SERGE FANTINO

Un Monde

Du big bang à l'Homme et vers l'inconnu

Essai

> L'histoire du cosmos se raconte avec précision entre deux bords que notre physique ne franchit pas, le seuil d'avant l'inflation et le futur que décidera l'énergie noire ; nous y apparaissons tard, sur une planète née avec le Soleil, faits d'hydrogène du premier jour et de cendres d'étoiles, et c'est depuis cette place tardive et mobile que l'histoire entière est racontée.

25 chapitres · 25 rédigés · 169 626 mots · état au 17/10/2026

Table des matières

I · LE SEUIL

1 Que faisait Dieu avant ? avant ~10^{-43} s (ère de Planck) brouillon

1.1 Une objection moqueuse
1.2 Trois questions sous un seul mot
1.3 Ni l'un ni l'autre ne se démontre
1.4 « Un peu avant le commencement de l'espace et du temps »
1.5 Le temps fait partie du monde
1.6 Le bord du modèle
1.7 Une question suspendue
1.8 Ce qu'on ne sait pas
1.9 Ce que ce chapitre démontre

2 De quel rien ? brouillon

2.1 La question qui survit à Augustin
2.2 Peut-on penser le rien ?
2.3 Trois riens
2.4 Quand la science est appelée en témoin
2.5 La phrase barrée de Lemaître
2.6 Ce qui reste à la philosophie, ce qui revient à la physique
2.7 Ce qu'on ne sait pas
2.8 Ce que ce chapitre démontre

3 L'emballement ~10^{-36} à 10^{-32} s brouillon

3.1 Trois énigmes pour une hypothèse
3.2 Du quantique au cosmique
3.3 Les empreintes mesurées
3.4 Laquelle des inflations
3.5 La signature qui manque
3.6 Une controverse entre pionniers
3.7 Un bord dans le passé
3.8 Ce qui occupe le bord
3.9 Ce qu'on ne sait pas
3.10 La sortie de l'emballement

II · LE PREMIER JOUR

4 La soupe 10^{-12} s à 1 s brouillon

4.1 Un bain à l'équilibre
4.2 Une particule en trop
4.3 Une seconde : deux gels
4.4 Le compte à rebours des neutrons
4.5 Ce qui passe la frontière
4.6 Ce qu'on ne sait pas
4.7 Ce que ce chapitre démontre

5 Trois minutes pour faire l'hydrogène et l'hélium 3 à 20 minutes brouillon

5.1 Un compte à rebours
5.2 Le goulot du deutérium
5.3 Le refuge dans l'hélium
5.4 Deux marches manquantes
5.5 Un calcul sans paramètre libre

5.6 La fausse note du lithium
5.7 La frontière de l'établi
5.8 Ce qu'on ne sait pas
5.9 Ce que ce chapitre démontre

6 La première lumière 47 000 à 380 000 ans brouillon
6.1 La matière prend la main
6.2 Un brouillard qui vibre
6.3 Pourquoi si tard : le milliard de photons
6.4 Le brouillard se lève
6.5 De 3 000 K à 2,7 K
6.6 Un bruit dans l'antenne
6.7 Les premières inégalités
6.8 Les notes de l'Univers
6.9 Une carte, pas encore un âge
6.10 Ce qu'on ne sait pas
6.11 Ce que ce chapitre démontre

7 Un âge calculé brouillon
7.1 Un chiffre à quatre décimales
7.2 Premier étage : ce qu'on mesure
7.3 Deuxième étage : ce que calcule la physique d'avant 380 000 ans
7.4 Troisième étage : ce qu'on déduit en supposant le modèle
7.5 Un contrôle venu d'ailleurs : les plus vieilles étoiles
7.6 Où le calcul pourrait céder
7.7 Ce que veut dire « il y a 13,8 milliards d'années »
7.8 Ce qu'on ne sait pas
7.9 Ce que ce chapitre démontre

III · LA NUIT ET L'AUBE

8 Les âges sombres ~0,4 à ~100 Ma brouillon
8.1 Après la lumière, plus rien
8.2 Ce qui travaille dans le noir
8.3 Dater sans rien voir
8.4 Le seul témoin : l'hydrogène à 21 cm
8.5 Où finit la nuit ?
8.6 Ce qu'on ne sait pas
8.7 Ce que ce chapitre démontre

9 Les premières étoiles ~100 à ~270 Ma (z ≈ 30 à 15) brouillon
9.1 Un gaz qui ne contient rien d'autre
9.2 Quand : une date qui est un calcul
9.3 Un portrait tiré des simulations
9.4 Ce qu'elles laissent : la première forge
9.5 Des traces sans témoin
9.6 LAP1-B, trouvé tard
9.7 Ce qu'on ne sait pas
9.8 Ce que ce chapitre démontre

10 Trop tôt, trop brillantes dès ~280 Ma brouillon
10.1 Une tache à 280 millions d'années
10.2 Cent fois trop
10.3 De l'oxygène à 300 millions d'années
10.4 Le plafond du modèle
10.5 Quatre explications, aucune gagnante
10.6 Ce qui cède

10.7 Ce qu'on ne sait pas
10.8 Ce que ce chapitre démontre

11 Le rallumage ~0,3 à ~1,1 Ga brouillon
11.1 Un préfixe qui dit tout
11.2 Les premières bulles
11.3 Le milieu, lu dans la plus vieille lumière
11.4 La fin, lue dans les quasars
11.5 Environ 700 millions d'années
11.6 Qui a fourni la lumière ?
11.7 Ce qui tranchera, et ce qui commence
11.8 Ce qu'on ne sait pas
11.9 Ce que ce chapitre démontre

IV · DES ÉTOILES AU SOLEIL

12 La forge brouillon
12.1 Ce que le premier jour a laissé
12.2 Franchir la marche : la triple alpha
12.3 Une forge qui s'accélère
12.4 Pourquoi elle s'arrête au fer
12.5 Qui a fait quoi
12.6 Une horloge chimique et un recyclage
12.7 Ce que la forge ne fait pas
12.8 Ce qu'on ne sait pas
12.9 Ce que ce chapitre démontre

13 L'or des catastrophes brouillon
13.1 Ce que la forge ne sait pas faire
13.2 Une origine longtemps incertaine
13.3 Août 2017 : entendre, puis voir
13.4 Trop tard pour les étoiles les plus anciennes
13.5 Les candidats rapides
13.6 Un sursaut relu vingt ans après
13.7 Ce qui départagerait les candidats
13.8 Un or sans origine unique
13.9 Ce qu'on ne sait pas
13.10 Ce que ce chapitre démontre

14 Une Galaxie agitée dès ~0,8 Ga ; fusion il y a 10 à 11 Ga brouillon
14.1 Des fossiles qui brillent
14.2 Avant le disque : Aurora
14.3 Un disque dès 13 milliards d'années
14.4 Gaia-Enceladus
14.5 Ce que le halo garde, ce que la Galaxie transmet
14.6 Ce qu'on ne sait pas
14.7 Ce que ce chapitre démontre

15 Le Soleil arrive tard ~9,2 Ga (il y a ~4 567 Ma) brouillon
15.1 Aux deux tiers de l'histoire
15.2 Un héritage de 1,4 %
15.3 Né ailleurs
15.4 Deux horloges dans une pierre
15.5 Ce que la date désigne
15.6 Un million d'années de désaccord
15.7 Ce qu'on ne sait pas
15.8 Ce que ce chapitre démontre

V · UNE PLANÈTE ET DES VIVANTS

16 Le disque et les planètes premiers millions d'années après le t = 0 brouillon

- 16.1 Une autre horloge
- 16.2 Un zéro incertain d'un million d'années
- 16.3 Les petits corps d'abord, et fondus
- 16.4 Jupiter et les deux réservoirs
- 16.5 La fin du disque
- 16.6 La matinée du 2 septembre
- 16.7 Ce qu'on ne sait pas
- 16.8 Ce que ce chapitre démontre

17 La Terre et la Lune brouillon

- 17.1 Le disque se vide, les embryons se heurtent
- 17.2 Le métal coule : l'horloge hafnium-tungstène
- 17.3 Le choc qui fait la Lune
- 17.4 Quel âge pour la Lune ?
- 17.5 Après le dernier choc : placage tardif et océan de magma
- 17.6 Ce qui reste de la Terre hadéenne
- 17.7 Une date, un objet, une horloge
- 17.8 Ce qu'on ne sait pas
- 17.9 Ce que ce chapitre démontre

18 L'eau, les océans et l'air brouillon

- 18.1 Deux atomes du premier jour, un atome d'étoile
- 18.2 Trop près du Soleil
- 18.3 Venue de loin, ou déjà là
- 18.4 Des atmosphères arrachées
- 18.5 Le premier océan, lu dans un grain
- 18.6 Un Soleil trop pâle pour de l'eau liquide
- 18.7 Un air sans oxygène
- 18.8 Ce qu'on ne sait pas
- 18.9 Ce que ce chapitre démontre

19 Ce dont la vie est faite brouillon

- 19.1 Peser, puis compter
- 19.2 L'hydrogène, seul héritage du premier jour
- 19.3 Les grandes usines : oxygène, carbone, azote
- 19.4 Le calcium, le phosphore et le dernier centième
- 19.5 Le compte fermé
- 19.6 Là où la chaîne s'arrête
- 19.7 Ce qu'on ne sait pas
- 19.8 Ce que ce chapitre démontre

20 Les dernières secondes de décembre des premières traces de vie (~3,5 Ga, candidats plus anciens contestés) à aujourd'hui brouillon

- 20.1 Une année pour ranger l'histoire
- 20.2 Septembre : une planète habitable, une vie déduite
- 20.3 Le 30 septembre : la première trace sûre
- 20.4 Octobre et novembre : deux mois de microbes
- 20.5 Décembre : glaces, algues, animaux
- 20.6 Cinq coupures
- 20.7 Le soir du 31 décembre
- 20.8 Trois histoires humaines
- 20.9 Ce qu'on ne sait pas
- 20.10 Ce que ce chapitre démontre

VI · L'UNIVERS QUI ACCÉLÈRE

21 Ce qu'on ne voit pas — brouillon
- 21.1 Un bilan à 5 %
- 21.2 Des galaxies trop agitées, des galaxies qui tournent trop vite
- 21.3 Peser la lumière déviée : l'amas du Boulet
- 21.4 Pas des atomes cachés
- 21.5 Elle était déjà là
- 21.6 Ce qu'elle pourrait être, et ce qu'on n'a pas trouvé
- 21.7 Il manque encore 68 %
- 21.8 Ce qu'on ne sait pas
- 21.9 Ce que ce chapitre démontre

22 Le tournant ~9,8 Ga (découverte en 1998) — brouillon
- 22.1 Une expansion qui devait ralentir
- 22.2 La bascule, un peu après le Soleil
- 22.3 1998 : chercher un freinage, trouver une accélération
- 22.4 Trois méthodes, un même trou
- 22.5 Un nom sur un trou : la constante et ses 120 ordres de grandeur
- 22.6 Ce qu'on ne sait pas
- 22.7 Ce que ce chapitre démontre

23 Deux mesures qui ne s'accordent pas aujourd'hui (~13,8 Ga) — brouillon
- 23.1 Un chiffre, deux chemins
- 23.2 Trois télescopes, une même valeur basse
- 23.3 Le camp local divisé
- 23.4 Si l'écart est réel : retoucher la règle
- 23.5 DESI : une énergie noire qui faiblirait
- 23.6 Ce qui bougerait, ce qui ne bougerait pas
- 23.7 Ce qu'on ne sait pas
- 23.8 Ce que ce chapitre démontre

24 Un ciel qui se vide futur — brouillon
- 24.1 Une seule grandeur décide
- 24.2 Le froid sans fin
- 24.3 Les derniers astronomes
- 24.4 Si elle n'est pas constante
- 24.5 Un second bord
- 24.6 Ce qu'on ne sait pas
- 24.7 Ce que ce chapitre démontre

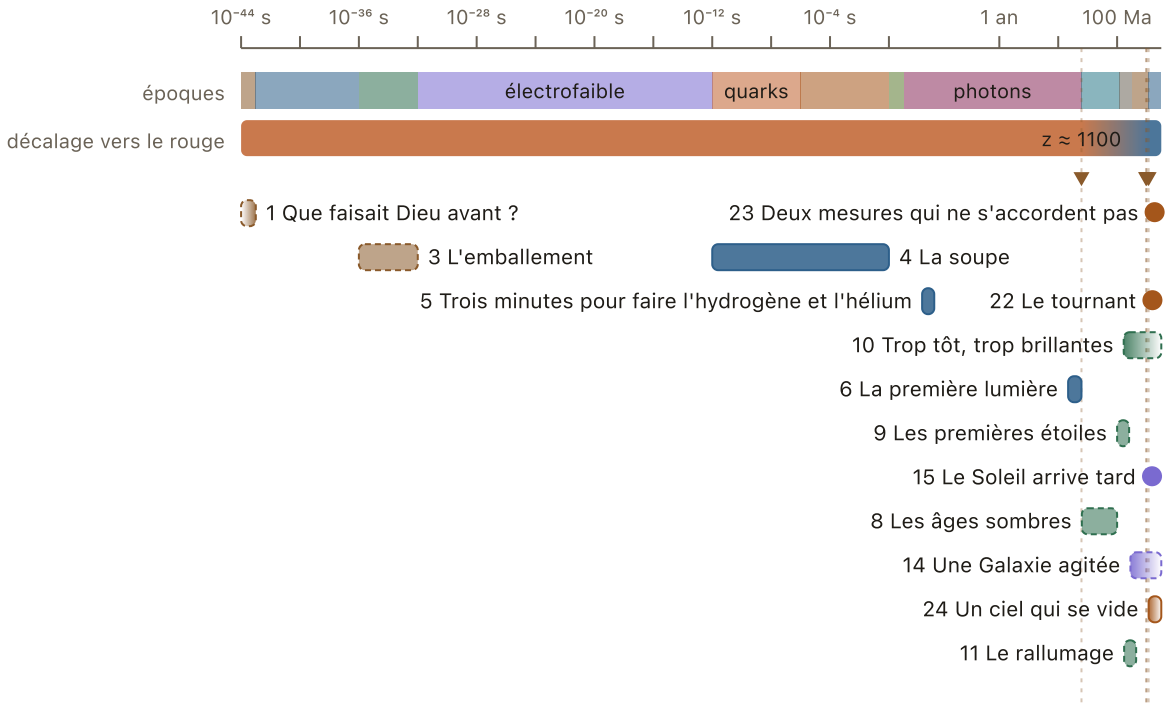
VII · ÉPILOGUE

25 Qui raconte ? — brouillon
- 25.1 L'horloge du livre
- 25.2 Nous ne sommes pas à l'heure
- 25.3 Deux sortes de dates
- 25.4 Un seul univers, vu d'un seul point
- 25.5 Une fenêtre d'un septième de seconde
- 25.6 Le bord du point de vue
- 25.7 Ce qu'on ne sait pas
- 25.8 Ce que ce chapitre démontre

BIBLIOGRAPHIE

La frise

Où se place chaque chapitre dans le temps de l'histoire — échelle : depuis le Big Bang (logarithmique).



Le seuil · Le premier jour · La nuit et l'aube · Des étoiles au Soleil · Une planète et des vivants · L'Univers qui accélère · Épilogue

Hors de la frise : 2 De quel rien ? · 7 Un âge calculé · 12 La forge · 13 L'or des catastrophes · 16 Le disque et les planètes · 17 La Terre et la Lune · 18 L'eau, les océans et l'air · 19 Ce dont la vie est faite · 20 Les dernières secondes de décembre · 21 Ce qu'on ne voit pas · 25 Qui raconte ?

PARTIE I

Le seuil

LE SENS

Le livre commence là où l'on croit que tout commence, pour montrer qu'aucun instant zéro n'a été observé. On y trouve un bord du modèle, une question ancienne sur l'avant et le rien, puis la plus ancienne phase dont on ait des indices, l'inflation. La partie fixe la règle du livre : séparer ce qu'on sait, ce qu'on suppose et ce qu'on ne peut pas dire.

L'ARC

De la question « que faisait Dieu avant ? » à l'inflation : on passe de l'impensable (l'avant, le rien) au plausible (un emballement dont on lit les empreintes), sans jamais atteindre le premier instant.

LA QUESTION

Peut-on dire comment, et même si, l'Univers a commencé ?

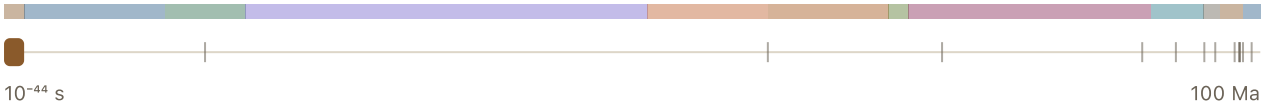
1. Que faisait Dieu avant ? brouillon
2. De quel rien ? brouillon
3. L'emballement brouillon

CHAPITRE 1

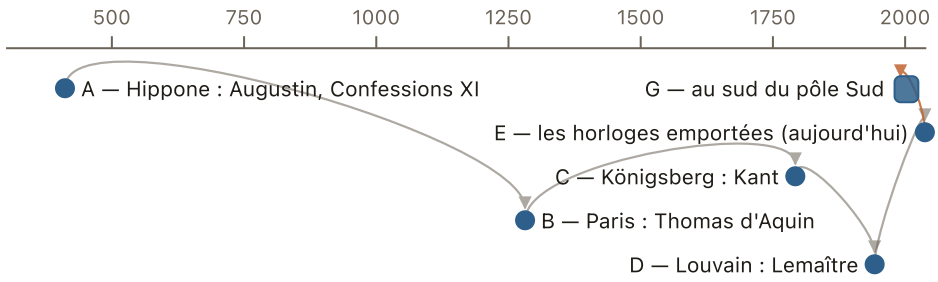
Que faisait Dieu avant ?

avant ~10⁻⁴³ s (ère de Planck)

brouillon · 4394 mots



LES SCÈNES DU RÉCIT



Les plans du storyboard, dans l'ordre du récit (le plan F, « en remontant », est hors du calendrier humain).

1.1 Une objection moqueuse

Vers l'an 400, les chrétiens qui affirment que Dieu a créé le monde se voient opposer une question : que faisait Dieu avant de le créer ? Augustin d'Hippone la prend au sérieux, au livre XI de ses *Confessions*. Il commence par rapporter la réponse d'un autre, qui s'en tirait par une plaisanterie : Dieu « préparait l'enfer pour ceux qui scrutent de trop près » augustin-conf[1]. Augustin ne la reprend pas à son compte. Une réponse qui menace celui qui questionne laisse la question entière, et elle reconnaît au passage qu'il y aurait bien eu un « avant » où Dieu s'occupait à quelque chose.

La réponse d'Augustin passe par la question elle-même. Demander ce que Dieu faisait avant, c'est supposer un temps antérieur au monde, une durée où Dieu aurait attendu, hésité ou préparé. Or, pour Augustin, le temps fait partie de ce qui est créé, au même titre que le ciel et la terre ; et « il n'y avait pas d'"alors" quand il n'y avait pas de temps » augustin-conf. Le mot « avant » désigne une place dans le temps. Si le temps commence avec le monde, aucune place ne précède le monde, et la question n'a pas d'objet.

Augustin ne donne aucun renseignement sur ce qui aurait précédé le monde : il met au jour une hypothèse que la question contenait sans la dire, celle d'un temps qui existerait hors du monde, comme une horloge qui tournerait avant qu'il y ait quoi que ce soit. Otez cette hypothèse, et l'objection tombe. Toute l'histoire que ce chapitre raconte consiste à savoir si l'on a le droit de l'ôter.

Il faut noter qu'Augustin fait ce geste sans prétendre savoir ce qu'est le temps. C'est dans ce même livre XI qu'il écrit : « Qu'est-ce donc que le temps ? Si personne ne me le demande, je le sais » augustin-conf. Son argument est logique : il porte sur ce que suppose une question, sans rien avancer sur ce que le temps est fait. Quinze siècles plus tard, la physique fournira une théorie dans laquelle le temps appartient au monde, et l'on pourra se demander si elle donne raison à Augustin, et jusqu'où.

1.2 Trois questions sous un seul mot

Avant d'aller plus loin, il faut démêler ce que l'on demande quand on parle du « commencement de l'Univers ». Le mot recouvre au moins trois questions qui n'ont ni le même statut ni les mêmes interlocuteurs soren-sen-sep[2].

La première porte sur la structure du temps : le passé de l'Univers est-il fini ? Si l'on remonte le cours des choses, arrive-t-on à un bord, ou peut-on remonter sans fin ? La physique a des choses à dire sur cette question, et elle en dit.

La deuxième porte sur l'avant : s'il y a un bord, qu'y a-t-il au-delà ? C'est la question qu'on posait aux chrétiens, et Augustin vient de montrer qu'elle peut être mal posée si le temps naît avec le monde. Elle dépend donc de la réponse à la première, mais elle ne s'y réduit pas : on peut admettre un passé fini et se demander encore si le mot « avant » garde un sens au bord.

La troisième porte sur l'existence : pourquoi y a-t-il quelque chose plutôt que rien ? Elle est indépendante des deux autres. Un univers éternel, sans aucun commencement, la poserait tout autant : on pourrait toujours demander pourquoi il existe, lui, plutôt que rien du tout. C'est la question de Leibniz.

Une quatrième notion se glisse souvent entre elles, celle de création. Au sens où l'entendent les philosophes médiévaux, être créé veut dire dépendre d'une cause, ce qui n'est synonyme d'aucune des trois questions précédentes. Un monde pourrait dépendre d'une cause sans avoir eu de premier instant ; un monde pourrait avoir eu un premier instant sans dépendre de rien. Une bonne part de l'histoire de ce problème, d'Augustin à Lemaître, consiste à apprendre à ne plus confondre commencement et création.

Ce chapitre traite les deux premières questions : le passé est-il fini, et que devient la question de l'avant quand la physique s'en mêle. La troisième question et la notion de création appartiennent au chapitre suivant, (→ chap. 2), parce qu'elles demandent de savoir de quel « rien » on parle, et que les physiciens et les philosophes n'emploient pas ce mot dans le même sens.

1.3 Ni l'un ni l'autre ne se démontre

Au XIII^{e} siècle, la redécouverte d'Aristote rouvre le débat, car pour Aristote le monde est éternel. Thomas d'Aquin y consacre un traité, *Sur l'éternité du monde*, vers 1270. Sa conclusion surprend ceux qui attendent d'un théologien qu'il défende un commencement : « aucun argument démonstratif n'est possible dans un sens ou dans l'autre » aquinas-sep. Dieu aurait pu créer un monde qui a toujours existé. Que le monde ait commencé, Thomas le tient pour vrai, mais au titre de la foi, « non susceptible de preuve philosophique » aquinas-sep.

Cette position repose sur la distinction posée plus haut : pour Thomas, être créé veut dire dépendre d'une cause, non avoir un premier instant aquinas-sep, et c'est au chapitre 2 que cette distinction est reprise en détail.

Cinq siècles plus tard, Kant va plus loin. Dans la *Critique de la raison pure* (1781), la première de ses « antinomies » (des couples de thèses contraires que la raison démontre avec une force égale) porte exactement sur les limites du monde dans le temps wiki-antinomy[3].

La thèse affirme que le temps a un commencement. Sinon, une infinité de moments se serait déjà écoulée jusqu'à aujourd'hui ; or une infinité ne peut pas être parcourue jusqu'au bout, une étape après l'autre, et le présent n'aurait jamais pu être atteint wiki-antinomy.

L'antithèse affirme que le temps n'a pas de commencement. Sinon, il faudrait un « temps vide » d'où le monde serait sorti ; mais dans un temps vide, rien ne distingue un moment d'un autre, rien n'y change, et rien ne peut donc en sortir wiki-antinomy.

Les deux preuves étant également bonnes, Kant conclut que la question des limites du temps doit être tenue pour dénuée de sens wiki-antinomy. Il en donne la raison : la contradiction vient de ce que la raison applique au monde pris comme un tout des concepts qui ne valent que pour l'expérience. Le monde comme totalité n'est jamais un objet d'expérience ; on ne peut donc pas lui attribuer un âge comme on en attribue un à une pierre wiki-antinomy.

Une remarque rattache Kant à Augustin. L'antithèse repose sur un temps vide qui précéderait le monde, c'est-à-dire sur l'hypothèse cachée qu'Augustin avait écartée : un temps extérieur, dans lequel le commencement du monde aurait lieu. Si le temps naît avec le monde, l'argument de l'antithèse perd son appui. Mais la position d'Augustin tombe elle aussi sous le diagnostic de Kant, puisqu'elle affirme quelque chose du monde pris comme un tout, à savoir que le temps commence avec lui : Augustin énonce une thèse que l'expérience ne peut pas atteindre plus que la thèse contraire. (Cette application du diagnostic de Kant à Augustin est une lecture proposée ici, pas un texte de Kant.)

À la fin du XVIII^{e} siècle, la question paraît donc réglée par épuisement : un commencement ne se démontre pas, l'éternité non plus, et la question elle-même excède ce que la raison peut trancher. Il faudra la physique du XX^{e} siècle pour lui rendre un contenu.

1.4 « Un peu avant le commencement de l'espace et du temps »

Le premier à proposer un commencement physique du monde est Georges Lemaître, physicien et prêtre belge. Dans une note publiée en 1931, il imagine que l'Univers est parti d'un seul quantum, un « atome primitif », et il en tire une conséquence sur le temps lui-même : si le monde a commencé par un seul quantum, « les notions d'espace et de temps n'auraient au commencement aucun sens » ; elles n'en prendraient un qu'une fois ce quantum divisé. D'où sa phrase : « le commencement du monde a eu lieu un peu avant le commencement de l'espace et du temps » Luminet 2015.

La formule est remarquable par sa maladresse même. Lemaître dit que le temps n'a pas encore de sens au commencement, et il ne peut pas le dire sans employer le mot « avant ». La langue n'a que des mots de temps pour exprimer une antériorité qui serait seulement logique, celle d'une condition sur ce qu'elle conditionne. Le « un peu avant » de Lemaître est l'« alors » d'Augustin retourné : Augustin refusait le mot, Lemaître l'emploie en sachant qu'il ne convient pas. Dans les deux cas, le langage bute sur le seuil.

L'idée n'a pas d'abord été discutée comme une hypothèse de physique. Arthur Eddington, l'un des astrophysiciens les plus influents de l'époque, écrivait : « la notion d'un commencement du monde m'est répugnante ». Einstein jugeait l'atome primitif « inspiré par le dogme chrétien de la création, et totalement injustifié du point de vue physique » Luminet 2015[4]. Le commencement a donc été soupçonné de théologie avant d'être tenu pour une hypothèse scientifique, et ce soupçon tenait au moins autant aux préférences de ceux qui l'exprimaient qu'aux données : un univers éternel paraissait plus acceptable à des esprits qui voulaient tenir la physique à l'écart de la religion.

Le soupçon visait à côté. Lemaître lui-même tenait que le commencement physique du monde était tout autre chose que la notion métaphysique de création Luminet 2015, retrouvant par un autre chemin la distinction de Thomas d'Aquin. La manière dont il a défendu cette séparation, jusque devant le pape, appartient au chapitre suivant.

1.5 Le temps fait partie du monde

Entre Kant et Lemaître, la théorie du temps a changé, en deux étapes. La relativité restreinte d'Einstein avait déjà supprimé l'horloge universelle : deux observateurs en mouvement l'un par rapport à l'autre ne découpent pas le monde en « maintenant » de la même manière. La relativité générale (1915) ajoute que le temps cesse d'être un cadre extérieur où les choses se passeraient : il devient une dimension du monde, liée à l'espace, qui se courbe et se dilate avec la matière qu'il contient smeenk-sep. Sur le point qui l'opposait à ses adversaires, Augustin reçoit ici une forme de confirmation : il n'y a pas de temps hors du monde, parce que le temps est une propriété du monde.

Cela pose un problème immédiat. Si la relativité interdit un temps universel, de quel temps parle-t-on quand on dit que l'Univers a 13,8 milliards d'années ? La réponse de la cosmologie ne réintroduit aucun temps absolu dans les lois. Elle tire parti d'un fait propre à notre Univers : à grande échelle, il est homogène (la matière y a partout la même densité) et isotrope (il a la même apparence dans toutes les directions).

Les modèles qui décrivent un tel univers sont dits FLRW, des initiales de Friedmann, Lemaître, Robertson et Walker. L'espace-temps s'y découpe en tranches d'espace homogènes, et le temps cosmique est le numéro de ces tranches : c'est « la coordonnée de temps standard » de ces solutions smeenk-sepwiki-cosmic-time.

Ces tranches ont des témoins : les observateurs dits « comobiles », au repos par rapport à la matière et emportés par l'expansion sans mouvement propre. Le temps cosmique est le temps propre qu'ils mesurent, celui que marquerait une horloge emportée avec eux smeenk-sepwiki-cosmic-time. « Au même moment », à l'échelle du cosmos, veut dire alors : sur la même tranche, là où l'Univers a partout la même densité. Comment chacun de ces observateurs peut lire ce temps sans échanger de signal, et où nous nous situons par rapport à lui, est l'objet du chapitre 25.

La conséquence est décisive pour la question de l'avant. Le temps qui date l'Univers est une propriété de la solution, c'est-à-dire de la manière dont la matière est répartie, et non des équations. Un univers très inhomogène n'aurait pas de temps cosmique. C'est un temps de fait, porté par le monde, qui existe parce que la matière est homogène et seulement dans cette mesure.

Même l'âge de l'Univers est défini avec cette prudence. Les tables de la mission Planck définissent l'âge comme le temps écoulé « depuis le début du Big Bang chaud » planck2018tab[5], non depuis un instant zéro. Comment on obtient ce nombre, et ce qu'il suppose, fait l'objet du chapitre 7.

1.6 Le bord du modèle

Si le temps cosmique est porté par la matière, il faut se demander ce qu'il devient quand on remonte vers des états de la matière où rien ne peut plus servir d'horloge. Les philosophes de la physique Svend Rugh et Henrik Zinkernagel ont posé la question en 2009 : pour eux, le concept de temps doit reposer sur des processus physiques possibles entre les constituants de l'Univers Rugh 2009. Une horloge, au sens large, est un système qui change de façon régulière ; encore faut-il que de tels systèmes puissent exister.

En remontant, ils voient apparaître deux difficultés. La première vient vers 10^{-5} seconde, au-delà de la transition où les quarks se lient en protons et en neutrons : plus tôt, il n'y a plus de systèmes liés Rugh 2009wiki-chrono. La seconde, plus sérieuse, vient vers 10^{-11} seconde, au-delà de la transition électrofaible[6]. Là, la propriété de masse disparaît presque, et il devient difficile de donner une base physique aux échelles de longueur, d'énergie et à la température, « toutes intimement liées au concept de temps en cosmologie moderne » Rugh 2009. Des particules sans masse filent à la vitesse de la lumière, et pour elles le temps

propre ne s'écoule pas. Leur conclusion : l'échelle de temps de la cosmologie très primitive manque de base physique, ou devra reposer sur une physique nouvelle, encore spéculative Rugh 2009. C'est une thèse de philosophie de la physique, non un résultat de mesure : elle ne change aucun calcul, mais elle dit ce que les calculs désignent.

Plus haut encore, c'est la théorie elle-même qui cesse de s'appliquer. Dans les années 1960, Stephen Hawking et Roger Penrose ont démontré des théorèmes dits de singularité : dans une large classe de modèles, la relativité générale prédit que l'Univers est fini vers le passé, et que les densités y deviennent infinies. Mais cette prédiction est d'ordinaire tenue pour un défaut profond de la relativité générale plutôt que pour la description d'un événement smeenk-sep. Une théorie qui donne des valeurs infinies à des grandeurs physiques signale l'endroit où elle ne vaut plus. En deçà d'environ 10^{-43} seconde, ce qu'on appelle l'ère de Planck, la physique connue ne s'applique plus, et la compréhension de cette période attend une théorie qui unisse la gravitation et la physique quantique wiki-bigbang. La singularité initiale « pourrait être absente dans une théorie de la gravitation quantique ; elle provient d'une extrapolation de la relativité générale » wiki-bigbang. Même l'inflation, la plus ancienne phase dont on ait des indices, n'échappe pas à ce bord : un théorème de Borde, Guth et Vilenkin montre qu'elle requiert « une physique autre que l'inflation » pour décrire sa frontière passée Bgv 2003, ce que détaille (→ chap. 3).

La formule la plus nette vient de la philosophie de la cosmologie : il n'y a pas de « premier moment » du temps, car le concept même de temps cesse d'être défini quand on s'approche de $t = 0$ smeenk-sep. Sur la question de ce qu'on peut dater, la singularité n'est pas un événement de l'histoire de l'Univers : c'est le bord de la description qu'on en donne.

Trois conséquences en découlent, et le livre s'y tiendra. D'abord, le mot « Big Bang », au sens le plus sûr, désigne une phase précoce, chaude et dense, et non un instant wiki-bigbang. Il ne désigne pas davantage une explosion : une explosion suppose un espace préexistant où la matière serait projetée, alors que le Big Bang décrit l'expansion du contenu de l'Univers partout à la fois ; il n'a pas de centre wiki-bigbang. Ensuite, le « zéro » des frises est une origine conventionnelle des horloges, sans rien de daté : les chronologies de référence ne remontent pas jusqu'au temps zéro, et certaines comptent les durées à partir de la fin de l'inflation wiki-chrono. Enfin, « 10^{-43} seconde » ou « 10^{-36} seconde » sont des valeurs de la coordonnée t d'un modèle prolongé au-delà de son domaine[7]. Aucune horloge ne les a marquées, et aucune ne pouvait le faire, puisqu'à ces époques, selon Rugh et Zinkernagel, rien ne pouvait en tenir lieu Rugh 2009.

1.7 Une question suspendue

Que reste-t-il alors de la question « qu'y avait-il avant ? ». Elle n'est pas absurde, puisque rien dans la physique connue n'interdit qu'une théorie plus complète décrive quelque chose au-delà du bord. Elle n'est pas résolue non plus, puisque la relativité générale, qui trace ce bord, ne dit rien de ce qu'il y a derrière. Elle est suspendue : toute description de conditions « avant le big bang » doit reposer sur une théorie qui dépasse la relativité générale smeenk-sep. La vieille question devient une question sur une théorie qu'on n'a pas encore, la gravitation quantique.

L'idée que la singularité n'est pas réelle est presque aussi ancienne que l'inflation : Alexeï Starobinsky la soutenait dès 1980 wiki-inflation, comme on le verra au chapitre 3. Depuis, plusieurs programmes théoriques proposent de décrire ce que la relativité ne décrit pas. Ils ne s'accordent pas, et ils ne répondent pas tous de la même manière à la question de l'avant.

Pour certains, le mot « avant » perd son sens. Quand on applique les méthodes de la physique quantique à la gravitation et à l'Univers entier, on obtient une équation, dite de Wheeler-DeWitt, qui ne contient pas de

temps Bamonti 2025. La description fondamentale serait intemporelle, et tout le problème est de retrouver, à partir d'elle, un Univers qui évolue. Une réponse répandue est que le temps émergerait comme une approximation, par exemple en prenant la taille de l'Univers comme horloge interne. Si c'était le cas, « avant » cesserait de s'appliquer au bord, comme la notion de température cesse de s'appliquer à une seule molécule : non parce qu'elle deviendrait fausse, mais parce qu'elle n'y aurait pas de prise. Cette idée de temps émergent est elle-même contestée : un article de philosophie de la physique paru en 2025 conclut qu'elle demande un examen plus poussé de ce qu'est la dynamique dans ce cadre Bamonti 2025.

La proposition la plus célèbre de cette famille est l'état « sans bord » de James Hartle et Stephen Hawking (1983). Ils décrivent l'état quantique d'un univers fermé par une fonction d'onde définie sur ses géométries possibles, calculée par une somme sur des géométries à quatre dimensions dont l'Univers présent est le seul bord Hartle 1983. En image : quand on remonte, le temps se comporte comme une direction d'espace, et l'histoire de l'Univers se referme comme une sphère se referme au pôle Sud, sans point de départ singulier. Demander ce qu'il y avait avant serait aussi mal posé que demander ce qu'il y a au sud du pôle Sud[8]. L'image a donné sa forme moderne à la réponse d'Augustin. Mais elle repose sur des choix techniques discutés : en reformulant le calcul avec un temps réel (on dit « lorentzien »), Job Feldbrugge, Jean-Luc Lehners et Neil Turok obtiennent en 2017 un facteur « exactement l'inverse du fameux résultat de Hartle-Hawking » Feldbrugge 2017, ce qui change ce que la proposition prédit.

Pour d'autres programmes, l'avant retrouve un sens. En appliquant à l'Univers entier les méthodes de la gravité quantique à boucles, Abhay Ashtekar, Tomasz Pawlowski et Parampreet Singh montrent en 2006, dans un modèle simplifié, que « le big bang est remplacé par un grand rebond », et que l'évolution reste déterministe à travers le régime de Planck Ashtekar 2006. Notre Univers en expansion aurait été précédé d'un univers en contraction. Il y aurait alors un « avant » au sens ordinaire, avec un temps qui traverse le bord. Ce programme est développé Ashtekar 2011, mais il repose sur des modèles très symétriques et sur une théorie de la gravitation quantique qui n'est pas confirmée.

Aucune de ces propositions n'a d'appui observationnel. Ce qu'elles changent, c'est la forme de l'antinomie de Kant. Kant opposait un temps fini à un temps infini, et montrait que la raison démontre également l'un et l'autre. La physique ne choisit pas entre les deux branches : elle déplace la question. Il ne s'agit plus de savoir si le temps a commencé ou non, mais de savoir si le mot « avant » garde un sens au bord de la description, et la réponse dépend d'une théorie qui reste à trouver. « La question de l'avant n'a pas de sens » est donc une position, défendue par Augustin, par Kant et par Hawking, et non un consensus : les modèles à rebond lui en donnent un Hartle 1983Ashtekar 2006.

1.8 Ce qu'on ne sait pas

On ne peut dire, en l'état, ni qu'il y a eu un instant zéro, ni qu'il n'y avait rien avant, ni qu'il y avait quelque chose avant. Aucune observation ne remonte au-delà de l'inflation, et les indices les plus solides qu'on ait sur celle-ci portent sur ses effets, pas sur ce qui l'a précédée wiki-chronoBgv 2003. Les propositions sur le bord ne sont pas pour autant invérifiables : le rebond prédit des effets aux plus grandes échelles du rayonnement fossile, l'état sans bord prédit la courbure d'ensemble de l'Univers, et le chapitre 3 montre pourquoi ces prédictions ne départagent encore rien.

Un scénario à éons successifs, la cosmologie cyclique de Roger Penrose, a même été confronté au rayonnement fossile, et ses tests sont négatifs Wehus 2011Jow 2020 (→ (→ chap. 3)). La question de l'existence, elle, échappe par construction à ce type d'épreuve, puisque toute théorie physique suppose au moins ses propres lois smeenk-sep.

Plusieurs points de ce chapitre ont des degrés de confiance différents. Que la singularité soit une extrapolation et non une observation est établi wiki-bigbangsmeenk-sep. Que le temps cosmique perde sa base physique avant 10^{-11} seconde est une thèse de philosophie de la physique, défendue par Rugh et Zinkernagel Rugh 2009 ; elle ne modifie aucun calcul et porte sur ce que les dates désignent. Que le temps émerge d'une description intemporelle est une hypothèse, contestée en 2025 Bamonti 2025. Le rebond et l'état sans bord sont des hypothèses, à des stades de développement différents.

1.9 Ce que ce chapitre démontre

La question « que faisait Dieu avant ? » contenait une hypothèse, celle d'un temps extérieur au monde. Augustin l'a écartée vers 400, sans savoir dire ce qu'est le temps. Thomas d'Aquin a montré qu'on ne peut démontrer ni un commencement ni l'éternité, et que la création n'exige pas de premier instant. Kant a montré que la raison prouve également que le temps a commencé et qu'il n'a pas commencé, et il en a conclu que la question excède l'expérience.

La physique du XX^{e} siècle a donné une forme précise à la thèse d'Augustin. En relativité générale, le temps est une dimension du monde, et le temps qui date l'Univers est celui d'horloges portées par une matière homogène ; il n'existe que dans la mesure où cette matière le porte. En remontant, ce temps perd ses horloges possibles, puis la théorie qui le définit cesse de valoir. Le « commencement » que proposait Lemaître en 1931, « un peu avant le commencement de l'espace et du temps », est devenu un bord du modèle : les dates qui s'en approchent sont des coordonnées extrapolées, et le zéro est une convention. La question de l'avant n'est ni absurde ni résolue : elle attend une théorie qui dépasse la relativité générale, et les candidates répondent différemment, les unes en dissolvant l'avant, les autres en lui rendant un sens.

Ce chapitre fixe la règle que le livre suivra. On sait qu'une phase chaude et dense a existé et que la physique connue la décrit à partir d'un certain seuil. On suppose, avec des indices, une phase d'inflation plus ancienne. On ne peut pas dire ce qui se trouve au bord, ni s'il y a un avant. Ces trois registres seront tenus séparés jusqu'au dernier chapitre.

Reste la question qu'Augustin n'a pas épuisée en supprimant l'« alors ». Même sans avant, même si le temps naît avec le monde ou émerge d'une description intemporelle, on peut toujours demander pourquoi il y a un monde. Cette question ne dépend pas de la forme du temps, et c'est l'objet du chapitre 2.

Notes

1. Les citations des *Confessions* (livre XI, chap. XII à XIV) sont traduites ici à partir de la traduction anglaise d'Albert C. Outler ; elles sont à confronter à une traduction française avant publication. ↩

2. La distinction entre commencement, avant et existence, et la mise à part de la création, est une synthèse proposée ici à partir de l'article « Nothingness » de la Stanford Encyclopedia of Philosophy et des textes d'Augustin, Thomas d'Aquin et Leibniz ; elle n'est pas empruntée telle quelle à un auteur. ↩

3. Les formulations de la thèse et de l'antithèse sont prises dans une paraphrase (article « Antinomy » de Wikipédia en anglais) ; le texte de Kant se trouve en A426-A433/B454-B461 de la *Critique de la raison pure*, où elles devront être vérifiées. ↩

4. Ces deux propos sont cités d'après l'article de Jean-Pierre Luminet sur le Big Bang de Lemaître (2015), et non d'après les textes d'Eddington et d'Einstein. ↩

5. Définition donnée dans les tables de paramètres de la mission Planck (résultats de 2018). ↩

6. La transition électrofaible est le moment où les particules acquièrent leur masse. Rugh et Zinkernagel la placent vers 10^{-11} s ; la chronologie de Wikipédia utilisée ailleurs dans le livre la situe vers 10^{-12} s. L'écart d'un facteur dix est sans conséquence

pour l'argument, mais les deux chiffres coexistent dans les sources. ↩

7. Une coordonnée est un numéro porté sur un axe d'un modèle, comme une longitude sur une carte. Une durée est ce qu'une horloge mesure entre deux événements. Dans l'Univers d'aujourd'hui, la coordonnée t coïncide avec la durée marquée par une horloge comobile ; près du bord, rien ne garantit plus cette coïncidence. ↩

8. L'image du pôle Sud est l'illustration courante de la proposition de Hartle et Hawking ; l'article de 1983 est technique et ne la contient pas sous cette forme dans son résumé. ↩

CHAPITRE 2

De quel rien ?

brouillon · 4763 mots

2.1 La question qui survit à Augustin

Le chapitre précédent a laissé tomber l'« avant ». Si le temps naît avec le monde, comme le soutenait Augustin, il n'y a pas d'« alors » où Dieu aurait attendu ; si la physique donne un jour un sens à cet avant, par un rebond par exemple, elle le fera avec une théorie qu'on n'a pas encore (→ chap. 1). Une question survit pourtant à ce nettoyage, parce qu'elle ne dépend pas de la forme du temps : un univers éternel la poserait aussi bien qu'un univers qui commence. Elle ne porte pas sur le premier moment d'une histoire, mais sur l'histoire entière, quelle qu'en soit la longueur sorensen-sep[1].

Thomas d'Aquin, on l'a vu, tenait le commencement du monde pour indémontrable, et jugeait qu'un monde éternel aurait pu être créé aquinas-sep. Ce qui le lui permettait est une définition. Pour Thomas, être créé veut dire dépendre d'une cause, à chaque instant de son existence ; cela n'exige pas d'avoir eu un premier instant aquinas-sep. Un monde éternel pourrait donc être entièrement créé, au sens où il ne tiendrait pas debout par lui-même. La question de la création et celle du commencement se séparent ici pour la première fois de manière explicite.

Quatre siècles et demi plus tard, Leibniz donne à la question de l'existence la forme sous laquelle on la cite encore. Dans les *Principes de la nature et de la grâce*, en 1714, il part d'un principe qu'il tient pour premier : « rien ne se fait sans raison suffisante ». Dès qu'on l'admet, écrit-il, « la première question qu'on a droit de faire sera : Pourquoi il y a plutôt quelque chose que rien ? Car le rien est plus simple et plus facile que quelque chose » Leibniz 1714. La seconde phrase porte tout le poids. Leibniz ne se contente pas de demander pourquoi le monde existe ; il suppose que l'absence de tout serait la situation par défaut, celle qui ne demanderait aucune explication, et que c'est l'existence qui fait exception. Sa réponse suit la même pente : la raison suffisante de l'existence « ne se saurait trouver dans la suite des choses contingentes », c'est-à-dire des choses qui auraient pu ne pas être ; elle doit se trouver « dans une substance, qui en soit la cause, et qui soit un être nécessaire », un être qui ne pouvait pas ne pas exister Leibniz 1714. Pour Leibniz, cet être est Dieu.

Heidegger fera de la phrase de Leibniz « la question fondamentale » de la philosophie sorensen-sep[2]. On la tiendra ici pour ce qu'elle est d'abord : une question distincte des deux autres. Le commencement du monde peut être un fait de physique ; la création, c'est-à-dire la dépendance du monde envers une cause, n'en est pas un, et l'on peut avoir l'un sans l'autre. Tout ce chapitre repose sur cette distinction, et il montre ce qui arrive quand on l'oublie.

2.2 Peut-on penser le rien ?

La question de Leibniz suppose qu'on puisse comparer le monde à son absence. Il faut donc que cette absence se laisse au moins penser. Or la philosophie a commencé par l'interdire.

Parménide, au V^e^ siècle avant notre ère, soutenait qu'il est contradictoire de dire que quelque chose n'existe pas : dire « cela n'est pas », c'est encore parler de cela sorensen-sep. Son disciple Mélissos en tire une conséquence physique : « il n'y a pas de vide, car le vide n'est rien, et le rien ne peut pas être » sorensen-sep. De cet interdit logique vient l'adage latin *ex nihilo nihil fit*, rien ne vient de rien, qui pèse sur toute l'histoire du

problème sorensen-sep. Si le rien ne peut pas être, il ne peut pas non plus avoir été, et la question de Leibniz perd son point de comparaison.

Des philosophes contemporains ont défendu l'inverse : un monde entièrement vide serait au moins possible. Leur argument le plus connu, dit de la soustraction et associé à Thomas Baldwin, procède par étapes. On imagine un monde qui contient un nombre fini d'objets ; on en retire un ; le monde qui reste est encore possible ; on recommence, et au bout d'un nombre fini de retraits on arrive au monde vide sorensen-sep. L'argument a la force des raisonnements pas à pas : aucune étape ne semble franchir une limite, et pourtant la dernière nous amène au rien.

Bergson avait répondu d'avance à ce genre de raisonnement, dans *L'Évolution créatrice*, en 1907. Son analyse porte sur ce que fait l'esprit quand il pense qu'une chose n'existe pas. Il ne se représente pas un trou : il se représente autre chose à la place de cette chose, ou la chose elle-même accompagnée de l'idée qu'elle est exclue. Il y a donc, écrit Bergson, « plus, et non pas moins, dans l'idée d'un objet conçu comme "n'existant pas" que dans l'idée de ce même objet conçu comme "existant" » Bergson 1907. Appliquée au tout, l'opération se détruit elle-même. Supprimer par la pensée toutes les choses, c'est toujours garder une place, un fond, ou au moins l'esprit qui supprime. L'idée du néant absolu, « entendu au sens d'une abolition de tout, est une idée destructive d'elle-même, une pseudo-idée », aussi vide de contenu que celle d'un cercle carré Bergson 1907[3].

Si Bergson a raison, la question de Leibniz tombe avec son présupposé. Elle demandait pourquoi l'existence l'a emporté sur un néant plus « simple » et plus « facile » ; mais ce néant n'est pas une possibilité qu'on aurait écartée, c'est un mot auquel aucune pensée ne correspond. On ne peut pas demander pourquoi une alternative n'a pas été réalisée quand cette alternative n'a pas de contenu.

Le désaccord entre Baldwin et Bergson porte sur un point précis : la dernière soustraction. Baldwin la traite comme les autres ; Bergson dirait, si l'on applique son analyse, qu'en retirant le dernier objet on garde encore le cadre (un espace vide, un monde qui « contient » zéro objet) et qu'on n'a donc pas atteint le rien absolu[4]. Ce qui les départagerait serait une réponse à cette question : un monde sans aucun objet est-il encore un monde, c'est-à-dire un cadre avec des propriétés, ou l'absence de tout cadre ? C'est la question que rencontre la physique quand elle parle de vide, et sa réponse est nette : un vide est encore un cadre.

2.3 Trois riens

Quand un physicien dit « rien », il désigne presque toujours le vide quantique. En physique moderne, la matière et la lumière sont décrites par des champs, des grandeurs qui prennent une valeur en chaque point de l'espace[5]. Le vide est l'état de plus basse énergie de ces champs : il ne contient plus de particule, mais les champs y sont toujours là, nuls en moyenne mais jamais immobiles ; on appelle fluctuations du vide ces écarts autour de zéro wiki-qvs. Or un tel état n'est pas rien. Comme l'écrivent les philosophes de la cosmologie Christopher Smeenk et George Ellis, « un état de vide n'est évidemment pas rien : il existe dans un espace-temps, et il possède toute une série de propriétés non triviales » smeenk-sep. Il a une énergie, il obéit à des lois, il occupe un espace qui a une géométrie.

Ce vide a des effets qu'on mesure. Un champ se décompose en une infinité d'ondes possibles, chacune avec sa longueur d'onde et sa direction ; et chacune garde, même au repos, une énergie minimale que le principe d'incertitude interdit d'annuler, l'énergie dite de point zéro Martin 2012. Le 29 mai 1948, Hendrik Casimir, physicien au laboratoire Philips d'Eindhoven, présente une note de trois pages sur deux plaques métalliques parallèles : entre elles, seules les ondes qui « tiennent » dans l'intervalle peuvent exister ; à l'extérieur, toutes. Additionnées, ces énergies sont infinies des deux côtés, des sommes « dépourvues de sens physique

», écrit Casimir ; mais leur différence est finie, et elle se traduit par une force qui attire les plaques l'une vers l'autre. L'effet est petit, ajoute-t-il, mais une confirmation « ne semble pas infaisable » Casimir 1948. Il faudra près de cinquante ans : en 1997, Steve Lamoreaux mesure cette force entre une sphère et une plaque dorées, en accord avec la théorie à 5 % près Lamoreaux 1997wiki-casimir. Dès 1947, Willis Lamb et Robert Retherford avaient mesuré dans l'atome d'hydrogène un petit écart entre deux niveaux d'énergie que la théorie de Dirac donnait égaux ; on l'explique par l'interaction de l'électron avec les fluctuations du champ électromagnétique du vide wiki-lambMartin 2012. Ces mesures confirment une théorie dans laquelle le vide fluctue ; elles ne photographient pas une fluctuation, et l'on discute encore si la force de Casimir prouve la réalité de l'énergie du vide, Robert Jaffe ayant montré en 2005 qu'on peut la calculer comme une force entre les charges des plaques, sans y faire appel Jaffe 2005Martin 2012. Le premier rien des physiciens est donc un objet d'expérience, avec une énergie et des forces. ^

Le philosophe de la physique David Albert a formulé ce qui correspondrait vraiment, dans cette théorie, à l'absence de toute chose physique : ce ne serait pas un état particulier des champs, fût-il le plus pauvre, mais « la simple absence des champs » eux-mêmes sorensen-sep. Le vide quantique est aux champs ce qu'une salle vide est à la salle : un de ses états, pas sa disparition.

En 1982, le physicien Alexander Vilenkin propose un « rien » plus radical. Dans son modèle, l'Univers est créé « par effet tunnel quantique à partir de littéralement rien », et il aboutit à un espace de de Sitter, c'est-à-dire un espace en expansion exponentielle, la forme mathématique d'un univers en inflation Vilenkin 1982wiki-inflation. L'effet tunnel est ce phénomène quantique par lequel un système passe d'un état à un autre alors qu'une barrière le lui interdirait en physique classique[6]. Le modèle n'a pas de singularité de Big Bang et ne demande aucune condition initiale Vilenkin 1982. Le point de départ n'est pas un vide : au-delà de l'univers ainsi créé, écrit Vilenkin, il n'y a « ni espace ni temps » Vilenkin 2015. Ce rien-là est plus pauvre que le vide quantique, puisqu'il ne contient même pas d'espace-temps où des champs pourraient se trouver.

Il n'est pourtant pas vide de tout. Le modèle suppose les lois de la physique, et Vilenkin le dit lui-même dans l'article de 1982 : la structure et l'évolution des univers y sont « totalement déterminées par les lois de la physique » Vilenkin 1982. Trente-trois ans plus tard, il en tire la conséquence : si les lois décrivent la naissance de l'Univers à partir d'un état sans espace ni temps, elles doivent être là avant l'Univers, ce qui « semble suggérer qu'elles ont une existence indépendante » ; et il ajoute : « ce que cela veut dire exactement, nous ne le savons pas » Vilenkin 2015[7].

On peut alors compter trois riens. Le premier est le vide quantique : des champs dans leur état le plus bas, dans un espace-temps, avec des lois. Le deuxième est le rien de Vilenkin : pas d'espace, pas de temps, pas de champ, mais des lois. Le troisième est le rien de Leibniz : pas de lois non plus, l'absence de tout. La physique ne travaille qu'avec les deux premiers sorensen-sepsmeenk-sepVilenkin 2015. Elle ne peut pas faire autrement : un calcul part d'équations, et des équations sont des lois. Le troisième rien est hors de portée de toute théorie physique par construction, puisqu'une théorie qui le décrirait devrait se supprimer elle-même.

Une difficulté s'ajoute, qui tient au verbe. La question populaire demande comment le rien est « devenu » quelque chose. Mais devenir est un changement, et un changement suppose du temps : un état, puis un autre. Or le temps cosmique, celui qui date l'histoire de l'Univers, perd sa base physique bien avant qu'on remonte jusqu'à un quelconque commencement Rugh 2009, comme l'a montré le chapitre 1 ; le rien de Vilenkin, lui, n'a pas de temps du tout. Dire que l'Univers « sort » de ce rien, c'est employer un verbe de mouvement là où aucun mouvement n'est défini. Le formalisme de Vilenkin décrit une amplitude de probabilité, pas une succession ; la langue, elle, n'a que des verbes de succession. Lemaître avait rencontré la même difficulté en 1931 avec son commencement placé « un peu avant » l'espace et le temps.

2.4 Quand la science est appelée en témoin

La confusion des trois riens n'est pas un défaut de vocabulaire sans conséquence. Elle permet de faire dire à la physique ce qu'elle ne dit pas, dans un sens ou dans l'autre. Deux querelles le montrent.

2.4.1 Un univers à partir de quel rien ?

En 2012, le physicien Lawrence Krauss publie *A Universe from Nothing*. Il y soutient que tout indique un univers qui aurait pu surgir, et qui a plausiblement surgi, d'un « rien plus profond », impliquant l'absence d'espace lui-même wiki-ufn. Krauss n'est pas seul : des physiciens comme Frank Wilczek, Stephen Hawking et Leonard Mlodinow présentent aussi ces mécanismes comme une réponse à la question de Leibniz sorensen-sep.

David Albert lui répond dans la *New York Times Book Review*. Son argument tient en une image. Dans la théorie quantique des champs, certains arrangements des champs correspondent à la présence de particules, d'autres non. Que des particules apparaissent et disparaissent n'est donc « pas plus mystérieux » que le fait que des poings apparaissent et disparaissent quand on ferme et qu'on ouvre la main Albert 2012. Le poing n'est pas créé à partir de rien quand la main se ferme : c'est la main qui change de forme. De même, aucun de ces surgissements de particules, « si on les regarde correctement », n'approche « même de loin » une création à partir de rien Albert 2012. Albert demande aussi d'où viennent les champs et les lois dont Krauss se sert wiki-ufn.

Les deux hommes ne se contredisent pas sur la physique : Albert ne conteste aucun des calculs de Krauss. Ils s'opposent sur ce que le mot « rien » désigne : Krauss l'emploie pour le premier ou le deuxième rien, Albert rappelle que la question de Leibniz porte sur le troisième Albert 2012wiki-ufn.

2.4.2 Le kalam et le théorème

La seconde querelle vient de l'autre bord. Au XI^{e} siècle, le théologien al-Ghazali formulait un argument que la tradition islamique appelle *kalam* : « Tout être qui commence a une cause de son commencement ; or le monde est un être qui commence ; donc il a une cause de son commencement » wiki-kalam. Là où Thomas d'Aquin jugeait le commencement indémontrable, al-Ghazali en faisait le pivot d'une preuve. En 1979, le philosophe William Lane Craig relance l'argument sous une forme presque identique (« Tout ce qui commence d'exister a une cause ; l'Univers a commencé d'exister ; donc l'Univers a une cause »), puis analyse cette cause comme intemporelle, immatérielle et personnelle wiki-kalam. La nouveauté est la seconde prémisse : Craig ne l'appuie plus seulement sur des arguments philosophiques contre l'infini, mais sur la cosmologie, et en particulier sur un théorème de Borde, Guth et Vilenkin wiki-kalamBgv 2003.

Ce théorème, publié en 2003, établit que la description classique d'un univers en expansion s'arrête sur un bord quand on la remonte vers le passé ; il ne dit pas ce qu'il y a sur ce bord, ni qu'il s'agit d'un commencement Bgv 2003. Sa portée exacte, et ce qui la limite, sont l'affaire du chapitre 3.

Les objections à Craig viennent des deux côtés. Côté philosophie, Adolf Grünbaum soutient que la causalité ne vaut qu'à l'intérieur d'une succession temporelle : une cause précède son effet, et l'origine du temps n'a pas de « précédent » où loger une cause wiki-kalam[8]. On retrouve Augustin, retourné contre l'apologétique : si le temps commence avec le monde, « cause du commencement » emploie un mot de temps là où il n'y a pas encore de temps. Côté physique, le cosmologiste Sean Carroll objecte à Craig, lors d'un débat en 2014, que le théorème suppose un espace-temps classique et ne dit donc rien de l'époque la plus ancienne, dominée par des effets quantiques wiki-kalam.

L'un des auteurs du théorème a lui-même pris position. À la question « l'Univers a-t-il eu un commencement ? », Vilenkin répond « probablement », faute de modèle viable d'univers éternel. Mais il ajoute aussitôt : « le théorème ne nous dit rien de l'existence de Dieu. Un mystère profond demeure » Vilenkin 2015. Celui qui a le plus d'autorité pour lire le théorème comme un argument en faveur d'un commencement refuse d'en faire un argument en faveur d'une création. Il reproduit, sans la citer, la distinction de Thomas d'Aquin.

Les deux querelles ont la même structure. Krauss passe du vide des physiciens au rien des philosophes pour conclure que la physique n'a pas besoin de Dieu ; Craig passe du bord d'un modèle à un commencement absolu, puis d'un commencement à une cause, pour conclure qu'elle en a besoin. Dans les deux cas, le résultat de physique est exact et la conclusion l'excède.

2.5 La phrase barrée de Lemaître

Lemaître avait vu ce danger avant tout le monde. Le manuscrit de sa note de 1931 à *Nature* se terminait par une phrase qu'il a barrée avant l'envoi : Dieu est essentiellement caché, et le croyant peut se réjouir de voir la physique fournir « un voile cachant la création » Luminet 2015. Il l'a probablement retirée pour qu'on ne lise pas son hypothèse comme un appui à la foi Luminet 2015. La phrase disait d'ailleurs le contraire d'un appui : pour Lemaître, la physique cache la création au lieu de la montrer, puisqu'elle ne décrit que des états physiques et leurs transformations.

La lecture qu'il craignait s'est pourtant produite, et au plus haut niveau. Le 22 novembre 1951, dans le discours *Un'Ora* prononcé devant l'Académie pontificale des sciences, le pape Pie XII prend des accents concordistes, c'est-à-dire qu'il cherche un accord direct entre un résultat scientifique et le texte biblique : la science semblerait avoir rejoint le *Fiat lux* primordial, le « que la lumière soit » de la Genèse ucl-unora[9]. Lemaître en est troublé, notamment par « la confusion entre Commencement et Création », et par le risque qu'on l'accuse de soutenir cette lecture ucl-unora. Dans le discours suivant du pape, prononcé le 7 septembre 1952 devant l'Union astronomique internationale, la théorie de l'atome primitif n'est plus mentionnée ucl-unora. On ne sait pas par quel chemin l'inflexion s'est faite ; on constate le silence.

Le préjugé a joué dans les deux sens. Eddington et Einstein, on l'a vu au chapitre 1, refusaient le commencement parce qu'ils y voyaient une création Luminet 2015 ; Pie XII l'accueillait pour la même raison. Les uns et les autres faisaient la même confusion, avec des préférences opposées. Lemaître est le seul, dans cet épisode, à tenir les deux questions séparées.

Sa position rejoint Thomas d'Aquin par un autre chemin : un univers éternel pourrait être créé, au sens de Thomas aquinas-sep, et un univers qui commence pourrait n'avoir aucune cause, au sens de Sean Carroll, qui tient l'existence de l'Univers pour un fait sans explication ultime Carroll 2018. C'est pourquoi aucune observation du commencement ne peut, à elle seule, trancher la question de la création.

2.6 Ce qui reste à la philosophie, ce qui revient à la physique

Si la physique ne répond pas à la question de Leibniz, qui y répond ? Les réponses se rangent en quatre familles, selon ce qu'elles font du présupposé de Leibniz, à savoir que le rien serait la situation par défaut.

La première garde le présupposé et cherche la raison hors du monde. C'est celle de Leibniz lui-même : le monde est fait de choses qui auraient pu ne pas être, et sa raison d'être se trouve dans un être nécessaire, qui ne pouvait pas ne pas être Leibniz 1714. Le rien ne « devient » pas quelque chose ; le monde dépend, à chaque instant, d'un être qui échappe à la question.

La deuxième rejette le présupposé et fait de la question une pseudo-question. C'est la conclusion de Bergson : si le néant absolu est une pseudo-idée, demander pourquoi l'être l'emporte sur lui est un faux problème Bergson 1907. Grünbaum, dans un article de 1989, soutient dans le même esprit que le vrai problème de l'origine de la matière et de l'énergie a été transformé à tort en pseudo-problème d'une création par une cause extérieure, et que les « vides » de la cosmologie quantique ne justifient pas une création à partir de rien Grunbaum 1989.

La troisième accepte la question mais refuse qu'elle ait nécessairement une réponse. Pour Sean Carroll, la physique moderne suggère que l'Univers peut exister comme un système autonome, sans rien d'extérieur pour le créer ou le maintenir ; toute tentative d'expliquer pourquoi il y a quelque chose doit finir par s'arrêter sur des « faits bruts » : l'Univers est, simplement, sans cause ni explication ultime Carroll 2018. La position n'est pas un refus de réfléchir. Elle constate que toute chaîne d'explications s'arrête quelque part, y compris celle de Leibniz, qui s'arrête sur un être nécessaire, et elle choisit de s'arrêter sur l'Univers lui-même.

La quatrième est implicite dans les modèles de création quantique : ce sont les lois qui font le monde, puisqu'elles rendent probable l'apparition d'un univers Vilenkin 1982. Cette réponse déplace la question au lieu de la résoudre. Si les lois précèdent l'Univers, d'où viennent-elles, et pourquoi celles-là ? Vilenkin le reconnaît : « nous n'avons aucun moyen de commencer à aborder ce mystère » Vilenkin 2015. La réponse par les lois ramène à la réponse par l'être nécessaire, avec des équations à la place de Dieu, ou au fait brut, avec des lois à la place de l'Univers.

Wittgenstein a résumé ce qui résiste en une ligne : « Ce qui est mystique, ce n'est pas comment est le monde, mais qu'il soit » sorensen-sep. La physique dit comment est le monde. Le « qu'il soit » lui échappe, et une raison propre à la cosmologie rend cette limite plus nette qu'ailleurs. Les autres sciences expliquent un phénomène en le rangeant parmi des cas semblables, ou en l'insérant dans un contexte plus large. La cosmologie n'a accès qu'à un seul univers, et il n'y a pas de contexte plus large auquel faire appel pour expliquer ses propriétés smeenk-sep. On ne peut pas comparer notre univers à d'autres pour voir ce qui dépend de quoi, ni le replacer dans un ensemble qui l'expliquerait.

Le partage se fait alors question par question. La question de l'existence reste à la philosophie, parce que toute explication physique part au moins de ses lois, et que la question porte aussi sur elles. La question de l'avant est à cheval : la philosophie a montré qu'elle pouvait être mal posée, la physique l'a rendue formulable sans la trancher (→ chap. 1). La question du bord, enfin, celle de ce qui limite le passé de l'Univers, peut devenir testable. Les scénarios qui remplacent le Big Bang par un rebond ou par la fin d'un cycle antérieur font des prédictions ; la cosmologie cyclique de Penrose a déjà été confrontée au rayonnement fossile, et ses tests ont été négatifs (→ (→ chap. 3)). Un scénario peut échouer ; c'est ce qui en fait de la physique.

2.7 Ce qu'on ne sait pas

La question la plus ouverte de ce chapitre est philosophique : le rien absolu est-il pensable ? Baldwin et Bergson s'opposent sur la dernière soustraction, celle qui fait passer d'un monde à zéro objet à l'absence de tout monde. Ce qui les départagerait est une analyse du « monde vide » : s'il garde un cadre (un espace, des lois, une structure où les objets auraient pu être), il n'est pas le rien de Leibniz ; s'il n'en garde aucun, il faut dire en quel sens il est encore un « monde possible ». La physique n'apportera pas cette réponse, mais elle illustre la difficulté : ses propres riens gardent toujours un cadre.

Le statut des lois physiques est la question la plus ouverte du côté de la physique. Dans les modèles de création quantique, elles précèdent l'Univers ; Vilenkin dit ne pas savoir ce que cela veut dire Vilenkin

2015. On ne voit pas quelle observation pourrait éclairer ce point : ce que sont les lois de la nature est une question de philosophie, que ce livre ne traite pas.

2.8 Ce que ce chapitre démontre

La question de l'existence survit à la disparition de l'« avant », parce qu'elle ne dépend pas du commencement. Thomas d'Aquin l'avait séparée de la question du commencement en définissant la création comme une dépendance, non comme un premier instant ; Leibniz l'a formulée en 1714 en supposant que le rien serait plus simple que quelque chose.

Ce présupposé est contesté. Pour Bergson, le néant absolu est une pseudo-idée, et la question tombe avec lui ; pour les défenseurs de l'argument de la soustraction, un monde vide reste possible. Le désaccord porte sur un point précis, et il n'est pas résolu.

La physique emploie le mot « rien » pour deux choses qui ne sont pas le rien de Leibniz : le vide quantique, qui a une énergie, des effets mesurés, des lois et un espace-temps, et le rien de Vilenkin, qui n'a ni espace ni temps mais garde les lois. Aucune théorie physique ne peut partir du troisième rien, puisqu'une théorie est d'abord un ensemble de lois. Les querelles autour de Krauss et de Craig naissent toutes deux de ce glissement.

Lemaître avait tracé cette ligne dès 1931 en barrant sa phrase sur « un voile cachant la création », et il l'a défendue en 1951 quand Pie XII a confondu commencement et création. Le partage qui en résulte tient pour tout le livre : la question de l'existence reste à la philosophie ; la question du bord revient à la physique, et elle peut devenir testable.

C'est par ce bord que le livre reprend la physique. La plus ancienne phase dont on ait des indices est l'inflation, cette expansion brève et démesurée dont on lit les empreintes dans la plus vieille lumière du ciel. C'est précisément dans un espace en inflation que le modèle de Vilenkin faisait déboucher son univers Vilenkin 1982. Ce qu'on sait de cette phase, et ce qui lui manque encore, est l'objet du chapitre 3.

Notes

1. La distinction entre commencement, avant et existence, posée au chapitre précédent, est une synthèse proposée dans ce livre à partir de l'article « Nothingness » de la Stanford Encyclopedia of Philosophy et des textes d'Augustin, Thomas d'Aquin et Leibniz ; elle n'est pas empruntée telle quelle à un auteur. ↩

2. La formule de Heidegger est citée d'après l'article de Roy Sorensen dans la Stanford Encyclopedia of Philosophy, et non d'après l'*Introduction à la métaphysique*, où elle devra être vérifiée. ↩

3. Les citations de *L'Évolution créatrice* (chapitre IV) ont été relevées sur le corpus en ligne Obvie (Sorbonne Université) ; elles sont à vérifier sur une édition imprimée. ↩

4. L'application de l'analyse de Bergson à l'argument de Baldwin est une lecture proposée ici : Bergson écrit en 1907 et ne connaît pas cet argument, et les sources consultées ne rapportent pas de réponse de Baldwin à Bergson. ↩

5. Cette définition du champ est une présentation élémentaire, donnée pour le lecteur ; elle n'est pas tirée des sources du chapitre. Le champ électromagnétique, par exemple, attribue à chaque point de l'espace une intensité et une direction. ↩

6. Définition élémentaire de l'effet tunnel, donnée pour le lecteur et non tirée des sources du chapitre. Dans le modèle de Vilenkin, la « barrière » n'est pas un obstacle dans l'espace, puisqu'il n'y a pas encore d'espace : c'est une région de solutions des équations que la physique classique ne permettrait pas de traverser. ↩

7. Les citations de Vilenkin, d'Albert, de Carroll, de Casimir et de Smeenk et Ellis sont traduites ici de l'anglais. La mesure de Lamoreaux (1997) est connue par le résumé de l'article. ↩

8. L'article de Grünbaum (« The Pseudo-Problem of Creation in Physical Cosmology », *Philosophy of Science*, 1989) n'a pas pu être lu : sa thèse est connue ici par un résumé et par la présentation qu'en fait l'article de Wikipédia sur l'argument du kalam. Il en va de même de l'objection de Carroll lors du débat de 2014 et de la formulation de Craig. ↩

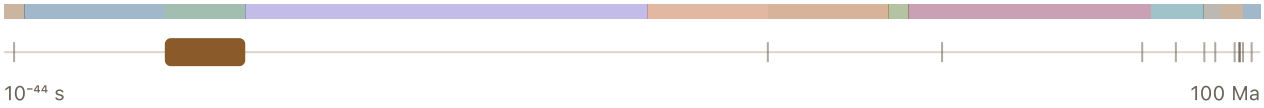
9. La formule *Fiat lux* est lue dans un résumé de recherche renvoyant à l'exposition des archives de l'UCLouvain, et non dans le texte du discours. ↩

CHAPITRE 3

L'emballement

~10⁻³⁶ à 10⁻³² s

brouillon · 6771 mots



3.1 Trois énigmes pour une hypothèse

Le chapitre précédent s'est arrêté sur une ligne de partage. La question de l'existence reste à la philosophie ; celle du bord, c'est-à-dire de ce qui limite le passé de l'Univers, revient à la physique, et elle peut devenir testable (→ chap. 2). Pour l'aborder, il faut d'abord savoir jusqu'où la physique remonte avec des indices. La réponse tient en un mot : l'inflation. C'est la plus ancienne étape de l'histoire cosmique pour laquelle on dispose d'indices observationnels wiki-chrono. Mais elle n'a pas été inventée pour expliquer une observation nouvelle. Elle a d'abord servi à répondre à trois questions que le modèle du Big Bang laissait sans réponse.

Ce modèle, dans sa forme classique, décrit un univers chaud et dense qui se dilate et se refroidit. Il rend compte de beaucoup de choses : le rayonnement fossile, les abondances des premiers noyaux, l'éloignement des galaxies. Mais il prend son état de départ tel quel, comme une donnée. Les cosmologistes parlent de « problèmes de conditions initiales » Baumann 2009 : l'état de départ que le modèle doit supposer pour retrouver l'Univers observé présente des coïncidences qu'il n'explique pas. Il y en a trois.

La première est celle de l'horizon. Le fond diffus cosmologique, la plus vieille lumière du ciel, libérée quand l'Univers avait environ 380 000 ans, a presque exactement la même température dans toutes les directions : ses variations ne dépassent pas quelques parts sur cent mille, environ 10^{-5} wiki-inflationwiki-cmb. Deux régions situées aux deux bouts du ciel ont donc la même température. Dans la vie courante, deux objets à la même température l'ont atteinte en échangeant de la chaleur. Or, dans le modèle classique, ces deux régions n'ont jamais pu échanger quoi que ce soit : elles « n'ont pas pu atteindre l'équilibre, parce qu'elles s'éloignent l'une de l'autre plus vite que la lumière » wiki-inflation. Aucun signal, aucune chaleur n'a eu le temps de passer de l'une à l'autre depuis le début de l'expansion. Leur égalité de température est alors une coïncidence qu'il faut poser au départ, région par région, sur tout le ciel.

La deuxième est celle de la platitude. En relativité générale, la géométrie de l'espace à grande échelle dépend de la densité de ce qu'il contient. Il existe une densité particulière, dite critique, pour laquelle l'espace est plat, c'est-à-dire obéit à la géométrie d'Euclide, celle où la somme des angles d'un triangle fait 180°[1]. L'Univers actuel en est très proche. Or l'expansion éloigne l'Univers de cette valeur au lieu de l'en rapprocher : un petit écart au départ devient un grand écart ensuite. Pour que l'Univers soit aussi proche de la densité critique aujourd'hui, il fallait qu'au départ il s'en écarte de moins d'une part sur 10^{62}, c'est-à-dire d'une part sur un nombre qui s'écrit avec un 1 suivi de soixante-deux zéros wiki-inflation. Le modèle classique peut supposer ce réglage ; il ne peut pas dire pourquoi l'Univers est né réglé à ce point.

La troisième est celle des monopôles. Les théories dites de grande unification, qui cherchent à réunir trois des forces fondamentales de la physique à très haute énergie, prévoient la formation, dans l'Univers très

chaud, de monopôles magnétiques : des particules qui porteraient un seul pôle magnétique, un nord sans sud wiki-inflation[2]. Si l'Univers a traversé ces énergies, il devrait en être rempli. On n'en a jamais observé.

En 1980 et 1981, deux physiciens proposent, par des chemins différents, une même réponse. Le Soviétique Alexeï Starobinsky soutient en 1980 que des corrections quantiques à la gravité remplaceraient la singularité initiale supposée par une phase « de de Sitter », c'est-à-dire une phase où l'espace se dilate de façon exponentielle, en doublant de taille à intervalles réguliers wiki-inflation. L'Américain Alan Guth propose l'inflation en 1980-1981 ; il étudiait au départ le problème des monopôles wiki-inflation. L'idée commune est une phase brève d'expansion accélérée, au tout début de l'histoire cosmique, avant l'Univers chaud que décrit le modèle classique Baumann 2009.

Cette phase règle les trois énigmes d'un seul geste. Pour l'horizon : avant l'inflation, les deux régions aujourd'hui opposées dans le ciel étaient assez proches pour échanger de la chaleur et s'équilibrer ; l'inflation les a ensuite séparées plus vite que la lumière ne pouvait les relier, et elles ont gardé la même température wiki-inflation. Pour la platitude : l'inflation aplatit l'espace comme on aplatit la surface d'un ballon en le gonflant. Une fourmi posée sur un ballon énorme ne voit plus sa courbure wiki-inflation. Au lieu d'amplifier l'écart à la densité critique, cette phase l'écrase, et l'Univers sort de l'inflation presque plat sans qu'on ait eu à le régler. Pour les monopôles : s'ils se sont formés avant ou pendant l'inflation, celle-ci les a dilués au point de les rendre introuvables wiki-inflation.

Une règle de méthode s'impose dès l'entrée, parce que tout le chapitre en dépend. Résoudre des énigmes connues ne prouve pas qu'une hypothèse est vraie. Cela montre qu'elle est économique : une seule supposition en remplace trois. Mais une hypothèse inventée pour expliquer des faits déjà connus les explique par construction ; elle a été taillée pour eux. Ce qui peut la mettre à l'épreuve, ce sont des faits qu'elle annonce avant qu'on les voie wiki-inflation[3]. L'inflation en a annoncé. Pour les comprendre, il faut voir ce qu'elle fait.

3.2 Du quantique au cosmique

Dans le scénario dominant, l'inflation dilate l'espace d'un facteur de l'ordre de 10^{26} entre environ 10^{-36} et 10^{-32} seconde wiki-chrono. Le facteur 10^{26} est celui qui sépare la taille d'un noyau atomique de la distance de la Terre au Soleil, en ordre de grandeur[4]. La durée, elle, se compte en fractions de seconde dont l'écriture décimale aligne trente et un zéros après la virgule avant le premier chiffre. C'est cet écart entre une durée infime et une dilatation démesurée que le titre de ce chapitre appelle l'emballement.

Ces chiffres demandent une précaution : ce sont des ordres de grandeur qui dépendent du modèle d'inflation retenu, et « 10^{-36} seconde » est une valeur de la coordonnée de temps d'un modèle prolongé au-delà de ce qu'une horloge physique aurait pu marquer (→ chap. 1). Ces nombres situent l'inflation dans un modèle ; ils ne la datent pas comme on date une roche.

Si l'inflation se bornait à gonfler l'espace et à le lisser, elle aurait un défaut : elle produirait un univers trop parfait. Un espace parfaitement uniforme ne formerait jamais de galaxies, puisque rien n'y distinguerait un endroit d'un autre ; la gravité n'aurait aucune surdensité à amplifier. L'apport décisif de l'inflation n'est donc pas le lissage, mais un mécanisme qui laisse des irrégularités, et des irrégularités d'un type précis. Selon la formule du cosmologiste Daniel Baumann, l'inflation « transforme des fluctuations quantiques microscopiques en germes macroscopiques pour la formation des structures cosmiques » Baumann 2009.

Le mécanisme se décompose en trois temps. D'abord, à l'échelle microscopique, la physique quantique interdit à un champ d'avoir une valeur parfaitement fixe : sa valeur tremble sans cesse autour de sa moyenne[5]. Le champ qui porte l'inflation, qu'on appelle l'inflaton et dont la nature reste inconnue, tremble comme les

autres Baumann 2009. Ensuite, l'inflation étire ces tremblements avec l'espace qui les contient. En une fraction de seconde, une fluctuation de taille subatomique est portée à une taille astronomique ; une fois assez étirée, elle cesse de trembler et se fige, comme une ride sur un tissu qu'on tend très vite. Enfin, à la sortie de l'inflation, ces rides figées deviennent de petites différences de densité dans la matière et le rayonnement : ici un peu plus de matière, là un peu moins. Les minuscules fluctuations visibles dans le fond diffus seraient nées ainsi, pendant l'inflation, et auraient été étirées aux grandes échelles par cette brève phase esa2013planck.

La suite est de la gravité ordinaire. Là où il y a un peu plus de matière, l'attraction est un peu plus forte ; la matière voisine y tombe, la surdensité se creuse, et en quelques centaines de millions d'années elle devient une galaxie, puis un amas. Si le scénario est juste, les grandes structures du ciel, et ce qu'elles contiennent, sont des fluctuations quantiques microscopiques agrandies aux dimensions du cosmos Baumann 2009.

3.3 Les empreintes mesurées

Le mécanisme annonce d'abord comment l'amplitude des fluctuations doit varier avec leur taille. Il prévoit un spectre dit « invariant d'échelle », ou de Harrison-Zel'dovich : les fluctuations y ont la même amplitude, quelle que soit la taille à laquelle on les considère. L'inflation prévoit ce comportement parce que chaque échelle de fluctuation a été produite de la même manière, à un moment légèrement différent d'une phase qui changeait peu. Les premières variations de température du fond diffus, détectées en 1992 par le satellite COBE (environ 30 ± 5 millionièmes de degré quand on regarde le ciel à travers des taches d'une dizaine de degrés), s'accordent avec ce spectre Smoot 1992[6] ; l'histoire de cette mesure est racontée au chapitre 6.

La deuxième confrontation est plus fine, et c'est la plus probante : ce sont les pics acoustiques du fond diffus, l'empreinte des ondes sonores qui parcouraient le plasma primordial et se sont figées quand l'Univers est devenu transparent, vers 380 000 ans. Leur mécanisme est exposé au chapitre 6. Il suffit ici de rappeler que ces pics avaient été prédits, et que leur découverte, écrivent les cosmologistes Wayne Hu et Scott Dodelson en 2002, « a établi un modèle cosmologique de travail », dont les structures sont nées par instabilité gravitationnelle de fluctuations quantiques produites pendant l'inflation Hu 2002.

Le point est important pour la logique du chapitre. Les pics ne s'observent sous cette forme que si toutes les ondes sonores ont démarré en même temps, en phase, comme les cordes d'un instrument pincées d'un seul coup[7]. Des perturbations créées au fil de l'eau, à des moments différents, donneraient une bouillie sans pics nets. L'inflation fournit exactement ce départ commun : toutes les fluctuations sont déjà en place quand l'Univers chaud commence. C'est pourquoi la découverte des pics compte plus que la résolution des trois énigmes : c'était une conséquence annoncée, qui aurait pu ne pas être au rendez-vous.

La troisième confrontation est quantitative. La mission européenne Planck, dont les résultats définitifs sont publiés en 2018, mesure trois propriétés des fluctuations primordiales avec une précision qu'on n'avait jamais atteinte.

La première est l'indice spectral, noté n_s. Il résume la manière dont l'amplitude des fluctuations varie avec leur taille. Un spectre exactement invariant d'échelle aurait $n_s = 1$. L'inflation prévoit un indice légèrement inférieur à 1, parce que la phase d'inflation change un peu pendant qu'elle se déroule et que les fluctuations produites à la fin n'ont pas tout à fait la même amplitude que celles du début planck2018inf[8]. Planck mesure $n_s = 0{,}9649 \pm 0{,}0042$, sans dépendance d'échelle détectable, et les reconstructions qui ne présupposent aucune forme confirment un spectre en loi de puissance simple planck2018inf. Autrement dit, l'indice est inférieur à 1 d'environ huit fois son incertitude, dans le sens qu'annonçait l'inflation.

La deuxième est l'adiabaticité. Des fluctuations sont dites adiabatiques quand toutes les composantes de l'Univers (matière noire, matière ordinaire, rayonnement) sont plus denses ensemble aux mêmes endroits, dans les mêmes proportions. C'est ce qu'on attend si toutes proviennent d'un seul champ qui fluctue, comme dans les modèles d'inflation les plus simples planck2018inf. Les nouvelles données de polarisation de Planck « fournissent un test rigoureux de l'adiabaticité des conditions initiales » planck2018inf, et le télescope ACT, au Chili, la vérifie aussi en 2025 act2025ext.

La troisième est la platitude. Combinée aux oscillations acoustiques des baryons, une autre empreinte des mêmes ondes sonores mesurée dans la répartition des galaxies, la carte de Planck donne une courbure spatiale nulle à 0,4 % près, avec 95 % de confiance planck2018inf. ACT ne trouve lui non plus « aucun écart à la platitude » Act 2025. L'inflation prévoyait un Univers plat ; il l'est, à la précision des mesures.

Planck en conclut que les modèles d'inflation dits « lente » à potentiel concave sont « de plus en plus favorisés » planck2018inf[9]. Il faut pourtant dire exactement ce que ces mesures établissent. Ce sont des mesures, et elles s'accordent avec l'inflation, dans le détail et sur des propriétés qui auraient pu être autres. Ce ne sont pas des preuves exclusives : elles montrent que l'inflation passe les tests, pas qu'aucun autre mécanisme ne pourrait les passer. Tout le débat de la fin de ce chapitre porte sur cet écart.

3.4 Laquelle des inflations

« L'inflation » n'est pas un modèle unique mais une famille. Le principe (une phase brève d'expansion accélérée qui étire des fluctuations quantiques) peut être réalisé par des champs de formes très diverses, et chaque forme donne ses propres valeurs de n_s et des autres paramètres. Les mesures ne servent donc pas seulement à tester l'idée ; elles servent à trier les versions.

Le modèle de Starobinsky, celui de 1980, était jusqu'à récemment l'un des mieux placés. Il prédit un indice spectral d'environ 0,965 starob-act, très proche de la valeur de Planck. En 2025, le télescope ACT publie ses mesures finales. Combinées à celles de Planck, elles donnent n_s = 0,974 ± 0,003 Act 2025act2025ext, plus élevé que la valeur de Planck seul (0,9649). ACT confirme par ailleurs la quasi-invariance d'échelle : la variation de l'indice avec la taille des fluctuations, 0,0062 ± 0,0052, est compatible avec zéro act2025ext.

Ce petit déplacement, moins d'un centième, compte parce que les incertitudes sont devenues très petites. Selon un article de 2025, la nouvelle valeur éloigne les données de la prédiction du modèle de Starobinsky et défavorise plusieurs modèles bien établis starob-act[10]. Une série d'articles de 2025-2026 cherche déjà à réconcilier ces modèles avec les données par des corrections théoriques starob-act.

Deux limites encadrent ce résultat. La première porte sur sa cible : il ne met pas en cause l'inflation, puisque n_s reste inférieur à 1 et que les fluctuations restent quasi invariantes d'échelle et adiabatiques ; il porte sur le choix entre les versions d'inflation. La seconde porte sur sa solidité : il est trop récent pour être tenu pour définitif. L'écart entre 0,965 et 0,974 est d'environ trois fois l'incertitude d'ACT combiné à Planck[11], ce qui est notable sans atteindre le seuil que les physiciens exigent pour une découverte. Ce qui le confirmerait ou le dissiperait est connu : d'autres mesures indépendantes des petites échelles du fond diffus, comme celles du télescope SPT au pôle Sud, et la vérification que la combinaison ACT-Planck ne cache pas une erreur systématique. Ce qu'on attend, c'est que la valeur de n_s se stabilise ; selon qu'elle reste vers 0,974 ou revienne vers 0,965, le modèle historique de Starobinsky sortira affaibli ou blanchi.

3.5 La signature qui manque

Tout ce qui précède porte sur un seul type de fluctuations : des variations de densité, que les physiciens appellent « scalaires ». Mais l'inflation ne secoue pas seulement la matière. Elle secoue aussi l'espace-temps lui-même, et devrait produire des ondes gravitationnelles primordiales : des ondulations de la géométrie de l'espace, étirées comme le reste aux dimensions du cosmos Baumann 2009. Les physiciens les appellent fluctuations « tensorielles ».

Ces ondes laisseraient une marque dans le fond diffus, non dans sa température mais dans sa polarisation. La lumière du fond diffus est légèrement polarisée : ses vibrations ont, en chaque point du ciel, une direction privilégiée. Cartographiées sur le ciel, ces directions dessinent des motifs. Les variations de densité ne produisent que des motifs sans rotation, rayonnants ou concentriques (qu'on appelle modes E). Les ondes gravitationnelles, elles, produiraient aussi des motifs en tourbillon, qu'on appelle les modes B Baumann 2009[12]. L'amplitude de ces ondes se mesure par un nombre, le rapport tenseur/scalaire r, qui compare la force des fluctuations de l'espace-temps à celle des fluctuations de densité. Des modes B primordiaux seraient la signature la plus directe de l'inflation, parce qu'aucun processus de l'Univers chaud ne produit d'ondes gravitationnelles de cette sorte à ces échelles. Ils n'ont jamais été détectés.

Ils ont pourtant été annoncés. En mars 2014, l'équipe de l'expérience BICEP2, installée au pôle Sud, annonce avoir détecté des modes B. L'annonce fait le tour du monde comme la preuve de l'inflation. Mais la polarisation de la lumière n'a pas qu'une source : les grains de poussière de notre propre Galaxie, alignés par son champ magnétique, émettent eux aussi une lumière polarisée, qui peut dessiner des tourbillons. Pour séparer les deux, il faut observer à plusieurs fréquences, car la poussière et le fond diffus ne brillent pas de la même façon selon la longueur d'onde. L'analyse conjointe menée avec l'équipe de Planck, qui observait à des fréquences où la poussière domine, conclut en 2015 qu'une grande partie du signal vient de la poussière galactique polarisée, et ne trouve « aucune preuve statistiquement significative de modes tensoriels » ; elle fixe seulement une limite supérieure, $r < 0{,}12$ Bkp 2015.

Depuis, la limite se resserre sans que rien n'apparaisse. En 2018, Planck combiné à BICEP2 et à Keck, son successeur, donne $r < 0{,}056$ planck2018inf. En 2021, BICEP et Keck, avec les données accumulées jusqu'en 2018, donnent $r < 0{,}036$ à 95 % de confiance, la contrainte la plus forte à ce jour Bk 2021. Chaque limite élimine les modèles qui prédisaient un r supérieur.

La prochaine étape est un satellite japonais, LiteBIRD, conçu pour mesurer r avec une sensibilité de 0,001 litebird-ipmu, soit une trentaine de fois mieux que la limite actuelle. Son objectif affiché est de fournir « un test direct de la théorie de l'inflation » Litebird 2025. Son lancement a glissé : la page du programme annonçait encore le milieu des années 2020, l'annonce de décembre 2025 dit seulement « dans les années 2030 » litebird-ipmuLitebird 2025.

Ce que LiteBIRD pourra dire n'est pas symétrique. L'amplitude de r dépend du modèle. Certains modèles prédisent un r supérieur aux limites actuelles : ceux-là sont déjà éliminés. D'autres prédisent un r de l'ordre de quelques millièmes, à la portée de LiteBIRD ; d'autres encore un r trop petit pour lui litebird-ipmu. Une détection serait donc un argument très fort, parce qu'elle verrait l'espace-temps lui-même fluctuer à l'époque de l'inflation. Une non-détection éliminerait une grande famille de modèles, dont plusieurs des plus simples, mais elle ne réfuterait pas l'idée d'inflation en général, puisque des versions à r minuscule resteraient permises. Cette asymétrie est une propriété de la famille inflationnaire, pas une faiblesse des instruments. Et c'est précisément ce que ses critiques lui reprochent.

3.6 Une controverse entre pionniers

La controverse sur l'inflation n'oppose pas des marginaux au consensus. Elle oppose des fondateurs entre eux. Paul Steinhardt compte parmi les pionniers de l'inflation Ijjas 2013. En 2013, au lendemain des premiers résultats de Planck, il publie avec Anna Ijjas et Abraham Loeb un article intitulé « Le paradigme inflationnaire en difficulté après Planck 2013 ». Ils y soutiennent que les données de Planck « défavorisent tous les scénarios inflationnaires les mieux motivés » Ijjas 2013.

Leur argument relève trois problèmes Ijjas 2013. Le premier est celui des conditions initiales. L'inflation devait dispenser le modèle d'un état de départ réglé à l'extrême ; or, pour qu'elle démarre, il faut déjà une région assez lisse. Le problème de départ est repoussé, pas supprimé. Le deuxième tient au multivers. Dans de nombreux modèles, l'inflation ne s'arrête pas partout en même temps : elle se poursuit indéfiniment quelque part, et produit sans fin des régions où elle a cessé, chacune pouvant avoir ses propres propriétés. On parle d'inflation éternelle. Si tout ce qui peut arriver arrive quelque part, le scénario risque de ne plus rien prédire. Le troisième est un « problème d'invraisemblance » : les modèles que les données favorisent, ceux dont le potentiel forme un plateau, seraient justement ceux qu'on juge les moins naturels dans la théorie.

En 2017, dans le magazine *Scientific American*, Ijjas, Steinhardt et Loeb vont plus loin : l'inflation, disent-ils, ne peut pas être testée guth2017letter. La réponse vient sous la forme d'une lettre au même magazine, signée par Alan Guth, Andreï Linde, David Kaiser, Yasunori Nomura et 29 autres chercheurs, dont Stephen Hawking. Elle est nette : « l'inflation est non seulement testable, mais elle a été soumise à un nombre important de tests et les a tous passés jusqu'ici » guth2017letter.

Les deux camps ne se contredisent pas sur les données. Ni l'un ni l'autre ne conteste les valeurs de n_s, l'adiabaticité ou la platitude. Ils s'opposent sur ce que l'on teste. Les signataires de la lettre désignent les prédictions des modèles d'inflation qu'on écrit et qu'on confronte aux mesures ; ces prédictions ont été vérifiées, et certaines versions ont été éliminées. Ijjas, Steinhardt et Loeb visent le « paradigme » : l'ensemble de tous les modèles d'inflation possibles, si vaste et si souple qu'il pourrait s'accommoder de presque tout résultat. L'asymétrie décrite à la section précédente est leur meilleur exemple : une détection de modes B confirmerait l'inflation, une non-détection ne la réfuterait pas.

Ce qui départagerait les deux positions est connu dans son principe : une alternative à l'inflation qui reproduise aussi bien les mesures actuelles tout en annonçant autre chose sur une observable à venir. En attendant, l'issue dépend de LiteBIRD de façon inégale. Une détection de modes B primordiaux donnerait raison aux défenseurs de l'inflation ; une non-détection ne trancherait rien, et la controverse continuerait.

Les deux contestations, que l'inflation soit la seule explication possible des mesures et que la notion très souple de « paradigme inflationnaire » puisse être réfutée, sont compatibles avec le fait que l'inflation a passé ses tests Ijjas 2013guth2017letter.

3.7 Un bord dans le passé

Même en admettant l'inflation, une question reste entière : d'où vient-elle ? Si elle a posé l'état de départ de l'Univers chaud, qu'est-ce qui a posé le sien ? Une réponse séduisante serait qu'elle n'en a pas besoin : l'inflation éternelle, qui se poursuit indéfiniment quelque part vers le futur, pourrait aussi s'être poursuivie indéfiniment vers le passé. L'Univers n'aurait alors pas de commencement, seulement une inflation sans fin dans les deux sens.

Un théorème publié en 2003 par Arvind Borde, Alan Guth et Alexander Vilenkin ferme cette porte, au moins dans le cadre de la relativité générale classique. Son principe a été présenté à propos de l'argument du *kalam* (→ chap. 2). Il suffit ici d'en rappeler la forme. Le théorème est « purement cinématique » : il ne porte que sur les mouvements, sans rien supposer des forces ni de la nature de la matière, et ne « requiert aucune condition d'énergie » Bgv 2003. Il suppose seulement que l'expansion, mesurée en moyenne le long de la trajectoire d'une particule ou d'un rayon de lumière qu'on remonte vers le passé, est positive. Il montre alors que l'expansion totale accumulée le long de cette trajectoire est bornée. Or, si la trajectoire se prolongeait indéfiniment dans le passé avec une expansion moyenne positive, l'expansion accumulée serait infinie ; puisqu'elle est bornée, la trajectoire ne peut pas l'être. Un modèle en inflation, ou « simplement en expansion suffisamment rapide », est donc incomplet vers le passé Bgv 2003. La conclusion des auteurs porte directement sur la question de ce chapitre : les modèles inflationnaires « requièrent une physique autre que l'inflation pour décrire la frontière passée de la région en inflation » Bgv 2003. L'inflation ne peut pas être son propre point de départ.

Vilenkin et Audrey Mithani ont étendu l'argument en 2012 à d'autres scénarios qui promettaient un passé éternel. L'inflation éternelle et l'évolution cyclique seraient elles aussi incomplètes vers le passé ; l'univers dit « émergent », qui aurait passé un temps infini dans un état statique avant de se mettre en expansion, pourrait s'effondrer par effet quantique et ne peut donc pas avoir un passé éternel Mithani 2012. Aucun des trois ne fournirait l'éternité qu'on lui prêtait.

Le théorème a des limites qu'il faut énoncer aussi nettement que son résultat, parce qu'on lui fait souvent dire davantage, et que le chapitre précédent a montré ce que devient ce « davantage » dans les mains de l'apologétique (→ chap. 2).

Il ne démontre ni une singularité, ni un instant zéro. « Incomplet vers le passé » veut dire que la description classique s'arrête sur un bord ; le théorème ne dit pas ce qu'il y a sur ce bord. Ses auteurs eux-mêmes concluent à la nécessité d'« une autre physique », pas à un commencement absolu Bgv 2003. Que ce bord soit un commencement est la lecture que Vilenkin défend Mithani 2012, mais le théorème ne suffit pas à l'établir.

Il ne dit rien hors de ses hypothèses. Il porte sur un espace-temps classique, décrit par la relativité générale ; il ne dit rien d'un régime de gravité quantique, où la géométrie elle-même n'est plus définie. Il suppose aussi une expansion moyenne positive : un univers qui se serait d'abord contracté, puis aurait rebondi, n'en remplit pas forcément la condition, puisque la phase de contraction fait baisser la moyenne Bgv 2003.

Enfin, sa borne elle-même est contestée. En 2023, Jerome Lesnefsky, Damien Easson et Paul Davies montrent que le calcul de l'expansion moyenne donne des résultats différents selon les hypothèses faites sur la topologie de l'espace, c'est-à-dire sur sa forme globale ; ils exhibent une famille infinie de solutions dont les trajectoires se prolongent indéfiniment vers le passé malgré une expansion moyenne positive, et jugent l'affirmation habituelle tirée du théorème « une question ouverte » Lesnefsky 2023.

Le résultat utile pour ce chapitre survit à ces réserves : dans le cadre où l'inflation est formulée, elle ne peut pas avoir duré depuis toujours, et ce qui l'a précédée demande une physique qu'on n'a pas. La question du chapitre, ce qui a fixé l'état de départ, remonte donc d'un cran sans trouver de réponse. L'inflation fixe l'état de départ de l'Univers chaud ; rien de ce qu'on sait ne fixe le sien.

3.8 Ce qui occupe le bord

Trois programmes théoriques proposent de décrire ce qui se trouve à la frontière passée. Ils ont été présentés du point de vue de la question de l'avant dans le chapitre 1 ; il s'agit ici de les situer par rapport à l'inflation et aux données. Aucun n'a d'appui observationnel, et ils en sont à des stades très différents Ashtekar 2006Hartle 1983Gurzadyan 2010.

Le premier remplace le commencement par un rebond : dans un modèle simplifié de cosmologie quantique à boucles, Abhay Ashtekar, Tomasz Pawlowski et Parampreet Singh montrent en 2006 que « le big bang est remplacé par un grand rebond » Ashtekar 2006. Notre Univers en expansion aurait été précédé d'un univers en contraction, et c'est précisément le cas que le théorème de Borde-Guth-Vilenkin ne couvre pas forcément. Le rebond ne remplace pas l'inflation : il ne produit pas seul le spectre presque invariant d'échelle qu'on observe, et se greffe sur elle Agullo 2023. Ainsi combiné, il laisse des traces là où aboutissent les fluctuations les plus anciennes, celles que l'inflation a le plus étirées : dans les plus grands motifs du ciel, ceux qui couvrent plusieurs degrés ou davantage, où il modifie la puissance des fluctuations dans l'exemple de référence Agullo 2023[13]. Ashtekar et ses collègues en tirent en 2020 une prédiction pour la polarisation : une diffusion plus forte de la lumière du fond diffus sur son trajet (on parle de profondeur optique) et des modes B atténués aux grandes échelles Ashtekar 2020, deux grandeurs que LiteBIRD visera. Mais ces prédictions sont conditionnelles. Leur signe dépend de l'état initial choisi pour les fluctuations : certains choix réduisent la puissance aux grandes échelles, d'autres l'augmentent Agullo 2023. Et si l'inflation a duré nettement plus que le minimum requis, les motifs nés au rebond sont aujourd'hui plus grands que l'Univers observable : une absence de signal dirait alors seulement que l'inflation a été longue Agullo 2023.

Le deuxième supprime le bord au lieu de le franchir : c'est l'état « sans bord » de James Hartle et Stephen Hawking (1983), dont l'image du pôle Sud a été présentée au chapitre 1 Hartle 1983. Rapporté à l'inflation, il a une ambition précise : dire dans quel état l'Univers y entre, et donc répondre à l'objection des conditions initiales formulée par Ijjas, Steinhardt et Loeb. Pour les fluctuations plus petites que l'Univers, il donne les mêmes que l'inflation standard, « en bon accord avec l'expérience » Maldacena 2024 ; rien ne l'en distingue sur ce terrain. Sa prédiction propre porte sur la courbure d'ensemble de l'espace, et sous sa forme simple elle est fausse : il favorise un univers petit, issu de peu d'inflation et nettement courbé. Juan Maldacena demande en 2024 pourquoi l'on n'observe pas une courbure de l'ordre de 10 % au lieu d'une platitude mesurée à 0,4 % près Maldacena 2024planck2018inf. Les remèdes proposés, un autre état initial ou une autre forme globale de l'espace, par exemple celle d'un tore, ne s'imposent pas pour l'instant Maldacena 2024Godet 2026. La dispute sur la formulation porte, elle, sur la cohérence du calcul plus que sur une donnée. En le reformulant avec un temps réel, dit lorentzien, Job Feldbrugge, Jean-Luc Lehners et Neil Turok obtiennent en 2017 un facteur « exactement l'inverse du fameux résultat de Hartle-Hawking » Feldbrugge 2017, et trouvent que les ondes gravitationnelles primordiales n'y sont pas amorties, ce qui rendrait inexplicable un univers lisse comme le nôtre Flt 2017b. Hartle, Thomas Hertog et leurs collègues répondent qu'une autre formulation lorentzienne retrouve des univers en inflation, à fluctuations presque gaussiennes Dorronsoro 2017. Le désaccord porte sur la définition mathématique de l'objet ; aucune mesure ne le départage.

Le troisième fait de notre Big Bang la suite d'un autre univers. Pour Roger Penrose, notre Big Bang serait la fin, remise à une autre échelle, d'un « éon » précédent : l'Univers passerait d'éon en éon, chacun commençant là où le précédent, infiniment dilué, s'achève Gurzadyan 2010. Ce scénario, dit de cosmologie cyclique conforme, a une qualité que les deux autres n'ont pas encore : il prédit des traces observables de l'éon antérieur dans le fond diffus. Vahe Gurzadyan et Penrose annoncent en 2010 avoir trouvé, dans les données du satellite WMAP, des familles de cercles concentriques où la température varie anormalement peu, à six écarts-types Gurzadyan 2010. Ingunn Wehus et Hans Kristian Eriksen retrouvent les cercles en 2011, mais

montrent sur des simulations que le ciel observé est « entièrement compatible avec le modèle ΛCDM », le modèle standard sans éon antérieur Wehus 2011 : de tels cercles apparaissent par hasard dans un ciel sans mémoire. Des « points de Hawking », taches chaudes interprétées comme la trace de trous noirs de l'éon précédent, sont annoncés ensuite à 99,98 % de confiance ; une fois prise en compte la variation de la taille des anneaux, l'excès tombe à 87 %, « guère plus de 1σ », selon Daniel Jow et Douglas Scott en 2020 Jow 2020. Le scénario a le mérite d'être testable, et ses tests sont pour l'instant négatifs.

Deux confusions sont à éviter. Rebond et cycle ne sont pas le même modèle : le rebond de la cosmologie quantique à boucles fait succéder une expansion à une contraction, par un effet quantique au régime de Planck ; la cosmologie cyclique de Penrose enchaîne des éons dont la fin dilatée devient un nouveau commencement, sans phase de contraction Ashtekar 2006Gurzadyan 2010. Et aucun de ces programmes n'est une alternative à l'inflation au sens où le seraient les scénarios de Steinhardt : le rebond et l'état sans bord cherchent à dire ce qui précède ou prépare l'inflation, non à la remplacer[14].

3.9 Ce qu'on ne sait pas

On ne sait pas si l'inflation a eu lieu, au sens où l'on sait que le fond diffus a été émis. On sait qu'une phase très ancienne a laissé des empreintes (fluctuations quasi invariantes d'échelle, adiabatiques, pics acoustiques en phase, Univers plat) et que l'inflation les prédit toutes. Ce qui manque est la signature qui ne s'explique guère autrement, les modes B primordiaux. Deux issues sont attendues de LiteBIRD dans les années 2030 : une détection, qui rendrait l'inflation très difficile à contester ; une non-détection sous $r \approx 0{,}001$, qui éliminerait les modèles les plus simples sans trancher la controverse Litebird 2025Bk 2021.

On ne sait pas quelle inflation. La valeur de n_s donnée par ACT en 2025 défavorise le modèle de Starobinsky et plusieurs autres, mais ce résultat a un an et n'a pas encore été confirmé par une mesure indépendante starob-act. Ce qui le consoliderait est une mesure indépendante des mêmes échelles. La nature du champ inflaton, sa forme, son lien avec la physique des particules restent des hypothèses Baumann 2009.

On ne sait pas ce qui a fixé l'état de départ de l'inflation. L'objection des conditions initiales d'Ijjas, Steinhardt et Loeb n'a pas de réponse acceptée Ijjas 2013. L'état sans bord prétend en donner une, mais sa forme simple prédit une courbure que l'observation contredit, et sa formulation même est disputée Maldacena 2024Feldbrugge 2017.

On ne sait pas ce qu'est le bord passé de l'inflation. Le théorème de Borde-Guth-Vilenkin établit, sous ses hypothèses classiques, que la région en inflation a une frontière passée ; Lesnefsky, Easson et Davies contestent la généralité de la borne Bgv 2003Lesnefsky 2023. Sur ce bord, les trois programmes sont des hypothèses : le rebond prédit des effets aux plus grandes échelles du ciel, conditionnels et de signe discuté ; l'état sans bord prédit une courbure que l'observation contredit sous sa forme simple ; les cycles de Penrose ont été testés et n'ont pas trouvé leurs signaux Agullo 2023Maldacena 2024Jow 2020.

3.10 La sortie de l'emballement

Voici ce qu'on peut écrire. L'Univers a connu, très tôt, une phase dont les empreintes sont mesurées avec précision et correspondent à ce que prédit l'inflation : des fluctuations presque invariantes d'échelle avec un indice un peu inférieur à 1, adiabatiques, en phase, dans un espace plat à 0,4 % près planck2018infAct 2025. Ces empreintes montrent que l'inflation passe ses tests ; elles ne montrent pas qu'elle est la seule à pouvoir les passer. Sa signature la plus directe, les modes B des ondes gravitationnelles primordiales, n'a pas été vue : annoncée à tort en 2014, elle reste sous $r < 0{,}036$ Bkp 2015Bk 2021. Le choix entre les ver-

sions d'inflation vient de bouger avec ACT, et ce mouvement demande confirmation Act 2025starob-act. Un théorème, dans le cadre classique où l'inflation est formulée, montre qu'elle ne peut pas avoir duré depuis toujours et qu'une autre physique doit décrire sa frontière passée Bgv 2003. On ne peut pas dire si cette frontière est un commencement, un rebond, une géométrie sans bord ou la fin d'un autre éon. Les trois pistes existent ; aucune n'est confirmée.

La question du chapitre reçoit donc une réponse en deux étages. Ce qui a fixé l'état de départ de l'Univers chaud, c'est probablement l'inflation : elle en a lissé la température, aplati la géométrie, dilué les monopôles et semé les fluctuations. Ce qui a fixé l'état de départ de l'inflation, on ne le sait pas, et l'on ne sait même pas si la question garde un sens au bord.

La partie du livre se ferme ainsi sur la question qu'elle posait, peut-on dire comment, et même si, l'Univers a commencé. Pas avec les connaissances actuelles. Augustin avait écarté l'« alors » d'avant le monde (→ chap. 1) ; le chapitre suivant a séparé le commencement de l'existence (→ chap. 2) ; celui-ci arrive au plus loin que remontent les indices et trouve un bord que la théorie trace sans le franchir.

C'est pourquoi les horloges de la cosmologie ne partent pas d'un instant zéro : Planck définit l'âge de l'Univers comme le temps écoulé « depuis le début du Big Bang chaud » planck2018tab, comme on l'a vu au chapitre 1. À la fin de l'emballement, l'énergie qui entraînait l'expansion accélérée se convertit en particules et en chaleur : c'est ce qu'on appelle le réchauffement, moment où se serait peut-être formé l'excès de matière sur l'antimatière Canetti 2012[15]. L'Univers devient une soupe brûlante de particules, dont la physique est testée dans les accélérateurs. C'est de là que part (→ chap. 4), et c'est là que le livre passe du plausible au connu.

Notes

1. Définition élémentaire de la géométrie plate, donnée pour le lecteur et non tirée des sources du chapitre. Dans un espace courbé positivement (comme la surface d'une sphère), la somme des angles d'un triangle dépasse 180° ; dans un espace courbé négativement, elle est inférieure. ↩

2. Un aimant ordinaire a toujours deux pôles ; le couper en deux donne deux aimants à deux pôles. Le monopôle serait une particule portant une « charge » magnétique isolée. La définition est donnée pour le lecteur ; les sources indiquent seulement que les théories de grande unification en prévoient et qu'on n'en observe pas. Leur trop grand nombre pose aussi problème aux scénarios de grande unification pour l'origine de la matière (Canetti et al. 2012). ↩

3. La règle (résoudre des énigmes montre l'économie d'une hypothèse, pas sa vérité ; la preuve vient des prédictions) est une synthèse proposée pour ce chapitre, non une citation d'un auteur. ↩

4. Calcul d'ordre de grandeur fait pour ce chapitre : un noyau atomique mesure environ 10^{-13} cm, la distance de la Terre au Soleil environ $1{,}5 \times 10^{13}$ cm, soit un rapport de l'ordre de 10^{26}. La comparaison rend le facteur sensible ; elle ne décrit pas ce qu'est devenue une région précise pendant l'inflation, puisque l'Univers a continué de s'étendre ensuite. ↩

5. Présentation élémentaire des fluctuations quantiques, donnée pour le lecteur et non tirée des sources du chapitre. Le « trois temps » (tremblement, étirement et gel, conversion en surdensités) résume le mécanisme décrit par Baumann (2009) sans en reprendre le formalisme ; l'image du gel des fluctuations une fois étirées n'a pas été lue telle quelle dans les sources. ↩

6. L'article de Smoot et al. (1992) a été lu dans un résumé de moteur de recherche, la page n'ayant pas été ouverte. Les chiffres (30 ± 5 µK à l'échelle de 10°) et la mention du spectre de Harrison-Zel'dovich sont à vérifier sur l'article. ↩

7. L'argument selon lequel les pics exigent un départ en phase des oscillations est un raisonnement classique de la cosmologie, qui n'a pas été lu sous cette forme dans les sources du chapitre ; les sources établissent seulement que les pics avaient été prédits et que leur découverte a établi le modèle à fluctuations inflationnaires (Hu et Dodelson 2002). ↩

8. L'explication de $n_s < 1$ par l'évolution de la phase d'inflation est une présentation simplifiée, donnée pour le lecteur ; les sources établissent la prédiction (n_s légèrement inférieur à 1) et la mesure, pas ce détail du mécanisme. ↩

9. Dans l'inflation dite « lente », le champ inflaton évolue doucement le long de son potentiel, une courbe qui donne son énergie en fonction de sa valeur ; « concave » décrit la forme de cette courbe. Définition élémentaire, non tirée des sources. ↩

10. La phrase selon laquelle ACT défavorise « de nombreux modèles inflationnaires, dont le modèle de Starobinsky » a été lue dans un résumé de moteur de recherche de l'article arXiv:2505.05363, qui n'a pas été ouvert. La valeur de 0,965 prédite par ce modèle vient de la même source. Point à vérifier avant publication. ↩

11. Calcul fait pour ce chapitre : $(0{,}974 - 0{,}965) / 0{,}003 = 3$. C'est un ordre de grandeur de l'écart, pas une significativité publiée, qui dépendrait aussi de l'incertitude sur la prédiction du modèle. ↩

12. La distinction entre motifs sans rotation (modes E) et en tourbillon (modes B), et l'affirmation que seules les ondes gravitationnelles produisent des modes B primordiaux, sont des présentations classiques qui ne figurent pas sous cette forme dans les sources du chapitre, lesquelles disent seulement que les ondes gravitationnelles primordiales laisseraient dans la polarisation un motif caractéristique en tourbillon, les modes B. Le lentillage gravitationnel, qui transforme une partie des modes E en modes B, n'est pas traité ici. ↩

13. Dans l'exemple détaillé par Agullo, Wang et Wilson-Ewing (2023), avec environ 4 « e-folds » (multiplications de la taille par e $\approx 2{,}7$) entre le rebond et l'inflation puis 64 d'inflation, les modifications n'apparaissent que pour les multipôles $\ell \lesssim 30$ du spectre angulaire, c'est-à-dire pour des motifs de plus de quelques degrés. Ce chiffre vaut pour cet exemple, pas comme prédiction générale. La robustesse de ces prédictions est contestée par Bojowald (2020). ↩

14. La relation entre la cosmologie cyclique conforme et l'inflation (Penrose la présente-t-il comme une alternative ?) n'est pas établie par les sources consultées ; la phrase ne vise que le rebond et l'état sans bord. ↩

15. Le terme « réchauffement » et la formation possible de l'asymétrie matière-antimatière à ce moment sont repris de Canetti et al. (2012), qui indiquent aussi que l'inflation dilue toute asymétrie préexistante ; la question est traitée au chapitre « La soupe ». La description de la conversion de l'énergie de l'inflaton en particules est une présentation élémentaire, non tirée des sources. ↩

PARTIE II

Le premier jour

LE SENS

Après le seuil, la physique devient solide. Cette partie contient les preuves les plus fortes du Big Bang chaud, fabrique l'hydrogène qui sera celui de nos corps, et donne l'outil qui date toute la suite. Elle va de la soupe opaque à la première lumière libre, et se clôt sur la manière dont on calcule l'âge de l'Univers à partir de cette lumière.

L'ARC

D'une soupe de particules à un gaz d'hydrogène et d'hélium, puis d'un brouillard opaque à un Univers transparent : en 380 000 ans, la matière prend sa composition et la lumière se libère.

LA QUESTION

Comment l'Univers a-t-il pris sa matière première, et comment le sait-on ?

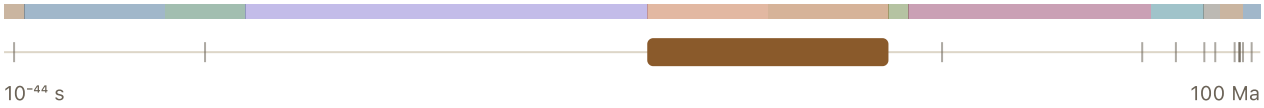
1. La soupe brouillon
2. Trois minutes pour faire l'hydrogène et l'hélium brouillon
3. La première lumière brouillon
4. Un âge calculé brouillon

CHAPITRE 4

La soupe

10^{-12} s à 1 s

brouillon · 6540 mots



4.1 Un bain à l'équilibre

À la fin de l'inflation, l'énergie qui entraînait l'expansion accélérée s'est convertie en particules et en chaleur (→ chap. 3). Ce que l'on sait de cette conversion est à peu près nul. Ce que l'on sait de son résultat, en revanche, est considérable, parce que la matière qui en sort obéit à une physique qu'on a mesurée sur Terre. Vers 10^{-12} seconde, l'Univers est un bain de particules à une température de l'ordre de 10^{15} K, et toutes les particules du modèle standard, le cadre théorique qui décrit les particules connues et trois des quatre forces, y sont en équilibre thermique wiki-chrono.

Être en équilibre thermique, pour un gaz de particules, veut dire que chaque réaction se produit aussi souvent dans un sens que dans l'autre. Deux photons assez énergiques qui se rencontrent créent une paire électron-positron ; une paire électron-positron qui se rencontre s'annihile en photons ; à l'équilibre, les deux flux se compensent. Le nombre de chaque espèce de particule n'est alors fixé que par la température[1]. C'est ce qui rend le bain calculable : à une température donnée, on sait combien il contient d'électrons, de quarks, de photons, sans avoir besoin de connaître son histoire. C'est aussi ce qui le rend muet, car un système qui oublie son passé ne transmet presque rien de ce passé à la suite.

À cette température, les physiciens comptent en énergie plutôt qu'en degrés. L'unité est l'électronvolt (eV), l'énergie que gagne un électron en traversant une différence de potentiel d'un volt ; le mégaélectronvolt (MeV) en vaut un million, le gigaélectronvolt (GeV) un milliard[2]. Une température de 1 MeV correspond à environ 10^{10} K fields2014pdg, 1 GeV à environ 10^{13} K Canetti 2012. Les 10^{15} K de départ font donc une centaine de GeV[3]. Ce thermomètre est la vraie horloge du chapitre : les temps qu'on y lit sont déduits de la température par le modèle d'expansion, et les températures sont ce que la physique des particules connaît.

Deux transitions se succèdent dans ce bain. La première est la brisure de la symétrie électrofaible, vers 10^{-12} s : l'interaction électromagnétique et l'interaction faible, qui ne formaient qu'une seule interaction au-dessus de cette température, se séparent, et les particules acquièrent leur masse wiki-chrono. La nature de cette transition, douce ou brutale, dépend de la masse du boson de Higgs Canetti 2012 ; ce point reviendra à la section suivante, parce qu'il décide si l'excès de matière a pu naître à ce moment. La seconde transition a lieu vers 10^{-5} s. Jusque-là, les quarks, les constituants des protons et des neutrons, circulent librement dans le bain ; ensuite, ils se lient par trois pour former des hadrons, dont les protons et les neutrons wiki-chrono. C'est la réponse à la première moitié de la question du chapitre : les protons et les neutrons naissent à cet instant, quand le bain devient trop froid pour que les quarks restent séparés[4].

Ces deux transitions marquent aussi le bord où le temps lui-même devient fragile. Le philosophe de la physique Svend Rugh et son collègue Henrik Zinkernagel soutiennent que le temps cosmique doit reposer sur des processus physiques possibles entre les constituants de l'Univers. Au-delà de la transition entre quarks libres et hadrons, vers 10^{-5} s, il n'existe plus de systèmes liés qui puissent servir d'horloge ; au-delà de la

transition électrofaible, qu'ils situent vers 10^{-11} s, la masse disparaît presque, et il devient difficile de donner une base physique à une échelle de longueur, d'énergie ou de température, « toutes intimement liées au concept de temps » Rugh 2009. Leur thèse est discutée ; elle ne change aucun calcul. Mais elle fait du début de ce chapitre un seuil précis : c'est là, à un ordre de grandeur près[5], que la coordonnée de temps du modèle redevient un temps que des horloges physiques pourraient marquer.

Le statut de ce récit doit être fixé tout de suite. La physique de ces deux transitions est testée dans les accélérateurs, et son application à l'Univers primordial est une extrapolation raisonnable, non une observation wiki-chrono. La revue du Particle Data Group (PDG), la référence des physiciens des particules, est plus précise encore. On pourrait être tenté, écrivent ses auteurs, de repousser la frontière du connu jusqu'à la transition quarks-hadrons ou jusqu'à la brisure électrofaible ; mais « aucune relique observable de ces époques n'a été identifiée, ni théoriquement ni observationnellement » fields2014pdg. Rien, dans le ciel actuel, ne porte la marque directe de ces deux événements. On sait qu'ils ont eu lieu parce que la physique qui les décrit est éprouvée et parce que l'Univers a été assez chaud pour les traverser ; on ne les a pas vus.

Il en découle une règle pour les dates. Pour les premières fractions de seconde, les durées sont des ordres de grandeur qui dépendent du modèle ; elles ne deviennent robustes qu'au-delà de la seconde wiki-chrono. Les « 10^{-12} s » et « 10^{-5} s » de ce chapitre sont donc des repères, lus dans une chronologie encyclopédique qui n'a pas été recoupée sur une revue spécialisée[6]. La seconde, elle, est solide, et c'est vers elle que le chapitre se dirige.

4.2 Une particule en trop

Le bain contient des particules et leurs antiparticules. À chaque particule correspond une antiparticule de même masse et de charge opposée : l'électron a le positron, le proton l'antiproton, le neutron l'antineutron. Une particule qui rencontre son antiparticule s'annihile avec elle en lumière ; inversement, de la lumière assez énergique peut créer une paire. Tant que le bain est assez chaud, les paires naissent et meurent à la même cadence. Au-dessus de 1 GeV, soit environ 10^{13} K, les baryons (la famille des protons et des neutrons) et les antibaryons sont à peu près aussi nombreux que les photons Canetti 2012.

Puis le bain refroidit. Les photons n'ont bientôt plus assez d'énergie pour créer des paires de baryons, qui pèsent environ un GeV chacun, tandis que les baryons et antibaryons existants continuent de se rencontrer et de s'annihiler. Si l'Univers avait contenu exactement autant de matière que d'antimatière, l'annihilation aurait suivi l'équilibre jusqu'à environ 20 MeV, soit quelque 2×10^{11} K ; à cette température, les rencontres deviennent trop rares et l'annihilation « gèle ». Il ne resterait qu'environ 10^{-19} baryon par unité d'entropie, alors qu'on en observe 10^{-10} Aoki 1997. L'entropie sert ici d'unité de compte parce qu'elle est dominée par les photons et se conserve dans l'expansion ; l'écart est de neuf ordres de grandeur. Un tel univers serait un bain de lumière presque sans atomes : ni étoiles, ni chimie, ni lecteur.

L'Univers réel ne ressemble pas à ce calcul. Le Système solaire ne contient aucune quantité notable d'antimatière, et les rayons gamma qu'émettrait l'annihilation à la frontière de régions de matière et d'antimatière ne s'observent pas Canetti 2012. Andrew Cohen, Alvaro De Rújula et Sheldon Glashow ont montré en 1998 qu'un univers fait de domaines de matière et d'antimatière produirait un fond gamma supérieur aux limites observées, « à moins que le domaine de matière que nous habitons ne soit pratiquement tout l'Univers visible » ; ils concluent qu'un univers symétrique est « empiriquement exclu » Cohen 1998. Il a donc existé, dans le bain chaud, un léger excès de baryons sur les antibaryons. L'annihilation a détruit toutes les paires, et l'excès est resté.

La taille de cet excès est mesurée. On l'exprime par le rapport du nombre de baryons au nombre de photons, noté η. Le satellite Planck, qui a cartographié le fond diffus cosmologique, donne $\eta = (6{,}104 \pm 0{,}058) \times 10^{-10}$ Fields 2020. Le deutérium des nuages de gaz lointains, mesuré par une tout autre méthode, donne la même valeur Fields 2020 ; le chapitre suivant dira comment (→ chap. 5). Aujourd'hui, il y a donc environ 1,6 milliard de photons pour chaque baryon[7]. Ces photons sont en grande partie les produits de l'annihilation d'autrefois Canetti 2012. La lumière fossile que capte Planck est pour l'essentiel la cendre de cette destruction, et nous sommes faits de ce qui n'a pas brûlé.

Ramené à l'époque où baryons et antibaryons étaient aussi nombreux que les photons, cet excès est infime : selon Luca Canetti, Marco Drewes et Mikhail Shaposhnikov, « l'énorme asymétrie d'aujourd'hui était en fait un nombre minuscule dans le passé » Canetti 2012. Les sources ne donnent pas tout à fait la même valeur. Hiroshi Aoki, qui rapporte l'excès à l'ensemble des particules du bain, l'estime à environ 10^{-8} Aoki 1997 ; Canetti et ses collègues l'écrivent de l'ordre de η, soit 10^{-10} Canetti 2012. La différence tient à ce qu'on met au dénominateur, pas au fait lui-même : il y avait une particule en trop pour quelques centaines de millions à quelques milliards de paires.

Deux explications paresseuses sont exclues. La première invoque le hasard : dans un grand nombre de particules, les deux camps ne sont jamais exactement à égalité. Mais dans le volume qui deviendra notre galaxie, 10^{79} baryons et antibaryons donneraient par hasard un écart relatif d'environ $10^{-39{,}5}$, beaucoup trop faible Aoki 1997. La seconde invoque une séparation : matière et antimatière auraient été rangées dans des régions distinctes avant de pouvoir s'annihiler. Il aurait fallu les séparer avant 38 MeV, quand la région où des signaux avaient eu le temps de circuler ne contenait qu'environ 10^{-7} masse solaire ; rien ne peut alors isoler des masses de galaxies Aoki 1997. Une troisième échappatoire, dire que l'Univers est né avec cet excès, se heurte à l'inflation : si elle a eu lieu, toute asymétrie préexistante a été diluée jusqu'à devenir négligeable, et l'excès doit avoir été fabriqué après, pendant le réchauffement ou pendant l'ère du rayonnement Canetti 2012. Il faut donc un processus physique qui ait produit l'excès. On l'appelle la baryogenèse.

Le cahier des charges de ce processus a été écrit en 1967 par le physicien soviétique Andreï Sakharov. Il tient en trois conditions nécessaires Sakharov 1967Canetti 2012[8]. La première est la violation du nombre baryonique : il faut des réactions qui changent le nombre de baryons moins celui des antibaryons, sans quoi un univers parti d'un solde nul le garde nul. La deuxième est la violation de deux symétries, notées C et CP : C échange particules et antiparticules, CP y ajoute l'inversion de l'espace comme dans un miroir. Si ces symétries tenaient, chaque réaction favorisant la matière aurait une réaction jumelle, de même probabilité, favorisant l'antimatière, et les deux s'annuleraient. La troisième est un écart à l'équilibre thermique : à l'équilibre, chaque réaction est compensée par sa réaction inverse, et le solde ne bouge pas Canetti 2012. Ces conditions ne disent pas comment l'excès s'est formé ; elles disent ce qu'il faut réunir pour qu'il se forme.

Le modèle standard les remplit toutes les trois, en principe. Le nombre baryonique y est violé par des transitions appelées « sphalérons », possibles à haute température ; supprimées d'un facteur d'environ 10^{-160} aux basses températures, ce qui explique que le proton ne se désintègre pas aujourd'hui, elles sont efficaces au-dessus d'une température comprise entre 100 et 300 GeV Canetti 2012. La violation CP existe dans l'interaction faible. L'expansion fournit l'écart à l'équilibre Canetti 2012. Mais deux ingrédients sont présents en quantité insuffisante. La violation CP du modèle standard, mesurée par une grandeur sans dimension qui vaut environ 10^{-20}, est très inférieure aux 10^{-10} à expliquer Canetti 2012 ; le CERN la dit « trop petite de nombreux ordres de grandeur » cern2025lhcb. Et l'écart à l'équilibre aurait exigé une transition électrofaible brutale, dite du premier ordre, où la nouvelle phase apparaît en bulles comme la vapeur dans l'eau qui bout. Une telle transition n'est possible que si le boson de Higgs pèse moins de 72 GeV ; il en pèse environ 126 selon la revue de 2012 Canetti 2012[9]. La transition est donc douce, et les sphalérons effacent au fur et à

mesure l'asymétrie qui tenterait de se former. Canetti et ses collègues concluent qu'il est « extrêmement improbable » que l'asymétrie observée ait été produite dans le cadre du modèle standard Canetti 2012.

Une mesure récente illustre ce que « trop faible » veut dire. En 2025, l'expérience LHCb, au CERN, observe pour la première fois une violation CP dans les désintégrations de baryons, la sorte de matière dont est fait l'Univers visible : les baryons appelés Λb et leurs antiparticules ne se désintègrent pas au même rythme, l'écart valant 2,45 % ± 0,47 % Lhcb 2025cern2025lhcb. C'est une pièce du puzzle ; elle ne le résout pas, parce que l'effet reste dans le cadre du modèle standard, dont la violation CP totale demeure insuffisante cern2025lhcb.

Il faut donc une physique au-delà du modèle standard, et les propositions sont nombreuses Canetti 2012. Trois familles dominent : la grande unification, où des bosons très lourds se désintègrent hors équilibre ; une transition électrofaible rendue brutale par des particules nouvelles ; la leptogenèse, proposée en 1986 par Masataka Fukugita et Tsutomu Yanagida, où un excès de leptons (la famille de l'électron et des neutrinos), né de la désintégration de neutrinos très lourds, est converti en excès de baryons par les sphalérons Fukugita 1986Davidson 2008. Chacune place la baryogenèse à une époque différente, de la fin de l'inflation à la transition électrofaible Canetti 2012. Le mécanisme est inconnu, son époque aussi, et on ne peut pas lui donner de date. Sa place dans ce chapitre est logique plutôt que chronologique : l'excès devait exister avant que l'annihilation des baryons ne gèle vers 20 MeV, et il est tout ce qui reste de cette annihilation.

4.3 Une seconde : deux gels

Le mot « gel » est déjà apparu pour l'annihilation. Il désigne un mécanisme général, qui va servir deux fois vers une seconde. Une réaction entre particules a un taux : le nombre de fois qu'elle se produit, par particule, en une unité de temps. L'expansion a elle aussi un taux, qui dit à quelle vitesse les distances grandissent. Tant que le taux d'une réaction dépasse largement celui de l'expansion, la réaction a le temps de se produire de nombreuses fois pendant que l'Univers change peu, et elle maintient l'équilibre. Quand l'Univers refroidit, les particules se raréfient et perdent de l'énergie, et le taux de la réaction chute ; celui de l'expansion diminue aussi, mais moins vite. Vient un moment où la réaction n'a plus le temps de se produire avant que l'Univers ait changé : elle cesse de fait, et ce qu'elle réglait reste figé à sa dernière valeur[10].

Les interactions faibles, celles qui gouvernent la radioactivité bêta et qui sont les seules que ressentent les neutrinos, ralentissent ainsi plus vite que l'expansion quand la température approche de 1 MeV, soit environ 10^{10} K, vers une seconde d'âge fields2014pdg. Deux choses gèlent alors, presque en même temps.

La première concerne les neutrinos. Ces particules sans charge électrique, presque sans masse, n'interagissent que par l'interaction faible (et la gravitation). Tant que le bain est assez chaud et assez dense, elles échangent de l'énergie avec les électrons et les autres particules et partagent la température commune. Quand les interactions faibles deviennent trop rares, les neutrinos cessent d'interagir avec le reste de la matière et voyagent librement depuis wiki-chrono. La chronologie usuelle place ce découplage vers une seconde wiki-chrono ; le PDG le situe à une température d'environ 3 MeV fields2014pdg, donc un peu plus tôt, dans un bain trois fois plus chaud. Ces neutrinos libérés existent encore : ils forment un fond de neutrinos fossiles qui baigne tout l'Univers, comme le fond diffus de photons, mais qui a été libéré quelque 380 000 ans plus tôt. Ce fond est prédit ; on ne l'a pas capté directement, et on le détecte indirectement, par ses effets sur la nucléosynthèse et sur le fond diffus Fields 2020. La dernière section de ce chapitre dit lesquels.

La seconde chose qui gèle est le rapport entre neutrons et protons. Le neutron pèse un peu plus lourd que le proton : l'écart de masse, exprimé en énergie, vaut $Q = 1{,}293$ MeV fields2014pdg. Tant que l'Univers est plus chaud qu'environ 1 MeV, les interactions faibles transforment sans cesse des neutrons en protons et

des protons en neutrons fields2014pdg. Dans ces échanges, fabriquer un neutron coûte l'énergie Q de plus que fabriquer un proton. À l'équilibre, un état plus coûteux est moins peuplé, dans une proportion qui dépend du rapport entre ce coût et l'énergie typique disponible, la température. Le rapport suit la loi n/p = e^(−Q/T), où e^ désigne la fonction exponentielle fields2014pdg[11]. Quand la température dépasse de beaucoup Q, le surcoût est négligeable et il y a presque autant de neutrons que de protons. Quand la température descend vers Q, l'exponentielle chute, et les neutrons se raréfient.

Si l'équilibre avait duré indéfiniment, le rapport aurait continué de tomber avec la température, et il ne serait resté presque aucun neutron. Il ne dure pas. Les conversions gèlent vers 1 MeV, et le rapport se fige autour de n/p ≈ 1/6 : un neutron pour six protons fields2014pdg. D'autres sources situent ce gel plutôt vers 2 MeV, avec le même rapport d'environ 1/6 wiki-bbn. Les deux valeurs ne se contredisent pas : le gel est progressif, les conversions s'essoufflent sur une plage de températures, et chaque auteur choisit une définition différente de l'instant où elles s'arrêtent fields2014pdgwiki-bbn. Un calcul simple montre que « vers 1 MeV » est un ordre de grandeur. La formule d'équilibre donne un rapport de 1/6 pour une température d'environ 0,7 MeV ; à 1 MeV, elle donnerait environ 1/3,6, et à 2 MeV environ 1/2[12]. Le « un pour six » est ce que laisse un équilibre qui se défait peu à peu ; aucune température unique ne le décrit exactement.

Voici donc la première partie de la réponse à la question du chapitre. Il y a moins de neutrons que de protons parce que le neutron est plus lourd, et que le bain, en refroidissant, favorise la particule la moins coûteuse. Il en reste pourtant un sur six, et non un sur mille, parce que les interactions faibles ont décroché avant que la température descende beaucoup sous Q. Le rapport résulte d'une rencontre entre deux échelles d'énergie indépendantes : l'écart de masse Q, et la température à laquelle l'interaction faible perd sa course contre l'expansion. Qu'elles tombent dans le même ordre de grandeur, autour du MeV, est ce qui laisse à l'Univers une fraction notable de neutrons.

Ce rapport fait intervenir les quatre interactions fondamentales à la fois. L'écart de masse Q dépend de l'interaction forte, qui lie les quarks dans le neutron et le proton, et de l'interaction électromagnétique. La température du gel dépend de l'interaction faible, qui fixe le taux des conversions, et de la gravitation, qui fixe le taux d'expansion fields2014pdg. Changer l'une des quatre changerait le nombre de neutrons disponibles, et donc, on le verra, la quantité d'hélium de l'Univers. Ce croisement fait de la nucléosynthèse un banc d'essai pour la physique fondamentale telle qu'elle était à une seconde.

4.4 Le compte à rebours des neutrons

Le gel fige les échanges, pas les neutrons eux-mêmes. Un neutron libre est instable : il se désintègre en proton, avec une durée de vie d'environ quinze minutes wiki-bbn. Le proton, lui, ne se désintègre pas, ou si lentement qu'on ne l'a jamais vu faire Canetti 2012. Tant que les interactions faibles maintenaient l'équilibre, les désintégrations étaient compensées par les conversions inverses. Après le gel, la compensation cesse. Il ne reste qu'un flux à sens unique, des neutrons vers les protons.

Dès la première seconde, un compte à rebours commence donc. Chaque minute, une fraction des neutrons restants disparaît. Ils ne seront à l'abri qu'une fois enfermés dans un noyau, où le neutron est stable ; or les noyaux ne se forment pas encore. Quand les réactions nucléaires commencent enfin, le rapport est tombé à n/p ≈ 1/7 fields2014pdg. C'est l'origine du « un neutron pour sept protons » avec lequel commence la fabrication des premiers noyaux.

Un calcul d'ordre de grandeur montre la cohérence de ces chiffres. Passer de 1/6 à 1/7 revient à faire passer la part des neutrons parmi tous les nucléons (neutrons et protons) de un sur sept à un sur huit, soit à perdre environ un neutron sur huit. Avec une durée de vie d'environ quinze minutes, cette perte prend envi-

ron deux minutes[13]. C'est l'ordre de grandeur de l'attente avant que les noyaux se forment, puisque les abondances des premiers éléments sont fixées pour l'essentiel vers 180 secondes fields2014pdg.

Le « un pour sept » est donc le résultat d'une course. D'un côté, la désintégration grignote les neutrons à un rythme fixé par leur durée de vie. De l'autre, le refroidissement rapproche le moment où ils pourront se réfugier dans des noyaux. Si l'Univers avait refroidi plus lentement, les neutrons auraient eu plus de temps pour disparaître, et il en serait resté moins ; s'il avait refroidi plus vite, davantage. Le rapport final enregistre la vitesse du refroidissement, mesurée avec l'horloge de la désintégration du neutron. C'est pourquoi, parmi toutes les grandeurs mesurées en laboratoire, celle qui pèse le plus sur la quantité d'hélium produite est la durée de vie du neutron fields2014pdg.

Une confusion fréquente doit être écartée. On lit parfois que le rapport entre neutrons et protons se fixe « à trois minutes ». Il se fixe vers une seconde, au gel ; pendant les trois minutes qui suivent, il ne fait que décroître par désintégration. Ce qui attend trois minutes, c'est la fusion fields2014pdg.

La seconde partie de la réponse à la question du chapitre tient donc dans ce délai. Il y a si peu de neutrons, un pour sept protons, parce que deux mécanismes se sont ajoutés. Le premier est thermique : le neutron plus lourd a été défavorisé tant que durait l'équilibre, jusqu'à un pour six au gel. Le second est une érosion : pendant l'attente des noyaux, les neutrons libres se sont désintégrés. Ces sept protons pour un neutron vont décider de la composition de toute la matière ordinaire de l'Univers. Si presque tous les neutrons finissent dans l'hélium, comme on le verra, le rapport 1/7 fixe à environ un quart la part de l'hélium dans la masse fields2014pdg(→ chap. 5).

4.5 Ce qui passe la frontière

La soupe n'a laissé aucune relique directe fields2014pdg. Mais elle a transmis à la suite de l'histoire trois grandeurs, fixées pendant la première seconde et relues bien plus tard : l'excès de matière η, le rapport entre neutrons et protons, et le nombre d'espèces de neutrinos. Ce sont elles qui permettent de vérifier, après coup, le récit des sections précédentes.

La première est l'excès de matière. Dans le modèle standard, la nucléosynthèse, la fabrication des premiers noyaux entre la troisième et la vingtième minute, ne dépend que d'un seul paramètre : le rapport baryons/photons η Fields 2020. Plus il y a de baryons par photon, plus les noyaux se rencontrent souvent, et moins il reste de deutérium, un noyau fragile d'un proton et d'un neutron. Le deutérium mesuré dans des nuages lointains donne donc η. Le fond diffus, lumière libérée 380 000 ans plus tard, le donne aussi, par la manière dont les baryons pèsent sur les ondes sonores du plasma primordial Fields 2020(→ chap. 6). Les deux mesures s'accordent : le deutérium prédit avec la valeur de Planck vaut $2{,}559 \times 10^{-5}$ de l'hydrogène, et la moyenne de onze mesures donne $(2{,}55 \pm 0{,}03) \times 10^{-5}$ Fields 2020. L'excès né, par un mécanisme inconnu, quelque part dans la soupe, est ainsi mesuré deux fois, à deux époques que tout sépare, et trouvé identique. Avec cette valeur fixée par Planck, la nucléosynthèse est devenue « essentiellement une théorie sans paramètre » Fields 2020.

La deuxième est le rapport entre neutrons et protons, qui fixe l'hélium. Une fois presque tous les neutrons réfugiés dans l'hélium 4, la fraction de la masse sous forme d'hélium, notée Yp, se déduit par simple comptage : environ 0,25 fields2014pdg. Les mesures dans le gaz des galaxies les plus pauvres en éléments lourds donnent $0{,}2449 \pm 0{,}0040$ selon Brian Fields et ses collègues Fields 2020. Le rapport qui a gelé vers une seconde se lit donc aujourd'hui, à quelques millièmes près, dans la lumière de nuages de gaz ionisé. Le chapitre suivant raconte la fabrication de cet hélium (→ chap. 5) ; il suffit ici de voir qu'il enregistre la physique du gel.

La troisième grandeur est la plus inattendue : l'hélium compte les neutrinos. Chaque espèce de particule légère présente dans le bain ajoute sa part à la densité d'énergie de l'Univers ; or, dans un univers dominé par le rayonnement, plus la densité d'énergie est grande, plus l'expansion est rapide. Chaque espèce supplémentaire de particule relativiste accélère donc l'expansion, ce qui avance le gel des conversions entre neutrons et protons ; le gel survenant à plus haute température, il reste plus de neutrons, et donc plus d'hélium, environ 0,013 de plus sur Yp par espèce fields2014pdg. C'est trois fois l'incertitude actuelle sur l'hélium mesuré[14]. La combinaison de la nucléosynthèse et du fond diffus donne pour le nombre d'espèces de neutrinos $N_\nu = 2{,}86 \pm 0{,}15$ Fields 2020, compatible avec les trois familles connues (électronique, muonique, tauique). Une quatrième famille de neutrinos légers serait à près de huit fois l'incertitude de cette mesure[15]. La valeur attendue dans le modèle standard n'est d'ailleurs pas exactement 3 mais 3,04, parce que les neutrinos se découplent juste avant que les dernières annihilations d'électrons et de positrons ne chauffent le bain, et qu'ils en recueillent une petite part fields2014pdg[16].

C'est ainsi que le fond de neutrinos fossiles est détecté : non par un détecteur qui capterait ces neutrinos, trop peu énergiques pour cela, mais par le poids qu'ils ont ajouté à l'expansion pendant la première seconde, et que l'hélium et le fond diffus ont enregistré Fields 2020. Le futur observatoire du fond diffus CMB-S4 vise une précision de 0,03 sur ce nombre, assez pour voir la correction de 0,045 attendue dans le modèle standard Fields 2020. Ce serait une mesure de la manière exacte dont les neutrinos ont quitté la soupe.

Ces trois transmissions situent la frontière du connu. La revue du PDG la place à un endroit précis : faute de « modèles standard » pour la baryogenèse et pour l'inflation, « la nucléosynthèse marque toujours la frontière entre l'établi et le spéculatif dans la cosmologie du Big Bang » fields2014pdg. Les mêmes auteurs précisent ce qu'on gagne de ce côté-ci de la frontière : avec une microphysique bien établie, on extrapole jusqu'à une seconde environ, et l'on prédit des abondances qui s'étendent sur neuf ordres de grandeur, en accord approximatif avec l'observation fields2014pdg. La frontière traverse donc ce chapitre lui-même. Le gel des neutrons et le découplage des neutrinos sont du côté établi : leurs conséquences sont mesurées. La baryogenèse est du côté spéculatif : sa conséquence, η, est mesurée à 1 % près, mais sa cause ne l'est pas. Les deux transitions du début du chapitre sont entre les deux : leur physique est testée, leur trace cosmique introuvable.

Reste une question que la soupe laisse ouverte. Vers une seconde, l'Univers contient des protons et des neutrons, dans le rapport de six pour un, et les neutrons commencent à disparaître. Pour qu'ils survivent, il faudrait qu'ils se lient à des protons en noyaux. Le plus simple d'entre eux, le deutérium, ne demande qu'un proton et un neutron. Pourquoi les noyaux attendent-ils trois minutes, pendant que les neutrons se désintègrent ? La réponse passe par les 1,6 milliard de photons par baryon que l'annihilation a laissés derrière elle fields2014pdg(→ chap. 5).

4.6 Ce qu'on ne sait pas

On ne sait pas comment l'excès de matière a été fabriqué, ni quand. C'est l'inconnue la plus lourde du chapitre, et elle est de nature théorique autant qu'observationnelle. Ce qui oppose les hypothèses, c'est l'échelle d'énergie à laquelle elles placent la baryogenèse, et donc l'endroit où l'on peut les tester. Une baryogenèse électrofaible exigerait des particules nouvelles et de nouvelles sources de violation CP à des énergies proches de celles du LHC ; elle est testable, mais les particules requises n'ont pas été vues, et un point de ce constat reste à documenter pour ce livre Aoki 1997. Une nouvelle violation CP donnerait à l'électron un moment dipolaire électrique, une légère dissymétrie de sa charge ; l'expérience JILA n'en a pas trouvé en 2023, avec une précision 2,4 fois meilleure que les précédentes nist2023edm, ce qui resserre l'étau sur ces

scénarios. La leptogenèse relie l'excès à la masse des neutrinos ; une violation CP chez les neutrinos en serait un indice, et l'analyse conjointe des expériences T2K et NOvA en fournit un en 2025, à trois écarts-types, mais seulement si l'ordre des masses des neutrinos est dit « inversé » t2knova2025. Même confirmée, une telle mesure ne prouverait pas la leptogenèse, qui dépend des neutrinos lourds et non des neutrinos connus[17]. Beaucoup de modèles de baryogenèse sont difficiles à réfuter, parce qu'ils peuvent repousser leur échelle d'énergie hors de portée ; selon la revue de 2012, trois seulement sont testables au sens strict Canetti 2012. Ce qu'on attend, ce sont les mesures de violation CP chez les neutrinos, et des contraintes toujours plus fines sur les particules nouvelles.

On ne sait pas grand-chose, par l'observation, des deux transitions du début du chapitre. Le PDG le dit sans nuance : aucune relique observable n'a été identifiée fields2014pdg. Ce qui changerait ce constat serait une trace cosmique prédite par la théorie de ces transitions et retrouvée dans le ciel ; les fiches de ce livre n'en décrivent aucune en préparation. La physique du plasma de quarks et de gluons recréé dans les collisionneurs, qui donne sa base expérimentale au récit de la section d'ouverture, n'est pas documentée ici ; c'est la principale lacune de ce chapitre.

On ne sait pas exactement ce que valent les dates. Les époques de 10^{-12} s et de 10^{-5} s viennent d'une chronologie encyclopédique non recoupée wiki-chrono, et Rugh et Zinkernagel situent la transition électrofaible vers 10^{-11} s Rugh 2009. L'écart est dans la marge d'un ordre de grandeur que le chapitre annonce ; il ne change rien au récit, mais il faudra harmoniser. La température du gel, 1 ou 2 MeV selon les sources, n'est pas une inconnue physique : c'est une question de définition, qui tient au caractère progressif du gel fields2014pdgwiki-bbn.

On ne sait pas avec toute la précision voulue la durée de vie du neutron, le paramètre de laboratoire qui pèse le plus sur l'hélium fields2014pdg. Un écart entre les mesures faites sur des neutrons piégés et celles faites sur des faisceaux de neutrons est connu des physiciens, mais n'est pas documenté dans les sources de ce livre ; son effet sur le compte à rebours de la quatrième section reste donc à chiffrer.

On ne sait pas enfin si le bain contenait autant de neutrinos que d'antineutrinos. Le programme japonais EMPRESS, qui mesure l'hélium dans des galaxies extrêmement pauvres en éléments lourds, trouve Yp = 0,2402 ± 0,0040, plus bas que les estimations antérieures, et ses auteurs y voient l'indice possible d'une « asymétrie leptonique » non nulle, un léger excès de neutrinos sur les antineutrinos Yanagisawa 2025. Si c'était le cas, la soupe aurait porté une seconde asymétrie, à côté de celle des baryons, et elle aurait déplacé le gel des neutrons. C'est une piste, fondée sur une mesure encore en discussion ; ce qui la départagerait est une convergence des mesures de l'hélium primordial, aujourd'hui dispersées entre 0,240 et 0,245 Fields 2020Yanagisawa 2025.

4.7 Ce que ce chapitre démontre

Entre 10^{-12} seconde et une seconde, l'Univers passe d'un bain de toutes les particules connues, en équilibre à 10^{15} K, à un gaz de protons et de neutrons plongé dans un océan de photons et traversé de neutrinos libres. La physique de ce passage est celle des accélérateurs ; son application à l'Univers est une extrapolation, et le PDG rappelle qu'aucune relique directe des deux grandes transitions, la brisure électrofaible et la formation des protons et des neutrons, n'a été identifiée wiki-chronofields2014pdg.

Les protons et les neutrons viennent des quarks, qui se lient vers 10^{-5} s quand le bain devient trop froid pour qu'ils restent libres wiki-chrono. Qu'il en reste suppose un excès de matière sur l'antimatière, d'une particule pour quelques centaines de millions à quelques milliards de paires ; sans lui, l'annihilation n'aurait laissé qu'un baryon pour 10^{19} unités d'entropie au lieu de 10^{10} Aoki 1997Canetti 2012. Cet excès est mesu-

ré, $\eta = (6{,}104 \pm 0{,}058) \times 10^{-10}$, et la lumière fossile en est la cendre Fields 2020Canetti 2012. Sa fabrication exige les trois conditions de Sakharov ; le modèle standard les remplit trop faiblement, et le mécanisme réel reste inconnu Canetti 2012.

Il y a si peu de neutrons pour deux raisons, qui se succèdent. Le neutron pèse $Q = 1{,}293$ MeV de plus que le proton, et tant que les interactions faibles maintiennent l'équilibre, le bain qui refroidit le défavorise ; quand elles décrochent, vers une seconde et 10^{10} K, le rapport se fige vers un neutron pour six protons fields2014pdg. Puis les neutrons libres se désintègrent, avec leur quart d'heure de vie, et le rapport tombe à un pour sept quand les réactions nucléaires commencent fields2014pdgwiki-bbn. Ce rapport engage les quatre interactions : la forte et l'électromagnétique par l'écart de masse, la faible et la gravitation par la température du gel fields2014pdg.

Au même moment, les neutrinos cessent d'interagir. Leur fond fossile n'a jamais été capté ; il est pourtant compté, par l'hélium et le fond diffus, qui donnent ensemble $2{,}86 \pm 0{,}15$ espèces, compatible avec trois Fields 2020. L'excès de matière, le rapport entre neutrons et protons et le nombre de neutrinos passent ainsi la frontière que le PDG place à la nucléosynthèse, entre l'établi et le spéculatif fields2014pdg. En deçà, ce chapitre raconte une physique vérifiée par ses conséquences, à côté d'une origine de la matière dont on connaît la taille et pas la cause. Au-delà commence ce qu'on peut mesurer directement, à condition que les neutrons survivent à trois minutes d'attente.

Notes

1. Présentation élémentaire de l'équilibre thermique, donnée pour le lecteur et non tirée des sources du chapitre. L'exemple de la paire électron-positron est un cas classique. L'idée que l'équilibre « efface l'histoire » et rend le bain muet est un raisonnement de ce chapitre ; le PDG établit seulement qu'aucune relique de ces époques n'a été identifiée. ↩

2. Définition de l'électronvolt donnée pour le lecteur. Les équivalences entre énergie et température (1 MeV $\approx 10^{10}$ K, 1 GeV $\approx 10^{13}$ K) sont celles des fiches « nucleosynthese-primordiale » (Fields et al. 2014) et « baryogenese » (Canetti et al. 2012). ↩

3. Calcul fait pour ce chapitre à partir de 1 GeV $\approx 10^{13}$ K : 10^{15} K correspondent à environ 100 GeV. Cette valeur tombe dans la plage de 100 à 300 GeV où, selon Canetti et al. (2012), les sphalérons sont efficaces, ce qui est cohérent avec la place de la transition électrofaible dans ce récit. ↩

4. Les sources du chapitre disent que les quarks se lient « en hadrons », donc en protons et en neutrons ; elles ne détaillent ni les autres hadrons formés à ce moment, ni le mécanisme qui empêche les quarks d'exister isolément (le confinement). « Par trois » est la composition connue du proton et du neutron, rappelée pour le lecteur. ↩

5. La chronologie encyclopédique utilisée par les fiches place la brisure électrofaible vers 10^{-12} s (wiki-chrono), Rugh et Zinkernagel (2009) vers 10^{-11} s. L'écart d'un facteur dix est dans la marge d'un ordre de grandeur annoncée pour ces dates. ↩

6. La source wiki-chrono est marquée « non vérifiée » dans les fiches. La fiche « frise-cosmique » recommande de recouper ces époques sur une revue (PDG, Baumann) avant publication. ↩

7. Calcul fait pour ce chapitre : $1/\eta = 1/(6{,}104 \times 10^{-10}) \approx 1{,}6 \times 10^{9}$. La fiche « baryogenese » donne « environ un milliard et demi de photons par baryon ». ↩

8. L'article original de Sakharov (1967) n'a pas été consulté ; les trois conditions sont lues dans la revue de Canetti et al. (2012), qui les lui attribuent. Les explications de chaque condition suivent cette revue ; la définition de C et de CP est une présentation élémentaire donnée pour le lecteur. ↩

9. La valeur de 126 GeV est celle de la revue de 2012. La valeur retenue aujourd'hui, voisine de 125 GeV, n'a pas été lue sur une source pour ce livre. L'image des bulles de vapeur illustre la transition du premier ordre ; elle n'est pas tirée des sources. ↩

10. Présentation élémentaire du mécanisme de gel (comparaison du taux d'une réaction et du taux d'expansion), donnée pour le lecteur. Les sources établissent que les interactions faibles ralentissent plus vite que l'expansion et que l'équilibre est alors rompu (Fields et al. 2014) ; elles ne sont pas citées pour la formulation générale. ↩

11. L'interprétation de la loi n/p = e^(−Q/T) comme la pénalité d'un état plus coûteux à l'équilibre (facteur de Boltzmann) est une présentation classique, donnée pour le lecteur ; la loi elle-même et la valeur de Q viennent de Fields et al. (2014). Les partenaires précis des réactions de conversion (électrons, positrons, neutrinos) ne sont pas détaillés dans les sources du chapitre. ↩

12. Calcul fait pour ce chapitre avec Q = 1,293 MeV. Le rapport vaut 1/6 quand Q/T = ln 6 ≈ 1,79, soit T ≈ 0,72 MeV (environ 8×10^9 K). À T = 1 MeV, e^(−1,293) ≈ 0,27 ≈ 1/3,6 ; à T = 2 MeV, e^(−0,65) ≈ 0,52 ≈ 1/1,9. Le PDG écrit lui-même n/p = e^(−Q/T_gel) ≈ 1/6, ce qui implique une température de gel effective un peu inférieure au MeV. ↩

13. Calcul fait pour ce chapitre. Avec n/p = 1/6, la part des neutrons parmi les nucléons vaut 1/7 ≈ 0,143 ; avec n/p = 1/7, elle vaut 1/8 = 0,125. Chaque neutron désintégré devient un proton, si bien que le nombre total de nucléons est constant ; il survit donc 0,125/0,143 ≈ 0,875 des neutrons. Avec une durée de vie τ d'environ 15 minutes, la durée correspondante vaut τ × ln(1/0,875) ≈ 0,13 τ, soit environ deux minutes. C'est un ordre de grandeur : il néglige les conversions résiduelles juste après le gel et l'imprécision des valeurs « environ 1/6 » et « environ 1/7 ». ↩

14. Calcul fait pour ce chapitre : 0,013 / 0,0040 ≈ 3, en rapportant l'effet d'une espèce supplémentaire (Fields et al. 2014) à l'incertitude de la valeur de Yp retenue par Fields et al. (2020). ↩

15. Calcul fait pour ce chapitre : (4 − 2,86) / 0,15 ≈ 7,6. La valeur 3 est à moins d'un écart-type ((3 − 2,86) / 0,15 ≈ 0,9). C'est une lecture simple de l'incertitude publiée, pas une significativité calculée par les auteurs. ↩

16. La fiche « nucleosynthese-primordiale » attribue la valeur 3,04 à « un léger chauffage des neutrinos » (Fields et al. 2014). L'explication par les annihilations d'électrons et de positrons survenant juste après le découplage est la présentation classique de ce chauffage ; elle n'a pas été lue sous cette forme dans les sources. La correction de 0,045 visée par CMB-S4 (Fields et al. 2020) correspond au même effet. ↩

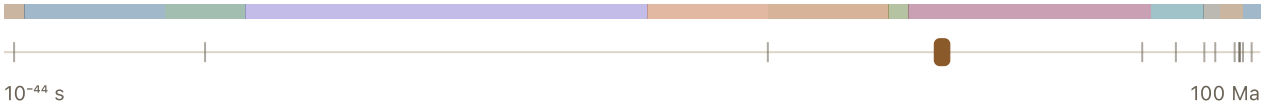
17. Raisonnement repris de la fiche « baryogenese », qui le signale comme non sourcé : la leptogenèse dépend des phases des neutrinos lourds, pas directement de la violation CP mesurée chez les neutrinos légers. ↩

CHAPITRE 5

Trois minutes pour faire l'hydrogène et l'hélium

3 à 20 minutes

brouillon · 7957 mots



5.1 Un compte à rebours

Au terme du chapitre précédent, l'Univers a une seconde. Sa température est d'environ 1 MeV, soit quelque 10^{10} K, et les interactions faibles, qui transformaient sans cesse des neutrons en protons et des protons en neutrons, viennent de perdre leur course contre l'expansion : elles se produisent désormais trop rarement pour maintenir l'équilibre, et le rapport entre les deux particules s'est figé autour d'un neutron pour six protons fields2014pdg(→ chap. 4). Le bain contient ces protons et ces neutrons, des électrons, un océan de photons, et des neutrinos qui ne touchent plus à rien. Il ne contient encore aucun noyau composé. Chaque proton isolé est déjà, à lui seul, un noyau d'hydrogène ; ce que les vingt minutes suivantes vont décider, c'est combien de protons resteront seuls, et ce que deviendront les autres[1].

Le gel a figé les échanges, pas les neutrons. Un neutron libre est instable : il se désintègre en proton, avec une durée de vie d'environ quinze minutes wiki-bbn. Tant que les interactions faibles maintenaient l'équilibre, ces désintégrations étaient compensées par les conversions inverses, de proton en neutron. Après le gel, la compensation cesse. Il ne reste qu'un flux à sens unique, des neutrons vers les protons, et ce flux ne s'arrêtera que pour les neutrons qui auront trouvé refuge dans un noyau, où ils cessent de se désintégrer[2]. Or les noyaux ne se forment pas encore, et ne se formeront pas avant environ trois minutes.

Un compte à rebours commence donc dès la première seconde. Chaque minute, une fraction des neutrons restants disparaît. Quand les réactions nucléaires commencent enfin, le rapport est tombé à environ un neutron pour sept protons fields2014pdg. Le chapitre précédent a vérifié l'ordre de grandeur : passer d'un pour six à un pour sept revient à perdre à peu près un neutron sur huit, ce que la désintégration accomplit en deux minutes environ (→ chap. 4). Le « un pour sept » n'a donc rien d'une constante de la nature. Il appartient à l'axe du temps : c'est la valeur qu'affiche le compte à rebours à l'instant où la fusion l'interrompt, et une fusion plus précoce ou plus tardive aurait arrêté l'aiguille ailleurs.

Cette dépendance au moment fait du rapport final l'enregistrement d'une course. D'un côté, la désintégration grignote les neutrons à un rythme fixé par leur durée de vie ; de l'autre, le refroidissement de l'Univers rapproche l'instant où ils pourront se réfugier dans des noyaux. Un univers qui aurait refroidi plus lentement aurait laissé plus de temps aux neutrons pour disparaître ; un univers plus rapide en aurait sauvé davantage. Toute la chimie de départ de l'Univers, on va le voir, découle du résultat de cette course.

Une confusion fréquente doit être écartée d'emblée. Le rapport entre neutrons et protons ne se fixe pas « à trois minutes » : il se fixe vers une seconde, au gel, et ne fait ensuite que décroître par désintégration. Ce qui attend trois minutes, c'est la fusion fields2014pdg. Le chapitre doit donc expliquer quatre choses : pourquoi la fusion attend, où vont les neutrons quand elle commence, pourquoi elle s'arrête si tôt dans le tableau des éléments, et comment on sait que ce récit est juste.

5.2 Le goulot du deutérium

Le premier noyau composé à se former est le plus simple : le deutérium, un proton et un neutron liés ensemble, qu'on appelle aussi hydrogène lourd. Il est un passage obligé. Pour fabriquer de l'hélium, qui compte quatre nucléons (deux protons et deux neutrons), il faudrait sinon que quatre particules se rencontrent au même instant, et une telle rencontre est exclue dans les conditions de l'époque, où seules les réactions entre deux particules comptent fields2014pdg. La chaîne doit donc monter marche par marche, et la première marche est la réunion d'un proton et d'un neutron en deutérium.

Cette marche est fragile. Un noyau tient parce que ses constituants, une fois réunis, ont moins d'énergie que séparés ; la différence s'appelle l'énergie de liaison, et c'est aussi l'énergie qu'il faut fournir pour casser le noyau. Celle du deutérium vaut 2,23 MeV fields2014pdg. Un photon qui porte plus de 2,23 MeV et qui frappe un deutérium le brise en un proton et un neutron. À première vue, le deutérium devrait donc survivre dès que la température descend sous 2,23 MeV, c'est-à-dire avant même le gel des neutrons, puisque le gel a lieu vers 1 MeV. Il n'en est rien : le deutérium ne tient qu'à partir d'environ 0,1 MeV, soit une température vingt fois plus basse, vers 10^9 K[3] fields2014pdg.

L'écart tient au nombre des photons. Il y en a environ un milliard par baryon, c'est-à-dire par proton ou neutron fields2014pdg. La température mesure l'énergie typique d'un photon, mais les énergies sont étalées autour de cette moyenne, et une petite fraction des photons en porte beaucoup plus[4]. Quand la température vaut 0,5 MeV, les photons capables de casser un deutérium ne sont qu'une infime minorité ; mais une infime minorité d'un milliard reste une foule, et chaque deutérium qui se forme en rencontre aussitôt un. Le deutérium naît, et il est cassé presque aussitôt, encore et encore. Le PDG formule le critère exactement : les noyaux ne survivent que lorsque le nombre de photons assez énergiques par baryon passe sous l'unité, et cela n'arrive que vers 0,1 MeV fields2014pdg. C'est ce qu'on appelle le « goulot du deutérium ».

Un calcul d'ordre de grandeur retrouve cette température. La fraction des photons d'énergie supérieure à 2,23 MeV décroît à peu près comme une exponentielle du rapport entre 2,23 MeV et la température. Multipliée par le nombre de photons par baryon, environ 1,6 milliard, elle tombe sous l'unité quand ce rapport dépasse une vingtaine, c'est-à-dire quand la température descend vers 0,1 MeV[5]. Le goulot tient donc à l'abondance des photons plus qu'à leur énergie moyenne : il faut que la queue de leur distribution soit devenue trop mince pour qu'un milliard de photons fournissent encore, à chaque baryon, un briseur.

Ce calcul montre aussi par où entre le seul paramètre cosmologique de l'histoire. Le nombre de photons par baryon est l'inverse du rapport baryons/photons, noté η, dont le chapitre précédent a raconté l'origine : un léger excès de matière sur l'antimatière, rescapé de l'annihilation (→ chap. 4). Plus η est grand, moins il y a de photons par baryon, et plus le goulot s'ouvre tôt[6]. L'excès de matière né dans la soupe décide ainsi du moment où la fusion peut commencer, et donc du temps accordé aux neutrons pour mourir.

Quand le goulot s'ouvre, l'Univers a changé de nature. Sa densité est déjà faible, « comparable à celle de l'air », et seules les réactions à deux corps comptent fields2014pdg. Il faut prendre la mesure de cette image. La fabrique des premiers noyaux n'a rien d'un cœur d'étoile comprimé ; c'est un gaz ténu, très chaud, qui refroidit et se dilate à vue d'œil. Deux noyaux s'y rencontrent assez souvent pour réagir ; trois noyaux au même point, presque jamais. Cette contrainte, anodine en apparence, décidera de l'endroit où la chaîne s'arrête.

Le travail se fait ensuite vite. Les abondances du deutérium, de l'hélium 3, de l'hélium 4 et du lithium 7 sont pour l'essentiel fixées vers 180 secondes fields2014pdg. Les minutes suivantes ne font plus que des retouches, dans un gaz qui s'appauvrit en énergie et en densité, jusqu'à ce que vers vingt minutes la tempéra-

ture et la densité deviennent trop basses pour toute fusion significative wiki-bbn. C'est l'origine de la fenêtre qu'on donne d'ordinaire à la nucléosynthèse primordiale, de 3 à 20 minutes wiki-chrono.

5.3 Le refuge dans l'hélium

Dès que le deutérium survit, il ne reste pas longtemps deutérium. Par une courte série de réactions à deux corps, il est converti en noyaux plus lourds, et la chaîne aboutit au noyau le plus stable de tous ceux qui sont alors accessibles : l'hélium 4, deux protons et deux neutrons fields2014pdg[7]. Presque tous les neutrons survivants finissent dans ce noyau fields2014pdg. Pour eux, le compte à rebours s'arrête : enfermés dans l'hélium, ils ne se désintègrent plus.

Il suffit alors de compter. Prenons seize nucléons, dans le rapport d'un neutron pour sept protons : deux neutrons et quatorze protons. Les deux neutrons s'associent à deux protons pour former un noyau d'hélium. Ce noyau contient quatre nucléons sur seize, soit un quart de la masse, puisque le neutron et le proton pèsent presque exactement le même poids[8]. Les douze protons restants demeurent seuls : ce sont douze noyaux d'hydrogène, qui portent les trois autres quarts de la masse. La fraction de la masse sous forme d'hélium, notée Yp, vaut ainsi environ 0,25 fields2014pdg[9]. C'est tout le calcul, et il répond à la première moitié de la question du chapitre : l'Univers est fait d'hydrogène et d'hélium dans la proportion de trois pour un, en masse, parce qu'un neutron sur huit nucléons avait survécu quand la fusion a commencé, et que chacun de ces neutrons a entraîné un proton avec lui dans l'hélium.

En nombre d'atomes, le tableau est encore plus déséquilibré. Pour un noyau d'hélium, il y a douze noyaux d'hydrogène : l'hélium ne représente qu'environ un atome sur treize, soit à peu près 8 % wiki-bbn[10]. L'écart entre le quart de la masse et le douzième des atomes vient de ce qu'un noyau d'hélium pèse quatre fois plus lourd qu'un noyau d'hydrogène. Plus de neuf atomes sur dix, à la sortie de cette fabrique, sont de l'hydrogène.

Ce résultat a une propriété qui fait sa force : il dépend très peu des taux des réactions nucléaires fields2014pdg. La raison tient à la forme du raisonnement qu'on vient de faire. Les taux de réaction disent à quelle vitesse les neutrons passent du deutérium à l'hélium ; ils ne disent pas où ils finissent. Puisque l'hélium 4 est le cul-de-sac de la chaîne, et que presque tous les neutrons y aboutissent, le résultat final ne dépend que du nombre de neutrons disponibles à l'ouverture du goulot. Une réaction deux fois plus rapide ou deux fois plus lente changerait le chemin, presque pas l'arrivée.

Le nombre de neutrons disponibles, lui, dépend de deux choses : de la température du gel, qui a fixé le rapport de départ à un pour six, et du temps écoulé avant l'ouverture du goulot, pendant lequel les neutrons se sont désintégrés. Le premier facteur engage l'interaction faible et le taux d'expansion ; le second engage la durée de vie du neutron. C'est pourquoi, parmi toutes les grandeurs mesurées en laboratoire qui entrent dans le calcul, celle qui pèse le plus sur l'hélium est la durée de vie du neutron fields2014pdg. Le rapport baryons/photons η, qui déplace un peu l'ouverture du goulot, n'agit sur l'hélium que par ce biais, et faiblement[11].

L'hélium primordial est donc une grandeur d'un genre particulier. Il ne mesure presque rien de la physique nucléaire des trois minutes ; il mesure ce qui s'est passé pendant la première seconde et dans les minutes d'attente, c'est-à-dire la vitesse de l'expansion d'alors et l'horloge du neutron. L'hélium de l'Univers est un recensement des neutrons qui ont survécu, et c'est pour cette raison qu'il servira, plus loin dans ce chapitre, à compter des particules qu'on n'a jamais vues.

5.4 Deux marches manquantes

Une fois l'hélium 4 formé, la suite naturelle serait d'y ajouter une particule de plus : un neutron, un proton, ou un autre noyau d'hélium. Ces trois fusions mèneraient à des noyaux de masse 5 (quatre nucléons plus un) ou de masse 8 (deux fois quatre). Or il n'existe dans la nature aucun noyau stable de masse 5, ni de masse 8 fields2014pdg. Les fusions de l'hélium 4 avec un neutron, avec un proton ou avec un autre hélium 4 ne mènent donc nulle part : le noyau qu'elles formeraient ne tient pas[12]. Dans l'escalier des masses, deux marches manquent, précisément là où la chaîne en aurait le plus besoin, puisque l'hélium 4 est de loin le noyau le plus abondant.

Restent les chemins de traverse : réunir l'hélium 4 non plus avec une particule isolée ou avec un autre hélium 4, mais avec l'un des noyaux intermédiaires plus rares, pour sauter directement à la masse 6 ou 7. Ces réactions existent, mais elles se heurtent à un second obstacle, la barrière coulombienne fields2014pdg. Tous les noyaux portent une charge électrique positive, et deux charges de même signe se repoussent ; pour fusionner, deux noyaux doivent s'approcher assez près pour que la force nucléaire, qui ne porte qu'à très courte distance, l'emporte sur cette répulsion. Plus les noyaux sont chargés, plus la barrière est haute, et plus il faut d'énergie pour la franchir[13]. Dans un gaz qui refroidit de minute en minute, de moins en moins de noyaux ont l'énergie nécessaire. Le goulot a retardé la fusion jusqu'à une époque où l'Univers est déjà trop froid et trop dilué pour la mener loin.

La chaîne s'arrête donc presque entièrement à l'hélium 4, et ne laisse au-delà que des traces. Le deutérium et l'hélium 3 (deux protons et un neutron), les intermédiaires qui n'ont pas été entièrement convertis, subsistent à hauteur de quelques 10^{-5} par rapport à l'hydrogène, quelques atomes pour cent mille. Le lithium 7 (trois protons et quatre neutrons) n'atteint qu'environ 10^{-10}, un atome pour dix milliards fields2014pdg.

Ce lithium a une histoire particulière. Il n'est pas fabriqué, pour l'essentiel, sous sa propre forme. Il naît surtout sous forme de béryllium 7 (quatre protons et trois neutrons), par la réaction notée $^{3}\mathrm{He}(^{4}\mathrm{He},\gamma)^{7}\mathrm{Be}$: un noyau d'hélium 3 capture un noyau d'hélium 4, et le surplus d'énergie s'échappe sous forme d'un photon, noté γ fields2014pdg[14]. Ce béryllium 7 est instable : il se désintègre ensuite en lithium 7 wiki-bbn. Il faut donc se garder de dire que la nucléosynthèse primordiale fabrique les éléments « jusqu'au béryllium » : le béryllium qu'elle produit n'est qu'une forme transitoire du lithium, et l'Univers qui sort de ces minutes ne contient, au-delà des traces de lithium, rien de plus lourd en quantité notable.

Au total, les abondances prédites s'étendent sur neuf ordres de grandeur fields2014pdg. En haut de l'échelle, l'hélium 4, un quart de la masse. Plus bas, le deutérium et l'hélium 3, quelques cent-millièmes de l'hydrogène. Tout en bas, le lithium 7, un dix-milliardième. Qu'un même calcul donne chacun de ces nombres, et que les observations les retrouvent, est le cœur de l'argument de la section suivante.

Vers vingt minutes, la fabrique ferme : la température et la densité sont devenues trop basses pour toute fusion significative wiki-bbn. Le carbone, l'oxygène, le fer devront attendre. Les éléments de masse 12 et plus ne sont pas produits pendant le Big Bang, mais à l'intérieur des étoiles, et la raison tient à la nature de la réaction qui franchit l'obstacle de la masse 8 Kobayashi 2020. Dans une étoile, l'hélium fusionne en carbone par la réaction dite triple alpha : trois noyaux d'hélium donnent un noyau de carbone, en passant par le béryllium 8, le noyau instable de masse 8 wiki-stellarnuc. Cette voie exige qu'un troisième noyau d'hélium arrive pendant la brève existence du béryllium 8 : c'est en pratique une rencontre à trois. Dans le gaz de la vingtième minute, aussi dilué que de l'air et où seules les rencontres à deux comptent, elle n'a aucune chance de se produire à l'échelle requise[15]. Les éléments au-delà du lithium seront forgés dans les premières étoiles et dans leurs explosions, des centaines de millions d'années plus tard Klessen 2023 (→ chap. 9) (→ chap. 12).

5.5 Un calcul sans paramètre libre

Il faut maintenant dire ce qui entre dans le calcul, pour mesurer ce qu'il en sort. Entrent d'abord des grandeurs de laboratoire : l'écart de masse entre neutron et proton, les taux de l'interaction faible, la durée de vie du neutron, les probabilités des réactions nucléaires entre noyaux légers, mesurées dans des accélérateurs. Entre ensuite le nombre d'espèces de particules légères présentes dans le bain, qui fixe le taux d'expansion ; dans le modèle standard, ce sont les photons, les électrons et trois espèces de neutrinos. Entre enfin un seul nombre cosmologique : le rapport baryons/photons η Fields 2020fields2014pdg. Dans le modèle standard, la nucléosynthèse ne dépend que de ce paramètre Fields 2020.

Pendant longtemps, η devait être tiré des abondances elles-mêmes : on ajustait sa valeur pour que le calcul reproduise le deutérium mesuré, puis on vérifiait les autres éléments. La théorie avait ainsi un bouton à régler. Ce n'est plus le cas, parce que le fond diffus cosmologique, la lumière libérée quelque 380 000 ans plus tard (→ chap. 6), mesure η de façon indépendante, par la manière dont les baryons pèsent sur les ondes sonores du plasma primordial Fields 2020. Le satellite Planck donne $\eta = (6{,}104 \pm 0{,}058) \times 10^{-10}$ Fields 2020. Avec cette valeur imposée de l'extérieur, la nucléosynthèse est devenue, selon Brian Fields et ses collègues, « essentiellement une théorie sans paramètre » Fields 2020. Elle ne peut plus s'ajuster ; elle ne peut que tomber juste ou se tromper.

Ses prédictions, pour la valeur de référence adoptée par ces auteurs, sont les suivantes : une fraction de masse d'hélium $Y_p = 0{,}24696$, un rapport deutérium sur hydrogène $D/H = 2{,}559 \times 10^{-5}$, et un rapport lithium 7 sur hydrogène de $4{,}702 \times 10^{-10}$ Fields 2020[16].

5.5.1 Le deutérium, balance des baryons

Le deutérium est le plus sensible des trois à η. C'est un intermédiaire : il se forme, puis il est consommé pour faire de l'hélium. Plus il y a de baryons par photon, plus les noyaux se rencontrent souvent, plus la consommation est complète, et moins il reste de deutérium à la fermeture de la fabrique[17]. Le deutérium restant pèse donc, en creux, la quantité de matière ordinaire.

On le mesure dans des nuages de gaz lointains éclairés par des quasars, des noyaux de galaxies extrêmement lumineux qui servent de lampe de fond : le gaz interposé absorbe une partie de leur lumière, et la signature du deutérium s'y lit à côté de celle de l'hydrogène[18]. Ces nuages sont vus tels qu'ils étaient il y a très longtemps, quand peu d'étoiles avaient eu le temps de transformer leur gaz. La moyenne de onze mesures donne $D/H = (2{,}55 \pm 0{,}03) \times 10^{-5}$ Fields 2020. La prédiction, $2{,}559 \times 10^{-5}$, tombe dans cette marge, à un tiers d'écart-type de la valeur mesurée, et l'accord est de l'ordre de 1 %[19].

La portée de cet accord tient à l'indépendance des deux mesures. L'une lit la chimie laissée par les trois premières minutes, dans des nuages éclairés il y a des milliards d'années ; l'autre lit l'empreinte des baryons sur une lumière émise 380 000 ans après le début, par une physique toute différente, celle des ondes sonores dans un plasma. Les deux donnent la même quantité de matière ordinaire Fields 2020. Cette quantité, fixée par la nucléosynthèse en accord avec Planck, est d'ailleurs trop faible pour rendre compte de toute la matière que révèle la gravité ; c'est l'une des raisons pour lesquelles la matière manquante ne peut pas être faite d'atomes ordinaires cachés Fields 2020(→ chap. 21)[20].

5.5.2 L'hélium, à la troisième décimale

L'hélium primordial se mesure autrement. Les étoiles fabriquent de l'hélium en brûlant leur hydrogène wiki-stellarnuc, si bien que le gaz d'une galaxie en contient d'autant plus que ses étoiles ont travaillé long-

temps[21]. On observe donc les nuages de gaz ionisé des galaxies les plus pauvres en « métaux », le terme par lequel les astronomes désignent tous les éléments plus lourds que l'hélium et qui sert de témoin de l'activité stellaire passée ; puis on extrapole vers une teneur en métaux nulle, celle du gaz primordial. Dans ces mesures, les incertitudes systématiques, celles qui tiennent à la méthode plutôt qu'au nombre d'observations, dominent fields2014pdg.

Fields et ses collègues retiennent Yp = 0,2449 ± 0,0040 Fields 2020. La prédiction, 0,247, en est éloignée de 0,002, la moitié de l'incertitude[22]. Le PDG recommandait en 2014 une valeur voisine, 0,2465 ± 0,0097 fields2014pdg. Le fond diffus mesure lui aussi l'hélium, plus grossièrement, et trouve 0,239 ± 0,013 Fields 2020. Le programme japonais EMPRESS, qui cible des galaxies extrêmement pauvres en métaux, obtient en 2025 une valeur plus basse : Yp = 0,2402 ± 0,0040 Yanagisawa 2025. L'écart à la prédiction atteint alors 0,007, soit un peu moins de deux fois l'incertitude[23]. Ce qui oppose ces mesures est donc la troisième décimale ; toutes placent l'hélium primordial entre 24 et 25 % de la masse, et le « quart » de l'arithmétique des seize nucléons n'est en cause dans aucune.

5.5.3 L'hélium compte les neutrinos

Parce qu'il enregistre la vitesse de l'expansion pendant la première seconde, l'hélium fait plus que confirmer le calcul : il compte des particules. Le chapitre précédent a décrit le mécanisme (→ chap. 4). Chaque espèce de particule légère présente dans le bain ajoute sa part à la densité d'énergie ; dans un univers dominé par le rayonnement, une densité plus grande signifie une expansion plus rapide ; le gel des conversions entre neutrons et protons survient alors plus tôt, à plus haute température, et il reste plus de neutrons, donc plus d'hélium. Chaque espèce supplémentaire de particule relativiste augmente Yp d'environ 0,013 fields2014pdg, trois fois l'incertitude de la mesure retenue par Fields et ses collègues.

La combinaison de la nucléosynthèse et du fond diffus donne pour le nombre d'espèces de neutrinos Nν = 2,86 ± 0,15 Fields 2020, compatible avec les trois familles connues, et incompatible avec une quatrième famille de neutrinos légers, qui se situerait à plus de sept fois l'incertitude (→ chap. 4). La valeur attendue dans le modèle standard est 3,04, plutôt que 3, à cause d'un léger chauffage des neutrinos fields2014pdg. Un calcul fait pour des noyaux d'atomes compte ainsi des particules que personne n'a jamais captées dans leur état fossile.

5.5.4 Pourquoi c'est la prédiction la plus sûre

La seconde moitié de la question du chapitre trouve ici sa réponse. La nucléosynthèse primordiale repose sur une physique mesurée en laboratoire, celle des noyaux légers et de l'interaction faible, appliquée à un univers dont la température et la densité sont connues à chaque instant par le modèle d'expansion. Son unique paramètre cosmologique est mesuré par ailleurs, par une méthode sans rapport. Elle produit plusieurs nombres indépendants, qui s'étendent sur neuf ordres de grandeur, et chacun d'eux se mesure dans un objet différent : l'hélium dans des galaxies naines, le deutérium devant des quasars, le lithium dans de vieilles étoiles. Le deutérium tombe juste à 1 % près ; l'hélium, à quelques millièmes près. Aucune autre prédiction de la cosmologie ne réunit une physique aussi éprouvée, aussi peu de liberté et autant de vérifications croisées. Le PDG, qui résume cet état des lieux, parle d'une concordance « remarquable » fields2014pdg. Le même texte ajoute aussitôt une réserve, qui porte sur un seul élément.

5.6 La fausse note du lithium

Le lithium primordial ne se mesure pas dans le gaz lointain, mais dans les étoiles, et dans des étoiles bien choisies : les vieilles étoiles pauvres en métaux du halo de notre Galaxie, le vaste nuage d'étoiles anciennes qui entoure son disque. Leur pauvreté en métaux signale qu'elles sont nées d'un gaz presque primordial, avant que les générations d'étoiles ne l'aient enrichi. Les astronomes mesurent cette pauvreté par la notation [Fe/H], le logarithme de la teneur en fer rapportée à celle du Soleil : [Fe/H] = −2 désigne une étoile cent fois plus pauvre en fer que le Soleil[24].

Pour les étoiles dont la métallicité est comprise entre −2,7 et −1,5 environ, plus de cent étoiles au total, l'abondance de lithium est uniforme, avec peu de dispersion : c'est le « plateau de Spite » Fields 2020. Cette uniformité ressemble à la signature d'une valeur de départ commune, que les étoiles auraient héritée du gaz primordial. Mais sa valeur, Li/H = (1,6 ± 0,3) × 10^{-10}, est très en dessous de la prédiction, 4,70 × 10^{-10} Fields 2020. Le facteur est d'environ trois[25]. Selon les estimations, on parle d'un facteur 2 à 4 wiki-bbn, ou de quatre fois Howk 2012. Les analyses des atmosphères stellaires donnent des valeurs de Li/H comprises entre 1,7 et 2,2 × 10^{-10} selon la méthode fields2014pdg, et aucune n'approche la prédiction ; le PDG signalait dès 2014 un désaccord dépassant cinq écarts-types selon l'analyse retenue fields2014pdg.

5.6.1 Un écart qu'aucun réglage ne rattrape

On pourrait croire que ce désaccord se règle en changeant la valeur de η. Le lithium prédit augmente avec η, à peu près comme η à la puissance 2,1 autour de la valeur de référence Fields 2020. Pour le ramener au niveau du plateau, il faudrait un η environ 1,7 fois plus petit que celui de Planck, soit un écart de plusieurs dizaines de fois l'incertitude de la mesure du fond diffus[26]. Surtout, cette valeur de η serait incompatible avec celle, très précise, que donne le deutérium, et avec celle de l'hélium fields2014pdg. Le lithium ne peut pas être accordé sans désaccorder le reste. Et comme le deutérium est mesuré de plus en plus finement, la marge se resserre : le problème du lithium « demeure, et est même plus aigu » Fields 2020.

Une complication s'ajoute du côté des étoiles elles-mêmes. Sous une métallicité de −2,7, le lithium des étoiles cesse d'être uniforme et se disperse fortement ; on parle de la « fonte » du plateau. Certaines étoiles détruisent donc bien leur lithium Fields 2020, et deux naines extrêmement pauvres en métaux n'en montrent même aucune trace détectable fields2014pdg. Mais dans cette zone non plus, aucune étoile ne dépasse le plateau Fields 2020 : aucune ne remonte vers la valeur prédite. Trois familles d'explications sont sur la table : une erreur de physique nucléaire ou de mesure, une destruction dans les étoiles, ou une physique nouvelle pendant la nucléosynthèse fields2014pdg. Leur état est très inégal.

5.6.2 La physique nucléaire, presque disculpée

Pour produire moins de lithium, il faudrait détruire davantage de béryllium 7 pendant la nucléosynthèse, puisque c'est sous cette forme que naît l'essentiel du lithium. La piste la plus directe est donc une réaction de destruction du béryllium 7 dont la probabilité aurait été sous-estimée. Les recherches expérimentales ont fermé les cas les plus prometteurs, ce qui rend un « correctif nucléaire » de plus en plus improbable fields2014pdg. En 2016, l'expérience n_TOF du CERN a mesuré pour la première fois la réaction ^{7}Be(n,α)^{4}He, où un neutron casse un béryllium 7 en deux noyaux d'hélium, sur une large gamme d'énergies. Le résultat indique un rôle mineur de cette réaction, « laissant le problème du lithium cosmologique non résolu » Barbagallo 2016. Les tables de sensibilité le confirment : cette voie de destruction, et une autre qui fait intervenir le deutérium, notée ^{7}Be(d,p), ne pèsent presque rien sur le lithium prédit Fields 2020.

Reste, sur le versant des mesures, la difficulté d'interpréter la lumière des étoiles. Pour en tirer une abondance, il faut modéliser leur atmosphère, et le résultat dépend de la manière d'estimer leur température Fields 2020. Mais la dispersion des analyses, de 1,7 à 2,2 × 10^{-10}, reste loin du facteur trois à combler fields2014pdg.

5.6.3 La destruction dans les étoiles, la piste la plus suivie

Une étoile vit des milliards d'années, et le lithium est un noyau fragile. Plusieurs mécanismes peuvent le soustraire à la surface, la seule partie de l'étoile qu'on observe : la diffusion, le mélange induit par la rotation, la destruction avant que l'étoile ne s'installe dans sa phase stable de combustion de l'hydrogène fields2014pdg. En 2014, le PDG jugeait que ces mécanismes « se produisent certainement », mais qu'ils exigent des réglages ad hoc pour expliquer tout le déficit, et que les modèles plafonnaient alors la destruction à un facteur d'environ 1,8 fields2014pdg, insuffisant pour un facteur trois.

Dix ans plus tard, l'astronome Andreas Korn fait un bilan plus favorable. Des indices indépendants s'accumulent, écrit-il en 2024, et indiquent que les étoiles « pourraient très bien être entièrement responsables » de l'abaissement de leur lithium de surface, par des mécanismes de transport d'éléments à l'intérieur de l'étoile regroupés sous le nom de diffusion atomique Korn 2024. Mais l'effet est modéré par un mélange aux frontières de la zone convective, la région où la matière de l'étoile est brassée, et les modèles ne savent pas prédire ce mélange. Un tableau pleinement quantitatif manque donc encore Korn 2024. Ce qui départagerait est précisément là : un modèle du mélange qui prédirait, sans ajustement étoile par étoile, un abaissement d'un facteur trois uniforme sur tout le plateau.

Un contre-témoin vient d'ailleurs. Le gaz interstellaire ne détruit pas son lithium comme le fait l'intérieur d'une étoile. Dans le Petit Nuage de Magellan, une galaxie voisine dont la métallicité vaut le quart de celle du Soleil, le lithium du gaz est « presque égal aux prédictions » de la nucléosynthèse Howk 2012. Pour réconcilier cette mesure avec la nucléosynthèse standard et le plateau de Spite, il faudrait une destruction stellaire « extrêmement ajustée » selon la métallicité ; la mesure est aussi compatible avec une nucléosynthèse non standard Howk 2012. Le témoin est toutefois brouillé : ce gaz a déjà été enrichi en lithium par des novae, des explosions à la surface de naines blanches dans des systèmes doubles, dont la contribution pèse sur l'interprétation Izzo 2022[27].

5.6.4 Une physique nouvelle, très contrainte

La troisième famille d'explications modifie la nucléosynthèse elle-même. Dans une première classe de modèles, des particules inconnues se désintègrent pendant la fabrique et libèrent des neutrons ; ceux-ci convertissent le béryllium 7 en lithium 7, plus facile à détruire. Mais ces mêmes neutrons fabriquent du deutérium, d'où une tension entre baisser le lithium et respecter le deutérium fields2014pdg. Une autre classe suppose que les constantes fondamentales avaient alors des valeurs un peu différentes, par exemple l'énergie de liaison du deutérium fields2014pdg.

La précision du deutérium mesuré « contraint désormais fortement ces tentatives » Ganguly 2026. Les modèles récents deviennent en conséquence des scénarios à plusieurs étages. Sandip Ganguly et ses collègues proposent en 2026 deux particules hypothétiques qui se désintègrent à deux époques successives, la seconde corrigeant l'excès de deutérium laissé par la première Ganguly 2026. Ce degré de construction est en lui-même une information : aucune solution simple ne passe entre le lithium et le deutérium.

5.6.5 Et s'il n'y avait pas de problème ?

Une position isolée conteste l'existence même du désaccord. En 2025, Oswaldo Miranda publie un modèle d'évolution chimique qui couple la formation progressive des structures aux rendements des premières générations d'étoiles. Le plateau de Spite y apparaît naturellement, à un niveau d'environ $1{,}81 \times 10^{-10}$, et deviendrait une « signature observationnelle » de la formation des toutes premières étoiles Miranda 2025. C'est l'affirmation d'un seul auteur, qui n'est pas reprise par la communauté à ce stade, et qui s'appuie sur des étoiles, celles de la première génération, qu'on n'a jamais observées directement Klessen 2023 (→ chap. 9).

Le bilan tient en deux constats qu'il faut garder ensemble. Le lithium ne réfute pas la nucléosynthèse primordiale : le deutérium et l'hélium, mesurés dans des objets sans rapport, concordent avec une précision que le lithium ne peut pas entamer, et la piste la plus suivie, celle des étoiles, n'exige aucune physique nouvelle. Mais le problème n'est pas résolu : la piste stellaire n'a pas encore son calcul, et le PDG le rangeait en 2014 parmi les problèmes « non résolus » fields2014pdg.

5.7 La frontière de l'établi

La revue du Particle Data Group, la référence des physiciens des particules, donne à ces vingt minutes un statut précis. Faute de « modèles standard » pour la baryogenèse et pour l'inflation, écrivent ses auteurs, la nucléosynthèse primordiale « marque toujours la frontière entre l'établi et le spéculatif dans la cosmologie du Big Bang » fields2014pdg. En deçà de la frontière, la soupe de particules, la brisure de la symétrie électrofaible et la liaison des quarks en protons et en neutrons relèvent d'une physique testée en accélérateur, mais n'ont laissé aucune relique observable : « aucune relique observable de ces époques n'a été identifiée, ni théoriquement ni observationnellement » fields2014pdg (→ chap. 4). Avec la nucléosynthèse, on dispose d'une microphysique bien établie, on extrapole jusqu'à une seconde environ, et l'on prédit des abondances qui s'étendent sur neuf ordres de grandeur, en accord avec l'observation à l'exception du lithium fields2014pdg.

La frontière passe donc là où l'Univers a laissé, pour la première fois, un produit qu'on peut peser. Tout ce qui précède se reconstruit par la théorie et se vérifie par ses conséquences ; les abondances de la nucléosynthèse, elles, sont là, dans le gaz des galaxies naines, dans les nuages qui absorbent la lumière des quasars, dans l'atmosphère des vieilles étoiles. Et ce produit n'a pas disparu. Les protons restés seuls vers la vingtième minute sont les noyaux d'hydrogène du gaz d'où naîtront toutes les étoiles, et, bien plus tard, ceux de l'eau[28].

La durée de l'épisode est dérisoire. Si l'on ramène les 13,8 milliards d'années de l'histoire cosmique à une seule année, la nucléosynthèse primordiale est achevée moins d'une milliseconde après minuit, le 1er janvier[29]. En ce rien de temps, la matière ordinaire de l'Univers a reçu la composition qu'elle gardera, pour l'essentiel, pendant des centaines de millions d'années : trois quarts d'hydrogène, un quart d'hélium, des traces de deutérium, d'hélium 3 et de lithium wiki-chrono. Les étoiles ne changeront ce mélange que lentement, et par petites touches, en y ajoutant les éléments lourds dont nous sommes faits (→ chap. 12).

Les noyaux sont faits, mais les atomes pas encore. L'Univers de la vingtième minute est trop chaud pour qu'un électron reste attaché à un noyau ; les électrons circulent librement, et la lumière rebondit sans cesse sur eux, si bien qu'elle ne peut parcourir aucune distance en ligne droite. Il faudra attendre environ 380 000 ans, et une température de 3 000 K, pour que les électrons se lient aux noyaux et que la lumière se libère wiki-chronoesa2013planck. C'est cette lumière qui, captée aujourd'hui, a donné la mesure de η grâce à laquelle ce chapitre a pu vérifier ses trois minutes (→ chap. 6).

5.8 Ce qu'on ne sait pas

On ne sait pas d'où vient le déficit de lithium. C'est la seule inconnue sérieuse du chapitre, et son degré d'incertitude a évolué. La physique nucléaire est presque disculpée par les mesures de n_TOF et les tables de sensibilité Barbagallo 2016Fields 2020. Ce qui oppose les deux pistes restantes est l'endroit où l'on place la destruction : dans les étoiles, après coup, ou pendant la nucléosynthèse, par une physique nouvelle. La piste stellaire a pour elle l'accumulation d'indices résumée par Korn et le fait qu'elle n'invente rien ; il lui manque un modèle quantitatif du mélange à la frontière de la zone convective Korn 2024. La piste de la physique nouvelle doit franchir l'obstacle du deutérium, et n'y parvient qu'au prix de scénarios à plusieurs étages Ganguly 2026. Ce qui départagerait les deux serait, d'un côté, un modèle stellaire qui reproduise le plateau sans ajustement ; de l'autre, une mesure du lithium dans un gaz qui n'a été ni traité par des étoiles ni enrichi par des novae, ce que le Petit Nuage de Magellan n'offre pas tout à fait Howk 2012Izzo 2022.

On ne sait pas la troisième décimale de l'hélium primordial. Les mesures se répartissent aujourd'hui entre 0,240 et 0,245 Fields 2020Yanagisawa 2025. Si la valeur basse d'EMPRESS se confirmait, elle s'écarterait de la prédiction de près de deux fois l'incertitude, et ses auteurs y voient l'indice possible d'une « asymétrie leptonique », un léger excès de neutrinos sur les antineutrinos dans la soupe Yanagisawa 2025. C'est une piste, pas un résultat. Comme les incertitudes de ces mesures sont dominées par la méthode fields2014pdg, ce qui trancherait n'est pas une observation de plus, mais la convergence de méthodes différentes sur les mêmes galaxies.

On ne connaît pas la durée de vie du neutron avec toute la précision voulue, alors qu'elle est le paramètre de laboratoire qui pèse le plus sur l'hélium fields2014pdg. Un écart entre les mesures faites sur des neutrons piégés et celles faites sur des faisceaux de neutrons est connu, mais il n'est pas documenté dans les sources de ce livre, et son effet sur la prédiction de l'hélium reste à chiffrer ici.

On attend enfin une mesure plus fine du nombre d'espèces de particules relativistes. Le futur observatoire du fond diffus CMB-S4 vise une précision de 0,03, assez pour détecter la correction de 0,045 attendue dans le modèle standard Fields 2020. Ce serait la première fois que le décompte des neutrinos fossiles verrait, au-delà du chiffre 3, le détail de la manière dont ils ont quitté la soupe (→ chap. 4).

5.9 Ce que ce chapitre démontre

Entre la première seconde et la vingtième minute, l'Univers transforme un gaz de protons et de neutrons en un mélange qui fait, en masse, environ 75 % d'hydrogène et 25 % d'hélium 4, avec des traces de deutérium, d'hélium 3 et de lithium wiki-chronofields2014pdg. Le mécanisme tient en quelques étapes. Au gel, vers une seconde, il reste un neutron pour six protons ; les neutrons libres, qui vivent environ quinze minutes, se désintègrent pendant l'attente, et le rapport tombe à un pour sept fields2014pdgwiki-bbn. L'attente dure environ trois minutes parce que les photons, un milliard par baryon, cassent le deutérium jusqu'à ce que la température descende vers 0,1 MeV, bien au-dessous de son énergie de liaison de 2,23 MeV fields2014pdg. Quand le goulot s'ouvre, presque tous les neutrons se réfugient dans l'hélium 4, et l'arithmétique de seize nucléons donne un quart de la masse, soit environ un atome sur treize fields2014pdgwiki-bbn.

La chaîne s'arrête parce qu'il n'existe aucun noyau stable de masse 5 ou 8, et que les barrières électriques entre noyaux chargés freinent le reste dans un gaz aussi dilué que l'air, où seules comptent les rencontres à deux fields2014pdg. Le lithium 7 naît surtout sous forme de béryllium 7 ; tout ce qui est plus lourd attendra les étoiles fields2014pdgKobayashi 2020.

Ce calcul est la prédiction la plus sûre de la cosmologie parce qu'il n'a plus de paramètre libre : le seul nombre cosmologique qu'il demande, le rapport baryons/photons, est mesuré indépendamment par le fond diffus Fields 2020. Le deutérium prédit, 2,559 × 10^{-5}, coïncide à 1 % près avec le deutérium mesuré ; l'hélium tombe juste à quelques millièmes près ; et l'hélium, qui enregistre la vitesse de l'expansion, compte 2,86 ± 0,15 espèces de neutrinos, compatible avec trois Fields 2020. Seul le lithium, trois fois trop rare dans les vieilles étoiles, ne concorde pas ; la physique nucléaire est presque disculpée, la destruction dans les étoiles est la piste la plus suivie sans être encore chiffrée, et une physique nouvelle est très contrainte par le deutérium Barbagallo 2016Korn 2024Ganguly 2026.

C'est pourquoi la nucléosynthèse marque, selon le PDG, la frontière entre l'établi et le spéculatif fields2014pdg. En moins d'une milliseconde de l'année cosmique, l'Univers a pris sa matière première, et il l'a laissée dans un état où on peut encore la peser. Il lui reste à devenir transparent.

Notes

1. Le noyau de l'hydrogène ordinaire est un proton seul : c'est une définition, rappelée pour le lecteur. Les fiches parlent de « protons » pour les douze nucléons restés seuls dans l'arithmétique de l'hélium, qu'elles identifient aux noyaux d'hydrogène (fiche nucleosynthese-primordiale, section 4). ↩

2. Que le neutron cesse de se désintégrer une fois lié dans un noyau stable est la présentation classique ; les fiches l'expriment par l'image du « refuge » dans l'hélium (fiche nucleosynthese-primordiale, « Ce que le livre peut en tirer ») sans en donner la justification physique, qui n'est pas documentée ici. ↩

3. Conversion faite pour ce chapitre à partir de l'équivalence 1 MeV ≈ 10^{10} K (Fields et al. 2014) : 0,1 MeV correspond à environ 10^{9} K, et 2,23 MeV à environ 2,6 × 10^{10} K. Le rapport 2,23 / 0,1 ≈ 22 justifie le « vingt fois ». ↩

4. L'étalement des énergies des photons autour de la moyenne (le spectre du rayonnement thermique, dit de Planck) est une présentation classique donnée pour le lecteur ; les sources du chapitre établissent seulement le critère du nombre de photons assez énergiques par baryon (Fields et al. 2014). ↩

5. Calcul d'ordre de grandeur fait pour ce chapitre. Le nombre de photons d'énergie supérieure à B = 2,23 MeV par baryon vaut approximativement (1/η) × e^(−B/T), en négligeant un facteur qui varie lentement. Avec 1/η ≈ 1,6 × 10^{9} (chapitre précédent), ce nombre vaut 1 quand B/T ≈ ln(1,6 × 10^{9}) ≈ 21, soit T ≈ 2,23 / 21 ≈ 0,11 MeV. Le résultat retrouve la valeur de 0,1 MeV donnée par le PDG (Fields et al. 2014) ; il ne prétend pas à plus que l'ordre de grandeur. ↩

6. Conséquence du calcul de la note précédente, tirée pour ce chapitre : si η augmente, ln(1/η) diminue, la température d'ouverture du goulot augmente, et le goulot s'ouvre plus tôt. L'effet est faible, parce que la dépendance passe par un logarithme. ↩

7. Les fiches ne détaillent pas les réactions intermédiaires entre le deutérium et l'hélium 4 (réactions deutérium-deutérium, captures de protons ou de neutrons, rôle du tritium). Le chapitre s'en tient à ce qu'elles établissent : la chaîne passe par le deutérium, se fait par réactions à deux corps, laisse de l'hélium 3 comme résidu, et aboutit à l'hélium 4 (Fields et al. 2014). ↩

8. L'écart de masse entre neutron et proton, Q = 1,293 MeV (Fields et al. 2014), est de l'ordre du dixième de pour cent de la masse d'un nucléon, d'environ un GeV (chapitre précédent, d'après Canetti et al. 2012). Le chapitre néglige aussi la petite masse perdue dans la liaison de l'hélium, qui ne change pas le « quart ». ↩

9. La formule du PDG est Yp = 2(n/p) / (1 + n/p). Avec n/p = 1/7, elle donne (2/7) / (8/7) = 2/8 = 0,25 (Fields et al. 2014). Le facteur 2 traduit le fait que chaque neutron entraîne un proton dans l'hélium. ↩

10. Calcul fait pour ce chapitre : un noyau d'hélium pour douze d'hydrogène donne 1/13 ≈ 7,7 % d'atomes d'hélium, arrondi par Wikipédia à « environ 8 % ». ↩

11. Raisonnement fait pour ce chapitre à partir des notes précédentes : un η plus grand ouvre le goulot un peu plus tôt, laisse moins de temps à la désintégration, et augmente légèrement l'hélium. Les sources établissent la faible dépendance de l'hélium aux taux nucléaires et le poids de la durée de vie du neutron (Fields et al. 2014) ; elles ne sont pas citées pour ce sens de variation, qui n'est pas documenté dans les fiches. ↩

12. Les sources disent qu'il n'existe aucun noyau stable de masse 5 ou 8 (Fields et al. 2014). La brièveté de l'existence des noyaux instables de ces masses n'est pas chiffrée dans les fiches. ↩

13. Définition de la barrière coulombienne donnée pour le lecteur. Les sources établissent seulement que ces barrières freinent les réactions plus lourdes (Fields et al. 2014). ↩

14. Dans la notation A(b,c)D, le noyau A capture la particule b, émet la particule c, et devient le noyau D. γ désigne un photon, n un neutron, p un proton, d un deutérium, α un noyau d'hélium 4. Présentation classique donnée pour le lecteur. ↩

15. Raisonnement fait pour ce chapitre, en combinant trois énoncés des sources : seules les réactions à deux corps comptent pendant la nucléosynthèse (Fields et al. 2014) ; la réaction triple alpha fait trois noyaux d'hélium en carbone par le béryllium 8 (wiki-stellarnuc, fiche des-etoiles-a-nous) ; les éléments de masse 12 et plus ne sont pas produits pendant le Big Bang « à cause de la nature des réactions triple alpha » (Kobayashi et al. 2020). Les conditions de densité et de température qui rendent cette réaction possible dans les étoiles ne sont pas documentées dans les fiches. ↩

16. Les auteurs expriment η en unités de 10^{-10}, notées η_{10}. Leurs prédictions sont données pour $\eta_{10} = 6{,}129$, valeur de référence un peu différente de la mesure de Planck qu'ils citent ($6{,}104 \pm 0{,}058$), et comprise dans la même marge à moins d'un demi-écart-type (Fields et al. 2020). Le chapitre arrondit parfois 0,24696 à 0,247 et $4{,}702 \times 10^{-10}$ à $4{,}70 \times 10^{-10}$. ↩

17. Explication classique de la sensibilité du deutérium à η, donnée pour le lecteur ; elle figure sous cette forme dans le chapitre précédent. Les fiches établissent l'accord entre le deutérium prédit avec la valeur de Planck et le deutérium mesuré (Fields et al. 2020), pas la loi de variation du deutérium avec η, qui reste à documenter. ↩

18. Définition du quasar et principe de la mesure en absorption donnés pour le lecteur ; les fiches disent seulement que le deutérium est mesuré « dans des nuages de gaz lointains éclairés par des quasars » (Fields et al. 2020) et ne détaillent pas la méthode. ↩

19. Calcul fait pour ce chapitre : $(2{,}559 - 2{,}55) / 0{,}03 \approx 0{,}3$ écart-type ; l'incertitude relative de la mesure est $0{,}03 / 2{,}55 \approx 1{,}2$ %. ↩

20. Conclusion tirée de la fiche energie-matiere-noires (section sur le fond diffus et les structures), qui s'appuie sur Fields et al. (2020) et sur les tables de Planck 2018 (planck2018tab, marquées non vérifiées dans cette fiche). Le chapitre 21 développe l'argument. ↩

21. Raisonnement fait pour ce chapitre : les étoiles transforment l'hydrogène en hélium (wiki-stellarnuc), donc un gaz traité par des étoiles contient un surplus d'hélium, d'où la nécessité d'extrapoler à métallicité nulle (Fields et al. 2014). La définition des « métaux » en astronomie est donnée pour le lecteur. ↩

22. Calcul fait pour ce chapitre : $0{,}24696 - 0{,}2449 \approx 0{,}0021$, soit environ la moitié de l'incertitude de 0,0040. ↩

23. Calcul fait pour ce chapitre : $0{,}24696 - 0{,}2402 \approx 0{,}0068$, soit environ 1,7 fois l'incertitude de 0,0040. C'est une lecture simple de l'incertitude publiée, pas une significativité calculée par les auteurs. ↩

24. Définition de la notation [Fe/H] donnée pour le lecteur ; les fiches utilisent la notation sans la définir. Le halo galactique est décrit ici de façon élémentaire ; il est traité ailleurs dans le livre (→ chap. 14). ↩

25. Calcul fait pour ce chapitre : $4{,}70 / 1{,}6 \approx 2{,}9$. Avec les bornes de l'incertitude du plateau, le facteur va de $4{,}70 / 1{,}9 \approx 2{,}5$ à $4{,}70 / 1{,}3 \approx 3{,}6$, ce qui recoupe la fourchette de 2 à 4 donnée par Wikipédia. ↩

26. Calcul fait pour ce chapitre à partir de la loi $^{7}\mathrm{Li/H} = 4{,}702 \times 10^{-10} \times (\eta_{10} / 6{,}129)\,\hat{}\,2{,}094$ (Fields et al. 2020). Ramener le lithium à $1{,}6 \times 10^{-10}$ exige $(\eta_{10} / 6{,}129) = (1{,}6 / 4{,}702)\,\hat{}\,(1/2{,}094) \approx 0{,}60$, soit $\eta_{10} \approx 3{,}7$, contre $6{,}104 \pm 0{,}058$ mesuré par Planck : un écart d'environ quarante fois l'incertitude. Cette loi de puissance est une approximation valable au voisinage de la valeur de référence ; l'extrapoler à un facteur 1,7 ne donne qu'un ordre de grandeur. Le comportement du lithium prédit loin de cette valeur n'est pas documenté dans les fiches. ↩

27. La définition des novae est donnée pour le lecteur ; la fiche nucleosynthese-primordiale dit seulement que le gaz du Petit Nuage de Magellan « a déjà été enrichi en lithium par des novae » (Izzo et al. 2022, qui estiment cet apport à une abondance de l'ordre de $A(\mathrm{Li}) \approx 2{,}6$). ↩

28. Raisonnement fait pour ce chapitre, non énoncé tel quel par les fiches : les étoiles consomment de l'hydrogène (wiki-stellarnuc), et aucune source du livre ne mentionne de processus qui en fabrique en quantité ; l'hydrogène présent aujourd'hui, y compris celui de l'eau, est donc pour l'essentiel l'hydrogène laissé par la nucléosynthèse primordiale. À faire confirmer par une source. ↩

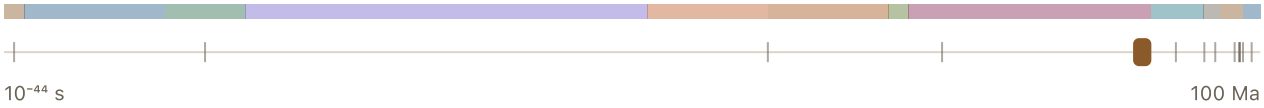
29. Repère donné par la fiche frise-cosmique comme une simple règle de trois, sans source extérieure. Le calcul exact est plus frappant encore : vingt minutes rapportées à 13,8 milliards d'années, puis ramenées à une année, font environ 1 200 / ($1{,}38 \times 10^{10}$) $\approx 9 \times 10^{-8}$ seconde, moins d'un dix-millionième de seconde. L'attribution de l'image de l'« année cosmique » à Carl Sagan n'a pas été vérifiée. ↩

CHAPITRE 6

La première lumière

47 000 à 380 000 ans

brouillon · 7790 mots



6.1 La matière prend la main

Vers la vingtième minute, la fabrique des noyaux a fermé. L'Univers contient désormais, en masse, trois quarts d'hydrogène et un quart d'hélium, avec des traces de deutérium, d'hélium 3 et de lithium field-s2014pdg(→ chap. 5). Ces noyaux baignent au milieu d'électrons libres et d'un nombre énorme de photons, environ un milliard et demi par noyau d'hydrogène ou par nucléon Fields 2020[1]. Les neutrinos, qui ne touchent plus à rien depuis la première seconde, traversent le tout sans s'y arrêter (→ chap. 4). La matière noire est là aussi, et elle ne se mêle pas au reste autrement que par la gravité.

À ce moment, l'énergie de l'Univers est surtout portée par le rayonnement, c'est-à-dire par les photons et par les autres particules qui se déplacent à une vitesse proche de celle de la lumière. La matière, bien que présente, pèse moins que la lumière qui l'entoure. Cette hiérarchie ne dure pas. Vers 47 000 ans, la densité d'énergie de la matière dépasse celle du rayonnement wiki-chrono. Rapporté à une année cosmique, où toute l'histoire de l'Univers tiendrait en douze mois, ce basculement a lieu moins de deux minutes après minuit, le 1er janvier[2].

Le basculement vient de ce que l'expansion dilue ces deux formes d'énergie à des rythmes différents. Quand l'espace s'étire, la matière se dilue simplement parce que le même nombre de particules occupe un volume plus grand. Le rayonnement se dilue de la même manière, mais il perd aussi de l'énergie par un second effet : chaque photon voit sa longueur d'onde étirée avec l'espace, et un photon de plus grande longueur d'onde porte moins d'énergie. Le rayonnement s'affaiblit donc plus vite que la matière, et quel que soit l'écart de départ, la matière finit par l'emporter[3]. La date du croisement dépend seulement du rapport initial entre les deux, que fixent la quantité de matière et le nombre de particules légères.

Cette date a une conséquence physique précise : à partir d'elle, la gravité peut commencer à amplifier les petites inégalités de densité wiki-chrono. Ces inégalités existent depuis bien avant. Le chapitre sur l'inflation a raconté comment des tremblements quantiques, étirés aux dimensions du cosmos, ont laissé partout de minuscules écarts de densité : ici un peu plus de matière, là un peu moins (→ chap. 3)esa2013planck. Tant que le rayonnement domine, ces écarts restent à peu près au même niveau. Quand la matière prend la main, les régions un peu plus denses attirent un peu plus fort, la matière voisine y tombe, et l'écart se creuse[4]. C'est le premier pas d'un processus qui, des centaines de millions d'années plus tard, donnera les premières galaxies (→ chap. 9).

Rien de tout cela ne serait visible pour un observateur de l'époque, même s'il avait existé. L'Univers est un plasma, un gaz dont les électrons ne sont pas attachés aux noyaux. Les photons y diffusent sans cesse sur ces électrons libres : chacun parcourt une courte distance, heurte un électron, repart dans une direction quelconque, en heurte un autre wiki-recombwiki-chrono. Un photon ne garde jamais sa direction assez

longtemps pour porter une image. L'Univers est opaque, à la manière d'un brouillard très dense, où la lumière est partout mais où l'on ne voit rien, parce que chaque rayon a été dévié mille fois avant d'arriver.

6.2 Un brouillard qui vibre

Ce brouillard n'est pas immobile. Deux forces s'y opposent, et leur affrontement le met en vibration.

La première est la gravité. Elle attire la matière vers les régions un peu plus denses. Dans l'Univers d'alors comme aujourd'hui, l'essentiel de la matière est de la matière noire : Planck mesure une densité de matière noire environ cinq fois et demie plus grande que celle de la matière ordinaire planck2018tab[5]. C'est donc surtout la matière noire qui creuse les puits de gravité, et c'est vers ces puits que tombe le reste.

La seconde force est la pression de la lumière. Les photons, par leurs collisions incessantes avec les électrons, sont liés à eux ; les électrons, par l'attraction électrique, restent liés aux noyaux. Noyaux, électrons et photons se comportent ainsi comme un seul fluide[6]. Quand la gravité comprime ce fluide dans une région, les photons s'y entassent, et leur pression, qui croît avec la compression, le repousse. Le fluide se détend, dépasse sa position d'équilibre, retombe sous l'effet de la gravité, est de nouveau repoussé. Une compression suivie d'une détente, répétée, c'est une onde sonore : le plasma primordial est parcouru par des ondes de pression, exactement comme l'air l'est par le son wiki-cmb.

La matière noire ne participe pas à cette danse. Elle n'interagit pas avec la lumière, et la pression des photons n'a donc aucune prise sur elle[7]. Elle reste dans ses puits, qu'elle continue de creuser, pendant que le fluide de matière ordinaire et de lumière oscille au-dessus. La gravité fournit le ressort, la lumière fournit la raideur, et le fluide oscille entre les deux.

L'image de l'instrument de musique est juste, et elle servira dans tout le chapitre. Les ondes sonores du plasma ont toutes démarré au même moment, quand les fluctuations laissées par l'inflation se sont trouvées en place au début de l'Univers chaud ; le chapitre sur l'inflation a expliqué pourquoi ce départ en phase, comme des cordes pincées d'un seul coup, est ce qui rend les pics observables (→ chap. 3). Une onde met un certain temps à accomplir une compression et une détente, et ce temps dépend de sa taille : une petite région oscille vite, une grande lentement. À un instant donné, les ondes de différentes tailles ne sont donc pas au même point de leur cycle. Certaines sont au plus fort de leur compression, d'autres au creux de leur détente, d'autres entre les deux.

Il existe aussi une distance maximale que le son a pu parcourir depuis le début de l'Univers chaud jusqu'au moment où le brouillard se lève. Planck la calcule : environ 144 mégaparsecs, mesurés à l'échelle d'aujourd'hui, soit de l'ordre de 470 millions d'années-lumière planck2018tab[8]. Cette longueur, qu'on appelle l'horizon sonore, est la règle graduée que le chapitre suivant utilisera pour arpenter l'Univers (→ chap. 7). Pour l'instant, il suffit de retenir que le plasma vibre, sur une gamme d'échelles bornée par cet horizon, et que l'état de sa vibration change à chaque instant. Il reste à savoir à quel instant cette vibration sera figée, et pourquoi si tard.

6.3 Pourquoi si tard : le milliard de photons

Pour que le brouillard se lève, il faut que les électrons cessent d'être libres, c'est-à-dire qu'ils se lient aux noyaux pour former des atomes neutres. Un atome neutre n'arrête presque pas la lumière : un photon peut le croiser sans être dévié. Tout dépend donc du moment où l'hydrogène, qui forme l'essentiel des atomes, peut garder son électron.

L'énergie nécessaire pour arracher l'électron d'un atome d'hydrogène vaut 13,6 électronvolts (eV), l'unité d'énergie usuelle à l'échelle des atomes wiki-recomb. On peut la traduire en température : c'est l'énergie typique des photons d'un rayonnement de l'ordre de 10^5 K, environ 150 000 degrés[9]. Un raisonnement naïf dirait donc que les atomes se forment dès que l'Univers descend sous cette température. Or il faut attendre qu'il tombe vers 3 000 K, cinquante fois plus bas wiki-recombwiki-cmb.

La raison est la même que celle qui a retardé la fusion de trois minutes au chapitre précédent (→ chap. 5). La température ne mesure que l'énergie typique des photons ; leurs énergies sont étalées autour de cette valeur, et une petite fraction en porte beaucoup plus[10]. Quand l'Univers est à 10 000 K, les photons capables d'ioniser l'hydrogène ne sont qu'une infime minorité. Mais il y a environ un milliard de photons par baryon wiki-recomb, et une infime minorité d'un milliard reste une foule. Chaque atome qui se forme rencontre presque aussitôt un photon assez énergique pour le défaire. La queue de haute énergie de la distribution des photons suffit ainsi à réioniser les atomes tant que la température ne descend pas vers 3 000 à 4 000 K wiki-recomb.

Ce nombre de photons par baryon est l'inverse d'une grandeur que le livre a déjà rencontrée : le rapport baryons/photons, noté η. Planck le mesure à $\eta = (6{,}104 \pm 0{,}058) \times 10^{-10}$ Fields 2020, soit environ 1,6 milliard de photons par baryon. Le même nombre, né d'un léger excès de la matière sur l'antimatière dans la soupe primordiale (→ chap. 4), décide deux fois du calendrier de l'Univers. Il a retardé la formation du deutérium jusqu'à ce que la température tombe vingt fois sous l'énergie de liaison de ce noyau ; il retarde la formation des atomes jusqu'à ce qu'elle tombe cinquante fois sous l'énergie de liaison de l'hydrogène. Les deux énergies diffèrent d'un facteur cent mille, l'une se compte en millions d'électronvolts, l'autre en électronvolts, mais la logique est identique.

Un calcul d'ordre de grandeur, calqué sur celui du chapitre précédent, retrouve l'essentiel. Les atomes survivent quand le nombre de photons ionisants par baryon passe sous l'unité. Avec 1,6 milliard de photons par baryon, cela arrive quand la température est descendue environ vingt fois sous l'énergie d'ionisation, soit vers 6 000 à 7 000 K[11]. Le calcul grossier tombe à un facteur deux de la valeur réelle ; les facteurs qu'il néglige suffisent à combler l'écart, mais leur détail n'est pas documenté dans les sources de ce livre. L'essentiel est acquis : la recombinaison est tardive parce que la lumière est innombrable, pas parce que l'atome serait fragile.

La recombinaison se produit donc vers 3 000 K, quand l'Univers a environ 380 000 ans, à un décalage vers le rouge $z \approx 1\,100$ wiki-cmbwiki-recomb. Le décalage vers le rouge mesure de combien l'Univers s'est étiré depuis : $1 + z$ est le rapport entre la taille de l'Univers aujourd'hui et sa taille au moment où la lumière est partie Hogg 1999. À $z \approx 1\,100$, les distances entre les amas de matière étaient environ 1 100 fois plus petites qu'aujourd'hui.

Le mot « recombinaison » est d'ailleurs mal choisi, et il faut le prendre pour un nom propre : électrons et noyaux n'avaient jamais été combinés auparavant. C'est la première fois, dans l'histoire de l'Univers, que des atomes neutres existent en quantité[12].

6.4 Le brouillard se lève

La recombinaison n'a pas lieu en un instant. À mesure que la température baisse, la proportion d'atomes neutres augmente progressivement, et la lumière trouve de moins en moins d'électrons libres sur son chemin.

Planck situe la « surface de dernière diffusion » à $z = 1089{,}92 \pm 0{,}25$ planck2018tab. *Cette surface est définie par une grandeur appelée profondeur optique, qui compte, pour un photon, le nombre moyen de diffusions qui lui restent à subir d'un instant donné jusqu'à aujourd'hui. Quand elle vaut 1, un photon n'a plus, en moyenne, qu'une seule diffusion devant lui : au-delà, il file en ligne droite. C'est ce seuil que Planck place à* $z \approx 1\,090$ planck2018tab. Mais à ce moment l'Univers n'est pas encore entièrement neutre : il ne l'est à 90 % que vers $z \approx 1\,070$ wiki-recomb. Entre les deux, l'Univers s'est encore étiré de près de 2 %, et le processus s'étend de part et d'autre bien au-delà de cet intervalle.

Deux processus distincts se superposent ici, très proches dans le temps wiki-recomb. La recombinaison est un événement de la matière : des électrons se lient à des noyaux et forment des atomes. Le découplage est un événement de la lumière : les photons cessent d'être diffusés et voyagent librement. Le second découle du premier, puisque ce sont les électrons libres qui arrêtent la lumière, mais ils ne coïncident pas. Il suffit qu'il reste trop peu d'électrons libres pour qu'un photon en rencontre un avant que l'expansion ne les éloigne encore, et le découplage peut survenir alors que la recombinaison n'est pas achevée[13].

Cette progressivité se lit dans les dates. Le tableau de référence du Particle Data Group, calculé avec les paramètres de Planck, donne un âge de 372 900 ans pour $z = 1\,089{,}9$ pdg2019-astro. Les synthèses usuelles parlent de 378 000 ou 379 000 ans wiki-recombwiki-cmb, l'Agence spatiale européenne de 380 000 ans esa2013planck. Ces chiffres ne se contredisent pas. Ils désignent des moments un peu différents d'une même transition, et ils sont tous calculés dans le modèle cosmologique standard ; le chiffre rond de 380 000 ans résume une fenêtre, pas un instant.

Quand le brouillard se lève, chaque photon part dans la direction de sa dernière diffusion et ne la quitte plus. Il emporte avec lui l'état du plasma à l'endroit et au moment où il l'a quitté. Là où le plasma était comprimé, il était un peu plus chaud ; là où il était détendu, un peu plus froid ; et le puits de gravité d'où le photon doit s'extraire modifie encore son énergie[14]. Les ondes sonores cessent au même moment : privé de la pression des photons, le fluide de matière ordinaire n'a plus de raideur, et les oscillations s'arrêtent là où elles en étaient. La lumière libérée garde la photographie de cet arrêt : les ondes y sont figées, chacune au point de son cycle où la libération l'a surprise.

La surface de dernière diffusion nous entoure comme une sphère. Nous recevons aujourd'hui les photons partis de tous ses points à la même époque, et qui ont voyagé exactement le temps nécessaire pour nous atteindre maintenant. La matière qui a émis cette lumière se trouve aujourd'hui, en tenant compte de l'expansion, à environ 13,9 milliards de parsecs, soit environ 45 milliards d'années-lumière planck2018tab[15]. Au moment de l'émission, elle n'était qu'à une quarantaine de millions d'années-lumière de la matière qui allait devenir notre Galaxie[15].

Il faut en tirer la conséquence pour tout ce qui précède. Aucune lumière ne peut nous parvenir d'avant 380 000 ans, parce que l'Univers était opaque : tout photon émis plus tôt a été diffusé, redirigé, brassé, jusqu'à la dernière diffusion wiki-chrono. Regarder plus loin que la surface de dernière diffusion revient à regarder dans un nuage. Sur l'axe de ce que nous pouvons voir, 380 000 ans est une limite de l'observation, et non une limite de l'histoire : c'est un mur, pas un début. Tout ce que les chapitres précédents ont raconté s'est déroulé derrière ce mur, et n'en est connu que par des traces indirectes, les abondances des noyaux légers ou l'empreinte que les fluctuations primordiales ont laissée dans la lumière elle-même.

Ce mur n'est opaque que pour la lumière. Les neutrinos, découplés dès la première seconde, forment un fond fossile qui a traversé le plasma sans s'y arrêter (→ chap. 4) ; il n'est détecté qu'indirectement, par ses effets sur la nucléosynthèse et sur le fond diffus Fields 2020. Les ondes gravitationnelles primordiales que l'inflation devrait avoir produites traverseraient elles aussi le brouillard ; elles n'ont pas été détectées

(→ chap. 3). Voir derrière le mur est donc possible en principe, avec d'autres messagers que la lumière, et hors de portée à ce jour.

6.5 De 3 000 K à 2,7 K

Les photons libérés vers 380 000 ans voyagent depuis sans être arrêtés. Mais l'espace qu'ils traversent continue de s'étirer, et leur longueur d'onde s'étire avec lui. Depuis la recombinaison, l'Univers s'est étiré d'un facteur d'environ 1 100 : c'est le sens même du décalage $z \approx 1\,100$ Hogg 1999. La température d'un rayonnement de ce type baisse dans la même proportion que l'étirement[16]. Divisons 3 000 K par 1 091, la valeur de $1 + z^*$: on obtient environ 2,7 K. La lumière émise à la température d'un corps incandescent nous arrive aujourd'hui à moins de trois degrés au-dessus du zéro absolu.

À cette température, le rayonnement ne se voit plus : il est dans le domaine des micro-ondes, et il vient de toutes les directions du ciel. C'est le fond diffus cosmologique, « la plus ancienne lumière de notre Univers, imprimée dans le ciel quand il n'avait que 380 000 ans » esa2013planck.

Sa température est aujourd'hui connue avec une précision extraordinaire : 2,72548 ± 0,00057 K, d'après la synthèse de l'ensemble des mesures publiée par Dale Fixsen en 2009 Fixsen 2009, soit une incertitude de deux dix-millièmes. Le calcul d'ordre de grandeur, 3 000 divisé par 1 091, tombe à un pour cent de cette valeur[17].

Plus que sa température, c'est la forme de son spectre qui compte, c'est-à-dire la manière dont son énergie se répartit entre les différentes longueurs d'onde. Cette répartition est celle d'un corps noir, le rayonnement qu'émet un corps en équilibre thermique parfait, sans rien réfléchir ni laisser passer. Le fond diffus est « le spectre de corps noir le plus parfait jamais mesuré », et cette perfection signe son origine cosmologique wiki-cmb. Le raisonnement qui relie les deux est le suivant. Un corps noir naît d'un milieu opaque où matière et lumière ont longtemps échangé de l'énergie jusqu'à l'équilibre ; c'est exactement ce qu'était le plasma primordial. L'expansion, ensuite, étire toutes les longueurs d'onde dans la même proportion, ce qui conserve la forme d'un corps noir et n'abaisse que sa température[18]. Aucune source connue dans l'Univers actuel, étoiles, galaxies ou poussières, qui sont des mélanges de corps à des températures différentes, ne produirait un corps noir aussi pur sur tout le ciel.

Ce rayonnement fait aussi office d'horloge. Puisque sa température baisse à mesure que l'Univers s'étend, deux observateurs éloignés qui mesurent la même température du fond diffus vivent à la même époque de l'histoire cosmique ; l'Univers porte ainsi son propre thermomètre, qui donne l'heure partout à la fois pdg2019-astro[19].

Sur l'année cosmique, le fond diffus est émis environ un quart d'heure après minuit, le 1er janvier wiki-chrono[20]. La matière a pris le dessus à peine deux minutes plus tôt. Tout ce que ce livre a raconté jusqu'ici, du seuil jusqu'aux trois minutes, tient dans la première milliseconde de cette année ; tout ce qui suivra, des premières étoiles jusqu'à nous, occupe le reste des douze mois.

6.6 Un bruit dans l'antenne

Ce rayonnement avait été prévu avant d'être trouvé. En 1948, Ralph Alpher et Robert Herman, qui travaillaient sur la formation des éléments dans un Univers primordial chaud, prédisent qu'il doit en rester un rayonnement résiduel, refroidi par l'expansion jusqu'à environ 5 K wiki-cmb. L'ordre de grandeur était juste, à un facteur deux près. Le cheminement de cette prédiction entre 1948 et 1965, et la raison pour laquelle

personne ne s'est mis aussitôt à chercher ce rayonnement, ne sont pas documentés dans les sources de ce livre.

La découverte vient d'ailleurs. À Crawford Hill, près de Holmdel, dans le New Jersey, les laboratoires Bell disposent d'une grande antenne cornet, une antenne en forme de pavillon évasé conçue pour recevoir des signaux très faibles Penzias 1965. Arno Penzias et Robert Wilson l'utilisent pour mesurer, à la fréquence de 4 080 mégahertz, la « température de bruit » de l'antenne : la puissance qu'elle reçoit en l'absence de toute source visée, exprimée comme la température d'un corps qui produirait ce même signal[21]. Ils connaissent les contributions attendues, celle de l'atmosphère, celle de l'antenne elle-même, celle de l'électronique. Or leur mesure dépasse la somme d'environ 3,5 K Penzias 1965. Leur première mesure date du 20 mai 1964 wiki-cmb.

La force du résultat tient à ce que ce bruit en trop résiste à toutes les explications locales. Il est le même dans toutes les directions où l'on pointe l'antenne, il n'est pas polarisé, et il ne varie pas avec les saisons entre juillet 1964 et avril 1965 Penzias 1965. Chacun de ces constats écarte une famille de suspects[22]. Une source terrestre ou atmosphérique dépendrait de la direction, et d'abord de la hauteur au-dessus de l'horizon. Une source liée au Système solaire varierait au fil de l'orbite de la Terre, donc des saisons. Une source dans la Galaxie serait plus forte dans la direction de la Voie lactée. Un défaut de l'instrument aurait peu de chances d'être à la fois isotrope, non polarisé et stable pendant dix mois. Reste une source qui remplit tout le ciel de la même manière, et qui n'a pas changé à l'échelle de l'année : l'Univers lui-même.

L'article qu'ils publient en 1965 porte un titre d'une sobriété d'ingénieur : « Une mesure de l'excès de température d'antenne à 4 080 Mc/s » Penzias 1965. La lecture cosmologique de cet excès, qui en fait le rayonnement prévu par Alpher et Herman, est proposée dans la foulée par d'autres physiciens, dont les sources de ce livre ne documentent pas le travail. Penzias et Wilson reçoivent le prix Nobel de physique en 1978 wiki-cmb.

Le récit tient à ce retournement. La plus vieille lumière de l'Univers entre dans la science comme un défaut, un bruit en trop qu'on cherche à éliminer d'une antenne de télécommunications. Ce qui la distingue d'un parasite, ce n'est pas sa force, mais sa régularité : elle est la même partout, tout le temps. Cette uniformité, qui a permis de l'identifier, pose aussitôt une question. Si le fond diffus porte l'état du plasma d'où sortiront les galaxies, il ne peut pas être parfaitement uniforme. Il doit porter, quelque part, la trace des inégalités de densité.

6.7 Les premières inégalités

Ces inégalités sont minuscules. Le fond diffus est isotrope, c'est-à-dire le même dans toutes les directions, à environ une part sur 25 000 près ; ses variations de température d'une direction à l'autre ont une moyenne quadratique d'un peu plus de 100 millionièmes de degré, notés µK wiki-cmb[23]. Les deux chiffres se recoupent : 2,725 K divisés par 25 000 donnent environ 110 µK. Pour les voir, il faut mesurer des différences de température d'un dix-millième de degré sur un rayonnement qui n'en fait pas trois.

Avant même de les chercher, il faut retirer du ciel une variation bien plus grande, qui ne doit rien à l'Univers primordial. Le ciel micro-onde est un peu plus chaud dans une direction et un peu plus froid dans la direction opposée ; c'est ce qu'on appelle le dipôle. Son amplitude est de 3,36 millièmes de degré pdg2019-astro, une trentaine de fois plus que les fluctuations cherchées. Il vient de notre propre mouvement : le Soleil se déplace à 369,82 ± 0,11 km/s par rapport au fond diffus wiki-cmbpdg2019-astro. Quand on avance dans un bain de rayonnement, celui qui vient de l'avant est comprimé et paraît plus chaud, celui qui vient de l'arrière est étiré et paraît plus froid ; l'effet vaut, en proportion, le rapport de notre vitesse à celle de la

lumière, soit environ un millième, ce qui redonne bien les 3,36 mK mesurés[24]. Le Groupe local de galaxies, pris dans son ensemble, se déplace à 620 ± 15 km/s par rapport au même repère pdg2019-astro. Une fois le dipôle retiré, on obtient le ciel que verrait un observateur immobile par rapport à l'expansion, et c'est dans ce ciel qu'il faut chercher les inégalités primordiales.

Le premier à les trouver est le satellite COBE, de la NASA. Il établit d'abord que le fond diffus a le spectre d'un corps noir, puis il détecte les premières anisotropies, les variations de température d'une direction à l'autre. Les résultats de sa première année, publiés en 1992 par l'équipe de George Smoot, donnent une variation quadratique d'environ 30 ± 5 µK quand le ciel est lissé à l'échelle de 10° Smoot 1992. Ces variations sont compatibles avec le spectre que prévoient les modèles d'inflation, où les fluctuations ont la même amplitude à toutes les échelles Smoot 1992 ; le chapitre sur l'inflation a détaillé ce que cette compatibilité apporte à la théorie (→ chap. 3). L'équipe de COBE reçoit le prix Nobel de physique en 2006 wiki-cmb.

COBE voyait les inégalités, mais pas encore les ondes sonores. La raison est une affaire d'échelle. L'échelle angulaire caractéristique des ondes figées, telle que Planck la mesure, est d'environ 0,6° Planck 2018[25]. Un instrument qui lisse le ciel à 10° mélange dans chacune de ses taches plusieurs centaines de ces motifs, et n'en voit que la moyenne. Les fluctuations que mesure COBE sont celles des très grandes échelles, plus grandes que l'horizon sonore, que le son n'avait pas eu le temps de parcourir avant la libération de la lumière : elles portent les inégalités primordiales telles que l'inflation les a laissées, sans la vibration du plasma. Pour entendre les notes, il fallait une vue plus fine.

6.8 Les notes de l'Univers

Cette vue plus fine arrive avec le satellite WMAP, lancé par la NASA le 30 juin 2001, qui cartographie les anisotropies sur tout le ciel avec une résolution bien meilleure et collecte ses données jusqu'au 19 août 2010 nasa-wmapwiki-cmb. Le satellite européen Planck lui succède ; ses résultats définitifs sont publiés en 2018 Planck 2018. Depuis, les télescopes au sol ACT, au Chili, et SPT, au pôle Sud, ont atteint ensemble la puissance de Planck sur certains paramètres, avec d'autres instruments et sur d'autres portions du ciel Camphuis 2025.

On ne lit pas une telle carte tache par tache. Chaque tache prise isolément est le fruit du hasard, comme une vague sur la mer. Ce qui porte l'information, c'est la statistique de l'ensemble : combien de taches de telle taille, avec quelle amplitude. On calcule donc le spectre de puissance de la carte, c'est-à-dire l'amplitude moyenne des fluctuations en fonction de leur taille angulaire wiki-cmb. L'opération est l'analogue de celle qui décompose un son en fréquences : là où l'oreille entend un accord, l'analyse montre les notes qui le composent et leur intensité.

Le spectre de puissance du fond diffus montre une série de pics wiki-cmb. Ce sont les ondes sonores figées. Chaque pic correspond à une taille d'onde qui, au moment où la lumière s'est libérée, se trouvait à un extrême de son cycle : le premier pic, aux ondes qui avaient eu tout juste le temps de se comprimer une fois ; le deuxième, à celles qui avaient eu le temps de se comprimer puis de se détendre ; le troisième, à celles qui en étaient à leur deuxième compression, et ainsi de suite[26]. Entre les pics, les ondes surprises à mi-chemin, qui laissent peu de contraste. L'instrument avait bien des harmoniques, et la carte les a gardées.

Ces pics avaient été prédits avant d'être observés, et c'est ce qui donne à leur découverte sa portée. Les cosmologistes Wayne Hu et Scott Dodelson écrivent en 2002 que cette découverte « a établi un modèle cosmologique de travail » : un univers fait surtout de matière noire et d'énergie noire, dont les structures sont nées par instabilité gravitationnelle à partir de fluctuations quantiques produites pendant l'inflation Hu 2002.

Chaque pic répond à une question différente wiki-cmb. La taille angulaire du premier pic renseigne sur la courbure de l'Univers. La physique du plasma fixe la taille réelle des ondes ; la géométrie de l'espace que la lumière a traversé fixe la taille apparente sous laquelle nous les voyons. Dans un espace courbe, les rayons lumineux convergent ou divergent en chemin, et le même objet paraît plus grand ou plus petit que dans un espace plat[27]. Comparer la taille réelle et la taille apparente mesure donc la courbure, et les données s'accordent avec un univers plat Hu 2002.

Le rapport entre le premier et le deuxième pic renseigne sur la densité de baryons, c'est-à-dire de matière ordinaire wiki-cmb. Les baryons alourdissent le fluide qui oscille : plus il y en a, plus les compressions, aidées par la gravité, l'emportent sur les détentes, qui la combattent. Or le premier pic correspond à une compression et le deuxième à une détente ; leur rapport pèse donc les baryons[28]. Le troisième pic, enfin, renseigne sur la densité de matière noire wiki-cmb, qui creuse les puits dans lesquels le fluide oscille sans participer à l'oscillation.

Tout cela se résume en un modèle remarquablement économe. Le modèle de base qui décrit la carte ne compte que six paramètres ajustés : la densité de matière ordinaire, la densité de matière noire froide, l'échelle angulaire des ondes sonores, un paramètre qui décrit la manière dont les premières étoiles ont plus tard réionisé une partie du gaz et diffusé à nouveau un peu de cette lumière, et deux paramètres qui décrivent les fluctuations primordiales, leur amplitude et la manière dont elle varie avec l'échelle planck2018-tab[29]. Tout le reste, l'âge, la composition, le taux d'expansion, en est dérivé. Les neuf ans de données de WMAP restent bien ajustés par ce modèle, et réduisent d'un facteur 68 000 le volume des combinaisons de paramètres permises avant la mission Hinshaw 2013.

Les chiffres de Planck donnent la mesure de cette précision. La densité de matière ordinaire, exprimée sous la forme que les cosmologistes appellent densité physique, vaut $0{,}02237 \pm 0{,}00015$; celle de la matière noire, $0{,}1200 \pm 0{,}0012$ planck2018tab. L'une et l'autre sont connues à moins d'un pour cent. L'échelle angulaire des ondes sonores, la grandeur la plus directement lue sur la carte, est mesurée à 0,03 % près, et Planck souligne que ce résultat ne dépend que faiblement du modèle cosmologique Planck 2018.

C'est de la densité de matière ordinaire mesurée par Planck qu'on tire le rapport baryons/photons $\eta = (6{,}104 \pm 0{,}058) \times 10^{-10}$ Fields 2020[30]. Et c'est ici que le chapitre rejoint le précédent. Injectée dans le calcul de la nucléosynthèse, cette valeur prédit un rapport deutérium sur hydrogène de $2{,}559 \times 10^{-5}$; mesuré dans des nuages de gaz lointains éclairés par des quasars, il vaut $(2{,}55 \pm 0{,}03) \times 10^{-5}$ Fields 2020. Deux physiques sans rapport, l'une nucléaire, qui opère pendant les premières minutes, l'autre acoustique, qui opère jusqu'à 380 000 ans, pèsent la même quantité de matière ordinaire et trouvent le même résultat à un pour cent près (→ chap. 5). Aucune des deux n'a été ajustée pour s'accorder avec l'autre.

6.9 Une carte, pas encore un âge

La carte du fond diffus est la mesure la plus solide de ce livre. Son spectre de corps noir est le plus parfait jamais mesuré wiki-cmb ; son échelle angulaire est connue à 0,03 % près Planck 2018 ; trois familles d'instruments, dans l'espace et au sol, la retrouvent indépendamment Camphuis 2025. Ce que l'Univers vibrait vers 380 000 ans est enregistré là, et ne changera plus.

Mais les dates qui scandent ce livre ne se lisent pas directement sur la carte. Il faut distinguer trois étages Planck 2018planck2018tab. Au premier, on mesure : la carte, son spectre de puissance, la taille apparente des ondes. Au deuxième, on calcule la taille réelle de ces ondes, l'horizon sonore d'environ 144 mégaparsecs, avec la physique d'avant la recombinaison, c'est-à-dire avec ce que contenait l'Univers entre le début

du Big Bang chaud et z ≈ 1 090. Au troisième, on déduit l'âge, la composition et le taux d'expansion actuels, en supposant une histoire de l'expansion entre la recombinaison et aujourd'hui, donc un modèle. Planck l'écrit lui-même : ses paramètres de l'Univers tardif sont « inférés » « en supposant la cosmologie ΛCDM de base » Planck 2018.

C'est ce calcul qui donne l'âge de l'Univers. WMAP l'estimait à 13,77 milliards d'années « à un demi-pourcent près » nasa-wmap ; Planck donne aujourd'hui 13,797 ± 0,023 milliards d'années seul, et 13,787 ± 0,020 milliards d'années combiné à d'autres mesures planck2018tab. Ces marges disent la précision du calcul à l'intérieur du modèle. Elles ne disent pas ce qui arriverait si le modèle était faux, et une mesure du taux d'expansion faite autrement, avec des étoiles proches, ne s'accorde pas avec celle que prédit la carte. Le chapitre suivant démonte ce calcul, étage par étage (→ chap. 7).

6.10 Ce qu'on ne sait pas

On ne connaît pas à quelques milliers d'années près la date où la matière prend la main. Les chronologies usuelles donnent 47 000 ans wiki-chrono ; le tableau du Particle Data Group, calculé avec les paramètres de Planck, place l'égalité entre matière et rayonnement à z = 3 402, soit 51 100 ans pdg2019-astro. L'écart, de l'ordre de 10 %, ne change rien au récit, mais sa source n'est pas documentée dans ce livre : jeu de paramètres différent, ou traitement différent des neutrinos, qui comptent dans le rayonnement. Ce qui trancherait est simple : une date donnée avec le jeu de paramètres qui la produit. Il en va de même, à moindre échelle, de la recombinaison, datée entre 372 900 et 380 000 ans selon la source pdg2019-astroesa2013-planck ; là, l'écart tient au moins en partie à ce que la transition est progressive et que chaque source en retient un moment différent.

On ne sait pas si la physique d'avant la recombinaison est complète. C'est la question la plus lourde du chapitre, parce que tout ce que le chapitre suivant tirera de la carte passe par elle. La carte elle-même ne montre aucun signe de physique au-delà du modèle standard : les données de Planck, d'ACT et de SPT, seules, s'y ajustent Camphuis 2025. Mais le taux d'expansion actuel que ce modèle prédit à partir de la carte, 67,19 ± 0,38 km/s par mégaparsec pour la combinaison des trois expériences, s'écarte de plus de six écarts-types de celui qu'on mesure localement avec des étoiles et des supernovas Camphuis 2025, et un écart de 2,8 écarts-types apparaît entre le fond diffus et les mesures du relevé de galaxies DESI Camphuis 2025. Selon Lloyd Knox et Marius Millea, les solutions les plus plausibles accélèrent l'expansion avant la recombinaison, ce qui réduirait l'horizon sonore, et elles sont fortement contraintes par leurs effets sur les ondes sonores et sur la diffusion des photons Knox 2020. Parmi les pistes qui obtiennent une légère préférence, entre deux et trois écarts-types, figurent justement une recombinaison modifiée et une masse de l'électron variable Camphuis 2025 : deux changements qui toucheraient la température et le moment où les atomes se forment, donc le cœur de ce chapitre. Aucune n'atteint le seuil d'une découverte. Si l'une d'elles était juste, la carte resterait la même, mais sa lecture changerait, et avec elle l'âge et le taux d'expansion qu'on en déduit.

On ne sait pas voir derrière le mur. Le fond de neutrinos fossiles, libéré dès la première seconde, n'est connu que par ses effets indirects Fields 2020 ; les ondes gravitationnelles primordiales ne sont pas détectées (→ chap. 3). Tant que ces messagers ne seront pas lus directement, tout ce qui précède 380 000 ans restera connu par ses conséquences, et non par une image. Les futurs instruments du fond diffus, comme CMB-S4, visent justement à mesurer le nombre effectif de neutrinos avec une précision de 0,03 Fields 2020, ce qui revient à peser le fond de neutrinos à travers la lumière.

Enfin, deux points d'histoire restent à consolider. Les textes originaux de Penzias et Wilson (1965) et de Smoot et ses collègues (1992) n'ont été lus, pour ce livre, qu'à travers des résumés Penzias 1965Smoot

1992 ; les chiffres cités concordent avec les synthèses, mais n'ont pas été vérifiés sur la publication. Et l'interprétation cosmologique immédiate de la découverte de 1965, par d'autres physiciens, n'est pas documentée ici.

6.11 Ce que ce chapitre démontre

Vers 47 000 ans, la densité d'énergie de la matière dépasse celle du rayonnement, parce que l'expansion affaiblit la lumière plus vite qu'elle ne dilue la matière ; la gravité peut alors commencer à creuser les inégalités de densité laissées par l'inflation wiki-chrono. L'Univers est encore un plasma opaque, où les photons diffusent sans cesse sur les électrons libres wiki-recomb. Dans ce plasma, la gravité, dominée par la matière noire, comprime les surdensités, et la pression de la lumière les repousse : il en naît des ondes sonores wiki-cmb.

Les électrons ne se lient aux noyaux que vers 3 000 K, bien que l'énergie d'ionisation de l'hydrogène, 13,6 eV, corresponde à une température cinquante fois plus haute. La raison est le nombre des photons, environ un milliard et demi par baryon ($\eta = 6{,}104 \times 10^{-10}$) : leur queue de haute énergie suffit à défaire les atomes tant que la température n'est pas tombée vers 3 000 à 4 000 K wiki-recombFields 2020. La recombinaison et le découplage des photons, deux processus distincts, se font vers 380 000 ans, à $z \approx 1\,100$; Planck place la surface de dernière diffusion à $z^* = 1089{,}92 \pm 0{,}25$, alors que l'Univers n'est neutre à 90 % que vers $z \approx 1\,070$ planck2018tabwiki-recomb. La lumière part alors en ligne droite et emporte les ondes figées. Avant, rien ne peut être vu en lumière : 380 000 ans est un mur de l'observation, pas le début de l'histoire.

Depuis, l'expansion a étiré cette lumière d'un facteur 1 100, de 3 000 K à $2{,}72548 \pm 0{,}00057$ K ; son spectre est le corps noir le plus parfait jamais mesuré, ce qui signe son origine Fixsen 2009wiki-cmb. Prédite vers 5 K par Alpher et Herman en 1948, elle est trouvée en 1964-1965 par Penzias et Wilson comme un excès de bruit de 3,5 K dans une antenne, le même dans toutes les directions, non polarisé, sans variation saisonnière wiki-cmbPenzias 1965. Une fois retiré le dipôle dû à notre mouvement à 369,82 km/s, le ciel est uniforme à une part sur 25 000 ; COBE y détecte les premières inégalités, WMAP et Planck en tirent un spectre de puissance où les pics acoustiques, prédits avant d'être vus, révèlent la courbure, la matière ordinaire et la matière noire wiki-cmbSmoot 1992Hu 2002. Six paramètres suffisent à décrire la carte planck2018tab, et la quantité de matière ordinaire qu'elle donne s'accorde à un pour cent près avec le deutérium des premières minutes Fields 2020.

La plus vieille lumière montre donc un Univers presque uniforme qui vibrait, et elle garde ses notes. On ne peut rien voir avant elle parce qu'avant elle la lumière ne voyageait pas. La carte est une mesure ; l'âge qu'on en tire est un calcul, et c'est ce calcul qu'il faut maintenant examiner.

Notes

1. Calcul fait pour ce chapitre : l'inverse de $\eta = 6{,}104 \times 10^{-10}$ (Fields et al. 2020) vaut environ $1{,}64 \times 10^{9}$. Les sources parlent d'« environ un milliard de photons par baryon » (Wikipédia, « Recombination ») ; le chapitre précédent retient 1,6 milliard. ↩

2. Règle de trois faite pour ce chapitre, sur le modèle de l'année cosmique de la fiche frise-cosmique : 47 000 / 13,8 × 10^{9} × 525 960 minutes (une année) ≈ 1,8 minute. Avec la date du PDG (51 100 ans), on obtient environ 1,9 minute. ↩

3. Explication classique donnée pour le lecteur, non lue sous cette forme dans les fiches, qui établissent seulement la date du croisement (Wikipédia, « Chronology of the universe »). En termes de facteur d'échelle a, la densité de matière décroît comme $1/a^3$ et celle du rayonnement comme $1/a^4$. ↩

4. Les fiches disent qu'à partir de l'égalité la gravité « peut commencer à amplifier » les inégalités (Wikipédia, « Chronology of the universe », via la fiche frise-cosmique). Le fait que les surdensités de matière croissent peu tant que le rayonnement domine est une présentation classique qui n'est pas documentée dans les fiches. ↩

5. Calcul fait pour ce chapitre à partir des tables de Planck 2018 : $\Omega c\, h^2 / \Omega b\, h^2 = 0{,}1200 / 0{,}02237 \approx 5{,}4$. ↩

6. Présentation classique du « fluide photons-baryons », donnée pour le lecteur. Les fiches décrivent le plasma et la vibration (fiche fond-diffus-cosmologique, section 4) sans détailler le couplage entre électrons et noyaux. ↩

7. Que la matière noire n'interagisse pas avec la lumière est sa définition usuelle ; l'argument selon lequel elle ne participe pas aux oscillations est classique mais n'est pas énoncé tel quel dans les fiches, qui disent seulement que la gravité « dominée par la matière noire » comprime les surdensités. ↩

8. Les tables de Planck 2018 donnent $r^* = 144{,}43 \pm 0{,}26$ Mpc, en distance comobile. Conversion faite pour ce chapitre avec 1 parsec ≈ 3,26 années-lumière : 144 Mpc ≈ 470 millions d'années-lumière. La définition de l'horizon sonore comme distance parcourue par le son est la présentation classique ; la fiche fond-diffus-cosmologique l'appelle « taille réelle de l'horizon sonore ». ↩

9. Conversion d'ordre de grandeur faite pour ce chapitre, avec l'équivalence 1 MeV ≈ 10^{10} K utilisée au chapitre précédent (Fields et al. 2014), soit 1 eV ≈ 10^4 K : 13,6 eV ≈ $1{,}4 \times 10^5$ K. La valeur plus exacte, avec 1 eV ≈ 11 600 K (constante de Boltzmann, non citée dans les fiches), donne environ 158 000 K. Le rapport à 3 000 K est d'environ cinquante. ↩

10. L'étalement des énergies des photons autour de leur valeur typique (le spectre de Planck du rayonnement thermique) est une présentation classique donnée pour le lecteur ; la source établit seulement que « la queue de haute énergie » de la distribution suffit à réioniser les atomes (Wikipédia, « Recombination »). ↩

11. Calcul d'ordre de grandeur fait pour ce chapitre, sur le modèle de celui du goulot du deutérium au chapitre précédent. Le nombre de photons d'énergie supérieure à 13,6 eV par baryon vaut approximativement $(1/\eta) \times e\hat{}(-13{,}6\text{ eV} / kT)$, en négligeant des facteurs qui varient lentement. Il vaut 1 quand $13{,}6\text{ eV} / kT \approx \ln(1{,}64 \times 10^9) \approx 21$, soit $kT \approx 0{,}65$ eV, c'est-à-dire environ 6 500 K (7 500 K avec la conversion exacte). La valeur réelle, 3 000 à 4 000 K (Wikipédia, « Recombination »), est deux fois plus basse. Le calcul exact (dit de Saha, puis hors équilibre) n'est pas documenté dans les fiches. ↩

12. Remarque sur le vocabulaire donnée pour le lecteur ; elle n'est pas tirée des fiches, qui emploient le terme sans le discuter. ↩

13. La source établit que recombinaison et découplage sont « des événements distincts fondés sur des processus physiques différents » (Wikipédia, « Recombination »). Le critère donné ici pour le découplage (plus assez d'électrons pour qu'un photon en rencontre un avant que l'expansion ne les éloigne) est une présentation classique, non lue sous cette forme. ↩

14. Les fiches disent que la carte « garde » les ondes figées (fiche fond-diffus-cosmologique, section 4). Le détail de la manière dont compression, détente et puits de gravité se traduisent en écarts de température observés (effets dits de Sachs-Wolfe et Doppler) est plus complexe que ce résumé et n'est pas documenté dans les fiches. ↩

15. Les tables de Planck 2018 donnent pour la distance comobile de la surface de dernière diffusion 13 873 ± 25 Mpc. La conversion en années-lumière (environ 45 milliards) et la distance au moment de l'émission (13 873 Mpc divisés par 1 091, environ 41 millions d'années-lumière) sont des calculs de la fiche temps-cosmique (section 7), repris ici. ↩↩

16. Relation classique (la température du rayonnement varie comme l'inverse du facteur d'échelle), signalée comme « non relue sur une source » dans la fiche temps-cosmique ; la fiche fond-diffus-cosmologique présente la division de 3 000 K par 1 091 comme une « simple vérification d'ordre de grandeur ». ↩

17. Calcul fait pour ce chapitre : 3 000 / 1 091 ≈ 2,75 K, à 0,9 % de 2,7255 K. La valeur de 3 000 K n'étant elle-même qu'approchée, l'accord ne dit rien de plus que la cohérence des ordres de grandeur. ↩

18. Les sources établissent que le spectre est un corps noir quasi parfait et que cela « signe » une origine cosmologique (Wikipédia, « Cosmic microwave background »). Le raisonnement détaillé (milieu opaque à l'équilibre, conservation de la forme par l'expansion, sources astrophysiques mélangeant des températures) est une présentation classique donnée pour le lecteur. ↩

19. Idée développée par la fiche temps-cosmique (section 3, « Le thermomètre du fond diffus »), qui s'appuie sur la température de 2,7255 K donnée par le PDG ; la loi de refroidissement sous-jacente est celle de la note sur le refroidissement. ↩

20. Règle de trois donnée par la fiche frise-cosmique sans source extérieure. Vérification faite pour ce chapitre : 380 000 / $13{,}8 \times 10^9 \times 525\,960$ minutes ≈ 14,5 minutes. L'attribution de l'image de l'année cosmique à Carl Sagan n'a pas été vérifiée. ↩

21. Définition de la température de bruit d'antenne donnée pour le lecteur ; la source dit seulement que Penzias et Wilson mesurent une température de bruit « environ 3,5 K plus élevée que prévu » (Penzias et Wilson 1965, lu dans un résumé). Le lieu (Crawford Hill, Holmdel) et la fréquence (4 080 Mc/s, soit 4,08 GHz) figurent dans la même source. La liste des contributions attendues (atmosphère, antenne, électronique) est une présentation classique non détaillée dans les fiches. ↩

22. Raisonnement fait pour ce chapitre à partir des trois propriétés établies par la source (isotrope, non polarisé, sans variation saisonnière) ; la manière dont Penzias et Wilson ont eux-mêmes éliminé les explications locales n'est pas documentée dans les fiches. ↩

23. La moyenne quadratique (en anglais rms) est la racine carrée de la moyenne des carrés des écarts : elle mesure l'amplitude typique des variations, qu'elles soient positives ou négatives. Définition donnée pour le lecteur. ↩

24. Calcul fait pour ce chapitre : $v/c = 369{,}82 / 299\,792 \approx 1{,}23 \times 10^{-3}$; multiplié par 2,7255 K, cela donne environ 3,36 mK, en accord avec l'amplitude de 3,3621 mK donnée par le PDG. L'explication par l'effet Doppler est classique ; la fiche fond-diffus-cosmologique dit seulement que le dipôle vient de notre mouvement. ↩

25. Planck 2018 donne $100\,\theta = 1{,}0411 \pm 0{,}0003$, θ étant exprimé en radians. Conversion faite pour ce chapitre : 0,010411 radian $\approx 0{,}60°$. Le rapprochement avec le lissage à 10° de COBE, et l'idée que les très grandes échelles vues par COBE n'ont pas été touchées par les oscillations, sont des raisonnements classiques non lus sous cette forme dans les fiches. ↩

26. Correspondance classique entre les pics et les phases d'oscillation (compressions pour les pics impairs, détentes pour les pics pairs), donnée pour le lecteur. Les fiches établissent l'existence des pics et ce que chacun mesure (Wikipédia, « Cosmic microwave background » ; Hu et Dodelson 2002), pas cette correspondance. ↩

27. Explication classique du lien entre taille angulaire du premier pic et courbure, donnée pour le lecteur ; la source dit que « l'échelle angulaire du premier pic détermine la courbure de l'univers » (Wikipédia, « Cosmic microwave background »). La planéité est tirée de Hu et Dodelson (2002), qui parlent d'un univers « à densité critique », ce qui équivaut à un univers plat. ↩

28. Explication classique donnée pour le lecteur (effet de « charge » des baryons sur l'oscillateur). Les fiches établissent seulement que le rapport du premier au deuxième pic renseigne sur la densité de baryons (Wikipédia, « Cosmic microwave background »). La même remarque vaut pour le rôle de la matière noire dans le troisième pic. ↩

29. Les six paramètres des tables de Planck 2018 sont $\Omega_b h^2$, $\Omega_c h^2$, θ, τ (profondeur optique de réionisation), As et ns. La description de τ comme trace de la réionisation par les premières sources est simplifiée ; la réionisation est traitée dans le chapitre 11. ↩

30. Fields et al. (2020) donnent la valeur de η issue de Planck ; le facteur de conversion entre $\Omega_b h^2$ et η n'est pas documenté dans les fiches. ↩

CHAPITRE 7

Un âge calculé

brouillon · 6754 mots

7.1 Un chiffre à quatre décimales

L'Univers a 13,787 milliards d'années, à 20 millions d'années près planck2018tab. La marge représente 0,15 % du total. Rapportée à une vie humaine de quatre-vingts ans, ce serait connaître un âge à six semaines près[1]. Aucune autre date de ce livre, ni celle des premières étoiles ni celle de la réionisation, n'est connue avec cette précision relative.

Le chiffre est aussi remarquablement stable. Le satellite WMAP, dont les données ont été collectées de 2001 à 2010, donnait 13,77 milliards d'années « à un demi-pour-cent près » nasa-wmap. La première carte de Planck, en 2013, donnait 13,82 milliards d'années esa2013planck. L'analyse finale de Planck, publiée en 2018, donne 13,797 ± 0,023 milliards d'années avec le fond diffus seul, et 13,787 ± 0,020 milliards d'années quand on y ajoute les oscillations acoustiques des baryons planck2018tab. Ces oscillations, qu'on abrège en BAO, sont l'empreinte des mêmes ondes sonores primordiales, retrouvée non plus dans la lumière mais dans la répartition des galaxies : une distance privilégiée entre galaxies, détectée pour la première fois en 2005 Eisenstein 2005. En quinze ans et trois instruments, le chiffre a bougé de 50 millions d'années, et toutes ces valeurs tombent dans la fourchette que WMAP annonçait[2].

Cette précision a pourtant une nature particulière, qu'on voit en la comparant à celle d'une autre date du livre. Les plus vieux solides du Système solaire, des inclusions minérales conservées dans certaines météorites, sont datés de 4 567,30 ± 0,16 millions d'années par la méthode plomb-plomb Connelly 2012. Cette méthode lit une horloge : des atomes radioactifs enfermés dans le grain au moment de sa formation se sont désintégrés depuis à un rythme connu, et la proportion de leurs descendants dit combien de temps a passé[3]. L'horloge était dans l'échantillon depuis le début, et elle n'a jamais cessé de tourner.

Pour l'Univers, rien de tel. Aucun échantillon ne date du début de la phase chaude, et ce début lui-même n'est pas un événement observé (→ chap. 1). La plus vieille lumière que nous recevions a été émise vers 380 000 ans, et avant elle l'Univers était opaque (→ chap. 6). L'âge de l'Univers « n'est pas mesuré comme celui d'une roche : il est calculé » dans un modèle wiki-agePlanck 2018. Le chapitre précédent a posé les trois étages de ce calcul : on mesure une carte, on calcule avec la physique d'avant la recombinaison la taille réelle de ce qu'on y voit, on déduit l'âge en supposant une histoire de l'expansion (→ chap. 6). Chaque étage a sa précision propre. Les ± 20 millions d'années appartiennent au dernier, et il faut remonter la chaîne pour savoir ce qu'ils garantissent.

7.2 Premier étage : ce qu'on mesure

Ce que Planck mesure, c'est une carte : la température du fond diffus dans chaque direction du ciel, et la polarisation de cette lumière. De cette carte, on tire le spectre de puissance, qui donne l'amplitude moyenne des fluctuations de température en fonction de leur taille angulaire wiki-cmb. Ce spectre montre une série de pics, qui sont les ondes sonores du plasma primordial figées au moment où la lumière s'est libérée (→ chap. 6).

Le chiffre le plus directement lu sur ce spectre est l'échelle angulaire acoustique, notée θ : *la taille apparente, dans le ciel, de la plus grande onde sonore que le plasma ait pu porter au moment de la recombinaison. Planck la donne sous la forme 100 θ* = 1,0411 ± 0,0003 Planck 2018. L'angle est exprimé en radians ; converti en degrés, il vaut environ 0,6°, un peu plus que la taille apparente de la pleine Lune[4]. La marge relative est de 0,03 % Planck 2018.

Cette précision tient à la manière dont l'angle est lu. On ne mesure pas une tache particulière, mais la position de toute la série des pics, dont l'espacement est fixé par θ*. Chaque pic apporte sa propre estimation du même angle, et chacun est lui-même la moyenne statistique de millions de fluctuations réparties sur le ciel[5]. Surtout, cette lecture ne demande presque rien au modèle cosmologique. Un angle est un fait de géométrie sur la carte ; il ne dit pas encore à quelle distance se trouve ce qu'on voit, ni quelle taille cela avait. Planck le souligne : ce résultat « ne dépend que faiblement du modèle cosmologique » Planck 2018.

Deux autres grandeurs sont presque aussi directes, parce qu'elles fixent la forme des pics plutôt que leur position. La densité de matière ordinaire, sous la forme que les cosmologistes appellent densité physique et notent $\Omega_b h^2$, vaut 0,02237 ± 0,00015 ; celle de la matière noire froide, $\Omega_c h^2$, vaut 0,1200 ± 0,0012 planck2018tab. Le chapitre précédent a expliqué comment le rapport entre les deux premiers pics pèse les baryons et comment le troisième pèse la matière noire (→ chap. 6). Le terme de « densité physique » mérite un mot. La lettre Ω désigne une densité exprimée en fraction d'une densité de référence, la densité dite critique, qui dépend elle-même du taux d'expansion actuel ; le facteur h^2 retire cette dépendance, et $\Omega_b h^2$ est, à une constante près, une densité absolue, une masse par unité de volume[6]. C'est ce que le plasma primordial « sentait » : ses oscillations dépendaient de la quantité réelle de matière qui s'y trouvait, pas de la fraction qu'elle représenterait treize milliards d'années plus tard.

S'y ajoute une dernière mesure, faite par d'autres instruments : la température actuelle du fond diffus, 2,72548 ± 0,00057 K Fixsen 2009. Elle fixe la quantité de lumière que contient l'Univers, donc, en remontant le temps, la densité du rayonnement à chaque époque.

Tout ce qui suit s'appuie sur cet étage : un angle connu à 0,03 %, deux densités absolues connues à environ 1 %, une température connue à deux dix-millièmes près. Aucun de ces chiffres n'est encore une distance, une vitesse d'expansion ou un âge.

7.3 Deuxième étage : ce que calcule la physique d'avant 380 000 ans

Un angle ne devient une distance que si l'on connaît la taille réelle de l'objet. Un arpenteur qui voit un poteau sous un certain angle en déduit sa distance s'il sait que le poteau mesure deux mètres. Pour le fond diffus, l'objet est l'horizon sonore : la distance maximale qu'une onde de pression a pu parcourir dans le plasma depuis le début de la phase chaude jusqu'à la recombinaison. Personne ne peut aller la mesurer. On la calcule.

Le calcul donne r^* = 144,43 ± 0,26 mégaparsecs planck2018tab. Un mégaparsec (Mpc) vaut un million de parsecs, soit environ 3,26 millions d'années-lumière ; 144 Mpc font environ 470 millions d'années-lumière (→ chap. 6). Cette longueur est exprimée en distance comobile, c'est-à-dire ramenée à l'échelle d'aujourd'hui : la distance qui sépare maintenant deux amas de matière qui, à la recombinaison, étaient séparés d'un horizon sonore Hogg 1999wiki-comoving. À l'époque, l'Univers étant environ 1 100 fois moins étiré, elle était 1 100 fois plus courte.

Ce calcul a trois ingrédients[7]. Le premier est la vitesse du son dans le plasma. Elle dépend de la proportion de baryons dans le fluide de photons et de matière ordinaire : plus il y a de baryons, plus le fluide est lourd,

et plus le son y est lent. Le deuxième est la durée pendant laquelle le son a voyagé, du début de la phase chaude à la recombinaison. Elle dépend du rythme de l'expansion à ces époques, et ce rythme est fixé par ce que contenait l'Univers : le rayonnement (photons et neutrinos), la matière ordinaire, la matière noire. Le troisième est le moment de la recombinaison, fixé par la physique atomique : les électrons se lient aux noyaux vers 3 000 K, ce qui, avec la température actuelle mesurée, place la surface de dernière diffusion à $z^* = 1\,089{,}92 \pm 0{,}25$ planck2018tabwiki-recomb.

Chacun de ces ingrédients est nourri par le premier étage. La densité de baryons règle la vitesse du son ; les densités de baryons et de matière noire, avec la température du fond diffus, règlent le rythme de l'expansion ancienne. C'est pourquoi le calcul est aussi précis. Mais il suppose aussi que la liste des ingrédients est complète : que le plasma d'avant 380 000 ans ne contenait rien d'autre que ce que le modèle y met. Cette hypothèse ne se voit pas dans la marge de ± 0,26 Mpc, et c'est par elle que le calcul pourrait céder.

Le rapport des deux étages donne une distance. En divisant la taille réelle r *par la taille apparente* θ, on obtient la distance comobile de la surface de dernière diffusion : 13,873 ± 0,025 gigaparsecs planck2018tab, soit environ 45 milliards d'années-lumière (→ chap. 6). La division se refait à la main : 144,43 Mpc divisés par 0,010411 radian donnent 13 873 Mpc[8].

La marge de cette distance est instructive. Elle vaut 0,18 %, six fois plus que celle de l'angle, et elle est presque entièrement héritée de celle de r^*[9]. Le maillon mesuré est le plus solide ; le maillon calculé fixe la précision. La distance de la plus vieille lumière est donc obtenue avec une règle graduée dont personne n'a vérifié la longueur sur pièce, mais dont la physique garantit la graduation, pourvu que la physique soit complète.

7.4 Troisième étage : ce qu'on déduit en supposant le modèle

On connaît maintenant la distance de la surface de dernière diffusion et son décalage vers le rouge, $z^* \approx 1\,090$: l'Univers s'est étiré d'un facteur 1 091 pendant le trajet de la lumière Hogg 1999. Une distance et un étirement ne font pas encore un âge. Pour passer de l'un à l'autre, il faut savoir à quelle vitesse l'Univers s'est étiré à chaque étape du trajet, c'est-à-dire connaître l'histoire de l'expansion entre $z \approx 1\,090$ et aujourd'hui. Cette histoire, personne ne l'observe d'un bout à l'autre sur le fond diffus : il faut la supposer, et la supposition s'appelle le modèle ΛCDM, le modèle standard de la cosmologie.

Ce modèle dit trois choses de l'Univers tardif. L'espace y est plat, c'est-à-dire sans courbure d'ensemble, ce que la position du premier pic confirme Hu 2002wiki-cmb. La matière y est faite de baryons et de matière noire froide, dont on connaît les densités absolues par le premier étage. Le reste de l'énergie est une constante cosmologique, notée Λ, une énergie noire dont la densité ne change pas avec l'expansion wiki-de.

Dans ce cadre, il ne reste presque plus d'inconnue. La densité absolue de matière étant connue, sa fraction Ωm dépend seulement du taux d'expansion actuel, et, l'espace étant plat, la fraction d'énergie noire vaut ce qui manque pour atteindre 1. Tout se ramène à un seul nombre, le taux d'expansion actuel H0, qu'on ajuste pour que la lumière partie de $z \approx 1\,090$ ait parcouru exactement les 13,873 gigaparsecs trouvés au deuxième étage[10]. Le résultat est $H0 = 67{,}36 \pm 0{,}54$ km/s/Mpc, $\Omega m = 0{,}3153 \pm 0{,}0073$ et $\Omega\Lambda = 0{,}6847 \pm 0{,}0073$ planck2018tab. L'unité de H0 se lit ainsi : une galaxie située à un mégaparsec s'éloigne de nous, du seul fait de l'expansion, à environ 67 kilomètres par seconde, une galaxie deux fois plus loin deux fois plus vite. Planck écrit lui-même que ces paramètres de l'Univers tardif sont « inférés » « en supposant la cosmologie ΛCDM de base » Planck 2018. Le verbe est exact : ils ne sont pas lus sur la carte, ils sont tirés de la carte par un modèle.

L'âge vient ensuite. Il est l'intégrale de l'inverse du taux d'expansion, et dépend donc de H0 et des densités de matière et d'énergie noire wiki-age. En termes concrets : on découpe l'histoire de l'Univers en petites étapes d'étirement, on calcule pour chacune le temps qu'il a fallu pour l'accomplir compte tenu de la vitesse d'expansion à ce moment, et on additionne[11].

Un repère aide à comprendre le résultat. Si les distances entre galaxies avaient toujours grandi à la vitesse d'aujourd'hui, il aurait fallu un temps égal à 1/H0 pour les amener de zéro à leur valeur actuelle. Ce « temps de Hubble » vaut environ 14,5 milliards d'années wiki-age[12]. L'âge réel en est à peu près 95 % wiki-age. L'écart résulte de deux effets opposés. Pendant la plus grande partie de l'histoire, la gravité de la matière a freiné l'expansion : les distances grandissaient alors plus vite qu'aujourd'hui, et il a fallu moins de temps que 1/H0 pour parcourir ces étapes. Depuis quelques milliards d'années, l'énergie noire accélère l'expansion : les distances grandissaient donc, dans ce passé récent, moins vite qu'aujourd'hui, et ces étapes ont pris plus de temps. L'énergie noire allonge l'âge, la matière le raccourcit Perlmutter 1999wiki-age, et dans l'Univers de Planck le freinage l'emporte de peu[13].

Toutes les grandeurs ne sont pas contraintes aussi bien par la carte. Le fond diffus contraint bien la densité de matière et la courbure, et moins directement l'énergie noire wiki-age. La raison tient au calendrier : l'énergie noire ne domine l'Univers que depuis un peu moins de dix milliards d'années wiki-chrono, et son effet sur le trajet de la lumière du fond diffus se mêle à ceux de la courbure et de H0[14]. Dans le modèle plat, on l'obtient par soustraction, ce qui revient à la contraindre par l'hypothèse de platitude autant que par la mesure. Les BAO ajoutent des règles de même longueur mesurées à des époques plus récentes, qui retracent l'expansion tardive indépendamment du fond diffus Eisenstein 2005 ; c'est ce qui fait passer la marge sur l'âge de ± 23 à ± 20 millions d'années planck2018tab.

Tout cela fixe le statut des ± 20 millions d'années. C'est une marge statistique, donnée à 68 % de confiance planck2018tab, qui dit de combien l'âge pourrait varier si l'on refaisait les mesures avec d'autres fluctuations du bruit et du ciel, le modèle étant tenu pour vrai. Elle ne dit rien de l'erreur commise si le modèle était faux. L'âge de l'Univers repose, écrit la synthèse de référence, « sur l'hypothèse que le modèle sous-jacent est correct ; d'autres méthodes pourraient donner des âges différents » wiki-age. Un navigateur qui annonce une arrivée à la minute près calcule cette minute en supposant la route dégagée : la précision de l'estimation et le risque de bouchon sont deux questions distinctes.

7.5 Un contrôle venu d'ailleurs : les plus vieilles étoiles

Une autre physique permet de vérifier le calcul. L'Univers ne peut pas être plus jeune que les étoiles qu'il contient, et l'âge des étoiles se calcule sans rien savoir de l'expansion. Une étoile consomme son combustible nucléaire à un rythme qui dépend de sa masse et de sa composition ; les modèles d'évolution stellaire en déduisent combien de temps il lui a fallu pour atteindre le stade où on l'observe[15]. Aucune de ces étapes ne passe par le fond diffus, par H0 ou par l'énergie noire.

Pour l'étoile surnommée Mathusalem, ces modèles donnent 14,27 ± 0,80 milliards d'années wiki-age. La valeur centrale dépasse l'âge de Planck d'un demi-milliard d'années, mais l'écart est inférieur à la marge : la fourchette de l'étoile descend jusqu'à 13,47 milliards d'années, et la valeur de Planck s'y trouve[16]. Les deux âges sont compatibles wiki-age. L'Univers n'est pas plus jeune que ses étoiles.

Ce contrôle n'a pas toujours été un succès, et c'est ce qui en fait la valeur. Avant 1998, les cosmologistes supposaient un Univers sans énergie noire, fait de matière seule, dont l'expansion n'a jamais cessé de ralentir. Dans un tel Univers, les distances ont toujours grandi plus vite qu'aujourd'hui, et l'âge est nettement

plus court que le temps de Hubble[17]. Avec les taux d'expansion mesurés à l'époque, cet âge paraissait plus court que celui des plus vieilles étoiles. En 1998 et 1999, deux équipes découvrent, grâce à des supernovas lointaines, que l'expansion accélère Riess 1998Perlmutter 1999. L'équipe de Saul Perlmutter en déduit, pour un Univers plat, un âge de 14,9 (+1,4 / −1,1) milliards d'années, calculé pour un taux d'expansion correspondant à h = 0,63, c'est-à-dire H0 = 63 km/s/Mpc Perlmutter 1999. L'accélération allongeait l'âge et levait le paradoxe d'un Univers plus jeune que ses plus vieilles étoiles Perlmutter 1999. Ramené au H0 de Planck, le chiffre de 1999 donne environ 13,9 milliards d'années, à moins de 1 % de la valeur actuelle[18].

Le contrôle est réel, mais il est lâche. La marge de l'étoile, ± 0,8 milliard d'années, est quarante fois celle de Planck. Il ne fonctionne en outre que dans un sens. Une étoile plus vieille que l'Univers réfuterait le modèle ; une étoile plus jeune ne prouve rien, puisque les étoiles ne sont pas nées au début. Les premières sont apparues quelques dizaines à quelques centaines de millions d'années après le début de la phase chaude Klessen 2023Naidu 2025, ce qui rend le test encore un peu plus exigeant pour Mathusalem et encore un peu moins précis. L'accord des deux physiques dit que le calcul de Planck n'est pas faux de plusieurs milliards d'années ; il ne dit rien des 20 millions.

7.6 Où le calcul pourrait céder

Le troisième étage a produit, en passant, un chiffre qu'on peut confronter à autre chose que des étoiles : le taux d'expansion actuel. Le fond diffus ne voit pas l'Univers d'aujourd'hui. Le H0 qu'on en tire, 67,4 ± 0,5 km/s/Mpc Planck 2018, est une prédiction du modèle pour aujourd'hui, à partir d'une image vieille de 380 000 ans. Le télescope au sol SPT-3G, seul, obtient 66,66 ± 0,60 km/s/Mpc ; la combinaison de Planck et des deux télescopes au sol, ACT au Chili et SPT au pôle Sud, donne 67,19 ± 0,38 km/s/Mpc, la contrainte la plus précise jamais tirée du fond diffus Camphuis 2025.

On peut aussi mesurer H0 directement, dans l'Univers proche, en construisant les distances de proche en proche : des distances géométriques étalonnent des étoiles pulsantes appelées céphéides, qui étalonnent à leur tour les supernovas, visibles beaucoup plus loin Riess 2022. L'équipe SH0ES obtient ainsi 73,04 ± 1,04 km/s/Mpc Riess 2022. En 2025, un rapport de consensus signé par plus de cent chercheurs, qui combine de nombreuses méthodes de distance, donne 73,50 ± 0,81 km/s/Mpc h0dn2025. L'écart avec le fond diffus est de 6,2 à 7,1 écarts-types selon les combinaisons Camphuis 2025h0dn2025[19]. Une autre équipe, qui étalonne les supernovas avec des géantes rouges observées par le télescope Webb, trouve des valeurs intermédiaires, entre 68,4 et 69,6 km/s/Mpc Hoyt 2025. Le détail de cette confrontation est la matière du chapitre 23 ; ici, on n'en retient que deux choses.

La première est que l'écart ne vient pas d'un défaut de Planck. ACT et SPT, avec d'autres instruments, depuis le sol, sur d'autres portions du ciel, retrouvent la valeur de Planck, et ont atteint ensemble sa puissance sur certains paramètres Camphuis 2025. Si le fond diffus se trompe, ce n'est pas dans sa carte.

La seconde est la conséquence pour l'âge. Si H0 valait 73,5 km/s/Mpc et que la composition de l'Univers restait la même, l'âge, qui varie alors comme l'inverse de H0, tomberait à environ 12,7 milliards d'années[20]. C'est une règle de trois faite pour ce livre, pas un résultat publié, et elle ignore qu'une solution réelle à la tension modifierait aussi les autres paramètres. Elle donne pourtant l'ordre de grandeur de l'enjeu : un milliard d'années, cinquante fois la marge annoncée. Un tel âge poserait d'ailleurs à nouveau la question des étoiles : 12,7 milliards d'années se trouve à environ deux fois la marge de Mathusalem sous sa valeur centrale[21].

Où le calcul céderait-il ? Pour Lloyd Knox et Marius Millea, les solutions les plus plausibles à la tension augmentent le taux d'expansion avant la recombinaison Knox 2020. Elles touchent donc le deuxième étage, et l'enchaînement se suit pas à pas. Une expansion plus rapide avant la recombinaison laisse moins de temps au son pour voyager : l'horizon sonore r *est plus petit* Knox 2020. *L'angle θ*, lui, est mesuré et ne bouge pas. Une règle plus courte vue sous le même angle est plus proche : la surface de dernière diffusion se rapproche. Pour qu'une lumière partie d'une surface plus proche arrive avec le même étirement de 1 091, il faut que l'expansion ait été plus rapide sur le trajet ; le H0 déduit augmente, et l'âge diminue[22]. La carte resterait la même ; sa lecture changerait.

Ces solutions ne sont pas libres. Elles sont fortement contraintes par leurs effets sur la diffusion des photons et sur les oscillations acoustiques, que la carte enregistre aussi Knox 2020. Les candidates précises, énergie noire précoce, recombinaison modifiée, masse de l'électron variable, n'obtiennent dans les données actuelles que de légères préférences, de deux à trois écarts-types, sous le seuil d'une découverte Camphuis 2025energie-matiere-noires-knox. Les données du fond diffus seules ne montrent aucun signe de physique au-delà du modèle standard Camphuis 2025.

Une seconde fragilité touche le troisième étage. Les mesures de BAO du relevé DESI préfèrent, combinées au fond diffus et aux supernovas, une énergie noire dont la densité varierait, avec une significativité de 2,8 à 4,2 écarts-types selon l'échantillon de supernovas Desi 2025 ; la recalibration de l'un de ces échantillons, en 2026, ramène le chiffre le plus haut à 3,2 écarts-types, une « faible préférence » selon ses auteurs Popovic 2026. Une énergie noire variable toucherait surtout les derniers milliards d'années, et ferait donc bouger l'âge bien moins que la tension sur H0 Desi 2025[23]. Les deux fragilités n'ont pas le même poids pour ce chapitre : l'une réécrirait la règle graduée, l'autre seulement la fin du trajet.

7.7 Ce que veut dire « il y a 13,8 milliards d'années »

Reste à savoir de quoi l'âge est la durée. Les tables de Planck le définissent comme le « temps écoulé depuis le début du Big Bang chaud » planck2018tab. Ce n'est pas un temps écoulé depuis un instant zéro. Le chapitre sur le seuil a montré que cet instant n'est qu'une extrapolation de la relativité générale au-delà de son domaine (→ chap. 1)wiki-bigbang. Le « zéro » de la frise est une origine conventionnelle des horloges, pas un événement daté, et certaines chronologies comptent d'ailleurs les temps à partir de la fin de l'inflation plutôt que d'un instant zéro wiki-chrono. Pour les toutes premières fractions de seconde, les durées sont des ordres de grandeur qui dépendent du modèle ; au-delà de la seconde, elles deviennent robustes wiki-chrono[24].

L'horloge qui compte ce temps est elle aussi précise. C'est le temps cosmique : le temps propre, celui qu'indiquerait une montre emportée, d'un observateur qui suit le flot de l'expansion sans mouvement propre smeenk-sepwright-tuto. Nous ne sommes pas exactement un tel observateur : le Soleil se déplace à 369,82 km/s par rapport au fond diffus pdg2019-astro, et nous sommes au fond du puits de gravité de la Galaxie. Les deux effets font retarder nos horloges d'une fraction de l'ordre de quelques millionièmes, soit quelques dizaines de milliers d'années au plus sur toute l'histoire cosmique, plusieurs centaines de fois moins que la marge de Planck[25]. Pour dater l'Univers, notre horloge et l'horloge cosmique sont indiscernables.

Avec cette définition, les dates du livre se rangent en deux familles qui ne réagissent pas de la même manière aux fragilités du calcul.

Les dates comptées depuis le début de la phase chaude, les trois minutes de la nucléosynthèse, les 47 000 ans de l'égalité entre matière et rayonnement, les 380 000 ans de la recombinaison, sont robustes. Le temps

écoulé jusqu'à ces moments dépend du rythme de l'expansion à ces époques, et ce rythme était fixé par les densités du rayonnement et de la matière, que le premier étage mesure. L'énergie noire, dont la densité ne change pas, pesait alors un poids négligeable face à une matière et un rayonnement incomparablement plus denses[26]. Un H0 différent ou une énergie noire variable ne changeraient presque rien à ces dates Desi 2025energie-matiere-noires-age. Seules les solutions qui modifient l'expansion avant la recombinaison y toucheraient, dans la mesure où elles accélèrent cette expansion, et la carte limite justement cette mesure Knox 2020.

Les dates comptées depuis aujourd'hui, les « il y a », héritent au contraire de toute l'incertitude du modèle. « Le fond diffus a été émis il y a 13,8 milliards d'années » est l'âge de l'Univers moins 380 000 ans : c'est une date aussi robuste que le modèle, pas davantage. Une date de ce livre fait exception, et l'exception éclaire la règle. Le Système solaire a été daté par une horloge radioactive à 4 567,30 millions d'années avant aujourd'hui Connelly 2012 : son « il y a » est mesuré, indépendamment de toute cosmologie. C'est son « après le Big Bang », environ 9,2 milliards d'années wiki-ageConnelly 2012, qui dépend du modèle. Les événements anciens sont ancrés au début, les événements récents à aujourd'hui, et le modèle fait le pont entre les deux ancrages.

Pour tout ce qui se trouve entre les deux, les astronomes ne parlent plus en années. Ce qu'ils mesurent sur un objet lointain est un décalage vers le rouge z, qui dit de combien l'Univers s'est étiré depuis que la lumière est partie : 1 + z est le rapport de sa taille aujourd'hui à sa taille à l'émission Hogg 1999. Pour en faire une date, il faut savoir quand l'Univers avait cette taille, donc intégrer l'histoire du taux d'expansion, qui dépend de H0 et des densités de matière et d'énergie noire Hogg 1999. La conversion de z en âge passe par le modèle standard Hogg 1999wiki-age. Le tableau de référence du Particle Data Group, calculé avec les paramètres de Planck, en donne quelques points pdg2019-astro :

Décalage vers le rouge z	Âge de l'Univers à ce moment
3 402 (égalité matière-rayonnement)	51 100 ans
1 089,9 (fond diffus)	372 900 ans
7,7 (réionisation à moitié)	690 millions d'années
0,636 (début de l'accélération)	7,70 milliards d'années
0 (aujourd'hui)	13,797 ± 0,023 milliards d'années

La galaxie MoM-z14, confirmée par Webb à z = 14,44, est ainsi vue « 280 millions d'années après le Big Bang » Naidu 2025. Le z est la mesure ; les 280 millions d'années sont son interprétation dans le modèle. Pour ces grands décalages, l'âge « après » relève de la première famille, parce qu'il dépend surtout de l'expansion ancienne ; le « il y a » relève de la seconde[27]. Chaque date de la nuit et de l'aube qui suivent, à partir du chapitre 8, sera un z converti de cette manière.

7.8 Ce qu'on ne sait pas

On ne sait pas si la physique d'avant la recombinaison est complète. C'est l'incertitude qui pèse le plus sur l'âge, parce qu'elle porte sur le deuxième étage, que la marge de ± 20 millions d'années ne couvre pas. Deux lectures s'opposent. Dans la première, le modèle est complet, et la tension sur H0 vient d'erreurs systématiques dans l'échelle des distances locales ; les valeurs intermédiaires obtenues avec les géantes rouges de Webb, 68,4 à 69,6 km/s/Mpc, vont dans ce sens Hoyt 2025. Dans la seconde, l'échelle locale est juste, comme l'affirme le rapport de consensus de 2025 h0dn2025, et il faut ajouter au plasma primordial un ingrédient qui raccourcisse l'horizon sonore Knox 2020. Ce qui départagerait les deux est de deux ordres. D'un côté, des mesures locales indépendantes qui convergent ou divergent : l'accord ou le désaccord entre

les méthodes de SH0ES et celles de l'équipe de Wendy Freedman décidera si la tension survit. De l'autre, des mesures plus fines du fond diffus, capables de voir les effets secondaires qu'un ingrédient nouveau laisserait sur la diffusion des photons Knox 2020 ; les futurs instruments comme CMB-S4 visent par exemple à mesurer le nombre effectif de neutrinos, qui compte dans le rayonnement d'avant la recombinaison, avec une précision de 0,03 Fields 2020. Si la seconde lecture l'emportait, l'âge baisserait, d'une quantité que ce livre ne peut pas chiffrer au-delà de la règle de trois, faute de résultat publié pour un modèle précis.

On ne sait pas si l'énergie noire est constante. Le signal de DESI, compris entre 2,8 et 4,2 écarts-types en 2025, a été ramené à 3,2 écarts-types par la recalibration des supernovas du Dark Energy Survey Desi 2025Popovic 2026, et une analyse limitée aux données de l'Univers tardif ne trouve pas de préférence robuste Chaudhary 2025. L'effet sur l'âge serait moindre que celui de la tension sur H0, mais ce livre n'a pas de chiffre publié pour le mesurer ; une fourchette vue dans une source non identifiée n'a pas été retenue.

Le contrôle stellaire est lui-même mal documenté ici. L'âge de 14,27 ± 0,80 milliards d'années pour Mathusalem est lu dans une synthèse wiki-age ; la méthode, les hypothèses sur la composition de l'étoile et sur sa distance, et l'âge que d'autres étoiles ou des amas d'étoiles très anciens donnent, ne sont pas documentés dans les sources de ce livre. De même, les chiffres qui faisaient paraître l'Univers plus jeune que ses étoiles avant 1998 ne sont connus ici que par la conclusion qu'en tirait Perlmutter Perlmutter 1999.

Enfin, une contestation minoritaire porte sur le sens même de l'âge. Le modèle dit *timescape*, défendu par David Wiltshire, soutient que les horloges des galaxies, situées dans des régions denses, et celles des grands vides en expansion libre divergent assez pour fausser tout modèle homogène ajusté à l'Univers ; l'accélération serait alors une apparence et l'âge d'expansion plus long Wiltshire 2007. Une analyse de 2025 des supernovas Pantheon+ trouve une forte préférence statistique pour ce modèle Seifert 2025. Le résultat est récent et n'est pas repris par les analyses de Planck, d'ACT, de SPT ou de DESI, qui reposent sur un Univers homogène et s'y ajustent bien. Si le timescape avait raison, « l'âge de l'Univers » dépendrait de l'endroit où l'on pose l'horloge, et l'écart dépasserait de loin les quelques millionièmes calculés plus haut.

7.9 Ce que ce chapitre démontre

L'âge de l'Univers, 13,787 ± 0,020 milliards d'années avec les BAO, 13,797 ± 0,023 milliards d'années avec le fond diffus seul planck2018tab, n'est pas lu sur une horloge : aucune n'a tourné depuis le début de la phase chaude. Il sort d'une chaîne à trois étages. Au premier, Planck mesure sur sa carte l'échelle angulaire des ondes sonores figées vers 380 000 ans, 100 θ = *1,0411 ± 0,0003, à 0,03 % près et presque indépendamment du modèle, ainsi que les densités absolues de matière ordinaire et de matière noire* Planck 2018planck2018tab. *Au deuxième, la physique du plasma primordial calcule la taille réelle de ces ondes, l'horizon sonore r* = 144,43 ± 0,26 Mpc, et le rapport des deux donne la distance comobile de la plus vieille lumière, 13,873 ± 0,025 Gpc planck2018tab. Au troisième, en supposant un Univers plat, fait de matière et d'une énergie noire constante, on en déduit H0, la composition et l'âge ; Planck écrit que ces paramètres sont « inférés » « en supposant la cosmologie ΛCDM de base » Planck 2018.

L'âge est l'intégrale de l'inverse du taux d'expansion wiki-age. Il vaut environ 95 % du temps de Hubble, 14,5 milliards d'années, parce que le freinage dû à la matière l'emporte un peu sur l'accélération due à l'énergie noire wiki-age. Le fond diffus contraint bien la matière et la courbure, moins directement l'énergie noire wiki-age. Sa marge de ± 20 millions d'années est statistique et interne au modèle : elle ne dit rien de l'erreur commise si le modèle était faux wiki-age.

Une datation indépendante, fondée sur l'évolution des étoiles, donne 14,27 ± 0,80 milliards d'années pour l'étoile Mathusalem, un âge compatible wiki-age. Ce contrôle a déjà servi : avant 1998, un Univers sans

énergie noire paraissait plus jeune que ses étoiles, et l'accélération, en allongeant l'âge, a levé le paradoxe Perlmutter 1999. Mais il est quarante fois moins précis que le calcul qu'il vérifie.

Le taux d'expansion que le modèle tire du fond diffus, 67,19 ± 0,38 km/s/Mpc pour Planck, ACT et SPT réunis Camphuis 2025, ne s'accorde pas avec celui qu'on mesure de proche en proche, environ 73 km/s/Mpc Riess 2022h0dn2025. Avec 73,5 à composition égale, une règle de trois donnerait un Univers d'environ 12,7 milliards d'années. La piste jugée la plus plausible modifie la physique d'avant la recombinaison, donc le deuxième étage : la même carte donnerait alors un horizon sonore plus court, un H0 plus élevé et un âge plus court Knox 2020.

Les dates du premier jour, elles, ne bougeraient presque pas. Elles se comptent depuis le début de la phase chaude, défini comme origine conventionnelle des horloges et non comme un instant observé planck2018-tabwiki-chrono, et elles dépendent de densités que la carte mesure. Ce sont les « il y a » qui héritent de toute l'incertitude du modèle, et les décalages vers le rouge, seules mesures directes des époques qui suivent, ne deviennent des dates qu'à travers lui Hogg 1999. Le premier jour du livre est donc solide, et le chiffre qui le relie au présent est précis dans son modèle et fragile hors de lui.

Notes

1. Calcul fait pour ce chapitre : 0,020 / 13,787 ≈ 0,145 % ; 0,145 % de 80 ans ≈ 0,116 an, soit environ 42 jours. ↩

2. Calcul fait pour ce chapitre : un demi-pour-cent de 13,77 milliards d'années vaut environ 0,07 milliard, soit une fourchette d'environ 13,70 à 13,84 milliards d'années, qui contient 13,82, 13,797 et 13,787. La marge exacte de la valeur Planck 2013 ne figure pas dans les sources de ce livre. ↩

3. Principe général de la datation radioactive, donné pour le lecteur ; la source (Connelly et al. 2012, lue dans un résumé) donne l'âge et la méthode (plomb-plomb) sans détailler le principe. La datation de la Terre et des météorites est traitée dans le chapitre 15. ↩

4. Calcul fait pour ce chapitre : θ* = 0,010411 radian ; 0,010411 × 180 / π ≈ 0,597°. La comparaison avec la pleine Lune (environ 0,5°) est un repère courant, non tiré des fiches. La marge relative : 0,0003 / 1,0411 ≈ 0,029 %. ↩

5. Explication donnée pour le lecteur. Les fiches établissent que θ* est « le chiffre le plus direct » et qu'il est mesuré à 0,03 % (Planck 2018) ; la manière dont la série des pics contribue à cette précision est une présentation classique qui n'est pas détaillée dans les fiches. ↩

6. Présentation classique, non détaillée dans les fiches, qui emploient le terme « densité physique » sans le définir. La densité critique est proportionnelle au carré du taux d'expansion actuel ; h désigne H0 divisé par 100 km/s/Mpc ; le produit Ω h² est donc proportionnel à la densité absolue. ↩

7. Les fiches établissent que r* dépend « de ce que contenait l'Univers entre le Big Bang chaud et z ≈ 1090 » (fiche fond-diffus-cosmologique) et que la recombinaison a lieu vers 3 000 K. La décomposition en trois ingrédients, et en particulier l'effet des baryons sur la vitesse du son, est une présentation classique donnée pour le lecteur, non lue sous cette forme dans les fiches. ↩

8. Calcul fait pour ce chapitre : 144,43 / 0,010411 ≈ 13 873 Mpc, en accord avec la valeur des tables de Planck (13,873 ± 0,025 Gpc). La conversion en années-lumière est celle de la fiche temps-cosmique, reprise au chapitre précédent. ↩

9. Calcul fait pour ce chapitre : 0,26 / 144,43 ≈ 0,18 % pour r ; *0,025 / 13,873 ≈ 0,18 % pour la distance ; 0,03 % pour θ*. Les marges ne se combinent pas exactement ainsi, car les paramètres sont ajustés ensemble, mais l'ordre de grandeur montre d'où vient l'essentiel de l'incertitude. ↩

10. Présentation simplifiée de l'ajustement, faite pour ce chapitre ; Planck ajuste en réalité les six paramètres ensemble. Vérification sur les tables de Planck 2018 : (Ωb h² + Ωc h²) / Ωm = (0,02237 + 0,1200) / 0,3153 ≈ 0,4515, soit h ≈ 0,672, à comparer à h = 0,6736 dans la table. Le petit écart tient à des composantes que les tables comptent dans la matière totale et que ce livre ne détaille pas. ↩

11. Traduction en mots, donnée pour le lecteur, de la formule que la source résume (l'âge est l'intégrale de l'inverse du taux d'expansion, Wikipédia, « Age of the universe »). En notant a le facteur d'échelle, l'âge est la somme des durées da / (da/dt) sur toute l'histoire. ↩

12. Calcul fait pour ce chapitre : 1 / H0, avec H0 = 67,4 km/s/Mpc, vaut environ 14,5 milliards d'années (le facteur de conversion, 1 km/s/Mpc correspondant à un temps de Hubble d'environ 978 milliards d'années, n'est pas tiré des fiches). Rapport : 13,797 / 14,51 ≈ 0,951, proche du facteur 0,956 que donne la source. ↩

13. La source donne le facteur 0,956 sans l'expliquer ; l'effet de l'énergie noire, qui allonge l'âge, est établi (fiche energie-matiere-noires, d'après Perlmutter 1999). L'explication par deux effets opposés, en termes de vitesse à laquelle les distances grandissent, est un raisonnement de ce chapitre. ↩

14. La source établit le fait (Wikipédia, « Age of the universe »). L'explication par le calendrier de l'énergie noire et par le mélange de ses effets avec ceux de la courbure et de H0 est une présentation classique, non lue sous cette forme dans les fiches. ↩

15. Principe général donné pour le lecteur. Les fiches disent seulement que l'âge de Mathusalem est donné par « les modèles d'évolution stellaire » (Wikipédia, « Age of the universe ») ; la méthode précise n'est pas documentée. La fabrication des éléments dans les étoiles est l'objet du chapitre 12. ↩

16. Calcul fait pour ce chapitre : 14,27 − 13,787 ≈ 0,48 milliard d'années, soit environ 0,6 fois la marge de l'étoile ; 14,27 − 0,80 = 13,47. ↩

17. Résultat classique, non documenté dans les fiches : dans un Univers plat fait de matière seule, l'âge vaut les deux tiers du temps de Hubble. Avec H0 = 67 km/s/Mpc, cela donnerait environ 9,7 milliards d'années. Les valeurs de H0 et les âges stellaires en usage avant 1998 ne sont pas documentés dans les sources de ce livre. ↩

18. Perlmutter et al. (1999) donnent l'âge sous la forme 14,9 (+1,4 / −1,1) × (0,63 / h) milliards d'années pour un Univers plat. Calcul fait pour ce chapitre avec h = 0,674 : 14,9 × 0,63 / 0,674 ≈ 13,9 milliards d'années. La mise à l'échelle suppose la composition de 1999 (Ωm ≈ 0,28), un peu différente de celle de Planck. ↩

19. Un écart-type (noté σ) mesure l'incertitude statistique d'une mesure. Un écart de cinq écarts-types est le seuil conventionnel d'une découverte en physique (fiche energie-matiere-noires, d'après Berkeley Lab 2025) : la probabilité qu'un tel écart soit un simple hasard de mesure est alors infime. ↩

20. Calcul d'ordre de grandeur de l'atelier (fiche energie-matiere-noires, section 8), refait pour ce chapitre : 13,787 × 67,66 / 73,5 ≈ 12,69 milliards d'années (67,66 est le H0 de la combinaison Planck + BAO qui donne 13,787). Non publié tel quel. ↩

21. Calcul fait pour ce chapitre : (14,27 − 12,7) / 0,80 ≈ 2,0. Comme la règle de trois elle-même, cette comparaison ignore qu'une solution réelle à la tension changerait aussi la composition, et donc l'âge, autrement qu'en proportion de H0. ↩

22. Knox et Millea (2020, lu dans un résumé paraphrasé) établissent que ces solutions augmentent le taux d'expansion avant la recombinaison et réduisent l'horizon sonore ; la fiche fond-diffus-cosmologique en tire que « la même carte donnerait un H0 plus élevé et un âge plus court ». Le détail de l'enchaînement (règle plus courte, surface plus proche, expansion plus rapide) est un raisonnement de ce chapitre. ↩

23. Raisonnement de la fiche energie-matiere-noires (section 8), « non chiffré sur source ». DESI (2025) note aussi un écart modéré entre ses BAO et le fond diffus dans ΛCDM. ↩

24. Voir aussi la fiche frise-cosmique (section 1) et, pour la question de ce qui précède, (→ chap. 2) et (→ chap. 3). ↩

25. Ordres de grandeur calculés par la fiche temps-cosmique (section 5), à partir des chiffres du Particle Data Group, et signalés par elle comme à faire relire : la dilatation due à notre vitesse vaut environ $7{,}6 \times 10^{-7}$, celle due au potentiel de la Galaxie environ $1{,}6 \times 10^{-6}$; au total quelques 10^{-6}, soit quelques dizaines de milliers d'années au plus sur 13,8 milliards. ↩

26. Raisonnement de ce chapitre, appuyé sur deux faits des fiches : la densité d'énergie noire ne change pas avec l'expansion alors que la matière se dilue (Wikipédia, « Dark energy ») ; les dates anciennes « ne changent presque pas » si H0 ou l'énergie noire changent (fiche energie-matiere-noires, section 8). Le rapport chiffré des densités aux premières époques n'est pas calculé dans les fiches. ↩

27. Raisonnement de ce chapitre, dans le prolongement de la note précédente : à z = 14,44, l'Univers a moins de 3 % de son âge actuel, et l'énergie noire n'y a encore joué presque aucun rôle. Le degré exact de robustesse de ces conversions n'est pas chiffré dans les fiches. ↩

PARTIE III

La nuit et l'aube

LE SENS

Une fois la lumière libérée, rien ne brille : cette partie raconte comment l'Univers s'allume. C'est aussi l'époque où le savoir bouge le plus vite, avec Webb. Elle vient après le fond diffus parce que ses dates sont des décalages vers le rouge convertis dans le modèle qu'il calibre.

L'ARC

Du gaz neutre et obscur aux premières étoiles jamais vues, puis à des galaxies trop précoces, et à la lente reconquête de la transparence : de 380 000 ans à environ un milliard d'années.

LA QUESTION

Comment un Univers sombre s'est-il allumé, et pourquoi la chronologie de cet allumage change-t-elle sans cesse ?

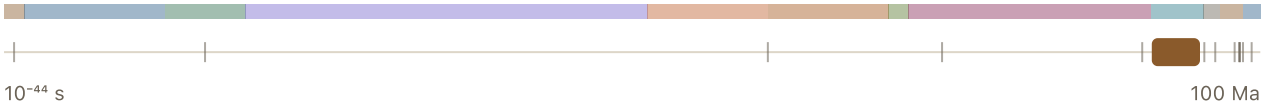
1. Les âges sombres brouillon
2. Les premières étoiles brouillon
3. Trop tôt, trop brillantes brouillon
4. Le rallumage brouillon

CHAPITRE 8

Les âges sombres

~0,4 à ~100 Ma

brouillon · 7351 mots



8.1 Après la lumière, plus rien

Vers 380 000 ans, l'Univers s'est refroidi à environ 3 000 K, et les électrons ont fini par se lier aux noyaux wiki-chronowiki-cmb. Le chapitre sur la première lumière a raconté pourquoi il avait fallu attendre si longtemps : le milliard de photons par baryon défaisait chaque atome aussitôt formé, tant que la température n'était pas descendue vers 3 000 à 4 000 K (→ chap. 6)wiki-recomb. Ce moment correspond à un décalage vers le rouge $z \approx 1\,100$ wiki-recomb, c'est-à-dire que l'Univers était alors environ 1 100 fois moins étiré qu'aujourd'hui Hogg 1999.

La transition n'a rien d'un déclic. Planck place la surface de dernière diffusion, au-delà de laquelle un photon n'a plus en moyenne qu'une diffusion devant lui, à $z^* = 1\,089{,}92 \pm 0{,}25$ planck2018tab. À ce moment, l'Univers n'est pas encore entièrement neutre : il ne l'est à 90 % que vers $z \approx 1\,070$ wiki-recomb. Entre les deux, il s'est encore étiré de près de 2 %, et la fin de la transition s'étire au-delà[1]. Mais le résultat, une fois la transition faite, est simple à dire. Le plasma opaque où la lumière rebondissait sans cesse est devenu un gaz d'atomes neutres, que la lumière traverse sans être déviée.

Ce gaz a la composition que lui ont donnée les premières minutes : en masse, environ trois quarts d'hydrogène et un quart d'hélium, avec des traces de deutérium, d'hélium 3 et de lithium wiki-chrono(→ chap. 5). Il ne contient rien d'autre. Pas un atome de carbone, d'oxygène ou de fer : tous les éléments plus lourds viendront plus tard, des étoiles wiki-chronoKlessen 2023. À côté de ce gaz se trouve la matière noire, environ cinq fois et demie plus abondante que la matière ordinaire planck2018tab[2], qui ne se mêle au reste que par la gravité.

La seule lumière qui existe est celle qui vient d'être libérée, le fond diffus. Elle part en ligne droite et ne s'arrête plus. Mais l'espace qu'elle traverse continue de s'étirer, et sa longueur d'onde s'étire avec lui ; sa température baisse dans la même proportion que l'Univers grandit (→ chap. 6)[3]. À l'émission, ce rayonnement avait la température d'un filament d'ampoule, environ 3 000 K. Quand l'Univers s'est étiré de dix fois plus, vers $z \approx 100$, il n'en fait plus qu'environ 275 K, à peu près la température d'un jour d'hiver sur Terre ; à $z = 30$, environ 84 K ; à $z = 20$, environ 57 K[4]. Aujourd'hui, après un étirement d'environ 1 100, il nous arrive à $2{,}72548 \pm 0{,}00057$ K Fixsen 2009planck2018tab. Pendant tout ce trajet, la lueur quitte le domaine visible pour l'infrarouge, puis pour les micro-ondes[5]. Un œil humain placé dans l'Univers de cette époque ne verrait bientôt plus rien.

C'est ce qui définit les âges sombres : après la recombinaison, l'Univers est rempli d'un gaz neutre d'hydrogène et d'hélium, et il n'y a aucune source de lumière, jusqu'à ce que se forme la première génération d'étoiles wiki-chrono. Le fond diffus n'est pas une source : il a été émis une fois, il ne fait que s'éloigner et se refroidir. Rien, dans ce gaz, ne produit de lumière nouvelle, parce que rien n'y est assez chaud ni assez

dense pour cela. L'Univers d'avant était brillant et opaque ; celui-ci est transparent et obscur. La transparence, qui avait permis à la première lumière de partir, ne sert plus à rien, puisqu'il n'y a plus rien à voir.

La frise du livre date cette époque de ~0,4 à ~100 millions d'années, avec une mention qui dit tout : « établi (pas observé directement) » wiki-chrono[6]. Sur l'année cosmique, où toute l'histoire de l'Univers tient en douze mois, la première lumière est émise un quart d'heure après minuit le 1er janvier ; la nuit dure alors jusque vers le 3 janvier[7]. Deux jours et demi sur un an, une époque brève à l'échelle du livre, et c'est pourtant pendant cette nuit que se prépare tout ce qui brillera ensuite.

8.2 Ce qui travaille dans le noir

L'absence de lumière ne signifie pas l'immobilité. Depuis environ 47 000 ans, la densité d'énergie de la matière dépasse celle du rayonnement, et à partir de ce moment la gravité peut commencer à amplifier les petites inégalités de densité qui deviendront les galaxies wiki-chrono(→ chap. 6). Ces inégalités ont été laissées par l'inflation : des tremblements quantiques étirés aux dimensions du cosmos, ici un peu plus de matière, là un peu moins (→ chap. 3)esa2013planck. Le fond diffus en porte la trace, sous la forme de variations de température d'environ une part sur 25 000 d'une direction à l'autre wiki-cmb.

Le mécanisme qui les fait grandir s'appelle l'instabilité gravitationnelle. Une région un peu plus dense que la moyenne attire un peu plus fort la matière voisine ; cette matière y tombe ; la région devient plus dense encore, et attire plus fort. L'écart se creuse de lui-même. C'est le modèle de travail que la découverte des pics acoustiques du fond diffus a établi : un Univers fait surtout de matière noire et d'énergie noire, dont les structures sont nées par instabilité gravitationnelle à partir des fluctuations quantiques de l'inflation Hu 2002. La gravité qui comprime les surdensités est dominée par la matière noire, puisque celle-ci pèse plus de cinq fois plus que la matière ordinaire planck2018tab.

La recombinaison change une chose dans ce mécanisme, et cette chose explique pourquoi la nuit est aussi le moment où les structures démarrent vraiment. Avant elle, le chapitre sur la première lumière l'a montré, la matière ordinaire était liée aux photons par ses électrons libres, et la pression de la lumière la repoussait chaque fois que la gravité la comprimait : elle oscillait au lieu de tomber (→ chap. 6). La matière noire, elle, ne sentait pas cette pression et continuait de creuser ses puits. Une fois les électrons attachés aux noyaux, la lumière n'a plus de prise sur le gaz. Privé de ce ressort, le gaz cesse d'osciller et tombe dans les puits que la matière noire a creusés pendant ce temps[8]. Les âges sombres sont l'époque où la matière ordinaire rattrape son retard.

Ce qui s'est passé à ce moment a laissé une trace qu'on observe aujourd'hui, et c'est l'un des rares témoignages directs de la nuit. Les ondes sonores figées au moment de la recombinaison n'ont pas seulement été photographiées par la lumière qui partait ; elles sont restées imprimées dans la répartition de la matière elle-même. En 2005, une équipe menée par Daniel Eisenstein détecte dans la répartition des galaxies un pic de corrélation, une distance privilégiée entre galaxies, à 100 h^{-1} mégaparsecs, qui correspond « excellemment » à la forme et à la position prévues pour l'empreinte des oscillations acoustiques de l'époque de la recombinaison Eisenstein 2005. Avec la valeur de h tirée de Planck, cette distance vaut environ 148 mégaparsecs, à quelques pour cent de l'horizon sonore de 144 mégaparsecs calculé à partir du fond diffus planck2018tab[9]. La règle graduée que le chapitre sur l'âge a utilisée pour arpenter l'Univers (→ chap. 7) a donc traversé les âges sombres sans se perdre : ce que le gaz a fait dans le noir, les galaxies d'aujourd'hui le montrent encore.

Où mène cette croissance ? Au bout de la nuit, la matière noire s'est rassemblée en concentrations que les astronomes appellent des halos, et le gaz ordinaire tombé dans ces halos y forme un réservoir : la masse d'étoiles qu'une galaxie peut fabriquer est plafonnée par la quantité de gaz ordinaire disponible dans son halo de matière noire Boylankolchin 2023. C'est dans ces réservoirs, faits d'un gaz primordial sans métaux, que naissent les premières étoiles, dites de population III, à des décalages vers le rouge de 30 et moins Klessen 2023. Les astronomes appellent « métaux » tous les éléments plus lourds que l'hélium ; un gaz sans métaux est donc le gaz tel que les premières minutes l'ont laissé.

Entre ces deux bouts, le modèle affirme la croissance des surdensités sous l'effet de la gravité ; il ne dit pas, dans les sources de ce livre, comment elle se déroule en détail. Trois questions restent sans réponse documentée ici. La première porte sur le rythme : de combien une inégalité d'une part sur 25 000 dans la température de la lumière grandit-elle entre 380 000 ans et 100 millions d'années, et à quel moment les premières régions cessent-elles de s'étendre avec l'Univers pour s'effondrer sur elles-mêmes ? La deuxième porte sur la chaleur : un gaz qui s'effondre se comprime et s'échauffe, et pour aller jusqu'à la densité d'une étoile il doit se débarrasser de cette chaleur en rayonnant ; comment un gaz fait seulement d'hydrogène et d'hélium, sans les métaux qui refroidissent le gaz des galaxies actuelles, y parvient-il ? La troisième porte sur le seuil : à partir de quelle masse un halo retient-il assez de gaz, assez froid, pour former une étoile ? Les réponses conditionnent la date de l'allumage, et donc la fin de la nuit. Elles relèvent de fiches que la base n'a pas encore[10].

8.3 Dater sans rien voir

Aucune date de cette époque n'a été lue sur une horloge, et aucune n'a été lue non plus sur un objet, puisqu'il n'y a pas d'objet à regarder. Ce que les astronomes manipulent, pour cette époque comme pour les suivantes, est un décalage vers le rouge z : 1 + z est le rapport entre la taille de l'Univers aujourd'hui et sa taille au moment considéré Hogg 1999. Dire que les premières étoiles s'allument « à z = 30 », c'est dire qu'elles s'allument quand l'Univers était 31 fois moins étiré qu'aujourd'hui. Pour en faire une date en années, il faut savoir quand l'Univers avait cette taille, donc connaître l'histoire de son expansion Hogg 1999. Le chapitre sur l'âge a démonté ce calcul : il passe par le modèle standard, et chaque date de la nuit et de l'aube est un z converti de cette manière (→ chap. 7).

Aux époques des âges sombres, cette conversion devient remarquablement simple. L'énergie noire, dont la densité ne change pas, ne pèse presque rien face à une matière encore très concentrée ; le rayonnement, qui s'affaiblit plus vite que la matière, ne pèse plus grand-chose non plus. L'expansion n'est plus gouvernée que par la matière, et l'âge suit une loi simple Planck 2018[11] :

t ≈ 17,2 milliards d'années × (1 + z) ^ (−3/2).

Ce n'est pas une formule lue dans une publication : c'est un calcul de la fiche qui sert de base à ce chapitre, fait avec les paramètres de Planck, H0 ≈ 67,4 km/s/Mpc et Ωm ≈ 0,315 Planck 2018. L'exposant −3/2 dit comment l'âge croît avec l'étirement : quand l'Univers est quatre fois moins étiré, il est huit fois plus jeune. Le préfacteur de 17,2 milliards d'années n'est pas un âge ; c'est la constante qu'imposent le taux d'expansion et la densité de matière[12].

Appliquée aux décalages qui comptent pour la nuit et l'aube, la règle donne ceci :

Décalage vers le rouge z	Âge par la règle	Contrôle publié
30	≈ 100 millions d'années	—
20	≈ 180 millions d'années	EDGES : « 180 millions d'années » Bowman 2018
15	≈ 270 millions d'années	Hashimoto : « environ 250 millions d'années », « z ≈ 15 » Hashimoto 2018
14,44	≈ 285 millions d'années	MoM-z14 : 280 millions d'années Naidu 2025
13	≈ 330 millions d'années	JADES-GS-z13-1-LA : 330 millions d'années Witstok 2025

Les contrôles tombent à moins de 10 % près ; les petits écarts viennent des paramètres cosmologiques retenus par chaque équipe, l'équipe de Hashimoto utilisant un modèle légèrement différent[13]. La conversion z ≈ 30 → environ 100 millions d'années, que la frise signalait comme « non vérifiée », est donc confirmée par le calcul Klessen 2023[6].

La règle a un domaine de validité, et ses bords sont instructifs. À la recombinaison, z ≈ 1 090, elle donnerait environ 480 000 ans, alors que le tableau du Particle Data Group, calculé avec les paramètres de Planck, donne 372 900 ans pdg2019-astro[14]. L'écart, d'environ 30 %, vient de ce que le rayonnement n'y est pas encore négligeable : l'égalité entre matière et rayonnement, à z ≈ 3 400, n'est pas si loin pdg2019-astro. La règle s'applique donc bien au cœur de la nuit et à l'aube, et mal à son tout début. Vers la fin de la réionisation, elle commence aussi à s'écarter du calcul complet, parce que l'énergie noire se fait sentir : à z = 7,7, elle donne environ 670 millions d'années, le Particle Data Group 690 pdg2019-astro[15].

Cette simplicité a une conséquence qui touche la solidité même des dates. Le préfacteur de 17,2 milliards d'années ne dépend, en réalité, que d'une seule combinaison de paramètres : la densité absolue de matière, que les cosmologistes notent $\Omega m\, h^2$ et que Planck mesure presque directement, par la forme des pics du fond diffus planck2018tab[12]. Le chapitre sur l'âge a distingué trois étages dans le calcul de Planck : ce qu'on mesure, ce qu'on calcule avec la physique d'avant la recombinaison, ce qu'on déduit en supposant le modèle (→ chap. 7). Les dates des âges sombres, exprimées en temps « après le Big Bang », s'appuient surtout sur le premier étage. Si la tension sur le taux d'expansion actuel se résolvait par une valeur plus élevée de H0, l'âge de l'Univers baisserait, mais les 100 millions d'années de z = 30 bougeraient beaucoup moins, tant que la densité absolue de matière reste celle que mesure la carte[16]. La conversion suppose seulement qu'à ces époques rien d'autre que la matière ne gouverne l'expansion, ce qui est une hypothèse du modèle et non une observation.

Le point le plus important de cette section est ailleurs. La conversion de z en âge est solide ; ce qui ne l'est pas, pour les âges sombres, c'est le z lui-même. Les deux bornes de la frise, ~0,4 et ~100 millions d'années, n'ont pas le même statut. La première est ancrée sur un objet observé : la surface de dernière diffusion, dont Planck mesure le décalage vers le rouge au quart d'unité près planck2018tab. La seconde est ancrée sur une prédiction : les premières étoiles se forment, selon la revue de référence de Ralf Klessen et Simon Glover, « à des décalages vers le rouge de 30 et moins » Klessen 2023. Personne n'a vu d'étoile à z = 30. La fin de la nuit est un z théorique, converti par une règle solide. La précision de la conversion ne transfère aucune précision à l'événement : on sait très bien quel âge avait l'Univers à z = 30 ; on ne sait pas si les premières étoiles s'y trouvaient.

La mention de la frise, « établi (pas observé directement) », prend alors son sens précis. Que l'Univers ait traversé une époque neutre et sans étoile entre la recombinaison et les premières étoiles est établi : c'est une conséquence du modèle qui décrit le fond diffus, et rien ne permet d'imaginer une source de lumière dans un gaz primordial qui n'a pas encore eu le temps de s'effondrer. Que cette époque ait duré à peu près cent millions d'années est une estimation, qui dépend de la date d'un événement que personne n'a observé. C'est la leçon du chapitre sur l'âge appliquée à la nuit : un chiffre peut être calculé avec soin et rester, pour ce qu'il désigne, une hypothèse.

8.4 Le seul témoin : l'hydrogène à 21 cm

Dans un Univers sans source de lumière, un seul acteur pourrait se signaler lui-même : le gaz d'hydrogène neutre, qui remplit tout. L'hydrogène neutre absorbe ou émet un rayonnement d'une longueur d'onde de 21 cm Bowman 2018[17]. Au repos, une telle onde a une fréquence d'environ 1,4 gigahertz[18]. Mais un signal émis ou absorbé pendant les âges sombres a été étiré, comme toute lumière, d'un facteur $1 + z$ en chemin. Venue de $z = 20$, la raie arrive à environ 68 mégahertz ; de $z = 30$, à environ 46 mégahertz[18]. La raie à 21 cm de la nuit cosmique devient ainsi une onde radio de quelques dizaines de mégahertz.

Ce témoin a deux vertus. La première est qu'il ne demande pas d'étoile : c'est l'hydrogène des âges sombres lui-même qui laisse sa marque, ce qui en fait en principe le seul moyen d'observer la nuit autrement que par le calcul. La seconde est que chaque fréquence reçue correspond à un décalage vers le rouge, donc à une époque : en balayant les fréquences, on balaie le temps. Un spectre radio de 50 à 100 mégahertz est, en principe, un film de l'aube. Ce que le signal devrait montrer à chaque époque, et pourquoi il apparaît tantôt en absorption, tantôt en émission, dépend de l'état du gaz, que les sources de ce livre ne détaillent pas ; elles retiennent une prédiction, sur laquelle tout repose. Quand les premières étoiles s'allument, elles baignent le gaz de lumière ultraviolette, en particulier de photons dits Lyman-α, et ce bain modifie la manière dont l'hydrogène absorbe à 21 cm : l'allumage doit se lire comme un creux dans le spectre Bowman 2018.

En 2018, l'expérience EDGES annonce ce creux. L'équipe de Judd Bowman, avec une antenne installée en Australie-Occidentale, publie dans *Nature* un « profil d'absorption centré à 78 mégahertz dans le spectre moyenné sur le ciel » Bowman 2018[19]. Ce spectre n'est pas une image. L'antenne ne vise pas un objet : elle reçoit la somme de tout ce qui arrive de sa portion de ciel, et l'on cherche dans cette somme un creux commun à toutes les directions, produit par tout l'hydrogène du cosmos à la même époque. Selon les auteurs, le bord basse fréquence du profil indique que des étoiles existaient et avaient produit un fond de photons Lyman-α « 180 millions d'années après le Big Bang » Bowman 2018. Le centre du creux, à 78 mégahertz, correspond à $z \approx 17$, soit environ 220 millions d'années ; son bord, du côté des basses fréquences, à $z \approx 20$ et 180 millions d'années[20]. Si le résultat tenait, ce serait la première observation de l'aube cosmique, et la fin des âges sombres serait datée par une mesure plutôt que par une théorie.

Le résultat portait en lui-même son premier problème. L'amplitude du creux, sa profondeur, est « plus de deux fois supérieure aux plus grandes prédictions » Bowman 2018. Un tel écart laisse deux lectures. Dans la première, le signal est réel, et il faut ajouter à la physique des âges sombres quelque chose que le modèle standard n'y met pas ; les propositions faites en ce sens ne sont pas documentées dans les sources de ce livre. Dans la seconde, le creux ne vient pas du ciel mais de l'instrument ou de son traitement. La mesure est de celles qui laissent le plus de place à la seconde lecture. Le livre a déjà raconté une histoire d'antenne : en 1964-1965, Penzias et Wilson avaient trouvé le fond diffus comme un excès de bruit qui résistait à toutes les explications locales (→ chap. 6)Penzias 1965. EDGES cherche l'inverse, un léger déficit dans le

bruit d'une antenne, à des fréquences où le ciel émet bien davantage par ailleurs[21]. Pour trancher entre les deux lectures, il faut une seconde antenne, conçue autrement, qui regarde le même ciel.

Elle vient en 2022. Le radiomètre SARAS 3, d'une équipe menée depuis l'Inde par Saurabh Singh, observe dans la même bande de fréquences et conclut que le profil trouvé par EDGES « n'est pas d'origine astrophysique » ; le profil le mieux ajusté par EDGES est rejeté avec 95,3 % de confiance Singh 2022[22]. Il faut lire ce chiffre pour ce qu'il est. 95,3 % de confiance correspond à un peu moins de deux écarts-types, bien en deçà des cinq écarts-types qu'on exige en physique pour annoncer une découverte[23]. SARAS 3 ne démontre donc pas au seuil habituel que le creux d'EDGES est un artefact ; il montre qu'un instrument indépendant ne le retrouve pas, avec une confiance suffisante pour que le résultat de 2018 ne puisse plus servir de date.

L'état de la question se résume ainsi. Une aube vers 180 millions d'années reste plausible, et elle est compatible avec la prédiction théorique, qui fait naître les premières étoiles à $z \leq 30$ et les fait dominer la formation d'étoiles jusqu'à $z \approx 15$ à 20, soit entre environ 180 et 270 millions d'années Klessen 2023. Mais elle n'a pas été mesurée. Ce qui la départagerait est connu : des mesures globales indépendantes, par des instruments aux défauts différents, qui retrouvent ou non un creux, et à quelle profondeur ; puis, à plus long terme, des cartes du signal à 21 cm, qui montreraient non plus une moyenne sur le ciel mais la répartition du gaz et des premières bulles de lumière[24]. Tant que ces mesures n'existent pas, le seul témoin de la nuit est un témoin dont on n'a qu'une déposition, contestée.

8.5 Où finit la nuit ?

La fin des âges sombres dépend de ce qu'on appelle la fin. Deux définitions coexistent dans les sources, et elles ne désignent pas le même événement.

La première fixe la fin de la nuit à l'allumage des premières étoiles. C'est celle de la frise du livre, qui arrête les âges sombres vers 100 millions d'années wiki-chrono, et c'est la plus naturelle : la nuit finit quand quelque chose brille. Selon Klessen et Glover, les étoiles de population III se forment à $z \leq 30$, soit à partir d'environ 100 millions d'années Klessen 2023. Cette date est une hypothèse : aucune étoile de population III n'a été observée directement Klessen 2023, et le signal radio qui aurait pu dater leur allumage est contesté Singh 2022.

Cette première fin est tout de même encadrée par l'autre côté, celui des objets que l'on voit. Le télescope spatial James Webb a confirmé par spectroscopie la galaxie MoM-z14 à $z = 14{,}44$, vue 280 millions d'années après le Big Bang Naidu 2025. Une autre galaxie de la même époque, JADES-GS-z14-0, contient déjà de l'oxygène, à hauteur de 5 à 20 % de la teneur du Soleil, « à peine 300 millions d'années après le Big Bang » Schouws 2025. Or l'oxygène n'existait pas à la sortie de la nuit : il est forgé dans les étoiles et dispersé par leur mort Klessen 2023. Une galaxie qui en contient à 300 millions d'années suppose donc au moins une génération d'étoiles déjà nées, déjà mortes, avant elle. Dès 2018, avant Webb, les étoiles d'une galaxie à $z = 9{,}1$ étaient datées d'une formation vers 250 millions d'années Hashimoto 2018. Ces observations ne voient pas la fin de la nuit ; elles la bornent. Les premières étoiles se sont allumées, au plus tard, quelque part avant 250 millions d'années. Ce que ces galaxies disent de la rapidité de l'aube est la matière du chapitre 10.

La seconde définition fixe la fin de la nuit à la réionisation. Quand les premières sources brillent, leur lumière ultraviolette arrache à nouveau les électrons de l'hydrogène intergalactique wiki-chrono. Le gaz neutre de la nuit redevient, par bulles qui grossissent autour des sources et finissent par se rejoindre, un gaz ionisé ; la frise appelle ce basculement « la fin des âges sombres » wiki-chronoesa2015reion. Cette définition a un avantage sur la première : elle se mesure.

Elle se mesure dans le fond diffus lui-même, et le mécanisme est celui qui avait rendu l'Univers opaque avant 380 000 ans. Des électrons libres diffusent la lumière. Quand la réionisation les libère, une petite fraction des photons du fond diffus, qui voyageaient en ligne droite depuis la recombinaison, est à nouveau diffusée en chemin. La grandeur qui compte ces diffusions est la même que celle qui définit la surface de dernière diffusion : la profondeur optique, notée τ (→ chap. 6). Planck mesure $\tau = 0{,}054 \pm 0{,}007$ Planck 2018. Autrement dit, environ 5 % des photons du fond diffus ont été diffusés une seconde fois après la nuit[25]. C'est l'un des six paramètres du modèle de base planck2018tab : la carte de la première lumière garde aussi la trace de la fin de la nuit.

Ce chiffre n'est pas encore une date. τ compte le total des diffusions subies en chemin ; il dit combien d'électrons libres la lumière a rencontrés, pas quand. Une réionisation précoce et lente peut donner le même total qu'une réionisation tardive et rapide. Pour en tirer une date, Planck suppose une forme simple pour la transition, une bascule régulière de l'état neutre à l'état ionisé autour d'un décalage vers le rouge central, et ajuste ce décalage : le mi-parcours de la réionisation tombe alors à $z = 7{,}68 \pm 0{,}79$ Planck 2018. Planck précise lui-même que ce mi-parcours « suppose un modèle tanh simple » Planck 2018[26]. Converti par la règle de la section précédente, $z = 7{,}68$ donne environ 670 millions d'années, et la marge en z correspond à une fourchette d'environ 590 à 780 millions d'années Planck 2018[27]. Le tableau du Particle Data Group donne 690 millions d'années pour la même époque pdg2019-astro.

Cette date a bougé, et c'est par elle que la chronologie de la nuit s'est allongée. En 2015, l'Agence spatiale européenne annonçait, à partir des données de Planck, que les âges sombres avaient pris fin « quelque 550 millions d'années après le Big Bang, plus de 100 millions d'années plus tard qu'on ne le pensait auparavant », avec une réionisation achevée vers 900 millions d'années esa2015reion. L'extrait dont dispose ce livre ne dit ni quelle grandeur était retenue comme « fin », ni sur quelle mesure antérieure reposait l'estimation plus précoce[28]. Depuis, la fin de la réionisation a elle-même reculé : les spectres de 67 quasars lointains montrent des fluctuations liées à la réionisation jusqu'à $z = 5{,}3$, soit environ 1,1 milliard d'années Bosman 2022. Ces fluctuations sont les dernières poches de gaz neutre, que la lumière des sources n'a pas encore atteintes.

Les deux définitions donnent donc des âges sombres de durées très différentes. Avec la première, la nuit dure environ cent millions d'années et s'achève dans une hypothèse. Avec la seconde, elle dure un demi-milliard d'années et s'achève dans une mesure, qui dépend elle-même d'un modèle de transition. L'intervalle qui les sépare, de l'ordre de cent millions à plus d'un demi-milliard d'années, n'est pas une incertitude à réduire : c'est l'aube elle-même, la période pendant laquelle des sources déjà allumées n'ont pas encore rendu le gaz transparent à l'ultraviolet. Les chapitres qui suivent la racontent (→ chap. 9)(→ chap. 11).

La question de la partie, pourquoi la chronologie de cet allumage change sans cesse, reçoit ici une première réponse. Chacune des bornes repose sur un observable différent. La fin selon la première définition repose sur une théorie de la formation des étoiles, contrainte par le bas par le signal radio, contesté, et par le haut par les galaxies que Webb découvre à des décalages toujours plus grands. La fin selon la seconde repose sur τ, un total converti en date par un modèle de transition, et sur les quasars. Quand un de ces observables change, la frise change. Les conversions, elles, ne bougent presque pas ; ce qui bouge, ce sont les z auxquels on attache les événements.

La nuit s'achève donc sur des étoiles que la logique impose et que personne n'a vues. Il fallait bien que les premières étoiles se forment dans un gaz sans métaux, puisque c'était le seul gaz disponible ; il fallait bien qu'elles précèdent les galaxies déjà riches en oxygène que Webb voit à 300 millions d'années. Leur existence est une nécessité, leurs propriétés une théorie Klessen 2023. C'est par elles que commence (→ chap. 9).

8.6 Ce qu'on ne sait pas

On ne sait pas quand les premières étoiles se sont allumées. La prédiction théorique, $z \leq 30$, soit à partir d'environ 100 millions d'années Klessen 2023, est encadrée par le haut par les galaxies de Webb, qui imposent des étoiles avant 250 à 300 millions d'années Hashimoto 2018Schouws 2025, et n'est encadrée par le bas par aucune mesure. L'annonce d'EDGES, qui aurait daté l'allumage vers 180 millions d'années Bowman 2018, est contredite par SARAS 3 à 95,3 % de confiance Singh 2022. Ni l'une ni l'autre des deux expériences n'atteint le seuil d'une découverte, dans un sens ou dans l'autre. Ce qui trancherait : d'autres mesures globales du spectre radio, par des instruments de conception différente, et à plus long terme des cartes du signal à 21 cm. La base de ce livre ne documente pas l'état de ces instruments après 2022 ; la question est ouverte à la date où ce chapitre est écrit, et un résultat nouveau pourrait déplacer la fin de la nuit de plusieurs dizaines de millions d'années.

On ne sait pas, dans les sources de ce livre, pourquoi le creux d'EDGES serait deux fois trop profond s'il était réel. L'écart aux prédictions Bowman 2018 est un fait ; les explications proposées, physiques ou instrumentales, ne sont pas documentées. C'est une lacune de la base, pas du savoir, et elle empêche de dire ce qu'une confirmation d'EDGES changerait au modèle des âges sombres.

On ne sait pas, ici, comment le gaz passe du réservoir d'un halo à une étoile. La croissance des surdensités par instabilité gravitationnelle est établie dans son principe Hu 2002 ; le rythme de cette croissance, la manière dont un gaz sans métaux perd sa chaleur, et la masse minimale d'un halo capable de former une étoile ne sont pas documentés dans la base. Ce ne sont pas des détails : ce sont ces paramètres qui fixent la valeur $z \approx 30$ que la frise prend comme fin de la nuit. La revue de Klessen et Glover les traite certainement Klessen 2023, mais les fiches n'en ont retenu que les conclusions.

On sait dater le mi-parcours de la réionisation dans un modèle, pas en dehors. Le chiffre $\tau = 0{,}054 \pm 0{,}007$ est une mesure ; le mi-parcours $z = 7{,}68 \pm 0{,}79$ suppose une transition de forme simple Planck 2018. Une réionisation plus étalée, commencée tôt par les premières étoiles et achevée tard, comme le suggèrent les quasars jusqu'à 1,1 milliard d'années Bosman 2022, donnerait le même τ avec un autre calendrier. Le bilan n'est d'ailleurs pas bouclé : additionnées, les galaxies déjà observées par Webb réioniseraient l'Univers trop tôt pour s'accorder avec le fond diffus et les quasars, ce que ses auteurs appellent une « crise du budget de photons » Munoz 2024. Ce qui départagerait les calendriers possibles : une mesure de τ plus précise, des mesures de l'état du gaz à plusieurs époques, et, de nouveau, les cartes à 21 cm, qui verraient les bulles ionisées grandir. La discussion appartient au chapitre 11.

On sait enfin que la conversion des z en âges tient, mais sous une condition. Elle suppose qu'aux époques de la nuit l'expansion n'était gouvernée que par la matière, dont Planck mesure la densité absolue planck2018tab. Les solutions à la tension sur le taux d'expansion actuel qui modifient la physique d'avant la recombinaison Knox 2020 toucheraient la lecture de la carte, et par elle, légèrement, cette densité ; les sources de ce livre ne chiffrent pas l'effet qu'elles auraient sur les dates des âges sombres. L'ordre de grandeur, comme le montre la section sur la datation, est bien moindre que l'effet sur l'âge actuel de l'Univers.

8.7 Ce que ce chapitre démontre

Après la recombinaison, vers 380 000 ans et 3 000 K, à $z \approx 1\,100$, l'Univers devient un gaz neutre d'hydrogène et d'hélium, transparent et sans aucune source de lumière wiki-chronowiki-recombwiki-cmb. La transition est graduelle : Planck place la surface de dernière diffusion à $z^* = 1\,089{,}92 \pm 0{,}25$, et l'Univers n'est neutre à 90 % que vers $z \approx 1\,070$ planck2018tabwiki-recomb. La seule lumière présente est le fond diffus, qui s'éloigne en se refroidissant ; étiré d'un facteur d'environ 1 100, il nous arrive aujourd'hui à 2,7 K Fixsen

2009. C'est ce qui définit les âges sombres, datés par la frise de ~0,4 à ~100 millions d'années, « établi (pas observé directement) » wiki-chrono.

L'époque n'est pas immobile. Depuis 47 000 ans, la matière domine l'énergie de l'Univers, et la gravité, dominée par la matière noire, amplifie les inégalités de densité laissées par l'inflation ; les structures naissent par instabilité gravitationnelle wiki-chronoHu 2002. Libérée de la pression de la lumière, la matière ordinaire tombe dans les puits de la matière noire. L'empreinte des ondes sonores figées à la recombinaison traverse la nuit et se retrouve dans la répartition des galaxies, à une distance privilégiée d'environ 100 h^{-1} mégaparsecs Eisenstein 2005. Au bout de la croissance, les halos de matière noire retiennent le gaz sans métaux où naissent les premières étoiles, à $z \leq 30$ Boylankolchin 2023Klessen 2023.

Les dates de cette époque sont des décalages vers le rouge convertis dans le modèle standard. À ces époques, où seule la matière gouverne l'expansion, l'âge suit $t \approx 17{,}2$ milliards d'années $\times (1 + z)^{(-3/2)}$, calculé avec $H0 \approx 67{,}4$ km/s/Mpc et $\Omega m \approx 0{,}315$ Planck 2018 : $z = 30$ correspond à environ 100 millions d'années, $z = 20$ à 180 millions, $z = 15$ à 270 millions, et cette règle retrouve à moins de 10 % les couples publiés Bowman 2018Hashimoto 2018Naidu 2025Witstok 2025. La conversion est solide ; l'incertitude porte sur les z des événements. La borne de 0,4 million d'années est attachée à un objet observé, la surface de dernière diffusion ; la borne de 100 millions d'années est attachée à une prédiction.

Le seul témoin possible de la nuit est l'hydrogène neutre, qui absorbe ou émet à 21 cm, une raie que l'expansion transforme en ondes radio de quelques dizaines de mégahertz. En 2018, EDGES annonce un creux à 78 MHz, signe d'étoiles dès 180 millions d'années, mais d'une amplitude plus de deux fois supérieure aux plus grandes prédictions Bowman 2018 ; en 2022, SARAS 3 conclut que ce profil n'est pas d'origine astrophysique et le rejette à 95,3 % de confiance Singh 2022. L'aube vers 180 millions d'années reste plausible ; elle n'est pas mesurée.

La fin de la nuit dépend de sa définition. Fixée à l'allumage des premières étoiles, elle tombe vers 100 millions d'années et reste une hypothèse, bornée seulement par les galaxies déjà enrichies en oxygène que Webb voit vers 300 millions d'années Klessen 2023Schouws 2025. Fixée à la réionisation, elle se lit dans le fond diffus : $\tau = 0{,}054 \pm 0{,}007$ place le mi-parcours à $z = 7{,}68 \pm 0{,}79$, soit vers 670 millions d'années, dans un modèle de transition simple Planck 2018 ; Planck annonçait en 2015 une fin des âges sombres vers 550 millions d'années, plus de 100 millions d'années plus tard qu'on ne le pensait esa2015reion. L'écart entre les deux définitions est l'aube elle-même. La nuit se termine sur des étoiles que la logique impose et que personne n'a vues.

Notes

1. Calcul fait pour ce chapitre : $(1 + 1\,089{,}92) / (1 + 1\,070) \approx 1{,}019$, soit un étirement de près de 2 % entre la surface de dernière diffusion et le moment où l'Univers est neutre à 90 %. Le chapitre sur la première lumière donne le même chiffre. ↩

2. Calcul fait au chapitre sur la première lumière à partir des tables de Planck 2018 : $\Omega c\, h^2 / \Omega b\, h^2 = 0{,}1200 / 0{,}02237 \approx 5{,}4$. ↩

3. La relation selon laquelle la température du rayonnement varie comme l'inverse de l'étirement ($T \propto 1 + z$) est classique ; la fiche temps-cosmique la signale comme « non relue sur une source », et la fiche fond-diffus-cosmologique en tire la « simple vérification d'ordre de grandeur » 3 000 K / 1 091 ≈ 2,7 K. ↩

4. Calculs faits pour ce chapitre avec $T = 2{,}7255\ \text{K} \times (1 + z)$: $z = 100$ donne environ 275 K (environ 2 °C) ; $z = 30$, environ 84 K ; $z = 20$, environ 57 K. La comparaison avec un « filament d'ampoule » pour 3 000 K vient de la fiche fond-diffus-cosmologique. ↩

5. Présentation classique, non documentée dans les fiches : un corps à 3 000 K émet une part de son rayonnement dans le rouge visible, et le maximum de son émission glisse vers les grandes longueurs d'onde à mesure qu'il refroidit. Le moment précis où la lueur du fond diffus sort du visible n'est pas calculé dans les sources de ce livre. ↩

6. La frise (fiche frise-cosmique, tableau de la section 10) donne « Les âges sombres | ~0,4 à ~100 Ma | gaz neutre, sans étoile | établi (pas observé directement) ». Elle signalait la conversion z ≈ 30 → ~100 Ma comme « non vérifiée sur source » ; la fiche aube-cosmique la confirme par le calcul et par des couples z–âge publiés. ↩↩

7. Règles de trois faites pour ce chapitre, sur le modèle de l'année cosmique de la fiche frise-cosmique : 380 000 / 13,8 × 10^9 × 525 960 minutes ≈ 14,5 minutes ; 100 × 10^6 / 13,8 × 10^9 × 365 jours ≈ 2,6 jours. La nuit s'étend donc de 0 h 15 le 1er janvier au milieu du 3 janvier environ. L'attribution de l'image de l'année cosmique à Carl Sagan n'a pas été vérifiée. ↩

8. Raisonnement classique, dans le prolongement du chapitre sur la première lumière (la matière noire ne participe pas aux oscillations et continue de creuser ses puits ; la pression des photons disparaît au découplage). Les fiches n'énoncent pas sous cette forme la chute du gaz dans les puits de matière noire après la recombinaison. ↩

9. Calcul fait pour ce chapitre : 100 / 0,674 ≈ 148 Mpc, à environ 3 % de r = *144,43 Mpc (tables de Planck 2018). Eisenstein et al. (2005) mesurent la distance en h^{-1} Mpc, unité qui dépend du taux d'expansion adopté ; la comparaison précise entre la position du pic et r* passe par un modèle et n'est pas faite dans les fiches. ↩

10. Ces trois questions sont signalées comme manques. La fiche aube-cosmique mentionne que « le gaz primordial se fragmente facilement » et que les premières étoiles naîtraient « en petits amas » (Klessen et Glover 2023), mais ne décrit ni le refroidissement ni la masse minimale des halos. ↩

11. La fiche aube-cosmique (section 1) présente cette loi comme « notre calcul, pas une valeur lue », vérifié sur des couples z–âge publiés. L'énoncé selon lequel « l'énergie noire et le rayonnement ne pèsent presque rien » à ces époques est celui de la fiche. ↩

12. Résultat classique, non écrit dans les fiches : dans un Univers gouverné par la seule matière, t = 2 / (3 H0 √Ωm) × (1 + z) ^ (−3/2). Vérification faite pour ce chapitre : 1/H0 ≈ 14,5 milliards d'années pour H0 = 67,4 km/s/Mpc ; 2/3 × 14,5 / √0,315 ≈ 17,2 milliards d'années. Comme H0 = 100 h km/s/Mpc, le produit H0 √Ωm s'écrit 100 km/s/Mpc × √(Ωm h^2) : le préfacteur ne dépend que de la densité physique de matière, Ωm h^2 ≈ 0,143, que les tables de Planck donnent comme somme de Ωb h^2 et Ωc h^2. ↩↩

13. Calculs de la fiche aube-cosmique (section 1), refaits pour ce chapitre : 17,2 / 31 ^ 1,5 ≈ 0,100 ; 17,2 / 21 ^ 1,5 ≈ 0,179 ; 17,2 / 16 ^ 1,5 ≈ 0,269 ; 17,2 / 15,44 ^ 1,5 ≈ 0,284 ; 17,2 / 14 ^ 1,5 ≈ 0,328 milliard d'années. L'écart le plus grand est celui de Hashimoto (270 contre 250, environ 8 %). ↩

14. Calcul fait pour ce chapitre : 17,2 × 10^9 / 1 090,9 ^ 1,5 ≈ 477 000 ans, contre 372 900 ans pour z = 1 089,9 dans le tableau du Particle Data Group (2019). L'attribution de l'écart au rayonnement est un raisonnement de ce chapitre, fondé sur la remarque de la fiche selon laquelle la loi vaut quand le rayonnement « ne pèse presque rien ». ↩

15. Calcul fait pour ce chapitre : 17,2 / 8,7 ^ 1,5 ≈ 0,670 milliard d'années, valeur donnée par la fiche aube-cosmique. Le Particle Data Group donne 690 millions d'années pour z = 7,7. L'attribution de l'écart, environ 3 %, à l'énergie noire ou à de petites différences de paramètres n'est pas établie dans les fiches. ↩

16. Raisonnement de ce chapitre, appuyé sur la note sur le préfacteur et sur le chapitre sur l'âge, qui range les dates « après le Big Bang » des grands décalages vers le rouge parmi les dates robustes. Aucune source de la base ne chiffre l'effet d'une modification du modèle sur la date de z = 30. ↩

17. Le fait (absorption ou émission à 21 cm par l'hydrogène neutre des âges sombres) est donné par la fiche aube-cosmique, qui s'appuie sur Bowman et al. (2018). Le mécanisme physique de cette raie n'est pas documenté dans les fiches. ↩

18. Calculs faits pour ce chapitre : 3 × 10^8 m/s / 0,21 m ≈ 1,43 × 10^9 Hz, soit environ 1,4 GHz (la valeur précise, 1 420 MHz, est classique mais n'est pas tirée des fiches) ; 1 420 / 21 ≈ 68 MHz pour z = 20 ; 1 420 / 31 ≈ 46 MHz pour z = 30. ↩↩

19. Le nom de Judd Bowman est celui du premier auteur de l'article (fiche aube-cosmique, sources). Le lieu d'installation de l'antenne, en Australie-Occidentale, n'est pas documenté dans les fiches et doit être vérifié avant publication. ↩

20. Calcul fait pour ce chapitre : 1 420 / 78 ≈ 18,2, soit z ≈ 17,2 ; par la règle, 17,2 / 18,2 ^ 1,5 ≈ 0,22 milliard d'années. Le bord basse fréquence est situé par la fiche aube-cosmique « vers z ≈ 20 » (180 millions d'années selon Bowman et al.). ↩

21. Le fait que le ciel émette, à ces fréquences, un rayonnement radio bien plus intense que le signal cherché (émission de la Galaxie, notamment) est un point classique de la radioastronomie à 21 cm, non documenté dans les fiches. Il est signalé comme

manque. ↩

22. Le nom de Saurabh Singh est celui du premier auteur de l'article (fiche aube-cosmique, sources). L'origine indienne de l'équipe et le principe de l'instrument ne sont pas documentés dans les fiches et doivent être vérifiés avant publication. ↩

23. Calcul fait pour ce chapitre : une confiance de 95,3 % correspond, pour une loi normale et un test bilatéral, à environ 1,99 écart-type. Le seuil de cinq écarts-types pour une découverte est rappelé au chapitre sur l'âge (fiche energie-matiere-noires). ↩

24. La fiche aube-cosmique (en-tête, rubrique « projeté ») annonce que « la radioastronomie à 21 cm (mesure globale, puis cartes) » devrait trancher entre les explications. Les instruments concernés et leur calendrier ne sont pas documentés dans les fiches. ↩

25. Calcul fait pour ce chapitre à partir de la définition de la profondeur optique donnée au chapitre sur la première lumière : la fraction de photons diffusés vaut $1 - e^{(-\tau)} \approx 1 - e^{(-0{,}054)} \approx 5{,}3$ %. Le lien entre τ et la réionisation est donné par la fiche aube-cosmique (« profondeur optique de réionisation ») et par les tables de Planck. ↩

26. La fonction tanh (tangente hyperbolique) décrit une bascule en S, lente au début, rapide au milieu, lente à la fin. La citation est celle des tables de Planck 2018 : « The reionization redshift mid-point z_re and optical depth τ here assumes a simple tanh model ». La présentation de τ comme un total qui ne fixe pas le calendrier est un raisonnement de ce chapitre. ↩

27. Calculs faits pour ce chapitre avec la règle $t \approx 17{,}2 \times (1 + z)^{(-3/2)}$ milliards d'années : $z = 8{,}47$ donne environ 590 millions d'années ; $z = 6{,}89$ environ 780 millions. La règle perd un peu de précision à ces époques (voir la note sur le bord bas de la règle). ↩

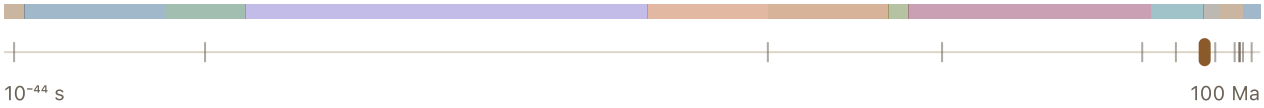
28. La fiche frise-cosmique cite le communiqué de l'ESA (2015) : « these 'Dark Ages' ended some 550 million years after the Big Bang – more than 100 million years later than previously thought ». Les valeurs antérieures de τ (celles de WMAP notamment) ne figurent pas dans les fiches. La phrase ne peut pas désigner l'allumage des premières étoiles, puisque des galaxies sont vues dès 280 millions d'années ; elle désigne vraisemblablement le moment où la réionisation devient importante, mais le texte du communiqué n'a pas été lu au-delà de l'extrait. ↩

CHAPITRE 9

Les premières étoiles

~100 à ~270 Ma (z ≈ 30 à 15)

brouillon · 7407 mots



9.1 Un gaz qui ne contient rien d'autre

Le gaz dont les premières étoiles vont naître a été fabriqué en une vingtaine de minutes, et il n'a pas changé depuis. À la sortie de la nucléosynthèse primordiale, il contient en masse environ trois quarts d'hydrogène et un quart d'hélium 4, avec des traces de deutérium, d'hélium 3 et de lithium wiki-chronofields2014pdg. Les traces sont minuscules : quelques cent-millièmes de l'hydrogène pour le deutérium et l'hélium 3, un dix-milliardième environ pour le lithium 7 fields2014pdg. Le chapitre sur les trois premières minutes a raconté comment ces proportions se sont fixées (→ chap. 5). Celui sur les âges sombres a suivi ce gaz pendant la nuit qui a suivi la première lumière : pendant une centaine de millions d'années, rien n'y a été ajouté, parce que rien n'y brûlait (→ chap. 8).

La liste des éléments présents s'arrête au lithium, et ce n'est pas une affaire de temps. La chaîne des réactions nucléaires des premières minutes monte marche par marche, en ajoutant à chaque fois un proton, un neutron ou un noyau léger. Deux marches manquent : il n'existe aucun noyau stable de masse 5 ni de masse 8 fields2014pdg. Un noyau d'hélium 4 qui capte un neutron ou un proton donne un noyau de masse 5, qui n'existe pas de façon stable ; deux noyaux d'hélium qui fusionnent donnent un noyau de masse 8, qui n'existe pas davantage fields2014pdg[1]. Les noyaux plus lourds sont en outre protégés par la répulsion électrique entre charges positives, les « barrières coulombiennes », qui freinent les réactions entre noyaux chargés fields2014pdg. Et le gaz est alors dilué, d'une densité « comparable à celle de l'air », si bien que seules comptent les rencontres entre deux noyaux fields2014pdg. Au bout d'une vingtaine de minutes, la température et la densité sont devenues trop basses pour toute fusion notable wiki-bbn, et l'inventaire est clos.

Pour franchir la marche de masse 8, il faut une autre réaction, et un autre lieu. Dans les étoiles, l'hélium fusionne en carbone par la réaction dite « triple alpha » : trois noyaux d'hélium donnent un noyau de carbone 12, en passant par le béryllium 8 wiki-stellarnuc. Le béryllium 8 est précisément le noyau de masse 8 qui manquait aux premières minutes. La réaction met en jeu trois noyaux d'hélium, alors que le gaz des premières minutes ne permettait que des rencontres à deux[2]. La revue de Chiaki Kobayashi, Amanda Karakas et Maria Lugaro, qui reconstruit l'origine de tous les éléments stables du carbone à l'uranium, en tire la conséquence sans détour : à cause de la nature des réactions triple alpha, les éléments de masse 12 ou plus « ne sont pas produits pendant le Big Bang mais formés à l'intérieur des étoiles » Kobayashi 2020. Le carbone, l'azote, l'oxygène, le fer, tout ce qui pèse au moins douze nucléons, sort donc d'une étoile ou de sa mort. Le chapitre sur la forge décrira comment une étoile monte ainsi de l'hélium au fer (→ chap. 12).

De ces deux faits, l'un sur le gaz, l'autre sur les étoiles, suit un raisonnement court. Les astronomes appellent « métaux » tous les éléments plus lourds que l'hélium (→ chap. 8). Aujourd'hui, toutes les étoiles dont les sources de ce livre donnent la composition en contiennent. La surface du Soleil en compte 1,39 % de sa masse Asplund 2021. Les vieilles étoiles du halo de la Galaxie, où l'on mesure le lithium primordial, sont pauvres en métaux mais pas sans métaux : les moins riches de l'échantillon principal ont environ cinq

cents fois moins de fer que le Soleil Fields 2020[3]. Or ces métaux ne peuvent venir que d'étoiles plus anciennes. En remontant la chaîne, étoile après étoile, on arrive forcément à une génération qui n'a hérité d'aucun métal, parce qu'il n'y en avait encore aucun : une génération née du gaz des premières minutes, tel quel. Les astronomes l'appellent « population III » Klessen 2023[4].

Ce raisonnement fonde tout le chapitre, et il faut voir ce qu'il établit et ce qu'il n'établit pas. Il établit que des étoiles sans métaux ont existé. Il ne dit ni quand elles se sont formées, ni combien elles pesaient, ni combien il y en avait, ni combien de temps elles ont vécu. Aucune observation n'intervient dans sa conclusion : il repose sur la physique nucléaire des premières minutes, que le deutérium mesuré confirme à 1 % près Fields 2020, et sur la physique nucléaire des étoiles. La frise du livre résume ce statut en une phrase : l'existence des étoiles de population III est une nécessité logique, leurs propriétés restent théoriques [5].

9.2 Quand : une date qui est un calcul

La date des premières étoiles vient d'une théorie, celle de la formation des étoiles, et non d'une observation. Selon la revue de référence de Ralf Klessen et Simon Glover, parue en 2023, les étoiles de population III se forment à partir d'un gaz primordial sans métaux « à des décalages vers le rouge de 30 et moins », et elles dominent la formation des étoiles jusqu'à des décalages vers le rouge de 15 à 20 Klessen 2023. Au-delà, c'est-à-dire plus tard, les étoiles de population II, nées d'un gaz déjà enrichi en métaux, prennent le relais Klessen 2023.

Un décalage vers le rouge z mesure l'étirement de l'Univers : $1 + z$ est le rapport entre sa taille aujourd'hui et sa taille à l'époque considérée (→ chap. 8). Pour transformer z en âge, il faut connaître l'histoire de l'expansion, donc passer par le modèle standard. Aux époques de ce chapitre, la matière gouverne seule l'expansion, et l'âge suit une loi simple, établie au chapitre précédent avec les paramètres de Planck : $t \approx 17{,}2$ milliards d'années $\times (1 + z)^{(-3/2)}$ Planck 2018(→ chap. 8). Elle donne environ 100 millions d'années pour $z = 30$, 180 millions pour $z = 20$, 270 millions pour $z = 15$ [6]. Cette loi n'est pas lue dans une publication : c'est un calcul du livre. Il a été contrôlé sur cinq couples z–âge publiés, dont ceux de l'expérience EDGES (180 millions d'années vers $z \approx 20$) Bowman 2018 et de l'équipe de Takuya Hashimoto (« environ 250 millions d'années », $z \approx 15$) Hashimoto 2018, et il les retrouve à moins de 10 % près (→ chap. 8).

La période des premières étoiles s'écrit donc ainsi : elles commencent à se former vers 100 millions d'années, et elles dominent jusque vers 180 à 270 millions d'années. Sur l'année cosmique, où les 13,8 milliards d'années de l'histoire tiennent en douze mois, la première lumière est émise un quart d'heure après minuit le 1er janvier ; les premières étoiles apparaissent vers le 3 janvier, et la population II prend le relais entre le 5 et le 8 [7]. L'ère des étoiles sans métaux dure, selon la borne retenue, de 80 à 170 millions d'années environ.

Deux incertitudes de nature différente se superposent dans ces chiffres. La première porte sur la conversion, et elle est faible. Le préfacteur de la loi ne dépend que de la densité absolue de matière, que Planck mesure presque directement sur le fond diffus ; même si la tension sur le taux d'expansion actuel se résolvait par une valeur plus élevée, les dates de cette époque bougeraient bien moins que l'âge de l'Univers (→ chap. 8). La seconde porte sur les décalages vers le rouge eux-mêmes, et elle est entière. Les valeurs 30, 20 et 15 sont des résultats de la théorie, qui décrit comment le gaz s'effondre dans les halos de matière noire, se refroidit et forme des étoiles. On sait très précisément quel âge avait l'Univers à $z = 30$; on ne sait pas si les premières étoiles s'y trouvaient.

La date du relais est d'ailleurs une fourchette, « 15 à 20 », et non un instant. Klessen et Glover décrivent une domination, c'est-à-dire une proportion dans la formation d'étoiles de tout l'Univers, qui bascule d'une population à l'autre Klessen 2023. Rien, dans cette description, n'impose que la bascule se produise partout à la fois. Un gaz est enrichi en métaux quand des étoiles voisines y ont rejeté les leurs ; une région restée à l'écart peut rester vierge plus longtemps[8]. Cette remarque paraît anodine à ce stade. Elle explique pourtant pourquoi le meilleur candidat de population III connu se trouve à 830 millions d'années, bien après la fin théorique de leur époque.

9.3 Un portrait tiré des simulations

Tout ce que cette section décrit est prédit, pas observé. Les propriétés des étoiles de population III sont celles que donnent les calculs et les simulations numériques de l'effondrement du gaz primordial, que la revue de Klessen et Glover rassemble Klessen 2023. Le portrait qui en sort a trois traits principaux.

Le premier trait est le lieu de naissance. Selon la revue, le gaz primordial « se fragmente facilement » : en s'effondrant, un nuage ne donne pas une étoile unique mais se divise en plusieurs morceaux, et les premières étoiles naîtraient en petits amas Klessen 2023. Le mécanisme qui gouverne cette fragmentation n'est pas décrit dans les sources de ce livre. On sait en principe ce qu'il doit résoudre : un gaz qui s'effondre se comprime et s'échauffe, et pour atteindre la densité d'une étoile il doit se débarrasser de cette chaleur en rayonnant. Dans les galaxies actuelles, les métaux aident le gaz à rayonner ; le gaz primordial n'en a aucun (→ chap. 8). Comment un mélange d'hydrogène et d'hélium y parvient, et à quel rythme, fixe à la fois la date des premières étoiles et leur masse[9]. Le livre n'a pas encore la fiche qui l'explique.

Le deuxième trait est la répartition des masses. Les modèles donnent aux étoiles de population III une fonction de masse « logarithmiquement plate » Klessen 2023. Une fonction de masse dit combien d'étoiles naissent à chaque masse. « Logarithmiquement plate » signifie qu'il naît autant d'étoiles dans chaque intervalle où la masse est multipliée par un même facteur : autant d'étoiles entre 1 et 10 masses solaires qu'entre 10 et 100, autant entre 10 et 100 qu'entre 100 et 1 000 Klessen 2023[10]. Cette égalité des nombres a une conséquence sur la masse totale. Si chaque tranche compte autant d'étoiles, et que les étoiles de la tranche 10–100 pèsent dix fois plus que celles de la tranche 1–10, la tranche supérieure pèse à peu près dix fois plus que la tranche inférieure. L'essentiel de la masse d'une telle population se trouve donc dans ses étoiles les plus lourdes[10]. C'est ce que veut dire la formule « riche en étoiles massives ».

Le troisième trait est l'extrême. Dans les scénarios les plus poussés que la revue discute, certaines étoiles de population III atteindraient plusieurs centaines de milliers de masses solaires Klessen 2023. Leurs restes pourraient alors avoir servi de germes aux trous noirs supermassifs que l'on observe dans les quasars les plus lointains Klessen 2023, ces noyaux de galaxies extrêmement lumineux que le chapitre sur les âges sombres a croisés comme sondes de la réionisation (→ chap. 8)[11]. L'idée répond à une question que les sources de ce livre ne détaillent pas : comment des trous noirs géants ont pu exister si tôt. Elle ne l'établit pas : elle fournit un candidat pour la graine.

Il faut mesurer l'amplitude de ce portrait. D'un côté, des amas de quelques milliers de masses solaires en tout, la taille que suggère le meilleur candidat observé (dernière section) Visbal 2025. De l'autre, une étoile isolée qui pèserait à elle seule cent fois plus qu'un tel amas entier. La même théorie couvre les deux, parce que la masse d'une étoile de population III dépend de détails de l'effondrement (refroidissement, fragmentation, rayonnement de l'étoile naissante sur son propre nuage) que les simulations traitent différemment et que rien n'a encore vérifié. Les masses de ces étoiles, leur nombre et leurs effets exacts restent hypothétiques[5].

Un trait du portrait découle directement de la masse, et c'est lui qui interdit de les voir : une étoile massive vit peu. Pour une étoile de 25 masses solaires de type actuel, la combustion de l'hydrogène dure environ 10 millions d'années, puis les étapes suivantes s'accélèrent jusqu'à la combustion du silicium, qui ne dure que cinq jours, avant l'effondrement du cœur en quelques secondes wiki-sib. Ces chiffres ne sont pas ceux d'une étoile sans métaux, que les sources de ce livre ne donnent pas ; ils donnent l'ordre de grandeur[12]. Une étoile de ce genre brille donc pendant une durée de l'ordre du dixième de l'ère des étoiles de population III, puis disparaît. Si la fonction de masse est bien riche en étoiles massives, l'essentiel de la lumière de cette population s'éteint vite, et il faut sans cesse de nouvelles naissances pour qu'elle continue de briller.

9.4 Ce qu'elles laissent : la première forge

Les premières étoiles agissent sur leur environnement de deux manières, que la revue de Klessen et Glover réunit en une phrase : leur rayonnement et leurs supernovas règlent la formation des étoiles qui suivent Klessen 2023. Ce que recouvre ce réglage, dans quel sens il agit (freiner ou déclencher la formation voisine), et à quelle échelle, les fiches ne le détaillent pas[13]. Deux effets sont en revanche établis par les chapitres voisins. Le rayonnement ultraviolet de ces étoiles est le premier à atteindre l'hydrogène neutre de la nuit : c'est par lui que devait apparaître, selon la prédiction, le creux radio que l'expérience EDGES a cherché Bowman 2018(→ chap. 8), et c'est le même rayonnement qui commencera à arracher les électrons de l'hydrogène intergalactique (→ chap. 11).

Le second effet est chimique, et il est le plus lourd de conséquences pour la suite du livre. C'est dans les premières étoiles, et dans leurs explosions, que sont forgés les premiers éléments au-delà du lithium Klessen 2023[5]. L'hélium d'une étoile fusionne en carbone ; chez les étoiles massives, la contraction et l'échauffement du cœur déclenchent ensuite la combustion du carbone, de l'oxygène, puis du silicium, jusqu'au nickel 56 qui donnera le fer wiki-stellarnucwiki-sib. Quand le cœur s'effondre, l'étoile explose en supernova, et une partie de ce qu'elle a fabriqué est projetée dans le gaz alentour. Dans le partage actuel des éléments entre leurs sources, l'oxygène, le magnésium, le silicium, le soufre et le calcium viennent surtout des étoiles massives, éjectés par ces supernovas à effondrement de cœur Kobayashi 2020.

Les rendements propres aux étoiles de population III, c'est-à-dire la quantité de chaque élément qu'une étoile sans métaux de telle masse fabrique et rejette, ne sont pas dans les sources de ce livre[14]. Une indication sur l'ordre des choses peut quand même se tirer du partage actuel. Environ la moitié du fer de l'Univers vient aujourd'hui des supernovas de type Ia, des explosions de naines blanches qui arrivent avec retard, puisqu'une naine blanche doit d'abord se former Kobayashi 2020. Et environ la moitié du carbone et de l'azote vient des vents d'étoiles de masse faible ou moyenne en fin de vie Kobayashi 2020, étoiles qui vivent plus longtemps que les massives. Pendant les premières dizaines de millions d'années de l'aube, seules les étoiles massives ont eu le temps de mourir. Les premiers métaux rejetés dans le gaz sont donc vraisemblablement ceux des supernovas à effondrement de cœur, où l'oxygène tient une grande place[15]. C'est un raisonnement sur le partage actuel, appliqué à une population dont on ignore les masses ; il reste à confronter aux calculs de la revue.

Le gaz enrichi par ces explosions donne naissance à la génération suivante. Ses étoiles contiennent des métaux, même en faible proportion : ce sont les étoiles de population II, qui prennent le relais vers $z \approx 15$ à 20, soit entre 180 et 270 millions d'années environ Klessen 2023. À partir de ce moment, le mécanisme que Kobayashi et ses coauteurs décrivent pour toute l'histoire de la Galaxie est en marche : les éléments plus lourds que l'hélium sont fabriqués dans les étoiles, rejetés quand elles meurent, et la génération suivante naît de nuages qui les contiennent Kobayashi 2020. Fabriquer, rejeter, renaître : chaque tour de la boucle ajoute des métaux au gaz. Chaque étoile garde dans son atmosphère la chimie du gaz dont elle est née, ce

qui en fait un fossile ; c'est le principe de ce que les astronomes appellent l'archéologie galactique Kobayashi 2020.

Le fil qui mène au Soleil part de là. Le Soleil naît environ 9,2 milliards d'années après le début, d'un gaz qui a déjà fait de nombreux tours de cette boucle (→ chap. 15)[16]. Le 1,39 % de sa masse qui n'est ni hydrogène ni hélium Asplund 2021 est la somme de tout ce que ces tours ont ajouté. On ne peut pas compter les générations qui séparent la population III du Soleil ; la fiche consacrée à cette histoire le dit non chiffrable, et l'image juste est celle d'un recyclage plutôt que d'une lignée [17]. Les premières étoiles n'ont fourni qu'une infime partie des métaux du Soleil. Elles ont en revanche rompu l'état initial : après elles, plus aucune étoile n'a pu naître du gaz des premières minutes, sauf dans les régions qu'aucune explosion n'avait encore atteintes.

9.5 Des traces sans témoin

Personne n'a observé d'étoile de population III [5]. La fiche sur l'aube cosmique en donne deux raisons : elles sont trop lointaines, et elles vivent trop peu Klessen 2023[18]. Une étoile vue à 100 ou 200 millions d'années est vue à travers presque toute l'histoire de l'Univers ; si elle est massive, elle n'a brillé que quelques millions d'années ; et elle était, selon le portrait de la théorie, regroupée avec d'autres dans un amas de quelques milliers de masses solaires, bien moins lumineux qu'une galaxie. Ce qu'on a, ce sont des traces laissées par ce qu'elles ont fait. Chacune établit qu'il y avait des étoiles avant un certain moment ; aucune ne dit ce qu'elles étaient.

La première trace est une chronologie reconstituée. En 2018, avant le télescope spatial James Webb, l'équipe de Takuya Hashimoto détecte, dans une galaxie vue à $z = 9{,}1$, une raie d'émission d'oxygène deux fois ionisé ; l'analyse de sa lumière révèle une composante d'étoiles dominante formée « environ 250 millions d'années après le Big Bang, ce qui correspond à un redshift d'environ 15 » Hashimoto 2018. La galaxie elle-même est vue vers 540 millions d'années [19]. Ses étoiles les plus nombreuses avaient donc déjà près de trois cents millions d'années quand la lumière qui nous parvient est partie. L'ordre de grandeur coïncide avec la fin théorique de l'ère de la population III : à $z \approx 15$, selon Klessen et Glover, la population II prend le relais Klessen 2023. La mesure ne dit pas à quelle population appartenaient ces étoiles. Elle dit qu'une galaxie formait des étoiles en nombre à l'époque où, selon la théorie, les premières étoiles achevaient leur règne.

La deuxième trace est chimique, et c'est la plus contraignante. En 2025, l'équipe de Sander Schouws détecte avec le réseau de radiotélescopes ALMA une raie de l'oxygène dans la galaxie JADES-GS-z14-0, vue à $z = 14{,}18$, soit à peine 300 millions d'années après le début Schouws 2025[20]. La galaxie est « étonnamment enrichie en métaux » : sa métallicité vaut de 5 à 20 % de celle du Soleil Schouws 2025. Rapportée au Soleil, dont 1,39 % de la masse est faite de métaux Asplund 2021, cette fourchette correspond à environ 0,07 à 0,3 % de la masse du gaz[21]. Le chapitre sur les âges sombres s'en est servi comme d'une borne : il fallait des étoiles avant le chapitre 8. On peut en tirer davantage. L'oxygène est surtout produit par les étoiles massives et libéré par leur explosion Kobayashi 2020. Pour qu'une galaxie en contienne à 300 millions d'années, il a fallu que des étoiles naissent, vivent, explosent, et que leur oxygène se mêle au gaz d'une galaxie qui forme encore des étoiles. Une ou plusieurs générations l'ont précédée Schouws 2025. Si les premières étoiles apparaissent vers 100 millions d'années, comme le prévoit la théorie, tout cela a tenu en moins de deux cents millions d'années ; le Soleil, qui n'a qu'un peu plus de cinq fois plus de métaux que la borne haute de cette galaxie, est né 9 milliards d'années plus tard[22]. Les auteurs y voient la confirmation que les galaxies du jeune Univers évoluent vite Schouws 2025. Les étoiles de JADES-GS-z14-0 elles-mêmes, nées

d'un gaz enrichi, ne sont pas de population III : la galaxie est un témoin de ce qui l'a précédée, pas un exemple.

La troisième trace est celle qu'on attendait le plus, et elle manque. Le rayonnement des premières étoiles modifie la manière dont l'hydrogène neutre absorbe à 21 cm, et l'allumage doit apparaître comme un creux dans le spectre radio du ciel, à quelques dizaines de mégahertz Bowman 2018. En 2018, EDGES annonce un tel creux, centré à 78 mégahertz, dont le bord indiquerait des étoiles dès 180 millions d'années ; mais sa profondeur est plus de deux fois supérieure aux plus grandes prédictions Bowman 2018. En 2022, le radiomètre SARAS 3 conclut que ce profil « n'est pas d'origine astrophysique » et le rejette à 95,3 % de confiance Singh 2022. Le chapitre sur les âges sombres a détaillé la mesure, sa difficulté et ce qui départagerait les deux instruments (→ chap. 8). Pour les premières étoiles, le bilan tient en une ligne : un allumage vers 180 millions d'années est plausible et compatible avec la théorie, mais il n'est pas mesuré.

Une quatrième trace possible reste à l'état de proposition. En 2025, Oswaldo Miranda publie un modèle d'évolution chimique qui couple la formation des structures aux rendements des étoiles de population III et de population II. Le « plateau de Spite », cette valeur uniforme du lithium dans les vieilles étoiles pauvres en métaux, trois fois inférieure à la prédiction des premières minutes, y apparaît naturellement ; il deviendrait une « signature observationnelle » de la formation des étoiles de population III Miranda 2025. Si cette lecture tenait, les premières étoiles auraient laissé leur marque dans une énigme vieille de plusieurs décennies, que le chapitre sur les trois premières minutes a exposée (→ chap. 5). C'est l'affirmation d'un seul auteur, qui n'est pas reprise par la communauté à ce stade, et la piste la plus suivie pour le lithium reste une destruction dans les étoiles elles-mêmes Korn 2024.

Mises ensemble, ces traces forment un encadrement plutôt qu'un portrait. Par le haut, l'oxygène de JADES-GS-z14-0 impose des étoiles mortes avant 300 millions d'années, et la population d'étoiles de Hashimoto une formation stellaire importante vers 250 millions d'années. Par le bas, rien : le seul signal qui aurait daté l'allumage est contesté. Et sur la nature des premières étoiles, leur absence de métaux, leur masse, leur regroupement, aucune de ces traces ne dit quoi que ce soit. Pour le savoir, il faudrait observer un système de population III lui-même.

9.6 LAP1-B, trouvé tard

Le meilleur candidat connu n'est pas à l'aube. On le trouve à $z = 6{,}6$, environ 830 millions d'années après le début Visbal 2025[23], soit plus de cinq cents millions d'années après la fin théorique de l'ère de la population III. Sur l'année cosmique, les premières étoiles règnent du 3 au 8 janvier environ ; LAP1-B brille vers le 22 [7].

On le voit grâce à une loupe. La masse courbe la trajectoire de la lumière qui passe à proximité ; c'est le principe des lentilles gravitationnelles, dont les astronomes se servent pour peser la masse des amas de galaxies, qu'elle soit visible ou non Clowe 2006[24]. Un amas de galaxies massif, placé par hasard entre nous et une source beaucoup plus lointaine, dévie la lumière de cette source et peut la concentrer : la source paraît alors plus brillante qu'elle ne l'est. LAP1-B est amplifié de cette manière par l'amas de galaxies MACS J0416 Visbal 2025. Sans cet amas, l'objet serait sans doute trop faible pour être étudié[25].

En 2025, Eli Visbal, Richard Hazlett et Greg Bryan soutiennent que LAP1-B est « le premier objet à s'accorder avec trois prédictions clés » de la théorie pour la population III Visbal 2025. Les trois prédictions sont celles du portrait décrit plus haut. La première est un halo de très faible métallicité : le gaz où naissent les étoiles de LAP1-B serait presque vierge. La deuxième est une fonction de masse riche en étoiles massives,

la « logarithmiquement plate » des simulations. La troisième est un regroupement en petits amas de quelques milliers de masses solaires Visbal 2025. Aucune des trois ne suffirait seule : une galaxie pauvre en métaux n'est pas forcément faite d'étoiles de population III, et un amas riche en étoiles massives peut naître d'un gaz enrichi. C'est leur conjonction qui fait de LAP1-B un candidat.

Reste le paradoxe de la date. Pourquoi le premier objet compatible avec la théorie des premières étoiles se trouve-t-il si tard, à une époque où la population II domine depuis longtemps ? Visbal et ses coauteurs répondent que LAP1-B a été trouvé « au redshift théoriquement attendu, compte tenu des limites actuelles d'observation, bien que la plupart des systèmes de population III se forment beaucoup plus tôt » Visbal 2025. Deux mouvements se croisent pour produire ce résultat. D'un côté, le nombre de systèmes de population III décroît avec le temps : ils sont bien plus nombreux vers 100 à 270 millions d'années, et deviennent rares ensuite, à mesure que le gaz vierge disparaît. De l'autre, la difficulté de les voir décroît aussi avec le temps : plus un système est proche de nous dans l'histoire cosmique, moins sa lumière a été affaiblie en chemin. Les systèmes de l'aube sont nombreux mais trop faibles pour les instruments actuels Visbal 2025. Les systèmes tardifs sont rares, mais un seul d'entre eux, s'il est placé derrière une loupe assez forte, franchit le seuil de détection. Le premier objet observable n'est donc pas le plus représentatif : c'est le plus favorablement placé[26].

Pour que ce raisonnement tienne, il faut qu'une poche de gaz vierge ait survécu jusqu'à 830 millions d'années. La section sur la date l'a laissé entendre : l'enrichissement en métaux se fait de proche en proche, par les explosions d'étoiles voisines, et une région restée isolée peut échapper longtemps au mélange [8]. Le relais entre les populations, fixé « vers z ≈ 15 à 20 » Klessen 2023, décrit une moyenne sur tout l'Univers, pas une frontière que chaque nuage franchit en même temps. LAP1-B serait l'un des retardataires : une poche de gaz vierge tardive, fortement amplifiée, exactement le type d'objet que Visbal et ses coauteurs estiment possible de trouver avec les moyens actuels Visbal 2025.

Ce qui est établi ici doit être dit avec précision. LAP1-B n'est pas une détection confirmée d'étoiles de population III. C'est l'interprétation, par Visbal et ses coauteurs, des observations publiées par l'équipe de Kimihiko Nakajima en 2025 Visbal 2025[27]. L'article d'observation n'a pas été lu pour ce livre, et les mesures sur lesquelles reposent les trois critères (la limite sur la métallicité, la forme de la fonction de masse, la masse des amas) ne sont connues ici qu'à travers l'article d'interprétation. Ce qui renforcerait ou affaiblirait le candidat se déduit des critères eux-mêmes : une mesure plus profonde qui détecterait des métaux dans le gaz de LAP1-B ferait tomber le premier ; d'autres objets du même type, trouvés derrière d'autres amas, feraient passer LAP1-B du statut d'exception à celui de premier exemple d'une classe[28]. En l'état, la population III a un candidat, pas un spécimen.

Le contraste est d'autant plus frappant que le même télescope voit, bien plus tôt, tout autre chose. À 280 millions d'années, Webb confirme la galaxie MoM-z14, compacte et très lumineuse Naidu 2025 ; vers 300 millions d'années, JADES-GS-z14-0 contient déjà de l'oxygène Schouws 2025. À l'époque où la théorie place encore les dernières étoiles de population III, les objets qu'on voit sont des galaxies déjà enrichies, plus brillantes et plus nombreuses qu'on ne l'attendait. C'est la matière du chapitre 10.

9.7 Ce qu'on ne sait pas

On ne sait pas quand les premières étoiles se sont allumées. La valeur z ≈ 30, soit environ 100 millions d'années, est une prédiction de la théorie Klessen 2023. Elle est bornée par le haut par des observations solides, l'oxygène de JADES-GS-z14-0 vers 300 millions d'années Schouws 2025 et les étoiles formées vers 250 millions d'années dans la galaxie de Hashimoto Hashimoto 2018. Elle n'est bornée par le bas par au-

cune mesure acceptée : l'annonce d'EDGES est contestée par SARAS 3, et aucune des deux expériences n'atteint le seuil d'une découverte Bowman 2018Singh 2022. Ce qui trancherait est connu : des mesures globales indépendantes du spectre radio à 21 cm, puis des cartes de ce signal (→ chap. 8). L'incertitude sur la date d'allumage est de l'ordre de la centaine de millions d'années, soit l'ère entière de la population III.

On ne sait pas ce que pesaient les premières étoiles. La fonction de masse logarithmiquement plate et les petits amas sont les résultats des modèles ; les étoiles de plusieurs centaines de milliers de masses solaires appartiennent aux scénarios extrêmes Klessen 2023. Entre les deux, l'écart couvre plusieurs ordres de grandeur, et il tient à des étapes de l'effondrement, refroidissement et fragmentation du gaz, que la base de ce livre ne documente pas. Un seul objet, LAP1-B, s'accorde avec les prédictions Visbal 2025 ; il ne peut pas, à lui seul, trancher entre les scénarios.

On ne sait pas si les premières étoiles ont semé les trous noirs géants. C'est une possibilité ouverte par les scénarios extrêmes Klessen 2023. Elle dépend de l'existence de ces étoiles supermassives, qui n'est pas établie, et les sources de ce livre ne disent pas ce qui distinguerait observationnellement cette origine d'une autre.

On ne sait pas, dans les sources de ce livre, ce que les premières étoiles ont rejeté. Leurs rendements chimiques, la part de chaque élément que produit une étoile sans métaux selon sa masse, ne sont pas documentés. L'argument selon lequel les premiers métaux seraient dominés par l'oxygène des supernovas à effondrement de cœur est un raisonnement tiré du partage actuel des éléments Kobayashi 2020, pas un résultat lu dans une source sur la population III. De même, le « réglage » de la formation suivante par leur rayonnement et leurs supernovas Klessen 2023 n'est connu ici que par son énoncé.

On ne sait pas si LAP1-B est ce que Visbal et ses coauteurs en disent. L'interprétation est publiée ; l'article d'observation n'a pas été lu ; aucune confirmation indépendante n'est documentée Visbal 2025. La proposition selon laquelle le plateau du lithium serait une signature de la population III Miranda 2025 est dans le même cas : une thèse d'un seul auteur, non reprise à ce stade.

Ce qui ne fait pas débat, en revanche, c'est l'existence d'une première génération d'étoiles sans métaux. Elle ne dépend d'aucune des incertitudes précédentes : elle découle de l'arrêt de la chaîne des premières minutes aux masses 5 et 8 fields2014pdg et de la formation des éléments de masse 12 et plus dans les étoiles Kobayashi 2020.

9.8 Ce que ce chapitre démontre

Le gaz qui sort des premières minutes contient en masse environ 75 % d'hydrogène et 25 % d'hélium, avec des traces de deutérium, d'hélium 3 et de lithium, et rien d'autre wiki-chronofields2014pdg. La chaîne nucléaire s'arrête parce qu'il n'existe aucun noyau stable de masse 5 ou 8, dans un gaz si dilué que seules comptent les rencontres entre deux noyaux fields2014pdg. Les éléments de masse 12 ou plus, à commencer par le carbone qu'engendre la réaction triple alpha, ne sont pas produits pendant le Big Bang mais formés à l'intérieur des étoiles Kobayashi 2020wiki-stellarnuc. Puisque toutes les étoiles dont on connaît la composition contiennent des métaux, et que ces métaux viennent d'étoiles antérieures, il a existé une première génération d'étoiles sans métaux, la population III. L'argument est logique, pas observationnel.

Selon la revue de Klessen et Glover, ces étoiles se forment à des décalages vers le rouge de 30 et moins et dominent la formation stellaire jusqu'à $z \approx 15$ à 20, où la population II, née d'un gaz enrichi, prend le relais Klessen 2023. Converties dans le modèle standard avec les paramètres de Planck, par $t \approx 17{,}2$ milliards d'années $\times (1 + z)^{(-3/2)}$, ces valeurs donnent environ 100, 180 et 270 millions d'années ; la règle re-

trouve à moins de 10 % cinq couples publiés Planck 2018(→ chap. 8). La conversion est solide ; les décalages vers le rouge sont des prédictions.

Selon les modèles, les premières étoiles naissent en petits amas, avec une fonction de masse logarithmiquement plate, donc riche en étoiles massives ; dans les scénarios extrêmes, certaines atteindraient plusieurs centaines de milliers de masses solaires, et leurs restes pourraient avoir semé les trous noirs géants des premiers quasars Klessen 2023. Leur rayonnement et leurs supernovas règlent la formation des étoiles suivantes, et c'est en elles que sont forgés les premiers éléments au-delà du lithium Klessen 2023. La boucle d'enrichissement, fabriquer, rejeter, renaître, commence avec elles Kobayashi 2020 ; elle mène, plusieurs milliards d'années plus tard, au 1,39 % de métaux du Soleil Asplund 2021.

Aucune étoile de population III n'a été observée : elles sont trop lointaines et vivent trop peu. Les traces sont indirectes. En 2018, les étoiles d'une galaxie vue à z = 9,1 sont datées d'une formation vers 250 millions d'années Hashimoto 2018. ALMA détecte de l'oxygène dans JADES-GS-z14-0, à 5 à 20 % de la métallicité solaire, à peine 300 millions d'années après le début : des étoiles y sont déjà nées et mortes Schouws 2025. Le signal radio à 21 cm qui aurait daté l'allumage, annoncé par EDGES, est contesté par SARAS 3 Bowman 2018Singh 2022.

Le meilleur candidat, LAP1-B, se trouve à z = 6,6, environ 830 millions d'années après le début, amplifié par l'amas MACS J0416. Selon Visbal et ses coauteurs, c'est le premier objet qui s'accorde avec trois prédictions de la théorie : un halo de très faible métallicité, une fonction de masse riche en étoiles massives, de petits amas de quelques milliers de masses solaires Visbal 2025. Sa date tardive s'explique : les systèmes de population III sont bien plus nombreux plus tôt, mais trop faibles, et le premier observable est une poche de gaz vierge tardive, fortement grossie Visbal 2025. C'est une interprétation des données de Nakajima et ses coauteurs, pas une détection confirmée. L'existence des premières étoiles est une nécessité ; leurs propriétés restent une théorie qui n'a, pour l'instant, qu'un seul candidat.

Notes

1. La fiche nucleosynthese-primordiale (d'après Fields et al. 2014) dit que l'absence de noyau stable de masse 5 ou 8 bloque les fusions ^{4}He + n, ^{4}He + p et ^{4}He + ^{4}He. La traduction en « marches » est celle du chapitre sur les trois premières minutes. ↩

2. Rapprochement fait pour ce chapitre entre deux énoncés des fiches : dans le gaz des premières minutes, « seules les réactions à deux corps comptent » (Fields et al. 2014) ; dans les étoiles, la réaction triple alpha transforme trois noyaux d'hélium en carbone « via ^{8}Be » (Wikipedia, Stellar nucleosynthesis). Pourquoi les conditions d'un cœur d'étoile permettent ce passage (densité, température, durée) n'est pas détaillé dans les fiches ; la question relève du chapitre 12. ↩

3. La fiche nucleosynthese-primordiale donne, pour les étoiles du plateau de Spite, des métallicités $-2{,}7 \lesssim [\mathrm{Fe/H}] \lesssim -1{,}5$ (Fields et al. 2020). [Fe/H] est le logarithme décimal du rapport fer/hydrogène de l'étoile divisé par celui du Soleil (définition classique, non écrite dans les fiches) ; $[\mathrm{Fe/H}] = -2{,}7$ correspond donc à $10^{(-2{,}7)} \approx 1/500$ du fer solaire. Les étoiles plus pauvres encore, où le plateau « fond », sont également dites « extrêmement pauvres en métaux », pas sans métaux. ↩

4. Klessen et Glover (2023) : « The first generation of stars, often called Population III (or Pop III), form from metal-free primordial gas ». L'origine historique de la numérotation des populations (et l'existence d'une population I, à laquelle le Soleil est rattaché) n'est pas documentée dans les fiches. ↩

5. Fiche frise-cosmique, section 6 : « Aucune étoile de population III n'a été observée directement à ce jour ; leur existence est une nécessité logique (il fallait bien des premières étoiles sans métaux), leurs propriétés restent théoriques. » ; « Ce qui est hypothétique : les masses de ces étoiles, leur nombre, leur effet exact. » ; « C'est dans ces premières étoiles, et dans leurs explosions, que sont forgés les premiers éléments au-delà du lithium » (Klessen et Glover 2023). ↩↩↩↩

6. Calculs de la fiche aube-cosmique (section 1), refaits au chapitre sur les âges sombres : 17,2 / 31^1,5 ≈ 0,100 ; 17,2 / 21^1,5 ≈ 0,179 ; 17,2 / 16^1,5 ≈ 0,269 milliard d'années. Paramètres : H0 ≈ 67,4 km/s/Mpc, Ωm ≈ 0,315 (Planck 2018).

Les cinq contrôles publiés sont ceux de Bowman et al. (2018), Hashimoto et al. (2018), Naidu et al. (2025), Witstok et al. (2025) et Bosman et al. (2022). ↩

7. Règles de trois faites pour ce chapitre, sur le modèle de l'année cosmique de la fiche frise-cosmique (13,8 milliards d'années ramenés à 365 jours) : 100 millions d'années ≈ 2,6 jours (3 janvier) ; 180 millions ≈ 4,8 jours (5 janvier) ; 270 millions ≈ 7,1 jours (8 janvier) ; 830 millions ≈ 22 jours (22 janvier). L'attribution de l'image à Carl Sagan n'a pas été vérifiée. ↩↩

8. Raisonnement de ce chapitre, non énoncé par les fiches sous cette forme. Il s'appuie sur la boucle décrite par Kobayashi et al. (2020), où les métaux sont rejetés par les étoiles mourantes dans le gaz d'où naîtra la génération suivante, et sur l'argument de Visbal et al. (2025), qui suppose l'existence d'une « poche de gaz vierge tardive ». La vitesse et la portée du mélange des métaux dans le gaz de l'aube ne sont pas documentées dans la base. ↩↩

9. Question déjà signalée comme manque au chapitre sur les âges sombres. La fiche aube-cosmique ne dit que « le gaz primordial se fragmente facilement » (d'après Klessen et Glover 2023). Le rôle des molécules d'hydrogène dans ce refroidissement, souvent évoqué dans la littérature, n'est documenté dans aucune fiche et n'est donc pas décrit ici. ↩

10. La définition (« autant d'étoiles massives que de légères, par intervalle logarithmique de masse ») est celle de la fiche aube-cosmique. Les exemples de tranches (1–10, 10–100, 100–1 000 masses solaires) sont des illustrations de ce chapitre ; les bornes réelles de la fonction de masse de la population III ne sont pas données dans les fiches. Le calcul sur la masse totale est une arithmétique simple : à nombre égal par tranche, la masse d'une tranche est proportionnelle à la masse typique de ses étoiles, dix fois plus grande d'une tranche à la suivante. ↩↩

11. Les quasars sont décrits ici comme des noyaux de galaxies très lumineux alimentés par un trou noir géant ; cette définition courante n'est pas écrite dans les fiches, qui utilisent les quasars comme sources lumineuses lointaines (Bosman et al. 2022, 67 quasars). Klessen et Glover (2023) : les étoiles supermassives de population III « may be the seeds of the supermassive black holes observed in high-redshift quasars ». ↩

12. Les durées (10 millions d'années pour l'hydrogène, 5 jours pour le silicium, pour une étoile de 25 masses solaires) viennent de la fiche des-etoiles-a-nous (Wikipedia, Silicon-burning process) et concernent les étoiles en général, non spécifiquement celles de population III. La comparaison avec la durée de l'ère de la population III (80 à 170 millions d'années) est faite pour ce chapitre ; la durée de vie des étoiles sans métaux selon leur masse est signalée comme manque. ↩

13. La fiche aube-cosmique résume Klessen et Glover (2023) : « Leur rayonnement et leurs supernovas règlent la formation d'étoiles qui suit ». Les mécanismes (chauffage, ionisation, dispersion du gaz par les explosions) ne sont pas décrits dans les fiches. ↩

14. Les types d'explosion propres aux étoiles sans métaux très massives, et ce qu'elles rejettent, ne sont documentés dans aucune fiche. Ils sont signalés comme manque. ↩

15. Raisonnement de ce chapitre, fondé sur le partage des éléments de Kobayashi et al. (2020) : éléments alpha (O, Mg, Si, S, Ca) surtout par les étoiles massives et les supernovas à effondrement de cœur ; environ la moitié du pic du fer par les supernovas Ia, qui arrivent avec retard ; environ la moitié de C, N, F par les étoiles de masse faible ou moyenne en phase AGB. Ce partage est un résultat de modèle pour l'ensemble de l'histoire galactique ; son application aux premières dizaines de millions d'années de l'aube n'est pas faite dans les fiches. ↩

16. La fiche frise-cosmique calcule 13,8 − 4,57 ≈ 9,2 milliards d'années pour la naissance du Soleil après le début, à partir de l'âge des premiers solides du Système solaire, 4 567,30 ± 0,16 millions d'années (Connelly et al. 2012, recoupé par Woitke et al. 2024). ↩

17. Fiche des-etoiles-a-nous, en-tête (« nombre de générations d'étoiles avant le Soleil (non chiffrable) ») et section « Ce que le livre peut en tirer » : « L'image juste est celle d'un recyclage, pas d'une lignée ». ↩

18. Fiche aube-cosmique, section 2 : « Aucune n'a été vue isolément : elles sont trop lointaines et vivent trop peu. » La fiche ne précise pas la luminosité attendue d'un amas de population III ni le seuil de détection des instruments ; la comparaison avec la luminosité d'une galaxie est un raisonnement de ce chapitre, appuyé sur Visbal et al. (2025), selon qui la plupart des systèmes de population III sont trop faibles pour être détectés. ↩

19. Calcul fait pour ce chapitre par la règle t ≈ 17,2 × (1 + z)^(−3/2) milliards d'années : 17,2 / 10,1^1,5 ≈ 0,54 milliard d'années pour z = 9,11. L'article de Hashimoto et al. utilise un modèle cosmologique légèrement différent. Le nom de la galaxie n'est pas donné dans les fiches. ↩

20. La raie détectée est celle de l'oxygène deux fois ionisé à 88 micromètres ([OIII] 88 µm), selon le titre de l'article de Schouws et al. (2025). ALMA est un réseau de radiotélescopes ; sa description n'est pas faite dans les fiches. ↩

21. Calcul fait pour ce chapitre : 0,05 × 1,39 % ≈ 0,07 % ; 0,20 × 1,39 % ≈ 0,28 %. La valeur solaire utilisée est celle de la photosphère actuelle selon Asplund et al. (2021), Z = 0,0139 ; Schouws et al. peuvent se référer à une autre valeur solaire, ce qui ne change pas l'ordre de grandeur. ↩

22. Calculs faits pour ce chapitre : 300 − 100 = 200 millions d'années entre l'allumage théorique et l'époque où l'on voit JADES-GS-z14-0 ; 1 / 0,20 = 5 fois plus de métaux dans le Soleil que la borne haute de la galaxie ; 9,2 milliards d'années pour la naissance du Soleil (fiche frise-cosmique). La formule « les galaxies du jeune Univers évoluent vite » paraphrase Schouws et al. : « galaxies in the early Universe undergo rapid evolution ». ↩

23. La fiche aube-cosmique donne ≈ 830 millions d'années. La règle du livre donne 17,2 / 7,6 ^ 1,5 ≈ 0,82 milliard d'années ; à ces époques, elle commence à s'écarter du calcul complet, parce que l'énergie noire n'est plus tout à fait négligeable (voir le chapitre sur les âges sombres). ↩

24. La fiche energie-matiere-noires énonce le principe : « La masse courbe la lumière des objets situés derrière ; mesurer cette déformation pèse la masse totale, visible ou non » (à propos de l'amas du Boulet, Clowe et al. 2006). L'effet d'amplification, qui rend la source plus brillante, est celui qu'indique la fiche aube-cosmique pour LAP1-B (« amplifié par l'effet de lentille de l'amas MACS J0416 ») ; le facteur d'amplification n'est pas donné dans les fiches. ↩

25. Déduction de ce chapitre à partir de l'argument de Visbal et al. (2025), selon qui le candidat observable est une poche de gaz vierge « fortement amplifiée ». Aucune source de la base ne chiffre la luminosité de LAP1-B sans la lentille. ↩

26. La formulation en deux tendances (nombre qui décroît, difficulté d'observation qui décroît aussi) est une présentation de ce chapitre ; la conclusion est celle de Visbal et al. (2025) : « LAP1-B was found at the redshift theoretically expected, given current observable limits, despite the fact that most Pop III systems form much earlier ». La fiche précise que les systèmes antérieurs sont « trop faibles pour être détectés ». ↩

27. La fiche aube-cosmique indique : « Il s'agit d'une interprétation (Visbal et al.) des données de Nakajima et al. 2025, non d'une détection établie ; nous n'avons pas lu l'article d'observation lui-même. » Le prénom Kimihiko est donné pour le premier auteur de l'article d'observation sans avoir été vérifié dans une fiche, et doit l'être avant publication. ↩

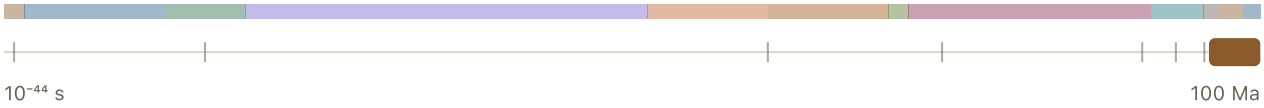
28. Raisonnement de ce chapitre sur ce qui renforcerait ou affaiblirait l'interprétation ; les fiches ne décrivent ni les observations prévues sur LAP1-B ni une recherche systématique d'objets semblables. ↩

CHAPITRE 10

Trop tôt, trop brillantes

dès ~280 Ma

brouillon · 7985 mots



10.1 Une tache à 280 millions d'années

En 2024, l'équipe du relevé JADES, un grand programme d'observation profonde du télescope spatial James Webb, publie dans *Nature* la confirmation de deux galaxies. Leurs décalages vers le rouge valent z = 14,32 et z = 13,90 Carniani 2024. La plus lointaine, JADES-GS-z14-0, est « étonnamment lumineuse ». Elle est aussi « résolue » : son image n'est pas un point, elle a une étendue mesurable, avec un rayon de 260 parsecs, soit environ 850 années-lumière Carniani 2024[1]. Un an plus tard, en 2025, une autre équipe, menée par R. P. Naidu et P. A. Oesch, confirme la galaxie MoM-z14 à z = 14,44. Elle est vue telle qu'elle était 280 millions d'années après le début Naidu 2025. Celle-ci est au contraire « extrêmement compacte » : son rayon effectif, celui qui contient la moitié de sa lumière, ne vaut que 74 parsecs, environ 240 années-lumière Naidu 2025[1]. L'article porte un titre inhabituel pour une publication d'astrophysique : « Un miracle cosmique ».

Dans ces deux annonces, le mot qui compte est « confirmé par spectroscopie ». Il existe deux manières d'estimer la distance d'une galaxie aussi faible. La première, la photométrie, mesure son éclat à travers une série de filtres colorés et en déduit un décalage vers le rouge approximatif, d'après la forme de ses couleurs. La seconde, la spectroscopie, décompose sa lumière longueur d'onde par longueur d'onde. Elle repère alors un trait précis, une raie ou une coupure, dont on connaît la position au repos, et mesure de combien il a été déplacé. La première méthode trie des milliers de candidats. Seule la seconde établit la distance d'un objet[2]. Les candidats à très grand décalage vers le rouge se comptaient par dizaines dès les premières images de Webb. Les galaxies confirmées à z ≈ 14 sont les premières dont la distance ne dépend plus de leurs couleurs.

Les âges de ces galaxies ne sont pas mesurés. Ce sont des décalages vers le rouge convertis dans le modèle standard, comme toutes les dates de cette partie du livre. Le chapitre sur les âges sombres a établi la règle qui vaut à ces époques, où la matière gouverne seule l'expansion : t ≈ 17,2 milliards d'années × (1 + z) ^ (−3/2), avec les paramètres de Planck Planck 2018(→ chap. 8). Pour z = 15, elle donne environ 270 millions d'années. Pour z = 14,44, celui de MoM-z14, elle donne environ 285 millions d'années, à 2 % des 280 millions publiés par l'équipe de Naidu Naidu 2025[3]. Les deux galaxies JADES sont vues vers 287 et 299 millions d'années. Les records successifs ne sont donc séparés que de quelques millions d'années. La règle est solide à ces époques, parce que son préfacteur ne dépend que de la densité absolue de matière, que Planck mesure presque directement (→ chap. 8). Ce qui la rend fragile ici tient au modèle lui-même : la question de ce chapitre est de savoir si ces galaxies le mettent en cause.

L'année cosmique donne l'échelle. Les 13,8 milliards d'années de l'histoire y sont ramenés à douze mois, et la première lumière est émise un quart d'heure après minuit, le 1er janvier. Dans cette année, MoM-z14 brille vers le 8 janvier, dans la même semaine que les premières étoiles, que la théorie fait apparaître vers le 3 [4](→ chap. 9). L'Univers n'a alors qu'environ 2 % de son âge actuel.

L'année cosmique montre aussi de combien la frontière a bougé. En 2015, on situait encore les premières galaxies vers 300 à 400 millions d'années après le début, soit entre le 8 et le 11 janvier esa2015reion[4]. MoM-z14 déplace la borne basse de cette fourchette de quelques dizaines de millions d'années, soit moins d'un jour de l'année cosmique. Et dès 2018, avant Webb, l'équipe de Takuya Hashimoto avait trouvé, dans une galaxie vue à z = 9,1, une population d'étoiles dominante formée « environ 250 millions d'années après le Big Bang, ce qui correspond à un redshift d'environ 15 » Hashimoto 2018. Le chapitre précédent a raconté cette mesure (→ chap. 9). On savait donc, avant les records de Webb, que des étoiles se formaient en nombre à cette époque. Du point de vue de la seule date, les records de 2024 et 2025 prolongent une tendance plutôt qu'ils ne la renversent.

Ces records ont une durée de vie. En septembre 2026, MoM-z14 reste à notre connaissance la galaxie la plus lointaine confirmée par spectroscopie Naidu 2025. Rien ne garantit qu'elle le soit encore quand ce livre paraîtra, et la fiche qui sert de base à ce chapitre recommande de ne pas figer le record [5]. Mais la surprise que Webb a produite ne tient pas dans ces quelques millions d'années gagnés sur le passé. Elle tient dans un comptage.

10.2 Cent fois trop

Une galaxie isolée, même très lointaine et très brillante, ne dit pas grand-chose sur les lois qui ont formé les galaxies. Elle peut être une exception, un objet né dans une région exceptionnellement dense ou vu dans un moment exceptionnellement favorable. Le titre de l'article de Naidu et ses coauteurs joue sur cette idée de hasard. Le résultat principal de l'article va pourtant dans l'autre sens. Les auteurs ne se contentent pas d'annoncer MoM-z14 : ils estiment combien de sources aussi brillantes existent, par unité de volume, entre $z \approx 14$ et $z \approx 15$. Ils comparent ensuite ce nombre à celui que prévoyaient les modèles qui faisaient consensus avant Webb. Leur densité est « plus de 100 fois » supérieure à la prévision, 182 fois selon leur estimation centrale Naidu 2025.

La marge est large : $+329$ et -105 autour de 182 Naidu 2025. Traduite en bornes, elle place le rapport entre environ 77 et environ 511[6]. Une marge aussi large s'explique en principe par le petit nombre d'objets sur lesquels repose le comptage : à ces distances, chaque galaxie confirmée pèse lourd dans la statistique, et une seule de plus ou de moins déplace le résultat. La fiche ne donne pas la taille de l'échantillon, et ce point reste à documenter[7]. La largeur de la marge ne change pourtant pas la conclusion. Même la borne basse, près de 80, laisse un écart de presque deux ordres de grandeur entre ce qu'on attendait et ce qu'on voit. Une erreur d'un facteur deux ou trois dans le comptage, qui serait déjà considérable, ne ferait pas disparaître l'excès.

« Brillant » a ici un sens précis. Ce que Webb mesure, c'est la lumière ultraviolette émise par ces galaxies, que l'expansion a étirée d'un facteur $1 + z$, donc d'un facteur 15 environ, avant qu'elle nous parvienne (→ chap. 8)[8]. Cette lumière ultraviolette est surtout celle des étoiles jeunes et massives. Une galaxie brillante, au sens de ces comptages, est donc une galaxie qui forme beaucoup d'étoiles au moment où on la voit, ou qui en a formé beaucoup très récemment[8]. C'est cette population qui est cent fois plus abondante que prévu.

L'équipe de JADES arrive à la même conclusion par ses propres objets. Stefano Carniani et ses coauteurs écrivent que les galaxies lumineuses « étaient déjà en place 300 millions d'années après le Big Bang et sont plus communes que ce qu'on attendait avant JWST » Carniani 2024. Deux programmes indépendants, avec des galaxies différentes, aboutissent au même constat.

Pour voir ce que cet excès met en jeu, il faut décomposer la prévision qu'il contredit. Un modèle qui prédit combien de galaxies brillantes on doit trouver à z = 14 enchaîne deux calculs. Le premier compte les halos de matière noire, ces concentrations où le gaz ordinaire tombe et forme des étoiles (→ chap. 8). Combien de halos de chaque masse existent à chaque époque, cela découle du modèle cosmologique : de la quantité de matière noire, et des petites inégalités de densité que le fond diffus a photographiées (→ chap. 6). Le second calcul attribue à chaque halo une galaxie, avec une masse d'étoiles, une luminosité, un contenu en poussière. Il ne découle pas du modèle cosmologique : c'est l'astrophysique de la formation des galaxies, celle du gaz qui se refroidit, s'effondre, forme des étoiles et réagit à leur présence[9]. Un excès de cent dans le résultat final peut venir de l'un ou de l'autre. S'il y a cent fois plus de halos qu'on ne le croit, c'est la cosmologie qui est en cause. Si les halos sont ceux qu'on attend mais qu'ils brillent davantage, c'est la formation des galaxies. Toute la suite du chapitre revient à savoir de quel côté se loge l'écart.

10.3 De l'oxygène à 300 millions d'années

Ces galaxies ne sont pas seulement nombreuses et brillantes. Leur chimie montre aussi qu'elles ont déjà un passé.

En 2025, l'équipe de Sander Schouws détecte, avec le réseau de radiotélescopes ALMA, une raie de l'oxygène ionisé dans JADES-GS-z14-0 Schouws 2025[10]. La galaxie est « étonnamment enrichie en métaux », au sens où les astronomes appellent métaux tous les éléments plus lourds que l'hélium (→ chap. 8). Sa métallicité, la part de ces éléments dans son gaz, vaut entre 5 et 20 % de celle du Soleil, « à peine 300 millions d'années après le Big Bang » Schouws 2025. Le chapitre précédent a tiré de cette mesure l'essentiel de ce qu'elle dit sur les premières étoiles (→ chap. 9). L'oxygène ne sort pas des premières minutes : la chaîne nucléaire du Big Bang s'arrête au lithium, et les éléments de masse 12 ou plus sont « formés à l'intérieur des étoiles » Kobayashi 2020. Il est surtout produit par les étoiles massives et libéré quand elles explosent Kobayashi 2020. Pour qu'une galaxie en contienne à 300 millions d'années, il a fallu que des étoiles naissent, vivent, meurent et que leur oxygène se mêle au gaz. Une ou plusieurs générations d'étoiles ont donc précédé celles qu'on voit briller dans JADES-GS-z14-0 Schouws 2025.

Ce qui intéresse ce chapitre, c'est ce que cette conclusion change à la question du nombre. D'abord, elle retire aux galaxies brillantes de z ≈ 14 le statut de premiers objets. JADES-GS-z14-0 n'est pas une galaxie qui s'allume : c'est une galaxie qui a déjà recyclé du gaz, au moins une fois, dans la boucle que le chapitre précédent a décrite (fabriquer, rejeter, renaître) (→ chap. 9)Kobayashi 2020. Ses propres étoiles, nées d'un gaz enrichi, ne sont pas des étoiles de population III, les étoiles sans métaux de la première génération. Pour cette galaxie au moins, l'excès de lumière ne s'explique donc pas par une population primitive exotique qui brillerait dans un gaz encore vierge[11]. Ensuite, elle aggrave la question du rythme plutôt qu'elle ne la résout. Si ces galaxies ont déjà des générations d'étoiles derrière elles, la formation d'étoiles qui les a construites a commencé plus tôt encore que leur date d'observation. L'aube a commencé avant ce qu'on voit, et ce qu'on voit est déjà un deuxième ou un troisième acte. Les auteurs y lisent que les galaxies du jeune Univers « évoluent rapidement » Schouws 2025.

MoM-z14 apporte un indice d'une autre nature. Son spectre montre un excès d'azote qui, selon l'équipe de Naidu, rappelle celui des amas globulaires de notre voisinage Naidu 2025. Les amas globulaires sont des amas d'étoiles très denses et très anciens, qui gravitent autour de la Voie lactée et des galaxies voisines [12]. La ressemblance est frappante parce que l'azote, dans le partage actuel des éléments, n'est pas un produit rapide. Environ la moitié de l'azote de l'Univers vient aujourd'hui des vents d'étoiles de masse faible ou moyenne en fin de vie, pendant leur phase dite de géante asymptotique Kobayashi 2020. Or ces étoiles vivent longtemps, bien plus longtemps que les étoiles massives qui fournissent l'oxygène (→ chap. 9). Un

excès d'azote dans une galaxie vue 280 millions d'années après le début demande donc soit une source rapide d'azote, soit un mode de formation particulier. La fiche ne dit ni laquelle ni ce que la parenté avec les amas globulaires implique[13]. Le fait reste : la plus lointaine galaxie confirmée porte déjà une signature chimique qu'on connaît dans des objets proches, et que les modèles ordinaires d'enrichissement ne produisent pas à cette vitesse.

Ces deux mesures relient ce chapitre à ceux qui l'entourent. Vers l'amont, elles bornent l'allumage : il y avait des étoiles mortes avant 300 millions d'années, ce qui est aujourd'hui la contrainte la plus solide sur la fin de la nuit (→ chap. 8). Vers l'aval, elles ouvrent l'histoire que racontera la partie suivante du livre, celle de la fabrication des éléments dans les étoiles (→ chap. 12). L'oxygène de JADES-GS-z14-0 est le plus ancien oxygène mesuré dont parlent les sources de ce livre, et il a été fabriqué comme celui que nous respirons.

10.4 Le plafond du modèle

Quand les premières images de Webb ont révélé des candidats très lointains et apparemment très massifs, en 2022, la première inquiétude n'a pas porté sur la formation des galaxies. Elle a porté sur le modèle cosmologique lui-même. En 2023, Michael Boylan-Kolchin la formule dans un article au titre explicite : « Mettre ΛCDM à l'épreuve avec les candidats galaxies à grand décalage vers le rouge » Boylankolchin 2023[14].

Son argument repose sur un plafond simple. « La masse d'étoiles d'une galaxie est limitée par le réservoir de matière ordinaire disponible dans son halo de matière noire » Boylankolchin 2023. Le gaz qui forme les étoiles est tombé dans le halo avec la matière noire, et il ne peut pas y en avoir plus que la part de matière ordinaire dans la matière totale. Planck fixe cette part : environ 4,9 % de matière ordinaire pour 26,4 % de matière noire, soit à peu près une masse de matière ordinaire pour cinq de matière noire planck2018tab. Un halo de matière noire contient donc au plus environ 16 % de sa masse totale sous forme de gaz ordinaire, et une galaxie ne peut pas avoir plus d'étoiles que ce gaz[15]. Encore faudrait-il que tout le gaz soit devenu étoile, ce qu'aucune galaxie connue ne fait. Le modèle cosmologique, de son côté, dit combien de halos de chaque masse existent à chaque époque. Il suffit de combiner les deux pour obtenir une limite stricte : à une époque donnée, dans un volume donné, on ne peut pas trouver plus de masse en étoiles que ce que contiendraient les halos existants s'ils avaient converti tout leur gaz.

Les premiers candidats de Webb se situaient « à la limite même » de ce plafond Boylankolchin 2023. Boylan-Kolchin en tire la conséquence sans choisir. Un tel résultat signale « un problème important non résolu » à l'un de trois niveaux. Le premier niveau concerne les propriétés des galaxies déduites des observations : leur distance, leur masse. Le deuxième concerne la manière dont les galaxies se forment tôt dans le modèle standard. Le troisième concerne le modèle cosmologique standard lui-même Boylankolchin 2023.

Les trois niveaux n'ont pas le même coût. Une erreur au premier niveau n'engage que des mesures : un décalage vers le rouge photométrique surestimé, ou une masse d'étoiles déduite de la lumière avec de mauvaises hypothèses. Une erreur au deuxième niveau engage l'astrophysique : le gaz s'est converti en étoiles plus vite, ou plus efficacement, qu'on ne le pensait. Une erreur au troisième niveau engage tout le reste du livre. Il faudrait alors plus de halos massifs, plus tôt, que ne l'autorise un modèle calé sur le fond diffus, sur les abondances des premières minutes et sur les oscillations acoustiques mesurées dans la répartition des galaxies (→ chap. 7)(→ chap. 8). Et les dates de ces galaxies, calculées dans ce même modèle, seraient elles aussi à reprendre.

Le premier niveau a absorbé une bonne part du problème. Depuis 2023, la spectroscopie a écarté beaucoup des candidats photométriques trop massifs : une fois leur lumière décomposée, plusieurs se sont révélés

moins lointains, ou moins massifs, que leurs couleurs ne le laissaient croire Boylankolchin 2023[16]. La menace la plus directe contre le modèle cosmologique venait d'objets qui n'étaient pas ce qu'on croyait.

Le premier niveau n'a pas pour autant absorbé tout l'excès. Les galaxies de $z \approx 14$ dont parle la section précédente sont confirmées par spectroscopie : leur distance ne se discute plus Carniani 2024Naidu 2025. Et l'excès que mesure l'équipe de Naidu ne porte pas sur une masse d'étoiles mais sur une luminosité : ce sont des galaxies brillantes qui sont cent fois trop nombreuses Naidu 2025. Le plafond de Boylan-Kolchin, lui, porte sur une masse. Pour passer de la lumière mesurée à la masse d'étoiles, il faut supposer combien de lumière produit chaque masse solaire d'étoiles. Cette quantité dépend de l'âge des étoiles, de leur répartition en masse, de la poussière qui absorbe une partie de leur rayonnement[17]. C'est exactement dans cet intervalle, entre la lumière vue et la masse inférée, que se logent la plupart des explications proposées. Une galaxie peut briller beaucoup sans avoir beaucoup d'étoiles, si ses étoiles sont très jeunes, si elles sont plus massives en moyenne, ou si rien n'absorbe leur lumière. Dans ce cas, le plafond n'est pas touché, et le modèle cosmologique n'est pas en cause.

10.5 Quatre explications, aucune gagnante

Quatre familles d'explications se partagent aujourd'hui l'excès de galaxies brillantes. Elles ne s'excluent pas : une même galaxie peut relever de plusieurs à la fois. Toutes jouent sur le deuxième étage de la prévision, celui qui attribue une luminosité à chaque halo.

10.5.1 Des sursauts sans frein

Dans une galaxie ordinaire, la formation des étoiles se freine elle-même. Les étoiles massives, dès qu'elles existent, soufflent des vents puissants puis explosent en supernovas ; elles chauffent et dispersent le gaz dont d'autres étoiles auraient pu naître. Les astronomes appellent cet effet en retour la rétroaction[18]. Elle fait qu'une galaxie ne convertit jamais d'un coup tout son gaz en étoiles : les premières étoiles formées empêchent les suivantes.

Mais la rétroaction a un délai. Il faut du temps à une étoile massive pour développer ses vents et atteindre son explosion. Le chapitre précédent a donné un ordre de grandeur pour une étoile de 25 masses solaires : environ 10 millions d'années de combustion de l'hydrogène avant les étapes finales wiki-sib(→ chap. 9). De son côté, un nuage de gaz qui s'effondre sous son propre poids met un certain temps à le faire, qu'on appelle le temps de chute libre, et ce temps est d'autant plus court que le gaz est dense[19]. En 2023, Avishai Dekel et ses coauteurs comparent les deux durées. Quand le temps de chute libre descend sous un million d'années environ, il devient plus court que le délai nécessaire aux étoiles massives pauvres en métaux pour développer vents et supernovas. Cela correspond à une densité caractéristique d'environ 3 000 atomes par centimètre cube Dekel 2023. Au-delà, le gaz s'effondre et forme ses étoiles avant que les freins ne se déclenchent. Dekel et ses coauteurs appellent ces épisodes des « sursauts sans rétroaction » Dekel 2023.

Dans ce scénario, les galaxies de l'aube convertissent le gaz accrété en étoiles avec une grande efficacité, et le modèle prédit un excès de galaxies lumineuses à $z \gtrsim 10$, soit avant environ 470 millions d'années Dekel 2023[20]. Les auteurs lisent les observations de Webb comme « cohérentes » avec cette conversion efficace Dekel 2023. Le scénario ne demande aucun halo de plus : il demande que les halos de l'aube, plus denses, fassent davantage d'étoiles avec le même gaz. Il reste sous le plafond de Boylan-Kolchin, mais il s'en rapproche.

10.5.2 Une formation d'étoiles en dents de scie

La deuxième explication ne change pas la quantité d'étoiles formées, mais sa répartition dans le temps. Dans les simulations numériques de la série FIRE, qui suivent en détail le gaz, les étoiles et leur rétroaction dans des galaxies individuelles, la formation d'étoiles des galaxies de l'aube n'est pas régulière. Elle procède par à-coups : des sursauts brefs et intenses, séparés de périodes plus calmes. Guochao Sun et ses coauteurs montrent en 2023 que ces histoires « en sursauts » induisent « des variations d'un ordre de grandeur » dans l'abondance des galaxies brillantes en ultraviolet à $z \gtrsim 10$ Sun 2023.

Le mécanisme tient à la manière dont on compte. L'ultraviolet trace les étoiles jeunes, donc la formation récente [8]. Une galaxie en plein sursaut brille beaucoup plus que sa masse ne le laisserait attendre ; entre deux sursauts, elle brille beaucoup moins. Un relevé qui compte les galaxies au-dessus d'un certain seuil d'éclat retient donc surtout celles qui sont en sursaut au moment où leur lumière est partie. Or les halos de petite masse sont bien plus nombreux que les halos massifs. Si une fraction d'entre eux franchit le seuil pendant leurs sursauts, le nombre de galaxies brillantes augmente sans que le nombre de halos change[21]. Webb ne verrait pas une population de galaxies anormalement grosses, mais une population de galaxies ordinaires saisies au moment de leur pic.

Les deux premières explications sont voisines, puisqu'un sursaut sans rétroaction est un sursaut. Elles ne disent pourtant pas la même chose. La première propose que les galaxies de l'aube fassent plus d'étoiles au total. La seconde propose que, sans en faire plus, elles les fassent par à-coups, et que l'on voie les pics.

10.5.3 Pas de poussière

La troisième explication porte sur la lumière perdue en chemin. La poussière interstellaire, faite de grains solides d'éléments lourds, absorbe la lumière ultraviolette des étoiles ; une galaxie poussiéreuse paraît moins brillante qu'elle ne l'est[22]. Andrea Ferrara, Andrea Pallottini et Pratika Dayal partent d'un constat sur la fonction de luminosité, la répartition des galaxies selon leur éclat. Son extrémité brillante, celle des galaxies les plus lumineuses et les plus rares, évolue peu entre $z = 7$ et $z \approx 14$, soit entre environ 760 et 290 millions d'années Ferrara 2023[23]. C'est ce qui surprend. En remontant le temps, les halos assez massifs pour abriter de grosses galaxies deviennent de plus en plus rares, et l'on s'attendait donc à voir le nombre de galaxies brillantes chuter.

Selon Ferrara et ses coauteurs, cette faible évolution résulte d'une « conspiration » entre deux effets. D'un côté, les halos se raréfient. De l'autre, l'atténuation par la poussière diminue, ce qui rend les galaxies plus brillantes. Ce second effet compense « presque exactement » le premier Ferrara 2023. Les galaxies au-delà de $z = 11$, avant environ 410 millions d'années, contiendraient une quantité négligeable de poussière Ferrara 2023[23], peut-être parce qu'elle en aurait été expulsée [24]. Dans ce scénario, les galaxies de l'aube ne produisent pas plus de lumière que prévu : elles en perdent moins.

Cette explication croise la section sur l'oxygène. La poussière est faite des mêmes éléments lourds que l'oxygène mesuré par ALMA. JADES-GS-z14-0 contient déjà de 5 à 20 % de la métallicité solaire Schouws 2025. Si elle contient aussi une quantité négligeable de poussière, il faut que ses éléments lourds soient restés à l'état de gaz, ou que la poussière formée ait été chassée. L'expulsion qu'évoquent Ferrara et ses coauteurs est une réponse à cette tension. Les sources de ce livre ne disent pas si une mesure directe de la poussière de ces galaxies a été faite[24].

10.5.4 Des étoiles plus massives, ou des trous noirs

La quatrième famille change l'origine de la lumière. Toute conversion entre la lumière d'une galaxie et sa masse d'étoiles suppose une fonction de masse, c'est-à-dire une répartition des étoiles naissantes entre légères et lourdes (→ chap. 9). Les étoiles massives produisent beaucoup plus d'ultraviolet, par unité de masse, que les étoiles légères [25]. Si les étoiles de l'aube étaient plus massives en moyenne que celles d'aujourd'hui, une même masse d'étoiles brillerait davantage, et les galaxies paraîtraient plus massives qu'elles ne le sont. L'excès de lumière n'exigerait alors ni plus de halos ni plus de gaz converti. Le chapitre précédent a décrit une telle répartition, riche en étoiles massives, pour la population III (→ chap. 9). L'hypothèse, ici, est qu'une partie de ce caractère ait persisté dans les générations suivantes, nées d'un gaz pauvre en métaux. Les sources de ce livre ne donnent ni les arguments pour ni un test direct.

L'autre variante fait intervenir les trous noirs. Un trou noir qui avale du gaz, ce que les astronomes appellent un noyau actif de galaxie, chauffe ce gaz au point de le faire briller intensément ; une partie de la lumière d'une galaxie pourrait venir de lui plutôt que de ses étoiles. Pour les deux galaxies JADES à $z \approx 14$, cette variante est écartée comme explication complète. Leur lumière est dominée par les étoiles, et l'excès de galaxies lumineuses « ne peut pas être entièrement expliqué par l'accrétion sur des trous noirs » Carniani 2024. Le fait que JADES-GS-z14-0 soit étendue, sur 260 parsecs, va dans le même sens : la lumière d'un noyau actif vient d'une région minuscule et apparaîtrait comme un point[26]. La fiche ne dit pas si le même examen a été fait pour MoM-z14, beaucoup plus compacte.

10.5.5 Ce qui les départagerait

Aucune de ces explications n'a gagné [27]. Elles ne s'opposent d'ailleurs pas terme à terme : une galaxie de l'aube peut être à la fois dense, en plein sursaut, dépourvue de poussière et riche en étoiles massives, et chaque effet multiplierait les autres. Ce qui les distingue, ce sont les signatures qu'elles laissent, et plusieurs se déduisent des mécanismes eux-mêmes[28]. Les sursauts sans rétroaction exigent un gaz très dense, donc des galaxies compactes : MoM-z14, avec ses 74 parsecs, est de ce type, JADES-GS-z14-0, avec ses 260, l'est moins. La formation en dents de scie prédit que des galaxies de même masse aient des éclats très différents selon leur phase : il faudrait mesurer les masses indépendamment de la lumière pour le voir. L'absence de poussière se teste en mesurant la poussière. La fonction de masse riche en étoiles massives devrait laisser une empreinte dans le spectre de la lumière. La fiche d'où vient ce chapitre attend, pour trancher, des relevés plus profonds avec Webb et la radioastronomie à 21 cm, d'abord en mesure globale puis en cartes [29]. Aucune de ces mesures décisives n'est documentée dans les sources de ce livre à la date où il est écrit.

10.6 Ce qui cède

Les quatre familles d'explications ont un point commun. Aucune ne touche au nombre de halos de matière noire, et aucune ne demande de modifier le modèle cosmologique. Elles changent la manière dont le gaz d'un halo devient des étoiles, la manière dont ces étoiles brillent, ou la quantité de lumière que la poussière en retire. Les principales pistes restent dans le modèle standard [27]. Le troisième niveau de Boylan-Kolchin, le modèle cosmologique lui-même, n'est pas exclu par un argument de principe. Mais il n'est plus nécessaire depuis que la spectroscopie a retiré les candidats les plus massifs et que des mécanismes astrophysiques suffisent à produire des excès du bon ordre de grandeur Boylankolchin 2023Sun 2023Dekel 2023.

Ce qui cède est donc situé à un étage précis de la théorie. Sur l'axe qui va du modèle cosmologique à l'astrophysique des galaxies, la rupture se produit du côté de l'astrophysique : ce n'est pas le Big Bang qui est bousculé, c'est le scénario de formation des galaxies. L'âge de l'Univers, 13,787 ± 0,020 milliards d'années

dans l'analyse finale de Planck Planck 2018, n'en dépend pas. Les abondances des premières minutes et le fond diffus n'en dépendent pas davantage (→ chap. 5)(→ chap. 6). Les dates de ces galaxies, calculées dans le modèle, restent valables. Les modèles qui prévoyaient cent fois moins de galaxies brillantes, eux, ont faux : c'est leur deuxième étage, l'attribution d'une galaxie à un halo, qui doit être refait pour l'aube. Écrire que Webb « contredit le Big Bang » est donc un contresens, que la fiche de base de ce chapitre signale expressément [30].

La portée du changement n'en est pas moins considérable pour le premier milliard d'années. Une synthèse collective de 2024, signée par une large part des équipes qui exploitent Webb, en résume l'état ainsi : Webb a révélé le premier milliard d'années de l'Univers, et la communauté scientifique est « en train de réécrire les manuels d'astronomie » Adamo 2024. Le mouvement se lit dans les dates de ce chapitre. En 2015, les premières galaxies étaient placées vers 300 à 400 millions d'années esa2015reion. En 2018, une galaxie vue vers 540 millions d'années contenait des étoiles nées vers 250 millions Hashimoto 2018(→ chap. 9). En 2024, deux galaxies confirmées à $z \approx 14$ étaient déjà lumineuses et plus communes qu'attendu Carniani 2024, et l'une d'elles contenait de l'oxygène Schouws 2025. En 2025, MoM-z14 a été confirmée à 280 millions d'années, avec un excès d'azote, et les galaxies brillantes de son époque se sont révélées cent fois trop nombreuses Naidu 2025. Chacune de ces étapes a déplacé une ligne des manuels, et aucune n'a déplacé le cadre.

Cette abondance de lumière a une conséquence immédiate, qui ouvre le chapitre suivant. Les galaxies brillantes de l'aube émettent un rayonnement ultraviolet capable d'arracher à nouveau les électrons de l'hydrogène intergalactique : c'est la réionisation, qui met fin à la nuit au sens de la seconde définition du chapitre sur les âges sombres (→ chap. 8). On en voit déjà un signe précoce. Une galaxie vue à $z = 13{,}0$, 330 millions d'années après le début, montre une raie de l'hydrogène (la raie Lyman-α) qui suppose qu'elle a déjà creusé autour d'elle une bulle de gaz ionisé Witstok 2025. Si les galaxies de l'aube sont cent fois plus nombreuses et plus brillantes qu'on ne le pensait, elles devraient réioniser l'Univers vite. Or la réionisation mesurée est lente et tardive : son mi-parcours tombe vers 670 millions d'années selon le fond diffus Planck 2018, et des poches de gaz neutre persistent jusqu'à 1,1 milliard d'années selon les quasars Bosman 2022. En 2024, Julian Muñoz et ses coauteurs font le bilan. Les galaxies déjà observées directement ne se contentent pas de pouvoir réioniser l'Univers : elles le réioniseraient « trop tôt » Munoz 2024. Ils parlent d'une « crise du budget de photons ». Il y a une erreur quelque part, dans la théorie ou dans les observations Munoz 2024. Le même excès qui a bousculé le scénario de formation des galaxies bouscule maintenant celui du rallumage (→ chap. 11).

10.7 Ce qu'on ne sait pas

On ne sait pas laquelle des quatre explications porte l'essentiel de l'excès, ni dans quelle proportion elles se combinent. Chacune produit, dans les calculs de ses auteurs, un effet du bon ordre de grandeur : un ordre de grandeur pour les sursauts dans les simulations FIRE Sun 2023, une compensation « presque exacte » pour la poussière Ferrara 2023. Aucune n'a été confirmée par une mesure qui lui soit propre. Ce qui les départagerait est identifiable : des masses d'étoiles mesurées indépendamment de la lumière ultraviolette, la taille et la densité des galaxies brillantes, leur contenu en poussière, l'empreinte spectrale de leur fonction de masse. Les sources de ce livre ne documentent aucun de ces tests pour les galaxies de $z \approx 14$. L'incertitude porte donc sur le mécanisme, pas sur l'existence de l'excès.

On ne sait pas précisément de combien l'excès dépasse la prévision. L'estimation centrale est de 182, avec une fourchette qui va d'environ 77 à environ 511 Naidu 2025. La conclusion qualitative, un excès d'au moins un facteur de l'ordre de cent, tient sur toute cette fourchette ; la valeur précise dépend d'un petit

nombre de galaxies confirmées et des modèles pris comme référence, que la fiche ne détaille pas. Chaque nouvelle galaxie confirmée à ces distances resserrera la fourchette.

On ne sait pas, au sens strict, que le modèle cosmologique est hors de cause. Les pistes principales n'en ont pas besoin, et la spectroscopie a retiré les candidats qui le menaçaient le plus Boylankolchin 2023. Mais tant que l'on n'a pas établi quel mécanisme astrophysique produit l'excès, le troisième niveau de Boylan-Kolchin n'est écarté que parce que les deux autres suffisent en principe. Le degré de confiance est élevé : aucune source de ce livre ne propose de modification du modèle standard pour expliquer ces galaxies.

On ne sait pas d'où vient l'excès d'azote de MoM-z14, ni ce que signifie sa ressemblance avec les amas globulaires Naidu 2025. La question est chimique : l'azote vient aujourd'hui pour moitié d'étoiles qui vivent longtemps Kobayashi 2020, et il faut une autre source, ou un autre rythme, pour en trouver un excès à 280 millions d'années. La base de ce livre n'a pas la fiche qui y répondrait. De même, on ne sait pas comment JADES-GS-z14-0 peut contenir des éléments lourds Schouws 2025 sans la poussière qui, selon Ferrara et ses coauteurs, manquerait aux galaxies de cette époque Ferrara 2023.

On ne sait pas ce qui précède les galaxies qu'on voit. Leur oxygène impose des générations d'étoiles antérieures Schouws 2025, mais aucune de ces générations n'est observée. Entre les premières étoiles que la théorie place vers 100 millions d'années Klessen 2023 et les galaxies brillantes de 280 à 300 millions d'années, l'histoire est reconstituée, pas vue.

On ne sait pas combien de temps MoM-z14 restera le record. Le record a changé en 2024 puis en 2025 Carniani 2024Naidu 2025, et il est à revérifier à la date de publication de ce livre.

10.8 Ce que ce chapitre démontre

En 2024, le relevé JADES a confirmé par spectroscopie deux galaxies à z = 14,32 et z = 13,90. La plus lointaine, JADES-GS-z14-0, est lumineuse et résolue, avec un rayon de 260 parsecs Carniani 2024. En 2025, Webb a confirmé MoM-z14 à z = 14,44, vue 280 millions d'années après le début, très compacte, avec un rayon effectif de 74 parsecs Naidu 2025. En septembre 2026, elle reste à notre connaissance la galaxie la plus lointaine confirmée par spectroscopie ; ce record est à revérifier. Ces âges sont des décalages vers le rouge convertis dans le modèle standard, par t ≈ 17,2 milliards d'années × (1 + z) ^ (−3/2) : z = 15 donne environ 270 millions d'années, z = 14,44 environ 285 Planck 2018(→ chap. 8). Sur l'année cosmique, MoM-z14 brille vers le 8 janvier. En 2015, on plaçait les premières galaxies vers 300 à 400 millions d'années esa2015reion ; en 2018 déjà, les étoiles d'une galaxie vue à z = 9,1 étaient datées d'une formation vers 250 millions d'années Hashimoto 2018.

Le fait le plus marquant n'est pas un record mais un comptage. Les galaxies brillantes à z ≈ 14–15 sont plus de cent fois plus nombreuses que ne le prévoyaient les modèles de consensus d'avant Webb : 182 fois, avec une marge de +329 et −105 Naidu 2025. Selon Carniani et ses coauteurs, les galaxies lumineuses étaient déjà en place 300 millions d'années après le début et plus communes qu'attendu Carniani 2024. Même la borne basse de la marge laisse un écart de près de deux ordres de grandeur.

Ces galaxies ont déjà une histoire chimique. ALMA a détecté l'oxygène ionisé dans JADES-GS-z14-0, dont la métallicité vaut de 5 à 20 % de celle du Soleil à peine 300 millions d'années après le début Schouws 2025. MoM-z14 présente un excès d'azote qui rappelle les amas globulaires proches Naidu 2025. Puisque ces éléments sont forgés dans les étoiles Kobayashi 2020, une ou plusieurs générations d'étoiles ont précédé ces galaxies : l'aube a commencé avant ce qu'on voit.

La masse d'étoiles d'une galaxie est plafonnée par le gaz ordinaire que retient son halo de matière noire, et les premiers candidats de Webb touchaient ce plafond. L'erreur pouvait se loger dans les mesures, dans la formation des galaxies ou dans le modèle cosmologique Boylankolchin 2023. La spectroscopie a depuis écarté beaucoup des candidats photométriques trop massifs. Quatre familles d'explications, non exclusives, se partagent l'excès qui demeure : des sursauts sans rétroaction, quand le gaz atteint environ 3 000 atomes par centimètre cube et s'effondre en moins d'un million d'années Dekel 2023 ; une formation d'étoiles en dents de scie, qui fait varier d'un ordre de grandeur l'abondance des galaxies brillantes dans les simulations FIRE Sun 2023 ; l'absence de poussière au-delà de z = 11, qui compense presque exactement la raréfaction des halos Ferrara 2023 ; des étoiles plus massives en moyenne, ou des trous noirs, qui ne suffisent pas pour les galaxies JADES Carniani 2024.

Aucune n'a gagné, et les principales restent dans le modèle standard. Ce qui est en question, c'est le scénario de formation des galaxies, pas le Big Bang ni l'âge de l'Univers. Webb est en train de « réécrire les manuels » du premier milliard d'années Adamo 2024. La réécriture déborde déjà sur le chapitre suivant : additionnées, les galaxies observées réioniseraient l'Univers trop tôt par rapport au fond diffus et aux quasars. Muñoz et ses coauteurs appellent ce désaccord la « crise du budget de photons » Munoz 2024.

Notes

1. Conversion faite pour ce chapitre avec la valeur courante 1 parsec ≈ 3,26 années-lumière, qui n'est pas écrite dans les fiches : 260 × 3,26 ≈ 850 ; 74 × 3,26 ≈ 240. Pour JADES-GS-z14-0, Carniani et al. (2024) écrivent « spatially resolved with a radius of 260 parsecs ». Pour MoM-z14, Naidu et al. (2025) donnent un rayon effectif « circularisé » r_e = 74 pc. La définition du rayon effectif (le rayon qui contient la moitié de la lumière) est la définition usuelle, non donnée dans les fiches. Les deux mesures ne sont donc pas strictement de même nature. ↩↩

2. La distinction entre photométrie et spectroscopie est présentée ici dans ses termes généraux ; les fiches l'utilisent (« candidats photométriques », « confirmé par spectroscopie ») sans la définir. Les méthodes précises employées pour ces galaxies (raies ou coupure utilisées par JADES et par l'équipe de MoM-z14) ne sont pas décrites dans les fiches. L'affirmation selon laquelle les candidats photométriques se comptaient par dizaines dès les premières images est une formulation prudente de ce chapitre ; le nombre exact n'est pas documenté. ↩

3. Calculs faits pour ce chapitre par la règle de la fiche aube-cosmique : 17,2 / 15,44 ^ 1,5 ≈ 0,284 milliard d'années (z = 14,44) ; 17,2 / 15,32 ^ 1,5 ≈ 0,287 (z = 14,32) ; 17,2 / 14,9 ^ 1,5 ≈ 0,299 (z = 13,90) ; 17,2 / 16 ^ 1,5 ≈ 0,269 (z = 15). Paramètres : H0 ≈ 67,4 km/s/Mpc, Ωm ≈ 0,315 (Planck 2018). ↩

4. Règles de trois faites pour ce chapitre sur l'année cosmique de la fiche frise-cosmique (13,8 milliards d'années ramenés à 365 jours) : 280 millions d'années ≈ 7,4 jours (8 janvier) ; 300 millions ≈ 7,9 jours (8 janvier) ; 400 millions ≈ 10,6 jours (11 janvier) ; 100 millions ≈ 2,6 jours (3 janvier). L'Univers a alors 280 / 13 800 ≈ 2 % de son âge actuel. La fiche frise-cosmique place elle-même MoM-z14 « vers le 8 janvier ». L'attribution de l'image à Carl Sagan n'a pas été vérifiée. ↩↩

5. Fiche aube-cosmique, « Contresens à éviter » : « Ne pas figer le record de distance : il change tous les ans. » ; et « À vérifier avant publication » : « le record MoM-z14 est à revérifier à la date de publication ». ↩

6. Calcul fait pour ce chapitre : 182 − 105 = 77 ; 182 + 329 = 511. Naidu et al. (2025) : « >100× larger (182 +329/−105 ×) than pre-JWST consensus models ». Le niveau de confiance associé à cette marge (un écart-type ou davantage) n'est pas précisé dans la fiche. ↩

7. Raisonnement de ce chapitre sur l'origine probable de la largeur de la marge. Le nombre de galaxies confirmées sur lequel repose l'estimation de densité, le volume sondé et la définition du seuil de « brillance » ne sont pas donnés dans la fiche aube-cosmique. Les modèles « de consensus d'avant JWST » auxquels Naidu et al. comparent leur résultat ne sont pas non plus identifiés. ↩

8. Sun et al. (2023) parlent de galaxies « UV-bright », et la fiche aube-cosmique décrit l'excès en termes de luminosité. Le facteur d'étirement 1 + z découle de la définition du décalage vers le rouge (chapitre sur les âges sombres, d'après Hogg 1999). Le lien entre lumière ultraviolette et étoiles jeunes et massives, qui fait de l'éclat ultraviolet un indicateur de la formation

d'étoiles récente, est un fait d'astrophysique courant que les fiches n'énoncent pas en ces termes. Le domaine de longueurs d'onde (infrarouge) où Webb observe cette lumière n'est pas documenté dans les fiches. ↩↩↩

9. Présentation de ce chapitre. Elle s'appuie sur deux énoncés des fiches : le plafond de Boylan-Kolchin (2023), qui relie la masse d'étoiles au réservoir de gaz du halo, et la « raréfaction des halos » (« increasing shortage of their host halos ») invoquée par Ferrara et al. (2023). La manière dont les modèles comptent les halos à partir des fluctuations initiales n'est pas décrite dans les fiches. ↩

10. La raie est celle de l'oxygène deux fois ionisé à 88 micromètres ([OIII] 88 µm), selon le titre de Schouws et al. (2025). Cette mesure ALMA donne pour la galaxie z = 14,1793, alors que la spectroscopie de Webb publiée par Carniani et al. (2024) donnait z = 14,32. Les fiches n'expliquent pas cet écart. On peut supposer qu'il vient de traits spectraux différents (une raie fine pour ALMA, une mesure moins précise pour Webb), mais ce n'est pas vérifié. En âge, l'écart vaut quelques millions d'années (≈ 291 contre ≈ 287 millions d'années par la règle du livre). ↩

11. Raisonnement de ce chapitre, déjà esquissé dans le chapitre sur les premières étoiles : une galaxie dont le gaz contient 5 à 20 % de la métallicité solaire ne forme plus d'étoiles de population III. Il ne vaut que pour JADES-GS-z14-0 ; la métallicité de MoM-z14 n'est pas chiffrée dans la fiche. ↩

12. Définition courante des amas globulaires, non donnée dans les fiches. La fiche aube-cosmique dit seulement que MoM-z14 « montre un excès d'azote qui rappelle les amas globulaires locaux » (d'après Naidu et al. 2025). ↩

13. Rapprochement fait pour ce chapitre entre la fiche aube-cosmique (excès d'azote de MoM-z14) et la fiche des-etoiles-a-nous (d'après Kobayashi et al. 2020 : environ la moitié du carbone, de l'azote et du fluor vient d'étoiles de masse faible ou moyenne en phase de géante asymptotique, par des vents). Ce partage vaut pour l'ensemble de l'histoire galactique ; les sources de l'autre moitié de l'azote, et les mécanismes qui pourraient produire un excès rapide, ne sont pas documentés dans la base. ↩

14. ΛCDM est le nom du modèle standard : Λ pour la constante cosmologique, CDM pour « matière noire froide » (voir le chapitre sur l'âge). Le titre original est « Stress testing ΛCDM with high-redshift galaxy candidates » (Nature Astronomy, 2023). La date de 2022 pour les premiers candidats vient de la version arXiv de l'article (arXiv:2208.01611, août 2022). ↩

15. Calcul fait pour ce chapitre à partir des pourcentages des tables finales de Planck 2018 cités par la fiche energie-matiere-noires : 4,9 / (4,9 + 26,4) ≈ 0,157, soit environ 16 % de la matière totale sous forme de matière ordinaire, et un rapport d'environ 1 à 5,4. Boylan-Kolchin (2023) énonce le principe du plafond ; la valeur numérique utilisée dans son article n'est pas citée dans la fiche. L'affirmation selon laquelle aucune galaxie ne convertit tout son gaz en étoiles est une formulation courante, non documentée dans les fiches. ↩

16. Fiche aube-cosmique, section 4 : « Depuis, la spectroscopie a écarté beaucoup de candidats photométriques trop massifs ». La fiche rattache ce constat à la discussion de Boylan-Kolchin (2023) sans donner la source primaire de ces confirmations ou réfutations, ni la liste des candidats concernés. La précision « moins lointains, ou moins massifs » est une explicitation de ce chapitre. ↩

17. Raisonnement de ce chapitre : le passage de la luminosité à la masse d'étoiles dépend d'hypothèses (âge des étoiles, fonction de masse, poussière). Ces hypothèses sont précisément celles que les explications 2, 3 et 4 modifient. Les fiches ne décrivent pas la méthode d'estimation des masses d'étoiles. ↩

18. Le terme « rétroaction » traduit l'anglais « feedback » ; Dekel et al. (2023) désignent par là les vents et les supernovas des étoiles massives (« feedback-free starbursts »). L'effet de frein de cette rétroaction sur la formation d'étoiles est la description courante ; les fiches ne le décrivent pas en détail (voir aussi la note sur la rétroaction des premières étoiles au chapitre précédent). ↩

19. Le temps de chute libre est la durée d'effondrement d'un nuage sous sa seule gravité ; qu'il diminue quand la densité augmente est une propriété générale, non énoncée dans les fiches. Dekel et al. (2023) : « Feedback-free starbursts (FFBs) occur when the free-fall time is shorter than ~1 Myr, below the time for low-metallicity massive stars to develop winds and supernovae. This corresponds to a characteristic density of ~3×10^3 cm^{-3} ». La durée de 10 millions d'années pour une étoile de 25 masses solaires (Wikipedia, Silicon-burning process, fiche des-etoiles-a-nous) vaut pour une étoile de type actuel et n'est donnée que comme ordre de grandeur ; le délai précis avant les premiers vents n'est pas documenté. ↩

20. Calcul par la règle du livre : 17,2 / 11 ^ 1,5 ≈ 0,47 milliard d'années pour z = 10. ↩

21. L'explication du mécanisme de sélection (seuil d'éclat, halos de faible masse plus nombreux) est une présentation de ce chapitre. La fiche aube-cosmique résume : « on voit surtout celles qui sont en plein sursaut » ; Sun et al. (2023) : « the bursty SFHs induce order-of-magnitude changes in the abundance of UV-bright galaxies at z ≳ 10 ». Que les halos de faible masse soient plus nombreux que les massifs est un résultat général des modèles de formation des structures, non énoncé dans les

fiches. La série FIRE n'est pas décrite dans les fiches au-delà de son nom ; sa description comme simulations qui suivent le gaz, les étoiles et leur rétroaction dans des galaxies individuelles est à vérifier. ↩

22. Description courante de la poussière interstellaire (grains solides d'éléments lourds, absorption de l'ultraviolet), non donnée dans les fiches. Ferrara et al. (2023) parlent de « dust attenuation » qui, en diminuant, rend les galaxies plus brillantes. ↩

23. Calculs par la règle du livre : 17,2 / 8 ^ 1,5 ≈ 0,76 milliard d'années pour z = 7 ; 17,2 / 12 ^ 1,5 ≈ 0,41 pour z = 11. À z = 7, la règle commence à s'écarter du calcul complet, parce que l'énergie noire n'est plus tout à fait négligeable (chapitre sur les âges sombres). ↩↩

24. La fiche aube-cosmique écrit « peut-être expulsée ». Le mécanisme d'expulsion proposé par Ferrara et al. n'est pas décrit dans la fiche, et aucune mesure directe de la poussière de JADES-GS-z14-0 ou de MoM-z14 n'y est documentée. La tension entre métaux présents et poussière absente est relevée par ce chapitre, pas par les sources. ↩↩

25. Fait d'astrophysique courant (les étoiles massives, chaudes, émettent l'essentiel de l'ultraviolet d'une population jeune), non énoncé dans les fiches. La fiche aube-cosmique mentionne seulement, comme quatrième famille, « des étoiles plus massives en moyenne » (FMI, pour fonction de masse initiale, dans son en-tête), sans source dédiée. ↩

26. Raisonnement de ce chapitre : un noyau actif émet depuis une région très petite et apparaît comme une source ponctuelle. Carniani et al. (2024) mentionnent que la galaxie est « spatially resolved » et que l'excès « cannot be entirely explained by accretion onto black holes », mais la fiche ne dit pas si l'étendue fait partie de leur argument. ↩

27. Fiche aube-cosmique, section 4 : « Aucune n'a gagné » ; « la plupart des explications proposées restent dans le modèle standard : c'est la formation des galaxies qui est en question, pas le Big Bang ». ↩↩

28. Les signatures attribuées à chaque explication sont déduites par ce chapitre des mécanismes décrits dans les sources ; elles ne sont pas énoncées comme tests par Dekel et al., Sun et al. ou Ferrara et al. dans les extraits dont dispose la base. Le rapprochement entre la compacité de MoM-z14 et les sursauts sans rétroaction n'est fait par aucune source de la base. ↩

29. Fiche aube-cosmique, en-tête (« projeté ») : « les relevés JWST plus profonds et la radioastronomie à 21 cm (mesure globale, puis cartes) devraient trancher entre les explications ». Le signal à 21 cm est présenté au chapitre sur les âges sombres. ↩

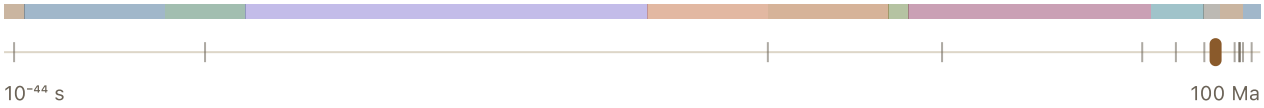
30. Fiche aube-cosmique, « Contresens à éviter » : « Ne pas écrire que JWST "contredit le Big Bang" ni qu'il a "vu les premières étoiles". » La fiche frise-cosmique dit de même : Webb « bouscule les modèles de formation des galaxies ». ↩

CHAPITRE 11

Le rallumage

~0,3 à ~1,1 Ga

brouillon · 7991 mots



11.1 Un préfixe qui dit tout

Le terme savant est « réionisation », et son préfixe dit l'essentiel. L'hydrogène de l'Univers a déjà été ionisé une première fois. Avant 380 000 ans, ses noyaux et ses électrons circulaient séparément, dans un plasma où la lumière rebondissait sans cesse sur les électrons libres. Vers 3 000 K, les électrons se sont liés aux noyaux, et la lumière est partie en ligne droite : c'est le fond diffus (→ chap. 6)wiki-recombwiki-cmb. Pendant les centaines de millions d'années qui suivent, le gaz reste neutre (→ chap. 8). Puis les étoiles et les galaxies arrachent de nouveau les électrons de cet hydrogène : l'Univers repasse à l'état ionisé wiki-chrono. La réionisation est donc un retour à l'état d'avant la première lumière, mais dans un Univers devenu très différent.

Pour comprendre ce que change ce retour, il faut voir comment le gaz neutre traite la lumière. Il ne la traite pas toute de la même manière. La lumière du fond diffus le traverse sans être gênée : il n'y a plus d'électrons libres pour la dévier, et ses photons n'ont pas l'énergie d'arracher l'électron d'un atome d'hydrogène. Il faut pour cela 13,6 électronvolts, bien plus que l'énergie typique d'un photon à 3 000 K ; c'est d'ailleurs pourquoi la recombinaison a attendu que la température descende si bas wiki-recomb(→ chap. 6). Le rayonnement ultraviolet des étoiles jeunes contient au contraire des photons qui dépassent ce seuil. Chacun d'eux, en rencontrant un atome d'hydrogène neutre, lui arrache son électron, et il est absorbé dans l'opération[1]. Un gaz neutre est donc transparent au fond diffus et opaque à l'ultraviolet ionisant. Les premiers photons ultraviolets émis par une galaxie ne vont pas loin : ils sont consommés par le gaz qui l'entoure.

La frise du livre définit la réionisation par ce qu'elle change : l'Univers redevient transparent aux ultraviolets, entre environ 0,3 et environ 1,1 milliard d'années après le début esa2015reionBosman 2022[2]. Une fois ionisé, l'hydrogène n'a plus d'électron à perdre, et le photon ultraviolet qui le traverse passe sans être absorbé.

On pourrait objecter qu'un gaz ionisé est justement ce qui rendait l'Univers opaque avant 380 000 ans. Il l'est redevenu, un peu. Mais entre la recombinaison et la réionisation, l'Univers s'est dilaté plus de cent fois dans chaque direction. Le gaz est donc devenu plus d'un million de fois moins dense[3]. Les électrons libérés sont trop dispersés pour rendre à la lumière son ancien brouillard. Ils en diffusent seulement une petite fraction, et cette petite fraction est justement ce qui permet de dater la réionisation (section « Le milieu, lu dans la plus vieille lumière »).

Le « rallumage » dont parle ce chapitre se distingue donc de l'allumage qu'ont raconté les chapitres précédents. Les premières étoiles se forment, selon la théorie, à partir d'environ 100 millions d'années Klessen 2023(→ chap. 9). Les premières galaxies confirmées brillent vers 280 millions d'années, et elles sont déjà cent fois plus nombreuses que prévu Naidu 2025(→ chap. 10). L'allumage concerne les sources, le rallumage concerne l'espace entre elles : le gaz intergalactique, transformé par la lumière que les sources y en-

voient. Le premier est un événement local, qui se produit au cœur de chaque halo. Le second est un changement d'état du milieu qui remplit le cosmos. C'est lui qui met fin à la nuit au sens de la seconde définition du chapitre sur les âges sombres, celle qui se mesure (→ chap. 8).

Sur l'année cosmique, où les 13,8 milliards d'années de l'histoire sont ramenés à douze mois, la réionisation commence vers le 9 janvier. Elle passe son mi-parcours vers le 18 et s'achève vers le 29[4]. La nuit avait duré deux jours et demi. La reconquête de la transparence prend trois semaines.

11.2 Les premières bulles

Le début de la réionisation ne se voit pas à l'échelle du cosmos. Il se voit au cas par cas, galaxie par galaxie, et pour l'instant dans un seul cas.

En 2025, l'équipe de Joris Witstok publie dans *Nature* l'observation, par le télescope spatial James Webb, d'une galaxie à $z = 13{,}0$, vue 330 millions d'années après le Big Bang Witstok 2025. Le chapitre sur les âges sombres l'a rencontrée sous son nom de catalogue, JADES-GS-z13-1-LA, comme point de contrôle de la conversion des décalages vers le rouge en âges (→ chap. 8). Son spectre montre une raie Lyman-α intense. Cette raie est la lumière ultraviolette qu'émet un atome d'hydrogène quand son électron retombe sur le niveau d'énergie le plus bas, et c'est aussi la lumière que l'hydrogène neutre absorbe le plus volontiers[5]. Une galaxie entourée de gaz neutre devrait donc voir sa raie Lyman-α effacée par ce gaz avant qu'elle ne s'échappe vers nous. L'équipe écrit que des étoiles massives et chaudes, ou un noyau actif de galaxie, ont créé autour de celle-ci « une région réionisée précoce » qui a empêché « l'extinction complète » de la raie Witstok 2025.

L'argument se reconstruit en trois étapes. D'abord, la raie est là, et intense. Ensuite, à 330 millions d'années, le gaz intergalactique est encore neutre presque partout : le mi-parcours de la réionisation ne viendra que des centaines de millions d'années plus tard (section suivante). Enfin, pour que la raie passe, il faut que la lumière ait pu s'éloigner de la galaxie sans rencontrer d'hydrogène neutre sur une distance suffisante. Il existait donc, autour de cette galaxie, une bulle de gaz déjà ionisé, creusée par son propre rayonnement[6]. Witstok et ses coauteurs n'ont pas vu le gaz ionisé directement. Ils l'ont déduit de ce que la raie aurait dû subir en son absence.

Deux réserves bornent ce que l'observation établit. La première porte sur la source. L'équipe ne tranche pas entre des étoiles massives et chaudes, qui produisent beaucoup d'ultraviolet ionisant, et un noyau actif, c'est-à-dire un trou noir qui avale du gaz et le fait briller Witstok 2025(→ chap. 10). Dès la première bulle observée, la question « par qui » se pose, et elle reste ouverte. La seconde réserve porte sur la portée. C'est un cas isolé, qui ne mesure rien de l'état global du gaz Witstok 2025[7]. Une galaxie qui a creusé sa bulle à 330 millions d'années dit que la réionisation avait commencé quelque part à cette date. Elle ne dit pas quelle fraction de l'Univers était alors ionisée. Cette fraction devait être minuscule, puisque le fond diffus place le mi-parcours bien plus tard.

Le cas suffit pourtant à fixer une date. La galaxie de Witstok est vue à peine 50 millions d'années après MoM-z14, la plus lointaine galaxie confirmée à ce jour Naidu 2025. À ce que l'on peut voir, le rallumage commence donc presque en même temps que les galaxies elles-mêmes : dès qu'une source brille assez fort, elle commence à ioniser son voisinage.

Cette observation donne aussi l'image qui organise tout le chapitre. Chaque source ionise d'abord le gaz qui l'entoure. Ses photons ultraviolets partent dans toutes les directions et sont absorbés par les premiers atomes neutres qu'ils rencontrent. Ils creusent ainsi une région ionisée dont la frontière avance tant que la

source continue de briller. Les sources sont nombreuses, et leurs bulles grossissent jusqu'à se toucher, puis se rejoindre. Le gaz neutre se retrouve alors réduit à des îlots de plus en plus petits, dans les régions les plus éloignées des sources. La réionisation procède ainsi, par bulles qui grossissent et se rejoignent wiki-chrono(→ chap. 8)[8]. Cette image a une conséquence qui commande toute la suite. À un même instant du temps cosmique, un lieu peut être ionisé depuis longtemps et un autre encore neutre. La réionisation n'a pas lieu à une date donnée : chaque région de l'Univers a la sienne.

11.3 Le milieu, lu dans la plus vieille lumière

Le mi-parcours se lit dans le fond diffus lui-même. Le chapitre sur les âges sombres a décrit le mécanisme (→ chap. 8). Les électrons que la réionisation libère diffusent, de nouveau, une petite partie de la lumière du fond diffus, qui voyageait en ligne droite depuis 380 000 ans. La grandeur qui compte ces diffusions s'appelle la profondeur optique. C'est celle qui définissait déjà la surface de dernière diffusion, et elle mesure le nombre moyen de diffusions qu'un photon subit sur son trajet (→ chap. 6). Pour la réionisation, Planck mesure $\tau = 0{,}054 \pm 0{,}007$ Planck 2018 : environ 5 % des photons du fond diffus ont été diffusés une seconde fois[9].

Ce nombre n'a rien d'une mesure annexe. La profondeur optique de réionisation est l'un des six paramètres ajustés du modèle cosmologique de base de Planck. Les cinq autres sont la densité de matière ordinaire, la densité de matière noire, l'échelle angulaire des ondes sonores figées à la recombinaison, et l'amplitude et la pente des fluctuations primordiales planck2018tab(→ chap. 6). Tout le reste en est dérivé, y compris l'âge de l'Univers. Planck ne peut donc pas se passer de la réionisation pour lire sa carte. Une diffusion supplémentaire, même faible, atténue et brouille légèrement les motifs du fond diffus, et il faut la compter pour interpréter ces motifs correctement[10]. La réionisation laisse ainsi sa trace dans l'observation qui sert de socle à toutes les dates de ce livre.

Ce total n'est pas encore une date. τ compte les électrons libres que la lumière a rencontrés en chemin, pas le moment où elle les a rencontrés. Une réionisation précoce et étalée peut donner le même τ qu'une réionisation tardive et brusque. Pour en tirer un calendrier, Planck suppose une forme : une bascule en S de l'état neutre à l'état ionisé, décrite par une fonction appelée tangente hyperbolique (tanh), autour d'un décalage vers le rouge central qu'on ajuste Planck 2018[11]. Le mi-parcours tombe alors à $z = 7{,}68 \pm 0{,}79$ Planck 2018. Planck le précise lui-même : ce mi-parcours « suppose un modèle tanh simple » Planck 2018.

Converti en âge, $z = 7{,}68$ donne environ 670 millions d'années avec la règle que le livre utilise pour ces époques, et la marge en z correspond à une fourchette d'environ 590 à 780 millions d'années (→ chap. 8)[12]. Pour $z = 7{,}7$, le tableau du Particle Data Group, calculé avec l'ajustement Planck 2018, donne 690 millions d'années pdg2019-astro. Il faut dire d'où vient cette différence. L'âge d'un décalage vers le rouge se calcule dans le modèle ΛCDM, en intégrant l'histoire de l'expansion Hogg 1999(→ chap. 7). La règle simple du livre néglige l'énergie noire, qui commence à peser un peu à ces époques, alors que le calcul complet l'inclut[13]. Ces vingt millions d'années d'écart entre deux conversions sont quatre à cinq fois plus petits que l'incertitude qui vient de la mesure elle-même. Écrire « 670 » ou « 690 millions d'années » revient au même : le mi-parcours tombe entre 600 et 800 millions d'années environ, si la transition a la forme supposée.

Ce qu'une telle mesure permet et interdit se voit mieux sur un exemple. Un scénario où la réionisation serait conduite par les seuls trous noirs place son mi-parcours à $z \approx 6{,}5$ à $6{,}7$ Madau 2024 (section « Qui a fourni la lumière ? »). Cette valeur tombe juste sous la marge de Planck, qui descend à $z \approx 6{,}9$, à un peu plus d'un écart-type de la valeur centrale[14]. Le fond diffus penche donc contre un calendrier aussi tardif,

sans l'exclure. C'est l'ordre de précision de τ : il écarte les réionisations très précoces, il départage mal les calendriers voisins.

Cette date a bougé. En 2015, l'Agence spatiale européenne annonçait, à partir des données de Planck, que les âges sombres avaient pris fin « quelque 550 millions d'années après le Big Bang, plus de 100 millions d'années plus tard qu'on ne le pensait auparavant » esa2015reion. Le chapitre sur les âges sombres a noté que le communiqué ne dit pas quelle grandeur il retenait comme « fin », ni sur quelle mesure antérieure reposait l'estimation plus précoce (→ chap. 8). Le sens du déplacement est clair, lui. Chaque analyse du fond diffus a repoussé le rallumage plus tard, et les premières galaxies ont eu plus de temps pour le produire.

11.4 La fin, lue dans les quasars

Pour la fin de la réionisation, le fond diffus ne suffit pas : τ additionne toute l'histoire et ne sait pas isoler son dernier chapitre. La fin se lit dans d'autres sources de lumière, les quasars. Ce sont des noyaux de galaxies extrêmement lumineux, alimentés par des trous noirs géants qui avalent du gaz (→ chap. 9)[15]. Leur éclat permet de les voir de très loin, et leur lumière traverse sur son trajet tout le gaz intergalactique qui les sépare de nous.

Le principe de la mesure est le suivant. En chemin, la lumière du quasar est étirée par l'expansion. Chaque longueur d'onde passe donc, à un moment ou à un autre, par la longueur d'onde de la raie Lyman-α, celle que l'hydrogène neutre absorbe le plus volontiers. Si, à cet endroit du trajet, il reste de l'hydrogène neutre, la lumière est absorbée à cette longueur d'onde. Le spectre du quasar garde ainsi, longueur d'onde par longueur d'onde, la trace de l'état du gaz tout au long de la ligne de visée, à la manière d'une carotte prélevée dans le temps[16]. Le titre de l'étude de référence le dit : il s'agit de mesurer la « profondeur optique Lyman-α » du gaz intergalactique Bosman 2022.

En 2022, Sarah Bosman et ses coauteurs analysent les spectres de 67 quasars lointains. Ils trouvent des « fluctuations liées à la réionisation » qui persistent dans le gaz intergalactique « au moins jusqu'à $z = 5{,}3$ », soit 1,1 milliard d'années après le Big Bang Bosman 2022. La règle du livre donne la même valeur pour ce décalage vers le rouge[12]. Ces fluctuations sont des variations de l'absorption d'une ligne de visée à l'autre. On les lit comme la signature des dernières poches de gaz neutre, que la lumière des sources n'avait pas encore atteintes (→ chap. 8)[17]. Un gaz entièrement ionisé depuis longtemps serait plus uniforme. Un gaz où survivent des îlots neutres varie d'une direction à l'autre, selon que la ligne de visée en traverse un ou non. Le titre de l'article en tire la conclusion : la réionisation de l'hydrogène « s'achève à $z = 5{,}3$ » Bosman 2022.

Le nombre de quasars compte. Une seule ligne de visée pourrait traverser, par hasard, une région particulièrement neutre ou particulièrement ionisée. Soixante-sept lignes de visée donnent une statistique : elles montrent que la dispersion elle-même, et pas un cas particulier, persiste jusqu'à cette époque[18]. La méthode a d'ailleurs la forme de la réponse qu'elle donne. Puisque la fin de la réionisation est inégale, on ne peut la saisir qu'en comparant beaucoup de directions.

La borne de fin a reculé plus que toutes les autres. Les synthèses plus anciennes donnaient une réionisation « pour l'essentiel achevée » vers 500 millions d'années wiki-chrono. En 2015, Planck la voyait achevée vers 900 millions d'années esa2015reion. En 2022, les quasars la prolongent jusqu'à 1,1 milliard d'années Bosman 2022. Sur l'année cosmique, la fin est passée du 13 au 24, puis au 29 janvier[4]. Entre la première estimation et la dernière, elle a reculé de six cents millions d'années, plus que la durée de la réionisation telle que la voyaient les synthèses anciennes[19].

Ce recul ne tient pas à une suite d'erreurs corrigées. Il tient à la difficulté propre de ce qu'on cherche. Le début d'un processus par bulles se signale par une source brillante et sa bulle. La fin se signale par l'absence d'une chose : les derniers îlots neutres, petits, dispersés, loin des sources, qu'on ne détecte qu'en accumulant des lignes de visée. Chaque progrès dans le nombre et la qualité des spectres a permis de voir des îlots plus tardifs. Rien ne garantit que z = 5,3 soit le dernier mot : Bosman et ses coauteurs écrivent « au moins jusqu'à » Bosman 2022[19].

11.5 Environ 700 millions d'années

Les trois repères peuvent maintenant être mis bout à bout. Au début, une galaxie a déjà creusé sa bulle à 330 millions d'années Witstok 2025. Au milieu, le fond diffus place le mi-parcours vers 670 millions d'années, dans un modèle de transition simple Planck 2018. À la fin, les quasars montrent des îlots neutres jusqu'à 1,1 milliard d'années Bosman 2022. Entre le premier et le dernier repère, il s'écoule quelque 770 millions d'années. La réionisation est donc un processus d'environ 700 millions d'années, par bulles qui grossissent et se rejoignent wiki-chrono[20]. C'est l'intervalle qu'inscrit la frise du livre, de ∼0,3 à ∼1,1 milliard d'années esa2015reionBosman 2022.

Ce bilan ne permet pas de donner une date, pour trois raisons de nature différente.

La première tient au processus. La réionisation n'est pas un événement bref : elle dure plus longtemps que tout ce qui l'a précédé depuis la première lumière. Donner une date reviendrait à choisir un moment dans un processus de sept cents millions d'années, et il faudrait dire lequel : le premier photon ionisant qui s'échappe d'une galaxie, la moitié du gaz ionisée, ou la dernière poche neutre effacée.

La deuxième raison tient à l'inégalité du processus. Par bulles, la réionisation avance plus vite près des sources et plus lentement loin d'elles. Même en choisissant un critère, par exemple « le gaz est ionisé ici », la date dépendrait du lieu. Le processus n'a pas de date unique à l'échelle de l'Univers, et en chercher une n'aurait pas de sens.

La troisième raison tient à la mesure. Chacun des trois repères vient d'un observable qui voit une chose différente. La galaxie de Witstok voit une bulle, à un endroit. Le fond diffus voit un total sur toute l'histoire et sur tout le ciel, qu'il convertit en date grâce à une forme supposée. Les quasars voient le gaz le long de soixante-sept lignes de visée. Aucun de ces repères ne mesure la même grandeur que les autres. Tous livrent des décalages vers le rouge, convertis en âges dans le modèle standard Hogg 1999(→ chap. 7). La conversion est solide à ces époques, à quelques pour cent près (→ chap. 8). Ce qui bouge, ce sont les z auxquels on attache chaque étape.

Les bornes restent donc débattues. Le début dépend du prochain cas isolé qu'on trouvera plus tôt. La fin dépend du prochain îlot neutre qu'on détectera plus tard. Le milieu dépend de la forme supposée de la transition. L'ordre de grandeur, lui, ne se discute plus : quelques centaines de millions d'années de reconquête lente, entre le premier tiers du premier milliard d'années et un peu après sa fin Bosman 2022Planck 2018. La formule que la frise recommande est la seule exacte : la réionisation s'étend entre quelques centaines de millions et un milliard d'années environ esa2015reionBosman 2022[21].

Ce bilan répond en partie à la question de la partie : pourquoi la chronologie de l'allumage change-t-elle sans cesse ? Les conversions sont stables, les observables ne le sont pas. Webb pousse le début vers le passé en trouvant des bulles de plus en plus tôt. Les quasars poussent la fin vers le présent en trouvant des îlots neutres de plus en plus tard. Le fond diffus, entre les deux, déplace le milieu à chaque analyse. La réionisation s'allonge par les deux bouts à mesure qu'on la regarde mieux.

11.6 Qui a fourni la lumière ?

Pour ioniser l'hydrogène d'un Univers entier, il faut des photons ultraviolets, en nombre au moins égal à celui des atomes à ioniser. Trois quantités déterminent ce nombre. La première est le nombre de sources. La deuxième est le nombre de photons ionisants que chacune produit. La troisième est la fraction de ces photons qui s'échappe de la galaxie qui les émet. Le gaz et la poussière de la galaxie absorbent en effet une partie de son propre rayonnement avant qu'il atteigne le milieu intergalactique[22]. Le produit des trois doit suffire à expliquer la réionisation, et au bon rythme.

Longtemps, le problème fut de trouver assez de photons Atek 2024[23]. Webb l'a inversé.

11.6.1 Les galaxies naines

En 2024, l'équipe d'Hakim Atek observe des galaxies faibles du premier milliard d'années derrière un amas de galaxies qui sert de loupe. La masse de l'amas courbe la lumière des objets situés derrière lui et l'amplifie, comme pour le candidat de population III LAP1-B (→ chap. 9)Visbal 2025. Cette amplification rend mesurables des galaxies trop faibles pour être étudiées autrement. L'équipe trouve que ces galaxies produisent quatre fois plus de photons ionisants, pour une même lumière ultraviolette, que les valeurs qu'on supposait couramment Atek 2024[24]. La conséquence tient dans une phrase de l'article : le taux de photons ionisants « dépasse ce qui est nécessaire à la réionisation, même pour des fractions d'échappement de l'ordre de 5 % » Atek 2024. Même si dix-neuf photons sur vingt restent piégés dans leur galaxie, le vingtième suffit. Le titre de l'article en tire la conclusion : la plupart des photons qui ont réionisé l'Univers viennent des galaxies naines Atek 2024.

L'argument repose sur le nombre. Les galaxies faibles sont individuellement modestes, mais elles sont beaucoup plus nombreuses que les brillantes, et leur contribution cumulée l'emporte[25].

11.6.2 La crise du budget de photons

La même année, Julian Muñoz et ses coauteurs font le compte dans l'autre sens. Ils additionnent la production des galaxies que l'on a déjà observées directement, celles qui sont assez brillantes pour être vues au-dessus d'un certain seuil. Ces galaxies-là, écrivent-ils, « non seulement peuvent conduire la réionisation, mais l'achèveraient trop tôt » Munoz 2024[26]. Or le fond diffus place le mi-parcours vers 670 millions d'années Planck 2018, et les quasars trouvent des îlots neutres jusqu'à 1,1 milliard Bosman 2022. Les galaxies vues fourniraient trop de photons, trop tôt, pour ce calendrier. Muñoz et ses coauteurs appellent ce désaccord une « crise du budget de photons » Munoz 2024.

Cette crise prolonge celle du chapitre précédent (→ chap. 10). Webb a trouvé des galaxies brillantes cent fois plus nombreuses que prévu à 280 millions d'années Naidu 2025, et Atek a trouvé des galaxies faibles qui produisent quatre fois plus de photons qu'on ne le pensait Atek 2024. Chacun de ces deux résultats augmente le budget. Additionnés, ils le font déborder. On se demandait autrefois d'où venaient assez de photons. On se demande maintenant où sont passés ceux qui sont en trop.

L'erreur est quelque part, dans la théorie ou dans les observations Munoz 2024. La fiche qui sert de base à ce chapitre désigne un suspect principal : la fraction de photons qui s'échappe Munoz 2024. Des trois facteurs du produit, c'est le seul qu'on ne voit pas directement à ces époques. On compte les galaxies, on mesure leur lumière ultraviolette et, comme Atek, les signes de leur production de photons ionisants. Les photons qui quittent la galaxie, eux, sont justement ceux qui ne nous parviennent pas : ils sont absorbés en chemin par le gaz intergalactique qu'ils ionisent[27]. Si cette fraction était nettement plus faible que 5 % dans

les galaxies de l'aube, le budget pourrait se refermer. Les sources de ce livre ne disent pas comment on la contraint, ni quelle valeur serait nécessaire. Muñoz et ses coauteurs discutent d'autres issues, dans les modèles comme dans les mesures, que la fiche ne détaille pas Munoz 2024.

11.6.3 Les trous noirs

Une troisième piste change de sources. Webb a découvert, dans le premier milliard d'années, de nombreux petits trous noirs en train d'accréter du gaz. En 2024, Piero Madau et ses coauteurs y voient une raison de réexaminer un scénario plus ancien, où les noyaux actifs de galaxies seraient « les seuls moteurs » de la réionisation de l'hydrogène et de l'hélium Madau 2024. Dans leur calcul, la réionisation de l'hydrogène atteint son mi-parcours à $z \approx 6{,}5$ à 6,7, et elle est achevée à 99 % vers $z \approx 5{,}3$ à 5,5 Madau 2024. Le mi-parcours tombe ainsi vers 800 à 850 millions d'années, plus tard que la valeur centrale de Planck[28]. La fin, elle, s'accorde bien avec celle des quasars.

Ce scénario est minoritaire et discuté Madau 2024[29]. Il se heurte à ce que montrent les galaxies elles-mêmes. Pour les deux galaxies les plus lointaines du relevé JADES, la lumière est dominée par les étoiles, pas par un trou noir Carniani 2024(→ chap. 10). Et pour que les trous noirs soient les seuls moteurs, il faudrait que les galaxies n'apportent presque rien. Leurs photons devraient donc rester piégés, ce qui suppose des fractions d'échappement bien plus faibles que les 5 % d'Atek[30]. Le scénario a toutefois un mérite dans la crise du budget : il déplace la réionisation vers la fin, là où les quasars la voient. Et la première bulle observée, à 330 millions d'années, pourrait avoir été creusée par des étoiles ou par un noyau actif ; l'équipe de Witstok ne sait pas le dire Witstok 2025.

11.6.4 Ce qui fait consensus

Le consensus, prudent, attribue l'essentiel de la réionisation aux galaxies qui forment des étoiles, et surtout aux petites Atek 2024[31]. Deux quantités restent ouvertes : la part des trous noirs et la fraction de photons qui s'échappe. Le bilan n'est pas bouclé, et il échoue par excès, ce qui est plus instructif qu'un déficit. Une source manquante peut toujours avoir été oubliée. Un excès signifie qu'une des quantités mesurées, ou un des modèles qui les relient, est faux. Les mesures qui départageraient les hypothèses sont identifiables. Il faudrait contraindre directement la fraction d'échappement dans des galaxies comparables, recenser les noyaux actifs et mesurer leur contribution, et suivre la croissance des bulles dans le temps pour obtenir un calendrier indépendant de la forme supposée par Planck.

11.7 Ce qui tranchera, et ce qui commence

Le calendrier comme les sources attendent le même arbitre : le signal de l'hydrogène neutre à 21 cm. Le chapitre sur les âges sombres l'a présenté comme le seul témoin possible de la nuit (→ chap. 8). L'hydrogène neutre absorbe ou émet un rayonnement de 21 cm de longueur d'onde, que l'expansion étire en ondes radio Bowman 2018. Pour la réionisation, ce témoin est idéal, parce qu'il ne répond que du gaz neutre. Une bulle ionisée ne contient plus d'hydrogène neutre : elle n'émet ni n'absorbe à 21 cm, et une carte du signal la montrerait comme un trou. Chaque fréquence reçue correspond à une époque. Une série de cartes à des fréquences différentes serait donc un film des bulles qui naissent, grossissent et se rejoignent[32]. Ce film donnerait directement ce qui manque aujourd'hui : la forme de la transition, sans la supposer, et la taille des bulles, qui dépend de la nature des sources.

La fiche de base annonce cette voie en deux temps : une mesure globale du signal, moyennée sur le ciel, puis des cartes Bowman 2018[33]. Le premier indice n'a pas tenu. En 2018, l'expérience EDGES annonçait un

creux dans le spectre radio moyen du ciel, centré à 78 mégahertz. Elle le lisait comme la marque d'étoiles déjà présentes vers 180 millions d'années, mais avec une amplitude plus de deux fois supérieure aux plus grandes prédictions Bowman 2018. En 2022, le radiomètre SARAS 3 a conclu que ce profil « n'est pas d'origine astrophysique » et l'a rejeté avec 95,3 % de confiance Singh 2022 (→ chap. 8). La radioastronomie à 21 cm reste attendue pour trancher, mais les sources de ce livre ne lui donnent aucune échéance. Aucune carte de la réionisation à 21 cm n'est documentée dans la base à la date où ce chapitre est écrit[34].

Pendant que la réionisation s'achève, autre chose commence. Grâce à l'âge de 250 000 étoiles sous-géantes datées avec précision, Maosheng Xiang et Hans-Walter Rix ont montré en 2022 que la formation du disque ancien de la Voie lactée, dit « disque épais », a commencé il y a 13 milliards d'années, « seulement 0,8 milliard d'années après le Big Bang », et deux milliards d'années avant l'assemblage final de son halo interne Xiang 2022. Sur l'année cosmique, c'est le 21 janvier environ[4]. La date précède la fin de la réionisation que lisent les quasars, à 1,1 milliard d'années Bosman 2022. Notre Galaxie a commencé à se construire dans un Univers où subsistaient encore des îlots de gaz neutre. Les sources de ce livre ne disent pas si la région où elle naissait était déjà ionisée[35].

Cette partie du livre se referme là. Après la première lumière, l'Univers était transparent et obscur (→ chap. 8). Des étoiles que personne n'a vues l'ont allumé (→ chap. 9). Des galaxies plus nombreuses et plus brillantes que prévu l'ont éclairé (→ chap. 10). Leur lumière a lentement ionisé le gaz entre elles, jusqu'à rendre l'Univers transparent à l'ultraviolet, un peu après son premier milliard d'années. La chronologie de cet allumage est celle qui a le plus bougé depuis dix ans, et elle bougera encore.

La suite change d'échelle. Les étoiles qui ont ionisé l'Univers ont aussi fabriqué, dans leur cœur et dans leur mort, les éléments qui manquaient au gaz primordial : l'oxygène déjà présent dans JADES-GS-z14-0 à 300 millions d'années en est la trace la plus ancienne (→ chap. 10). La partie suivante resserre la focale sur cette fabrication, puis sur une galaxie particulière, la nôtre, et sur la matière recyclée dont est fait le Soleil (→ chap. 12) (→ chap. 14) (→ chap. 15).

11.8 Ce qu'on ne sait pas

On ne sait pas quand la réionisation a commencé à l'échelle de l'Univers. Le seul repère précoce est une galaxie, à 330 millions d'années, qui a creusé sa bulle Witstok 2025. Il fixe une date au plus tard pour le début quelque part, pas une fraction ionisée. Deux voies pourraient faire mieux : d'autres raies Lyman-α à des décalages vers le rouge comparables ou plus grands, et, à terme, les cartes à 21 cm. Le degré de confiance est faible sur la date du début, élevé sur le fait que le processus était engagé avant 350 millions d'années.

On sait mesurer le total des diffusions, pas la forme de la transition. $\tau = 0{,}054 \pm 0{,}007$ est une mesure. Le mi-parcours $z = 7{,}68 \pm 0{,}79$, vers 670 millions d'années, dépend d'une bascule en S supposée Planck 2018. Un calendrier étalé, commencé tôt et achevé tard, comme le suggèrent ensemble la bulle de 330 millions d'années et les quasars de 1,1 milliard, peut donner le même total qu'un calendrier concentré. Deux choses départageraient ces calendriers : une mesure de τ plus précise, dont l'instrument n'est pas documenté dans la base, et surtout la mesure directe de la fraction de gaz neutre à plusieurs époques. Les décalages de conversion entre 670 et 690 millions d'années, eux, ne sont pas une incertitude : ils tiennent dans la marge pdg2019-astro.

On ne sait pas si la fin a fini de reculer. Elle est passée de 500 millions à 900 millions puis à 1,1 milliard d'années wiki-chronoesa2015reionBosman 2022, et Bosman et ses coauteurs écrivent « au moins jusqu'à $z = 5{,}3$ ». Seuls davantage de spectres de quasars, plus proches de nous dans le temps, pourraient montrer où s'arrêtent les dernières fluctuations. La base ne dit pas si de telles données existent après 2022.

On ne sait pas qui a fourni l'essentiel des photons, dans des proportions chiffrées. Le consensus désigne les petites galaxies à formation d'étoiles Atek 2024. Mais les galaxies déjà observées, additionnées, réioniseraient l'Univers trop tôt Munoz 2024, et un scénario minoritaire confie tout aux trous noirs Madau 2024. Ce qui oppose les hypothèses se ramène à deux nombres : la fraction de photons qui s'échappe des galaxies, et la production des noyaux actifs. Les sources de ce livre ne disent pas comment le premier se mesure à ces époques. La crise est sérieuse : elle vient de mesures indépendantes qui vont toutes dans le même sens. Sa résolution n'est pas en vue dans la base.

On ne sait pas à quoi ressemblaient les bulles : leur taille, leur nombre, le moment où elles se sont rejointes. L'image des bulles qui grossissent et se rejoignent est établie dans son principe wiki-chrono. Sa géométrie n'a jamais été observée. C'est ce que les cartes à 21 cm verraient, et leur calendrier n'est pas documenté Singh 2022.

11.9 Ce que ce chapitre démontre

La réionisation est un retour. L'hydrogène de l'Univers était ionisé avant 380 000 ans, neutre ensuite. La lumière ultraviolette des premières galaxies l'ionise de nouveau wiki-recombwiki-chrono. Un gaz neutre laisse passer le fond diffus mais absorbe l'ultraviolet ionisant ; en réionisant le gaz intergalactique, les sources rendent l'Univers de nouveau transparent à l'ultraviolet, entre environ 0,3 et environ 1,1 milliard d'années après le début esa2015reionBosman 2022. Le rallumage n'est pas l'allumage des étoiles. C'est la transformation, par leur lumière, du gaz qui les sépare.

Le début se voit au cas par cas. À $z = 13{,}0$, 330 millions d'années après le Big Bang, une galaxie montre une raie Lyman-α intense, que le gaz neutre aurait dû éteindre. Des étoiles chaudes ou un noyau actif avaient donc déjà creusé une bulle ionisée autour d'elle Witstok 2025. C'est un cas isolé, qui ne mesure pas l'état global du gaz. La réionisation avance par bulles qui grossissent et se rejoignent.

Le milieu se lit dans le fond diffus. Les électrons libérés diffusent une petite part de sa lumière. La profondeur optique correspondante, $\tau = 0{,}054 \pm 0{,}007$, est l'un des six paramètres ajustés du modèle de base de Planck Planck 2018planck2018tab. Elle place le mi-parcours à $z = 7{,}68 \pm 0{,}79$, vers 670 millions d'années, à condition de supposer une transition simple, en tanh Planck 2018. Cet âge est un décalage vers le rouge converti dans le modèle ΛCDM : pour l'ajustement Planck 2018, $z = 7{,}7$ correspond à environ 690 millions d'années pdg2019-astro, et l'écart entre les deux conversions tient dans la marge. En 2015, Planck situait déjà la fin des âges sombres vers 550 millions d'années, plus de 100 millions d'années plus tard qu'on ne le pensait, et une réionisation achevée vers 900 millions d'années esa2015reion.

La fin se lit dans les quasars. Les spectres de 67 quasars montrent des fluctuations liées à la réionisation dans le gaz intergalactique jusqu'à $z = 5{,}3$, soit environ 1,1 milliard d'années après le Big Bang Bosman 2022. Les synthèses plus anciennes donnaient une réionisation pour l'essentiel achevée vers 500 millions d'années wiki-chrono : la borne de fin a reculé d'environ six cents millions d'années.

La réionisation est un processus d'environ 700 millions d'années, inégal, par bulles. Ses bornes restent débattues, pas son ordre de grandeur. Elle n'a pas de date unique : elle dure, elle avance à des rythmes différents selon les lieux, et chaque repère est lu par un observable différent. On dit qu'elle s'étend entre quelques centaines de millions et un milliard d'années environ.

Les galaxies faibles du premier milliard d'années produisent quatre fois plus de photons ionisants qu'on ne le supposait ; même si 5 % seulement s'en échappent, cela dépasse le besoin de la réionisation Atek 2024. Additionnées, les galaxies déjà observées achèveraient la réionisation trop tôt par rapport au fond diffus et

aux quasars. C'est la « crise du budget de photons », dont l'origine, dans les modèles ou dans les mesures, n'est pas identifiée Munoz 2024. Un scénario minoritaire fait des noyaux actifs les seuls moteurs de la réionisation, avec un mi-parcours à z ≈ 6,5–6,7 Madau 2024. Le consensus prudent attribue l'essentiel du travail aux galaxies à formation d'étoiles, surtout aux petites ; la part des trous noirs et la fraction de photons qui s'échappe restent ouvertes.

Le signal radio de l'aube annoncé par EDGES vers 180 millions d'années a été rejeté par SARAS 3 à 95,3 % de confiance Bowman 2018Singh 2022. La radioastronomie à 21 cm, qui verrait les bulles ionisées comme des trous dans le signal de l'hydrogène neutre, est attendue pour trancher. Pendant que la réionisation s'achève, la formation du disque ancien de la Voie lactée commence, il y a 13 milliards d'années, environ 0,8 milliard d'années après le Big Bang Xiang 2022.

Notes

1. L'énergie d'ionisation de l'hydrogène, 13,6 eV, est donnée par la fiche fond-diffus-cosmologique (d'après Wikipédia, « Recombination »). Le principe selon lequel un photon d'énergie supérieure à ce seuil est absorbé en ionisant l'atome, et pas au-dessous, est une présentation classique de la photo-ionisation ; les fiches ne l'énoncent pas en ces termes. Elles disent seulement que la lumière ultraviolette des premières sources « arrache à nouveau les électrons de l'hydrogène intergalactique » (fiche aube-cosmique) et que la réionisation rend l'Univers « transparent aux UV » (fiche frise-cosmique). ↩

2. Fiche frise-cosmique, tableau de la section 10 : « 9. La réionisation | ~0,3 à ~1,1 Ga | l'Univers redevient transparent aux UV | débattu (dates) ». ↩

3. Calcul fait pour ce chapitre. Entre la recombinaison (z ≈ 1 090) et le mi-parcours de la réionisation (z ≈ 7,7), l'Univers s'est étiré d'un facteur (1 + 1 090) / (1 + 7,7) ≈ 125 dans chaque direction, et la densité du gaz a donc baissé d'un facteur $125^3 \approx 2$ millions. Le lien entre densité des électrons et opacité est un raisonnement de ce chapitre ; la faiblesse de τ (≈ 0,05, contre 1 à la surface de dernière diffusion) en est la traduction mesurée. ↩

4. Règles de trois faites pour ce chapitre sur l'année cosmique de la fiche frise-cosmique (13,8 milliards d'années ramenés à 365 jours) : 330 Ma ≈ 8,7 jours (9 janvier) ; 500 Ma ≈ 13,2 jours (13 janvier) ; 670 Ma ≈ 17,7 jours (18 janvier) ; 800 Ma ≈ 21,2 jours (21 janvier) ; 900 Ma ≈ 23,8 jours (24 janvier) ; 1,1 Ga ≈ 29,1 jours (29 janvier). La durée des âges sombres (deux jours et demi) vient du chapitre sur les âges sombres. L'attribution de l'image de l'année cosmique à Carl Sagan n'a pas été vérifiée. ↩↩↩

5. La définition de la raie Lyman-α (transition entre le premier niveau excité et le niveau fondamental de l'hydrogène) est classique et n'est pas donnée dans les fiches. La fiche aube-cosmique et Witstok et al. (2025) établissent seulement que le gaz neutre éteint la raie : « massive, hot stars or an active galactic nucleus (AGN) have created an early reionised region to prevent complete extinction of Ly α ». Le chapitre sur les âges sombres mentionne les « photons Lyman-α » à propos du signal à 21 cm. ↩

6. La reconstruction en trois étapes est de ce chapitre. Le mécanisme précis par lequel une bulle laisse passer la raie n'est pas documenté dans les fiches. Selon la présentation classique, la lumière, étirée par l'expansion pendant qu'elle traverse la bulle, sort de la longueur d'onde de la raie avant d'atteindre le gaz neutre. La taille de la bulle que suppose l'observation de Witstok n'est pas chiffrée dans la base. ↩

7. Fiche aube-cosmique, section 5 : « C'est un cas isolé (récent), pas une mesure globale. » ↩

8. L'image « par bulles qui grossissent et se rejoignent » est celle de la fiche aube-cosmique (section 5) et du chapitre sur les âges sombres. La description du mécanisme (photons absorbés à la frontière, qui avance tant que la source brille ; îlots neutres résiduels loin des sources) est une présentation de ce chapitre, cohérente avec ces sources mais non énoncée par elles en ces termes. ↩

9. Calcul du chapitre sur les âges sombres : la fraction de photons diffusés vaut $1 - e^{-\tau} \approx 1 - e^{-0{,}054} \approx 5{,}3$ %. ↩

10. Les six paramètres sont ceux des tables de Planck 2018 (fiche fond-diffus-cosmologique, section 4) : $\Omega_b h^2$, $\Omega_c h^2$, θ, τ, A_s, n_s. L'effet de la diffusion par les électrons de la réionisation sur les motifs de la carte (atténuation des fluctuations) est une présentation classique, non documentée dans les fiches ; la manière dont Planck mesure τ en pratique (notamment par la polarisation aux grandes échelles) n'y est pas décrite. ↩

11. La tangente hyperbolique (tanh) décrit une bascule en S, lente au début, rapide au milieu, lente à la fin. Tables de Planck 2018 : « The reionization redshift mid-point z_re and optical depth τ here assumes a simple tanh model ». ↩

12. Calculs faits pour ce chapitre avec la règle t ≈ 17,2 × (1 + z) ^ (−3/2) milliards d'années (fiche aube-cosmique, section 1) : z = 7,68 donne ≈ 0,670 ; z = 8,47 ≈ 0,590 ; z = 6,89 ≈ 0,780 (chapitre sur les âges sombres) ; z = 5,3 donne 17,2 / 6,3 ^ 1,5 ≈ 1,09 milliard d'années, en accord avec les 1,1 Ga publiés par Bosman et al. (2022). ↩↩

13. La fiche aube-cosmique justifie la règle par le fait qu'à ces époques « l'énergie noire et le rayonnement ne pèsent presque rien ». Le chapitre sur les âges sombres note qu'à z = 7,7 elle commence à s'écarter du calcul complet (670 contre 690 Ma, environ 3 %). L'attribution exacte de l'écart à l'énergie noire ou à de petites différences de paramètres n'est pas établie dans les fiches. La comparaison avec la marge (± 90 Ma environ) est un calcul de ce chapitre. ↩

14. Calcul fait pour ce chapitre : 7,68 − 0,79 = 6,89. Le mi-parcours de Madau et al. (z ≈ 6,5–6,7) se trouve à (7,68 − 6,6) / 0,79 ≈ 1,4 écart-type de la valeur centrale de Planck, en supposant une marge symétrique et gaussienne. La comparaison est approximative : le scénario de Madau n'a pas nécessairement la forme en tanh supposée par Planck, et la fiche ne donne pas le τ qu'il prédit. ↩

15. Définition reprise du chapitre sur les premières étoiles (« ces noyaux de galaxies extrêmement lumineux »). La fiche aube-cosmique mentionne les « trous noirs supermassifs des premiers quasars » (d'après Klessen et Glover 2023). Le mécanisme d'émission (accrétion de gaz sur un trou noir géant) est la description classique, que la fiche aube-cosmique applique aux « noyaux actifs » en général. ↩

16. Présentation classique de la méthode (l'absorption Lyman-α le long de la ligne de visée, souvent appelée « forêt Lyman-α »), non décrite dans les fiches. La fiche aube-cosmique donne seulement le titre de l'article : « Hydrogen reionisation ends by z=5.3: Lyman-α optical depth measured by the XQR-30 sample ». L'image de la carotte est de ce chapitre. ↩

17. Bosman et al. (2022) : « reionisation-related fluctuations […] persist in the intergalactic medium until at least z=5.3 (t=1.1 Gyr after the Big Bang) ». La lecture de ces fluctuations comme variations de l'absorption d'une ligne de visée à l'autre, dues à des îlots neutres résiduels, est celle du chapitre sur les âges sombres. La définition statistique précise de ces fluctuations dans l'article n'est pas donnée dans les fiches. ↩

18. Raisonnement de ce chapitre sur l'intérêt d'un grand échantillon. La fiche ne dit pas comment Bosman et al. séparent les fluctuations dues à la réionisation de celles qu'on attendrait dans un gaz déjà entièrement ionisé. ↩

19. Calcul fait pour ce chapitre : 1,1 Ga − 0,5 Ga = 0,6 Ga. La date des « synthèses plus anciennes » citées par Wikipédia (« Chronology of the universe ») n'est pas documentée, si bien que le rythme du recul (en combien d'années) ne peut pas être donné. L'explication du recul par la difficulté de détecter les derniers îlots neutres est un raisonnement de ce chapitre, non énoncé par les sources. ↩↩

20. Calcul fait pour ce chapitre : 1 100 − 330 = 770 millions d'années. La fiche aube-cosmique arrondit à « environ 700 millions d'années ». Le premier repère est une date au plus tard pour le début : le processus a pu commencer avant. ↩

21. Fiche frise-cosmique, section 7 : « la réionisation est un processus long et inégal, pas un instant. Il faut éviter une date unique et dire "entre quelques centaines de millions et un milliard d'années environ". » La fiche aube-cosmique, dans ses « contresens à éviter », dit de même : « Ne pas donner une date unique pour la réionisation ». ↩

22. Décomposition présentée par ce chapitre. Les fiches mentionnent la production de photons ionisants (Atek et al. 2024) et la « fraction de photons qui s'échappe » (Atek et al. 2024 ; Muñoz et al. 2024), mais pas le nombre de photons nécessaires par atome. Le fait que le gaz ionisé puisse se recombiner, ce qui exige davantage de photons qu'il n'y a d'atomes, n'est pas documenté dans la base. L'absorption par le gaz et la poussière de la galaxie elle-même est l'explication classique de la fraction d'échappement. ↩

23. Fiche aube-cosmique, section 6 : « Longtemps, le problème fut de trouver assez de photons ionisants. JWST a inversé la difficulté. » La fiche ne cite pas de source pour la situation d'avant Webb. ↩

24. Atek et al. (2024) : « faint galaxies during the Universe's first billion years produce ionizing photons with log(ξion) = 25.80±0.14, a factor of 4 higher than commonly assumed values ». La grandeur ξion mesure le nombre de photons ionisants produits pour une lumière ultraviolette donnée. Cette définition est classique et n'est pas donnée dans la fiche, qui ne précise pas non plus l'amas-lentille utilisé. ↩

25. Raisonnement de ce chapitre. Que les galaxies faibles soient plus nombreuses que les brillantes est un résultat général, non chiffré dans les fiches pour ces époques. Le titre d'Atek et al. (2024) est « Most of the photons that reionized the Universe came from dwarf galaxies ». ↩

26. Muñoz et al. (2024) : « the galaxies we have directly observed (M_UV < −15) not only can drive reionization, but would end it too early ». M_UV est la magnitude absolue dans l'ultraviolet ; M_UV < −15 désigne les galaxies plus brillantes qu'un certain seuil (plus la magnitude est négative, plus la galaxie est brillante). La fiche ne précise pas la date de fin qu'implique ce calcul. ↩

27. Raisonnement de ce chapitre sur la difficulté de mesurer la fraction d'échappement à ces époques. La fiche aube-cosmique désigne cette fraction parmi les suspects (« fraction de photons qui s'échappe, notamment »). Les méthodes indirectes qui permettent de l'estimer ne sont pas documentées dans la base. ↩

28. Calcul fait pour ce chapitre par la règle du livre : 17,2 / 7,5 ^ 1,5 ≈ 0,84 milliard d'années pour z = 6,5 ; 17,2 / 7,7 ^ 1,5 ≈ 0,80 pour z = 6,7. La règle sous-estime légèrement les âges à ces époques (voir la note sur l'écart entre conversions). ↩

29. Fiche aube-cosmique, section 6 : « C'est une position minoritaire et discutée. » Madau et al. (2024) écrivent que les nouvelles données les « conduisent à réévaluer un scénario où les AGN sont les seuls moteurs » ; les réponses publiées à ce scénario ne sont pas documentées dans la base. ↩

30. Raisonnement de ce chapitre : si les galaxies à formation d'étoiles fournissaient autant de photons qu'Atek et al. le mesurent, un apport des trous noirs s'ajouterait au budget au lieu de le remplacer, et aggraverait la crise. La fiche ne dit pas comment Madau et al. traitent la contribution des galaxies. ↩

31. Fiche aube-cosmique, section 6 : « Le consensus prudent : les galaxies à formation d'étoiles, surtout les petites, sont les principales responsables ; la part des trous noirs et la fraction de photons qui s'échappe restent ouvertes. » Ce consensus est une synthèse de la fiche ; il n'est pas attribué à une revue particulière. ↩

32. Raisonnement de ce chapitre, dans le prolongement du chapitre sur les âges sombres (qui évoque des cartes montrant « la répartition du gaz et des premières bulles de lumière »). Fréquences calculées pour ce chapitre à partir de la fréquence au repos d'environ 1 420 MHz : z = 13 donne ≈ 101 MHz ; z = 7,7 ≈ 163 MHz ; z = 5,3 ≈ 225 MHz. Le mécanisme physique de la raie à 21 cm et les conditions dans lesquelles elle apparaît en émission ou en absorption ne sont pas documentés dans les fiches. ↩

33. Fiche aube-cosmique, en-tête (rubrique « projeté ») : « les relevés JWST plus profonds et la radioastronomie à 21 cm (mesure globale, puis cartes) devraient trancher entre les explications ». ↩

34. Les instruments de radioastronomie à 21 cm en construction ou en service, et leur calendrier, ne sont pas documentés dans la base. Ce point est signalé comme manque. ↩

35. Fiche frise-cosmique, section 8, d'après Xiang et Rix (2022) : « the formation of the Galactic old (thick) disk started 13 Gyr ago, only 0.8 Gyr after the Big Bang, and two Gigayears earlier than the final assembly of the inner Galactic halo ». Le rapprochement avec la fin de la réionisation est fait par ce chapitre. L'état d'ionisation de la région où naissait la Voie lactée n'est documenté par aucune source de la base. ↩

PARTIE IV

Des étoiles au Soleil

LE SENS

L'Univers allumé, le récit resserre la focale : de l'Univers entier à notre Galaxie, puis à notre étoile, et de la matière cosmique à celle dont le Soleil est fait. La partie s'arrête au Soleil parce que c'est là que l'inventaire de la matière se ferme : au-delà, il ne s'agit plus de fabriquer les éléments mais de les assembler en planètes. Le Soleil est aussi le premier objet du livre dont la date se lit dans des pierres.

L'ARC

De l'hydrogène et de l'hélium hérités du premier jour aux 1,4 % de cendres d'étoiles du Soleil : la forge stellaire, les catastrophes qui font l'or, une Galaxie qui s'assemble dès 13 Ga, puis un Soleil né tard, ailleurs, et daté par deux uraniums.

LA QUESTION

Comment la matière du premier jour est-elle devenue celle du Soleil, et quand le Soleil est-il né ?

1. La forge brouillon
2. L'or des catastrophes brouillon
3. Une Galaxie agitée brouillon
4. Le Soleil arrive tard brouillon

CHAPITRE 12

La forge

brouillon · 7290 mots

12.1 Ce que le premier jour a laissé

Au sortir des premières minutes, l'inventaire de la matière ordinaire tient en trois lignes. En masse, environ trois quarts d'hydrogène et un quart d'hélium 4. Des traces de deutérium et d'hélium 3, de l'ordre de quelques cent-millièmes de l'hydrogène. Un dix-milliardième environ de lithium 7 fields2014pdgwiki-chrono. Le quart d'hélium n'a rien d'arbitraire. Presque tous les neutrons qui avaient survécu jusqu'aux premières fusions ont fini dans l'hélium 4, le noyau léger le plus solide, et un neutron pour sept protons donne, par simple comptage, une fraction de masse d'hélium $Y_p \approx 0{,}25$ fields2014pdg(→ chap. 5). Les mesures actuelles discutent la troisième décimale, entre 0,240 et 0,245 environ, pas le quart lui-même Fields 2020Yanagisawa 2025.

La liste s'arrête là. Il n'y a ni carbone, ni oxygène, ni fer. L'arrêt ne tient pas au manque de temps mais à la structure des noyaux. La chaîne des réactions des premières minutes monte en ajoutant à chaque pas un proton, un neutron ou un noyau léger, et deux marches y manquent : il n'existe aucun noyau stable de masse 5 ni de masse 8 fields2014pdg. Un hélium 4 qui capte un proton ou un neutron donne un noyau de masse 5, qui ne tient pas. Deux héliums 4 qui fusionnent donnent un noyau de masse 8, qui ne tient pas davantage. Les noyaux plus lourds sont en outre protégés par la répulsion électrique entre charges positives, que les physiciens appellent barrière coulombienne. Le gaz est enfin si dilué, d'une densité « comparable à celle de l'air », que seules y comptent les rencontres entre deux noyaux fields2014pdg. Vers vingt minutes, température et densité sont trop basses pour toute fusion notable wiki-bbn. Les chapitres sur les trois premières minutes et sur les premières étoiles ont détaillé cet arrêt (→ chap. 5)(→ chap. 9) ; ce chapitre part de ses conséquences.

La principale est qu'il a fallu fabriquer ailleurs tout le reste du tableau périodique. Le principe en est posé en 1957 par un article de revue resté célèbre, « Synthesis of the Elements in Stars », signé par Margaret Burbidge, Geoffrey Burbidge, William Fowler et Fred Hoyle wiki-stellarnuc[1]. Soixante ans plus tard, la revue de Chiaki Kobayashi, Amanda Karakas et Maria Lugaro, qui reconstruit l'origine de tous les éléments stables du carbone à l'uranium, le formule sans détour : les éléments de masse $A \geq 12$, c'est-à-dire ceux dont le noyau compte au moins douze protons et neutrons, « ne sont pas produits pendant le Big Bang mais formés à l'intérieur des étoiles » Kobayashi 2020. Les astronomes appellent « métaux » tous les éléments plus lourds que l'hélium, y compris le carbone et l'oxygène (→ chap. 8). Au départ, la part des métaux dans la matière ordinaire est donc pratiquement nulle. Dans la photosphère du Soleil, la couche dont vient sa lumière, elle vaut aujourd'hui 1,39 % de la masse Asplund 2021. Tout ce que ce chapitre décrit tient entre ces deux nombres : de presque rien à 1,4 %, en un peu plus de neuf milliards d'années.

La forge a commencé tôt, et on ne l'a pas vue commencer. En 2025, le réseau de radiotélescopes ALMA détecte une raie de l'oxygène ionisé dans la galaxie JADES-GS-z14-0, vue « à peine 300 millions d'années après le Big Bang ». Sa métallicité, la part de métaux dans son gaz, vaut de 5 à 20 % de celle du Soleil Schouws 2025, soit de l'ordre de 0,07 à 0,3 % de la masse du gaz[2]. Le chapitre sur les galaxies trop précoces en a tiré la conséquence (→ chap. 10) : puisque l'oxygène ne sort pas des premières minutes, il a fallu que des étoiles naissent, fabriquent de l'oxygène, meurent et le rendent au gaz avant que cette galaxie ne forme les étoiles qu'on voit briller. Les ouvriers de ce premier travail restent inconnus. Les étoiles de la première génération, dites de population III, nées d'un gaz sans aucun métal, n'ont jamais été observées directement

Klessen 2023 (→ chap. 9)[3]. La forge a donc un produit daté, l'oxygène de JADES-GS-z14-0 à 300 millions d'années, et un commencement que personne n'a observé.

12.2 Franchir la marche : la triple alpha

Une étoile brûle d'abord son hydrogène en hélium wiki-stellarnuc. « Brûler » est ici un terme de métier : il ne s'agit pas d'une combustion chimique, qui réarrange des atomes, mais d'une fusion nucléaire, qui soude des noyaux et libère de l'énergie[4]. Les réactions par lesquelles quatre noyaux d'hydrogène finissent en un noyau d'hélium ne sont pas détaillées dans les sources de ce livre[5]. Leur résultat suffit ici. Pendant la plus longue phase de sa vie, une étoile refait lentement, dans son cœur, ce que les premières minutes avaient fait en quelques minutes dans tout l'Univers : elle change de l'hydrogène en hélium. Elle n'ajoute alors aucun métal au monde.

Quand l'hydrogène du cœur est épuisé, l'hélium devient le combustible, et l'étoile se trouve devant la marche qui avait arrêté les premières minutes. Deux noyaux d'hélium qui fusionnent donnent un noyau de masse 8, le béryllium 8, qui n'est pas stable fields2014pdg. L'étoile le franchit par une réaction à trois partenaires, dite « triple alpha » : trois noyaux d'hélium donnent un noyau de carbone 12, en passant par le béryllium 8 wiki-stellarnuc. Le nom vient de ce que les physiciens appellent « particule alpha » le noyau d'hélium 4[6]. Le béryllium 8 n'est donc pas absent de la réaction : il en est l'étape intermédiaire. Il ne dure pas, mais s'il capte un troisième noyau d'hélium avant de se défaire, le carbone est formé, et le carbone, lui, est stable.

Ce qui distingue le cœur d'une étoile du gaz des premières minutes tient aux conditions. Les premières minutes offraient un gaz de la densité de l'air, où seules les rencontres à deux comptaient, pendant une fenêtre d'une vingtaine de minutes fields2014pdgwiki-bbn. Une réaction qui exige qu'un troisième noyau arrive pendant la brève existence d'un béryllium 8 y était pratiquement impossible. Le cœur d'une étoile qui brûle son hélium offre ce que les premières minutes n'offraient pas : une densité bien plus élevée et une durée qui se compte en millions d'années. La densité et la température qui règnent alors dans le cœur ne sont pas chiffrées dans les sources de ce livre[7]. Le principe, lui, découle des deux faits établis : la marche de masse 8 ne se franchit qu'à trois, et seul le cœur d'une étoile rend une rencontre à trois assez fréquente.

La réaction triple alpha a trois conséquences qui organisent toute la suite. La première porte sur la frontière de masse 12. Puisque le seul passage au-dessus des masses 5 et 8 aboutit au carbone 12, et que ce passage exige les conditions d'une étoile, tout ce qui pèse au moins douze nucléons sort d'une étoile. C'est exactement le lien que fait la revue de Kobayashi et de ses coautrices : c'est « à cause de la nature des réactions triple alpha » que les éléments de masse 12 ou plus sont formés à l'intérieur des étoiles Kobayashi 2020. La deuxième conséquence porte sur les étoiles concernées. La source le dit en trois mots : « dans tous les cas », l'hélium fusionne en carbone par cette réaction wiki-stellarnuc. Toute étoile qui brûle son hélium fabrique donc du carbone, qu'elle soit massive ou non. On verra que ce détail décide d'où vient le carbone de l'Univers. La troisième conséquence est ce que le passage laisse de côté. Entre le lithium, dernier produit des premières minutes, et le carbone, premier produit de la triple alpha, il reste des éléments, comme le béryllium et le bore stables, de masse 9 à 11. Leur origine n'est traitée par aucune source de ce livre[8].

12.3 Une forge qui s'accélère

Chez les étoiles massives, la forge ne s'arrête pas au carbone. La contraction gravitationnelle du cœur, et l'échauffement qu'elle provoque, déclenchent successivement la combustion du carbone, de l'oxygène, puis du silicium wiki-stellarnuc. Le mécanisme se comprend à partir de ce qu'est une étoile : une boule de gaz

que sa propre gravité comprime, et que la chaleur dégagée par les fusions de son cœur empêche de s'effondrer. Tant qu'un combustible brûle, les deux se compensent. Quand il est épuisé au centre, la chaleur ne compense plus, le cœur se contracte et, en se contractant, il s'échauffe. L'échauffement se poursuit jusqu'à ce que la température suffise à allumer le combustible suivant, qui n'est autre que la cendre du précédent[9]. Chaque nouveau combustible est plus lourd que le précédent. Ses noyaux portent plus de charges positives et se repoussent plus fort : la barrière coulombienne, qui freinait déjà les réactions lourdes dans les premières minutes fields2014pdg, exige à chaque étape une température plus haute pour être franchie[10]. La forge monte ainsi d'étage en étage, et chaque étage demande un cœur plus comprimé et plus chaud que le précédent.

Les étapes s'accélèrent brutalement. Pour une étoile de 25 masses solaires, la combustion de l'hydrogène dure 10 millions d'années ; celle du silicium dure 5 jours wiki-sib. Le rapport entre les deux est d'environ sept cents millions. Si la combustion de l'hydrogène de cette étoile durait une année, celle du silicium durerait quatre centièmes de seconde[11]. Les durées des étapes intermédiaires, hélium, carbone et oxygène, ne sont pas données dans les sources de ce livre, pas plus que les raisons physiques de l'accélération[12]. Le fait lui-même suffit pour la chimie du cosmos. Une étoile massive passe l'essentiel de sa vie à faire de l'hélium, et elle fabrique les éléments intermédiaires, du carbone au silicium, dans un temps qui, rapporté à cette vie, est presque nul.

Deux réserves bornent ces chiffres. La première tient à l'étoile de référence. Ce sont ceux d'une étoile de 25 masses solaires de type actuel. Ceux d'une étoile sans métaux de la première génération ne sont pas dans les sources, et le chapitre sur les premières étoiles ne s'en est servi que comme ordre de grandeur (→ chap. 9). La seconde tient à la masse. Les sources disent que cette suite de combustions est le fait des étoiles massives wiki-stellarnuc, sans donner le seuil de masse au-dessous duquel une étoile s'arrête avant le silicium, ni l'étape où s'arrête une étoile comme le Soleil[13].

Une conséquence, en revanche, se tire directement des chiffres. Une étoile de 25 masses solaires vit de l'ordre d'une dizaine de millions d'années, puisque sa phase la plus longue en dure dix. À l'échelle de l'histoire cosmique, c'est un instant : trois cents fois moins que les 300 millions d'années qui séparent le début de l'observation de JADES-GS-z14-0. Les étoiles massives sont les seules à avoir eu le temps de vivre et de mourir plusieurs fois avant cette galaxie. C'est pourquoi l'oxygène, qu'elles produisent surtout Kobayashi 2020, est le premier métal qu'on s'attend à trouver dans le jeune Univers, et le premier qu'on y a trouvé Schouws 2025(→ chap. 9).

12.4 Pourquoi elle s'arrête au fer

La combustion du silicium est la dernière. Elle aboutit au nickel 56, qui donnera le fer wiki-sib. Le nickel 56 est un noyau radioactif : par deux désintégrations successives, en passant par le cobalt 56, il devient du fer 56, le fer ordinaire[14]. C'est pourquoi on dit que la forge s'arrête « au fer », alors que son dernier produit direct est un noyau de nickel.

Deux raisons l'empêchent d'aller plus loin, et la source les donne ensemble : après le nickel 56, les réactions sont « beaucoup moins exothermiques », et la température est si haute que la photodésintégration empêche de progresser wiki-sib.

La première raison touche à ce qu'est un combustible. Une étoile ne vit pas des éléments qu'elle fabrique, mais de l'énergie que leur fabrication libère : c'est cette énergie qui retient le cœur contre la gravité. Fusionner deux noyaux légers libère de l'énergie parce que le noyau produit est plus solidement lié que ses deux

parents. Ce gain diminue à mesure qu'on monte dans les masses, et il s'annule dans la région du fer et du nickel, où les noyaux sont les plus solidement liés de tous[15]. Au-delà, fusionner ne rapporte presque plus rien. Le nickel 56 n'est pas un combustible pour l'étage suivant : c'est une cendre qui ne brûle plus.

La seconde raison est un retour de l'obstacle qui avait retardé les premières minutes. On appelle photodésintégration la destruction d'un noyau par un photon, un grain de lumière, assez énergétique pour le briser. Dans les premières minutes, c'est ce qui avait tenu le deutérium en échec : les photons, un milliard de fois plus nombreux que les noyaux, cassaient chaque noyau de deutérium dès sa formation, et les fusions avaient dû attendre que la lumière faiblisse fields2014pdg(→ chap. 5). Au fond d'une étoile massive, la situation est symétrique. Pour faire fusionner des noyaux de plus en plus lourds, le cœur doit être de plus en plus chaud, et à la température requise, la lumière du cœur se met à défaire les noyaux au lieu de laisser la forge les construire[16]. Aux deux bouts de l'histoire des noyaux, c'est la lumière qui fixe la limite : au début parce qu'elle est encore trop chaude, au fond des étoiles massives parce qu'elle l'est redevenue.

Privé de combustible, le cœur perd ce qui le soutenait. Il se contracte en quelques minutes ; la contraction s'emballe ensuite en un effondrement de quelques secondes wiki-sib. C'est la supernova à effondrement de cœur, que les astronomes classent en plusieurs types d'après la lumière qu'elle émet, dits II, Ib et Ic Kobayashi 2020. L'échelle des durées résume toute la vie de l'étoile : dix millions d'années d'hydrogène, cinq jours de silicium, quelques minutes de contraction, quelques secondes d'effondrement wiki-sib. Ce qui se passe pendant ces secondes, comment l'effondrement du cœur devient une explosion qui disperse le reste de l'étoile, et ce qu'il reste au centre, n'est pas décrit dans les sources de ce livre[17].

Pour la chimie, un point compte plus que le mécanisme : la distinction entre fabriquer et rendre. Les éléments sont fabriqués pendant la vie de l'étoile, étage après étage. Ils ne rejoignent le gaz de la galaxie qu'au moment de sa mort. La revue de Kobayashi et de ses coautrices le dit pour les éléments intermédiaires : ils sont surtout produits dans les étoiles massives « avant d'être éjectés » par les supernovas à effondrement de cœur Kobayashi 2020. Tant qu'une étoile vit, ses produits restent enfermés en elle. Pour qu'un atome d'oxygène puisse entrer dans une étoile de la génération suivante, il faut que la première soit morte.

12.5 Qui a fait quoi

Savoir comment une étoile fabrique un élément ne dit pas quelle part de cet élément vient de telle ou telle sorte d'étoile. Cette répartition sort de modèles d'évolution chimique. Ces modèles suivent une galaxie au fil du temps. Ils y font naître des étoiles de toutes masses, leur attribuent ce que chacune rejette en mourant, et comparent le mélange qui en résulte aux compositions mesurées dans les étoiles réelles[18]. Kobayashi, Karakas et Lugaro ont reconstruit de cette façon l'origine de tous les éléments stables du carbone à l'uranium Kobayashi 2020. Les proportions qui suivent sont donc des résultats de modèle, pas des comptages d'atomes étiquetés. Les auteurs les donnent d'ailleurs en ordres de grandeur, « environ la moitié », « surtout », et la fiche qui sert de base à ce chapitre les range parmi les points à vérifier avant publication[19]. Le partage se fait entre quatre sources.

Les vents des étoiles moyennes. Environ la moitié du carbone, de l'azote et du fluor de l'Univers vient d'étoiles de masse faible ou moyenne, pendant la phase de leur fin de vie que les astronomes appellent la branche asymptotique des géantes, ou phase AGB Kobayashi 2020[20]. Ces étoiles ne meurent pas en explosant. Elles rendent leur matière par des vents, en perdant peu à peu leurs couches extérieures Kobayashi 2020. Le résultat corrige une image répandue. Le carbone ne vient pas surtout des supernovas : environ la moitié vient d'étoiles moyennes qui soufflent leur enveloppe. Ce n'est pas un paradoxe, puisque toute étoile qui brûle son hélium fabrique du carbone par la triple alpha wiki-stellarnuc. Les étoiles de masse faible ou

moyenne sont bien plus nombreuses que les massives, et elles rendent leur carbone doucement, par leurs vents[21].

Les supernovas à effondrement de cœur. L'oxygène, le magnésium, le silicium, le soufre et le calcium sont surtout produits dans les étoiles massives et éjectés par les supernovas à effondrement de cœur Kobayashi 2020. Ce sont les produits des étages décrits plus haut, du carbone au silicium. Les astronomes les appellent éléments « alpha », parce que leurs noyaux les plus abondants comptent un nombre de nucléons multiple de quatre, comme s'ils étaient des assemblages de noyaux d'hélium[22]. L'oxygène de JADES-GS-z14-0 relève de cette source Kobayashi 2020Schouws 2025.

Les naines blanches qui explosent. La moitié environ des éléments du « pic du fer », c'est-à-dire le chrome, le manganèse, le fer, le nickel, le cobalt, le cuivre et le zinc, vient des supernovas de type Ia Kobayashi 2020. Ces supernovas sont des explosions de naines blanches carbone-oxygène dans des systèmes doubles, où deux étoiles tournent l'une autour de l'autre Kobayashi 2020. Une naine blanche est le cœur mis à nu d'une étoile de masse faible ou moyenne qui a perdu son enveloppe[23]. Celle-ci est faite de carbone, que la triple alpha a produit, et d'oxygène. Pourquoi une telle naine blanche finit par exploser, et quel rôle y joue sa compagne, n'est pas décrit dans les sources de ce livre[24]. Le résultat corrige une seconde image répandue. Le fer ne vient pas seulement des étoiles massives : environ la moitié du fer vient de ces explosions de naines blanches. L'extrait de la revue ne nomme pas la source de l'autre moitié ; la fiche la rapporte, par contraste, aux étoiles massives[25].

Les captures de neutrons. Au-delà du fer, à partir d'une masse d'environ 64, les éléments ne sont plus fabriqués par fusion de noyaux chargés, mais surtout par captures de neutrons Kobayashi 2020. Un neutron n'a pas de charge électrique. Aucune barrière coulombienne ne l'empêche d'approcher un noyau, si lourd soit-il. Un noyau qui absorbe des neutrons s'alourdit, puis certains de ses neutrons se changent en protons, ce qui le fait monter d'un rang dans le tableau périodique[26]. Deux régimes existent, qui se distinguent par la densité de neutrons disponibles. Le processus lent, ou processus s, opère à environ 10^7 neutrons par centimètre cube ; le processus rapide, ou processus r, au-delà de 10^{20} Kobayashi 2020. Le processus s principal fabrique les éléments du strontium au plomb, et il a lieu dans les étoiles AGB de faible masse Kobayashi 2020, les mêmes étoiles modestes qui fournissent la moitié du carbone. Le processus r relève d'autres lieux, que la dernière section de ce chapitre situe.

Le partage se résume en quelques lignes.

Éléments	Source principale selon les modèles	Mode de retour au gaz
Hydrogène, hélium (l'essentiel), traces de lithium	les premières minutes	—
Carbone, azote, fluor (environ la moitié)	étoiles de masse faible ou moyenne, phase AGB	vents
Oxygène, magnésium, silicium, soufre, calcium	étoiles massives	supernovas à effondrement de cœur
Pic du fer : chrome à zinc (environ la moitié)	naines blanches dans des systèmes doubles	supernovas de type Ia
Du strontium au plomb (processus s principal)	étoiles AGB de faible masse	vents

Ce tableau fait apparaître un fait que l'image d'une forge unique cache. Les étoiles massives et leurs explosions n'ont pas tout fait. Les étoiles moyennes, sans explosion, ont fourni une grande part du carbone et de l'azote et la plupart des éléments du processus s. Les naines blanches, restes d'étoiles moyennes elles aussi,

ont fourni la moitié du fer. Le tableau périodique de la matière ordinaire est l'œuvre de toutes les masses d'étoiles, chacune à son rythme.

12.6 Une horloge chimique et un recyclage

Le partage des éléments entre ces sources a une conséquence dans le temps, parce que les sources ne rendent pas leur matière au même rythme. Une étoile massive meurt au bout de quelques millions d'années wiki-sib. Une supernova de type Ia ne peut se produire qu'après la formation d'une naine blanche, donc après la vie entière d'une étoile moyenne, qui est longue : elle arrive avec retard Kobayashi 2020[27].

Imaginons une galaxie qui commence à former des étoiles. Pendant ses premiers temps, seules les supernovas à effondrement de cœur ont eu le temps de se produire. Elles enrichissent le gaz en éléments alpha, oxygène, magnésium, silicium, avec un peu de fer. Le gaz de cette époque a donc un rapport élevé entre éléments alpha et fer. Plus tard, les supernovas Ia s'ajoutent. Elles apportent beaucoup de fer et peu d'éléments alpha, et le rapport baisse. La revue de Kobayashi et de ses coautrices énonce le fait et sa cause : le rapport entre éléments alpha et fer baisse avec le temps, et cette relation s'explique par « l'enrichissement retardé en fer par les supernovas Ia » Kobayashi 2020.

Le rapport devient ainsi une horloge. Une étoile riche en éléments alpha par rapport à son fer est née d'un gaz enrichi surtout par des étoiles massives, donc tôt dans l'histoire de sa galaxie. Une étoile au rapport plus bas est née après l'arrivée des supernovas Ia. C'est une horloge relative : elle ordonne des populations d'étoiles, elle ne donne pas d'âge en années. Les sources de ce livre ne disent pas si elle bat au même rythme partout, par exemple dans une galaxie qui forme ses étoiles vite et dans une autre qui les forme lentement[28]. Pour dater en années, il faut d'autres méthodes, comme l'âge des étoiles sous-géantes dont Maosheng Xiang et Hans-Walter Rix se sont servis pour dater le début du disque ancien de la Voie lactée Xiang 2022. Les deux se combinent, et c'est ainsi que se lit l'ordre de formation des populations d'étoiles de notre Galaxie, que raconte (→ chap. 14).

L'horloge repose sur une propriété plus générale. Les éléments plus lourds que l'hélium sont fabriqués dans les étoiles, rejetés quand elles meurent, et la génération suivante naît de nuages de gaz qui les contiennent Kobayashi 2020. Une étoile garde dans son atmosphère la composition du gaz dont elle est née. Chaque étoile d'aujourd'hui est donc un fossile de la chimie de ce gaz, et les astronomes appellent « archéologie galactique » l'étude qui s'en sert Kobayashi 2020. Les étoiles les plus pauvres en métaux sont les témoins les plus anciens de ce recyclage. Les vieilles étoiles du halo de la Galaxie, dans lesquelles on mesure le lithium des premières minutes, descendent jusqu'à environ cinq cents fois moins de fer que le Soleil Fields 2020[29]. Le Soleil, avec 1,39 % de sa masse en métaux, est né d'un gaz qui avait fait beaucoup de tours de cette boucle Asplund 2021.

Combien de tours, au juste ? On ne peut pas le chiffrer, et ce n'est pas une lacune de mesure qu'une meilleure observation comblerait. Une lignée se compte parce que chaque génération y descend d'une seule précédente. Le gaz d'une galaxie, lui, mélange les rejets d'étoiles de toutes masses, mortes à toutes les époques. Une étoile massive née il y a peu y dépose son oxygène à côté du fer d'une naine blanche formée des milliards d'années plus tôt. Un atome de carbone du Soleil peut avoir traversé une étoile, ou trois, ou aucune depuis sa fabrication. La question « combien de générations avant le Soleil ? » n'a pas de réponse numérique, parce que le recyclage ne définit pas de générations successives ; la fiche de base la classe parmi les hypothèses non chiffrables [30]. Sur l'axe qui compte ici, celui de ce qu'on peut dénombrer, l'histoire des métaux du Soleil est un recyclage et non une lignée.

Un dernier point de l'inventaire se lit dans la composition du Soleil. En masse, sa photosphère contient aujourd'hui 74,4 % d'hydrogène, 24,2 % d'hélium et 1,39 % de tous les autres éléments Asplund 2021[31]. Le 1,4 % est l'œuvre de la forge. Les 74 % d'hydrogène ne le sont pas. Les étoiles ne fabriquent pas d'hydrogène : elles en consomment, puisque leur premier travail est de le changer en hélium wiki-stellarnuc. Tout l'hydrogène qui existe vient donc des premières minutes. La formule selon laquelle « nous sommes faits de poussière d'étoiles » demande à être corrigée sur ce point [32]. Dans une molécule d'eau, l'oxygène a été fabriqué dans une étoile massive et rendu par sa supernova, mais les deux atomes d'hydrogène datent du premier jour. Le carbone de nos cellules vient pour moitié environ des vents d'étoiles moyennes. Le fer de notre sang vient pour moitié environ de naines blanches qui ont explosé Kobayashi 2020wiki-frise-na. Si la matière de nos corps est bien celle du nuage dont est né le Soleil, ce que les chapitres suivants auront à établir, nos corps portent à la fois de la matière du premier jour et de la matière forgée dans les étoiles.

12.7 Ce que la forge ne fait pas

La forge décrite jusqu'ici laisse de côté une moitié des éléments lourds. Environ la moitié des éléments plus lourds que le fer présents dans la nature est attribuée au processus r, la capture rapide de neutrons Cowan 2021. L'or et le platine en font partie Kasen 2017. Ce processus exige plus de 10^{20} neutrons par centimètre cube Kobayashi 2020, soit dix mille milliards de fois la densité de neutrons du processus s. Aucune des étapes décrites dans ce chapitre ne fournit une telle densité : ni la combustion tranquille de l'hydrogène et de l'hélium, ni les étages rapides du carbone au silicium, ni les vents des étoiles AGB, qui atteignent 10^{7} neutrons par centimètre cube Kobayashi 2020. Les sources de ce livre situent le processus r dans des événements plus violents et plus rares que la mort ordinaire d'une étoile.

L'origine cosmique des éléments plus lourds que le fer « est restée longtemps incertaine » Kasen 2017. Les candidats que recense la revue de John Cowan et de ses coauteurs sont des fusions de deux étoiles à neutrons, des fusions d'une étoile à neutrons et d'un trou noir, et certaines hypernovas, des supernovas particulièrement énergiques Cowan 2021. Kobayashi et ses coautrices reproduisent l'évolution de l'europium, un élément du processus r, si environ 3 % des hypernovas de 25 à 50 masses solaires sont des supernovas dites magnéto-rotationnelles, qui produiraient ces éléments Kobayashi 2020. Leur revue relève aussi que les fusions d'étoiles à neutrons, qui peuvent produire les éléments du processus r jusqu'au thorium et à l'uranium, ont des délais « trop longs » pour expliquer les étoiles les plus pauvres en métaux, qui en contiennent déjà Kobayashi 2020. Le site du processus r reste, selon la revue de Cowan, l'une des deux grandes incertitudes du domaine, avec la physique des noyaux très riches en neutrons Cowan 2021.

En août 2017, une fusion de deux étoiles à neutrons a été détectée en ondes gravitationnelles, puis vue en lumière Kasen 2017. Ce qu'on y a vu, et ce que ce premier témoin direct laisse encore ouvert, est l'objet du chapitre 13.

12.8 Ce qu'on ne sait pas

On ne sait pas ce qu'a fabriqué la première forge. L'oxygène de JADES-GS-z14-0 prouve que des étoiles avaient forgé et rendu des métaux avant 300 millions d'années Schouws 2025. Il ne dit pas lesquelles, ni en quelles quantités. Les étoiles de population III n'ont jamais été observées Klessen 2023, et ce qu'une étoile sans métaux de telle masse fabrique et rejette n'est pas dans les sources de ce livre (→ chap. 9). Deux sortes d'indices pourraient faire mieux : les compositions des étoiles les plus pauvres en métaux de la Galaxie, fossiles des premiers enrichissements Kobayashi 2020, et l'observation directe d'un système de pre-

mière génération. La confiance est élevée sur le fait qu'une forge a précédé les premières galaxies visibles, faible sur ce qu'elle a produit.

On ne connaît le partage des éléments qu'à travers des modèles. Les « environ la moitié » de Kobayashi et de ses coautrices pour le carbone, l'azote, le fluor et le fer sont des résultats d'évolution chimique Kobayashi 2020. Ils dépendent de ce que chaque sorte d'étoile rejette et du rythme auquel les supernovas Ia se produisent. Les sources de ce livre ne disent pas de combien ces proportions bougeraient si l'on changeait ces ingrédients. Le sens général du partage, les éléments alpha aux étoiles massives, une grande part du carbone et de l'azote aux étoiles moyennes, une grande part du fer aux naines blanches, est établi ; les proportions exactes sont à tenir pour des ordres de grandeur.

Deux mécanismes d'explosion restent hors de la base. Comment l'effondrement d'un cœur de fer, qui dure quelques secondes wiki-sib, se change en une explosion qui disperse l'étoile, et pourquoi une naine blanche dans un système double finit par exploser, ne sont pas décrits dans les sources de ce livre. Il s'agit ici de lacunes de la base, pas nécessairement d'inconnues de la science : les fiches ne disent pas où en est la compréhension de ces explosions. Il en va de même pour les raisons de l'accélération des étapes de combustion, et pour le seuil de masse qui sépare les étoiles qui vont jusqu'au silicium de celles qui s'arrêtent avant.

On ne sait pas si l'horloge chimique bat au même rythme partout. Le principe, un rapport alpha/fer qui baisse à mesure que les supernovas Ia s'ajoutent, est établi Kobayashi 2020. La durée du retard des Ia n'est pas chiffrée dans la base, et la dépendance de l'horloge au rythme de formation des étoiles de chaque galaxie n'y est pas documentée. L'horloge ordonne ; pour dater en années, il faut la combiner avec d'autres méthodes Xiang 2022.

On ne sait pas où se fait l'essentiel du processus r aux premières époques. Les fusions d'étoiles à neutrons en produisent, mais arrivent trop tard pour les étoiles les plus anciennes ; les supernovas magnéto-rotationnelles sont une solution de modèle Kobayashi 2020Cowan 2021. Ce qui départagerait les candidats est la présence et la dispersion des éléments du processus r dans les étoiles les plus pauvres en métaux, et le nombre d'événements de chaque sorte. Cette question appartient au chapitre suivant.

Enfin, on ne saura pas compter les générations d'étoiles qui ont précédé le Soleil, pour une raison de principe et non de mesure : le recyclage mélange les apports de toutes les époques.

12.9 Ce que ce chapitre démontre

Les premières minutes laissent de l'hydrogène, environ 25 % d'hélium en masse et des traces de lithium. Elles s'arrêtent là parce qu'il n'existe aucun noyau stable de masse 5 ou 8 fields2014pdg. Tous les éléments de masse 12 ou plus sont formés dans les étoiles Kobayashi 2020. Le principe en est posé en 1957 par Margaret et Geoffrey Burbidge, William Fowler et Fred Hoyle wiki-stellarnuc. La forge a commencé avant les plus anciennes galaxies vues : JADES-GS-z14-0 contient déjà, à 300 millions d'années, 5 à 20 % de la métallicité solaire Schouws 2025. Aucune étoile de la première génération n'a pourtant été observée Klessen 2023.

Les étoiles franchissent la marche de masse 8 par la réaction triple alpha : trois noyaux d'hélium donnent un carbone, en passant par le béryllium 8 wiki-stellarnuc. Toutes les étoiles qui brûlent leur hélium la réalisent. C'est elle qui fait de la masse 12 la frontière entre ce que le premier jour a fait et ce que les étoiles font Kobayashi 2020.

Chez les étoiles massives, la contraction et l'échauffement du cœur allument successivement le carbone, l'oxygène et le silicium wiki-stellarnuc. Les étapes s'accélèrent : pour une étoile de 25 masses solaires, 10

millions d'années d'hydrogène, 5 jours de silicium wiki-sib. La forge s'arrête au nickel 56, qui donnera le fer. Au-delà, les réactions libèrent beaucoup moins d'énergie, et la température est si haute que la photodésintégration défait ce que la fusion construirait wiki-sib. Privé de combustible, le cœur se contracte en quelques minutes puis s'effondre en quelques secondes : c'est la supernova à effondrement de cœur wiki-sib.

Selon les modèles d'évolution chimique, les sources se partagent le tableau périodique Kobayashi 2020. Environ la moitié du carbone, de l'azote et du fluor vient des vents d'étoiles de masse faible ou moyenne en phase AGB. L'oxygène, le magnésium, le silicium, le soufre et le calcium viennent surtout des étoiles massives, par leurs supernovas. Environ la moitié des éléments du pic du fer vient des supernovas Ia, explosions de naines blanches carbone-oxygène dans des systèmes doubles. Le processus s, à environ 10^7 neutrons par centimètre cube, fabrique dans les étoiles AGB de faible masse les éléments du strontium au plomb. Le carbone ne vient donc pas surtout des supernovas, et le fer ne vient pas seulement des étoiles massives.

Parce que les supernovas Ia arrivent en retard, le rapport entre éléments alpha et fer baisse avec le temps Kobayashi 2020. Il sert d'horloge pour ordonner les populations d'étoiles, chacune étant un fossile chimique du gaz dont elle est née. Le Soleil contient 1,39 % de métaux, somme de ce recyclage Asplund 2021, dont on ne peut pas compter les générations. Ses 74 % d'hydrogène, et l'hydrogène de nos corps, ne viennent pas des étoiles mais du premier jour.

Environ la moitié des éléments plus lourds que le fer, dont l'or et le platine, relève du processus r Cowan 2021Kasen 2017. Il exige plus de 10^{20} neutrons par centimètre cube Kobayashi 2020, ce qu'aucune combustion stellaire ordinaire ne fournit. Où il se produit est la question du chapitre suivant.

Notes

1. Wikipédia (en), « Stellar nucleosynthesis » : « the 1957 review paper 'Synthesis of the Elements in Stars' by Margaret Burbidge, Geoffrey Burbidge, William Alfred Fowler and Fred Hoyle ». La source est une encyclopédie ; l'article de 1957 lui-même n'a pas été lu, et son contenu précis (quels processus il pose, ce qu'il doit aux travaux antérieurs) n'est pas documenté dans la base. ↩

2. Calcul repris du chapitre sur les premières étoiles : 5 % et 20 % de 1,39 % donnent environ 0,07 % et 0,28 % de la masse. Ce calcul suppose que la métallicité mesurée par l'oxygène se rapporte à l'ensemble des métaux comme dans le Soleil, ce que la fiche ne précise pas. ↩

3. Fiche frise-cosmique, section 6 : « Aucune étoile de population III n'a été observée directement à ce jour ; leur existence est une nécessité logique […], leurs propriétés restent théoriques. » Le meilleur candidat, LAP1-B à 830 millions d'années, est une interprétation discutée au chapitre sur les premières étoiles. ↩

4. Le vocabulaire (« combustion », « brûler ») est celui des sources (« hydrogen burning », « silicon-burning process »). La distinction entre combustion chimique et fusion nucléaire est une précision de ce chapitre. ↩

5. Les voies par lesquelles l'hydrogène devient hélium dans les étoiles (chaîne proton-proton, cycle carbone-azote-oxygène) ne sont pas documentées dans les fiches. Ce manque est signalé. ↩

6. L'appellation « particule alpha » pour le noyau d'hélium 4 est classique ; les fiches ne la définissent pas, mais la revue de Kobayashi et al. parle de « triple α reactions ». ↩

7. Le raisonnement qui explique pourquoi la triple alpha réussit dans une étoile et pas dans les premières minutes (densité et durée) est de ce chapitre, dans le prolongement du chapitre sur les premières étoiles. Les fiches ne chiffrent ni la densité ni la température d'un cœur d'étoile qui brûle son hélium, ni la durée de vie du béryllium 8. La présentation classique ajoute un rôle décisif à une propriété particulière du noyau de carbone 12 (une « résonance »), que les sources de ce livre ne mentionnent pas. ↩

8. Le lithium 6, le béryllium 9, le bore 10 et le bore 11 ne sont produits en quantité notable ni par les premières minutes (fiche nucleosynthese-primordiale), ni par la triple alpha, qui saute de 4 à 12. Leur origine n'est documentée par aucune fiche ; la revue de Kobayashi et al. commence d'ailleurs au carbone. ↩

9. La fiche des-etoiles-a-nous dit que la contraction gravitationnelle et l'échauffement « déclenchent » les combustions successives, et qu'« à court de combustible, le cœur se contracte ». La description de l'étoile comme équilibre entre gravité et chaleur des fusions est la présentation classique qui relie ces deux énoncés ; elle n'est pas formulée ainsi dans les fiches. ↩

10. La fiche nucleosynthese-primordiale établit, pour les premières minutes, que les barrières coulombiennes freinent les réactions plus lourdes (Fields et al. 2014). L'application aux étages successifs d'une étoile (des noyaux plus chargés exigent une température plus haute) est un raisonnement de ce chapitre, cohérent avec cette source. ↩

11. Calcul fait pour ce chapitre : 10 millions d'années × 365,25 jours ≈ 3,65 × 10^9 jours ; divisé par 5 jours, le rapport vaut ≈ 7,3 × 10^8. Une année (≈ 3,16 × 10^7 secondes) divisée par 7,3 × 10^8 donne ≈ 0,043 seconde. ↩

12. Wikipédia (en), « Silicon-burning process » : « for a 25-solar mass star, the period lasts 5 days, compared to a prior 10 million years of hydrogen burning ». Les durées des combustions de l'hélium, du carbone et de l'oxygène, et les causes physiques de l'accélération, ne sont pas dans la fiche. Ce manque est signalé. ↩

13. La masse minimale à partir de laquelle une étoile brûle le carbone, puis le silicium, et le destin propre du Soleil (étape où s'arrête sa forge) ne sont pas documentés dans les fiches. ↩

14. La désintégration du nickel 56 en cobalt 56 puis en fer 56 est la présentation classique ; la fiche dit seulement que le nickel 56 « donnera le fer ». Les demi-vies de ces désintégrations ne sont pas dans la base. ↩

15. La source dit seulement que les étapes après le nickel 56 sont « much less exothermic ». L'explication par l'énergie de liaison des noyaux, maximale dans la région du fer et du nickel, est la présentation classique ; elle n'est pas documentée dans les fiches. Ce manque est signalé. ↩

16. Wikipédia (en), « Silicon-burning process » : « the temperature is so high that photodisintegration prevents further progress ». Le parallèle avec le goulot du deutérium des premières minutes (Fields et al. 2014 : les photons cassent le deutérium jusqu'à ce que la température descende vers 0,1 MeV) est fait par ce chapitre. La fiche ne précise pas quels noyaux sont défaits au fond de l'étoile, ni à quelle température. ↩

17. La fiche donne la chronologie (contraction en quelques minutes, effondrement en quelques secondes) mais pas le mécanisme de l'explosion, ni la nature du résidu central (étoile à neutrons ou trou noir). Les étoiles à neutrons n'apparaissent dans la base qu'à propos de leurs fusions (chapitre suivant). ↩

18. Description générale de ce chapitre. La fiche des-etoiles-a-nous dit seulement que « les modèles d'évolution chimique répartissent les éléments entre plusieurs sources » et que Kobayashi et al. les ont « reconstruites pour tous les éléments stables du carbone à l'uranium ». Les ingrédients précis de leur modèle ne sont pas documentés. ↩

19. Fiche des-etoiles-a-nous, rubrique « À vérifier avant publication » : « Les proportions "moitié" de Kobayashi et al. sont des résultats de modèle. » Texte de la revue : « Roughly half of the light elements such as C, N and F are produced by low- and intermediate-mass stars during their asymptotic giant branch (AGB) phase ». ↩

20. Le nom vient de la position de ces étoiles dans le diagramme où les astronomes classent les étoiles selon leur température et leur luminosité, où elles forment une branche qui longe (« asymptotique ») celle des géantes rouges. Cette explication du nom est classique et n'est pas donnée dans les fiches. ↩

21. Raisonnement de ce chapitre. Que les étoiles de faible masse soient plus nombreuses que les massives est un fait général, non chiffré dans les fiches pour les étoiles actuelles ; le chapitre sur les premières étoiles décrit une répartition différente, supposée, pour la population III. ↩

22. Explication classique du nom (oxygène 16, magnésium 24, silicium 28, soufre 32, calcium 40, tous multiples de 4). La revue de Kobayashi et al. emploie le terme « α-elements » sans que la fiche en donne l'origine. ↩

23. Définition classique, non donnée dans les fiches. Le chapitre sur les premières étoiles note seulement qu'« une naine blanche doit d'abord se former » avant une supernova Ia. Que les naines blanches soient faites de carbone et d'oxygène est dans la revue (« carbon–oxygen white dwarfs », selon la fiche) ; que l'oxygène d'une naine blanche vienne lui aussi de la combustion de l'hélium n'est pas documenté. ↩

24. Le mécanisme qui fait exploser une naine blanche dans un système double (apport de matière par la compagne, fusion de deux naines blanches, masse limite) n'est pas dans les fiches. Ce manque est signalé. ↩

25. Kobayashi et al. : « half of the iron-peak elements (Cr, Mn, Fe, Ni, Co, Cu, and Zn) are produced by Type Ia Supernovae ». La fiche des-etoiles-a-nous, dans ses « contresens à éviter », précise : « environ la moitié vient des Ia, qui sont des naines blanches, pas des étoiles massives ». L'attribution de l'autre moitié aux supernovas à effondrement de cœur est la lecture naturelle, mais l'extrait lu ne l'énonce pas. ↩

26. La fiche dit que les éléments au-delà du fer ($A \gtrsim 64$) sont « fabriqués surtout par captures de neutrons ». L'absence de barrière coulombienne pour le neutron et la montée dans le tableau périodique par transformation d'un neutron en proton (désintégration bêta) sont la présentation classique, non détaillée dans les fiches. ↩

27. La fiche des-etoiles-a-nous : « Les supernovas Ia arrivent avec retard, car une naine blanche doit d'abord se former. » La durée de ce retard, et sa distribution, ne sont pas chiffrées dans la base. La durée de vie d'une étoile massive est tirée de l'exemple de 25 masses solaires (Wikipédia, « Silicon-burning process »). ↩

28. Remarque de ce chapitre. Les fiches présentent le rapport alpha/fer comme un indicateur d'ordre de formation dans la Voie lactée ; elles ne discutent pas sa dépendance à l'histoire de formation des étoiles de chaque galaxie. ↩

29. D'après Fields et al. (2020), cité par la fiche nucleosynthese-primordiale : le plateau de Spite est mesuré pour des étoiles de métallicité $-2{,}7 \lesssim [\mathrm{Fe/H}] \lesssim -1{,}5$. La notation [Fe/H] compare, en logarithme décimal, le rapport fer/hydrogène d'une étoile à celui du Soleil : $[\mathrm{Fe/H}] = -2{,}7$ correspond à $10^{-2{,}7}$, soit environ 500 fois moins de fer relatif que le Soleil. Le calcul est celui du chapitre sur les premières étoiles. ↩

30. Fiche des-etoiles-a-nous, en-tête : « nombre de générations d'étoiles avant le Soleil (non chiffrable) », rangé parmi les hypothèses ; section « Ce que le livre peut en tirer » : « L'image juste est celle d'un recyclage, pas d'une lignée : on ne peut pas compter les générations d'étoiles qui ont précédé le Soleil. » L'argument du mélange est développé par ce chapitre. ↩

31. Asplund et al. (2021) : $X = 0{,}7438 \pm 0{,}0054$; $Y = 0{,}2423 \pm 0{,}0054$; $Z = 0{,}0139 \pm 0{,}0006$. Ce sont des valeurs de la surface actuelle, un peu modifiée depuis la naissance du Soleil ; les auteurs notent que le désaccord entre ces abondances et les modèles de l'intérieur solaire persiste. ↩

32. Fiche des-etoiles-a-nous, rubrique « Contresens à éviter » : « Ne pas écrire "nous sommes faits de poussière d'étoiles" comme si c'était vrai de tout : l'hydrogène de notre corps date du Big Bang. » La part de l'hydrogène dans la masse d'un corps humain n'est pas chiffrée dans la base. La fiche frise-cosmique (section 4) parle du « carbone, l'oxygène, le fer de notre sang », venus « plus tard, des étoiles ». L'attribution aux sources précises (AGB pour le carbone, Ia pour le fer) applique au corps humain les proportions cosmiques de Kobayashi et al., ce qui suppose que la matière de nos corps a le mélange moyen de la Galaxie. ↩

33. Voir la note précédente. ↩

CHAPITRE 13

L'or des catastrophes

brouillon · 6201 mots

13.1 Ce que la forge ne sait pas faire

La forge des étoiles s'arrête au nickel 56, qui donnera le fer. Au-delà, les réactions de fusion sont « beaucoup moins exothermiques » : elles ne libèrent presque plus d'énergie. Et la température du cœur est si haute que la photodésintégration, la destruction des noyaux par des photons trop énergétiques, défait ce qui se construirait wiki-sib. Une étoile vit de l'énergie de ses fusions ; au fer, fusionner ne rapporte plus rien, et le chapitre 12 a montré comment le cœur, privé de combustible, s'effondre alors en quelques secondes.

Le tableau périodique, lui, continue : strontium, europium, platine, or, plomb, thorium, uranium. Au-delà d'une masse d'environ 64 ($A \gtrsim 64$, A étant le nombre de protons et de neutrons d'un noyau), ces éléments sont fabriqués « surtout par captures de neutrons » Kobayashi 2020. Le neutron, sans charge électrique, approche un noyau sans être repoussé ; le noyau s'alourdit, puis l'un de ses neutrons se change en proton et il monte d'un rang dans le tableau, comme l'a expliqué (→ chap. 12). Il n'y faut pas de chaleur extrême, mais des neutrons libres, et beaucoup.

Tout dépend de leur nombre. Le processus lent, ou processus s (*slow*), opère vers 10^{7} neutrons par centimètre cube ; le processus rapide, ou processus r (*rapid*), en exige plus de 10^{20} Kobayashi 2020. Treize ordres de grandeur les séparent, soit dix mille milliards de fois plus de neutrons dans le second cas. Le processus s a un lieu connu : sa forme principale, du strontium au plomb, opère dans les étoiles de faible masse en fin de vie, pendant la phase dite de la branche asymptotique des géantes, ou phase AGB, et les pics d'abondance du baryum et du plomb sont « bien reproduits » par ce que ces étoiles rejettent Kobayashi 2020. Une étoile ordinaire, dans sa vieillesse, suffit.

Le processus r est d'une autre nature, et c'est ce chapitre qui doit en dire le mécanisme. Tout se joue dans une course entre deux horloges : le temps qui sépare deux captures de neutron, et le temps que met un noyau instable à se désintégrer. Quand les neutrons sont rares, comme dans le processus s, un noyau instable a presque toujours le temps de se désintégrer avant la capture suivante, et la montée reste au voisinage des noyaux stables. Quand ils arrivent par centaines de milliards de milliards dans chaque centimètre cube, les captures s'empilent avant toute désintégration. Les noyaux se gonflent de neutrons bien au-delà de ce qui est stable ; puis, le flux tari, ils se désintègrent en cascade jusqu'à des noyaux stables, souvent autres que ceux du processus s[1]. Le chemin de synthèse longe ainsi la limite au-delà de laquelle un noyau ne peut plus retenir un neutron de plus, ce que les physiciens appellent la *neutron drip line* Cowan 2021. Ces noyaux-là ne vivent qu'un instant, et cette particularité fait l'une des deux grandes incertitudes du domaine.

Ce processus produit « environ la moitié » des éléments lourds présents dans la nature Cowan 2021, dont l'or et le platine Kasen 2017. Or aucune étape de la vie ordinaire d'une étoile ne fournit 10^{20} neutrons par centimètre cube : ni la combustion de l'hydrogène ou de l'hélium, ni les étages rapides du carbone au silicium, ni les vents des étoiles AGB, qui en restent à 10^{7} Kobayashi 2020. Son site principal est débattu « depuis près de 60 ans » Ji 2016. La question du chapitre se ramène à une densité : où, dans l'Univers, trouve-t-on assez de neutrons libres pour faire de l'or ?

13.2 Une origine longtemps incertaine

L'article de Daniel Kasen et de ses coauteurs, en 2017, s'ouvre sur ce constat : l'origine cosmique des éléments plus lourds que le fer « est restée longtemps incertaine » Kasen 2017. Depuis 1957, on savait que les étoiles fabriquent les éléments wiki-stellarnuc. La physique du processus r était comprise ; personne n'avait vu une étoile, ni rien d'autre, fabriquer de l'or.

Le site cherché doit réunir trois conditions. Une densité de neutrons libres d'au moins 10^{20} par centimètre cube Kobayashi 2020. Une densité qui dure assez pour que les noyaux se gonflent, puis qui cesse, pour qu'ils se désintègrent vers la stabilité. Et une matière rendue au gaz de la galaxie : le chapitre 12 a insisté sur la différence entre fabriquer et rendre, car un élément resté enfermé dans l'objet qui l'a produit n'entre dans aucune étoile de la génération suivante.

La revue de John Cowan et de ses coauteurs recense les candidats : les fusions de deux étoiles à neutrons, les fusions d'une étoile à neutrons et d'un trou noir, et des scénarios de supernovas, dont certaines hypernovas, supernovas particulièrement énergiques Cowan 2021. Une étoile à neutrons est le résidu que laisse, dans certains cas, l'effondrement du cœur d'une étoile massive : une masse d'étoile comprimée au point d'être faite pour l'essentiel de neutrons serrés les uns contre les autres[2]. Un trou noir est un objet si compact que rien, pas même la lumière, n'en ressort[3].

Chaque candidat répond au cahier des charges à sa manière. L'étoile à neutrons est un réservoir de neutrons : que l'on en arrache de la matière et qu'on la projette dans l'espace, et la densité voulue est déjà là[4]. Les supernovas ont un autre atout, qui tient au calendrier : elles sont la mort d'étoiles massives, qui vivent peu. Une étoile de 25 masses solaires brûle son hydrogène en une dizaine de millions d'années wiki-sib. Une telle supernova rend donc sa matière très tôt dans l'histoire d'une galaxie, ce qu'une fusion d'étoiles à neutrons ne fait pas nécessairement. Ce calendrier décidera de presque tout dans la suite.

Aucun de ces sites n'avait été pris sur le fait avant 2017, mais une prédiction pouvait servir de test. Les noyaux qui sortent du processus r sont pour la plupart radioactifs. Leurs désintégrations chauffent la matière éjectée, et une matière chaude brille. Un site du processus r en activité devait donc s'accompagner d'une lueur thermique alimentée par la radioactivité de ce qu'il venait de fabriquer, et les modèles pouvaient en prévoir l'éclat Kasen 2017. On l'a appelée kilonova[5]. Il restait à trouver un site au bon moment, et à regarder.

13.3 Août 2017 : entendre, puis voir

Deux étoiles à neutrons qui tournent l'une autour de l'autre émettent des ondes gravitationnelles, des ondulations de la géométrie de l'espace, de même nature que celles que l'inflation aurait dû laisser dans le fond diffus cosmologique (→ chap. 3). Ces ondes emportent de l'énergie ; l'orbite se resserre, et le couple spirale jusqu'au contact Cote 2019[6]. Pendant les derniers instants, le signal devient assez fort pour être capté sur Terre.

Le 17 août 2017, à 12 h 41 min 04 s en temps universel, les détecteurs LIGO et Virgo enregistrent la fusion de deux étoiles à neutrons : l'événement est baptisé GW170817, GW pour *gravitational wave* suivi de la date. Environ 1,7 seconde plus tard, le satellite Fermi capte, de son côté, un sursaut de rayons gamma abbott2017mm. Le signal gravitationnel place la source à environ 40 mégaparsecs, quelque 130 millions d'années-lumière, dans une zone du ciel de 31 degrés carrés. Moins de 11 heures après la fusion, un télescope de 1 mètre découvre dans la galaxie NGC 4993 une source lumineuse nouvelle, AT 2017gfo ab-

bott2017mm. Cet ordre, entendre avant de voir, justifie le titre de cette section. Une onde gravitationnelle ne donne pas d'image : elle renseigne sur le mouvement des masses qui l'ont émise, un peu comme un son renseigne sur ce qui l'a produit sans le montrer. « Entendre » est une image, puisque ces ondes ne sont pas du son ; mais c'est l'onde qui a dit où chercher, et la lumière qui a montré ce que la fusion avait produit.

La source est d'abord bleue et s'éteint en 48 heures dans l'ultraviolet, puis évolue dans le visible et l'infrarouge pendant une dizaine de jours abbott2017mm. C'est la kilonova attendue : son éclat et son évolution correspondent à ce que prédisent les modèles pour la désintégration d'éléments du processus r tout juste formés Kasen 2017. La matière arrachée aux deux étoiles a été projetée dans l'espace, ses neutrons ont été capturés en masse, les noyaux gonflés se sont désintégrés, et ces désintégrations l'ont fait briller. On a vu, dans la lumière d'une galaxie lointaine, la signature d'éléments lourds en train de se former.

Kasen et ses coauteurs lisent dans cette lumière deux composantes distinctes de matière éjectée : l'une faite surtout d'éléments « légers » du processus r, de nombre de masse inférieur à 140, l'autre d'éléments « lourds », au-delà de 140 Kasen 2017. Même la composante légère est plus lourde que le fer. L'or et le platine, dont les noyaux comptent près de 200 nucléons, relèvent de la famille lourde[7]. Il faut pourtant mesurer ce que dit la kilonova : elle révèle des familles d'éléments, non l'or nommément. Aucune raie ne permet, dans AT 2017gfo, de lire tel ou tel élément.

Le premier élément précis a été lu dans une seconde fusion. En 2023, le télescope spatial James-Webb observe, 29 puis 61 jours après l'explosion, le sursaut gamma GRB 230307A, un sursaut long, d'ordinaire signe d'une étoile massive qui s'effondre, pourtant attribué à la fusion de deux objets compacts. Le spectre montre une raie d'émission à 2,15 microns, que l'équipe d'Andrew Levan interprète comme du tellure, de nombre de masse 130, et une source très rouge, émettant l'essentiel de sa lumière dans l'infrarouge moyen, ce que les auteurs attribuent à la production de lanthanides, la famille de l'europium Levan 2024. Le tellure appartient à la famille légère ; la rougeur des lanthanides signale la lourde.

Reste à passer d'un événement à l'Univers. Une kilonova montre qu'une fusion fabrique des éléments du processus r ; elle ne dit pas, à elle seule, si les fusions en ont fait assez pour les galaxies. Il faut deux nombres : la masse éjectée par fusion, tirée de l'éclat de la kilonova, et le taux de fusions, leur fréquence dans un volume d'Univers, tiré de la détection elle-même. Leur produit, sur la durée de l'histoire cosmique, se compare aux abondances observées[8]. Kasen et ses coauteurs concluent que de telles fusions sont « un mode dominant » de production du processus r dans l'Univers Kasen 2017. L'article écrit « un » mode dominant, non « le » : la formule laisse la place à d'autres sites.

La portée de GW170817 tient à ce qu'il réunit deux témoins indépendants du même événement. L'onde gravitationnelle dit ce qui a fusionné ; la lumière dit ce que la fusion a produit. Avant août 2017, le processus r devait avoir lieu quelque part ; après, l'un des candidats a été pris en train de le faire. La revue de Cowan enregistre le changement : le site des fusions d'étoiles à neutrons « vient d'être identifié », en lien avec GW170817 Cowan 2021.

13.4 Trop tard pour les étoiles les plus anciennes

Le doute ne porte pas sur la capacité des fusions à fabriquer de l'or, mais sur leur calendrier. Une fusion n'a lieu qu'après un délai : il faut d'abord que deux étoiles massives liées vivent, meurent et laissent chacune une étoile à neutrons sans que l'explosion sépare le couple, puis que celui-ci spirale jusqu'au contact. Benoit Côté et ses coauteurs décrivent ces délais par une distribution en t^{-1} : la probabilité qu'une fusion survienne au bout d'un temps t décroît comme l'inverse de ce temps, de sorte que les fusions s'étalent sur toute l'histoire d'une galaxie au lieu de se concentrer au début. Cette distribution est tirée des sursauts gamma courts

observés et des modèles de populations d'étoiles doubles Cote 2019. Deux observations résistent à l'idée que ces fusions suffisent seules.

La première vient des plus vieilles étoiles. Chaque étoile garde dans son atmosphère la composition du gaz dont elle est née : c'est un fossile de la chimie de ce gaz, et l'archéologie galactique consiste à lire ces fossiles Kobayashi 2020, comme on l'a vu au chapitre 12. Les étoiles les plus pauvres en métaux (les astronomes appellent « métaux » tous les éléments plus lourds que l'hélium) sont nées d'un gaz que peu d'étoiles avaient enrichi ; ce sont, en règle générale, des témoins des premières époques[9]. Or elles contiennent déjà des éléments du processus r Kobayashi 2020.

Le raisonnement tient en trois pas. Ces étoiles sont nées tôt. Elles contiennent du processus r. Si la seule source en était un phénomène qui tarde, le gaz des premières époques n'en aurait pas encore reçu. Dans les modèles d'évolution chimique de Chiaki Kobayashi, Amanda Karakas et Maria Lugaro, les fusions peuvent produire ces éléments jusqu'au thorium et à l'uranium, mais leurs délais sont « trop longs pour expliquer les observations à basse métallicité » Kobayashi 2020. La revue de Friedrich-Karl Thielemann et John Cowan, en 2026, range parmi les sources assez rapides pour la jeunesse de la Galaxie les supernovas à effondrement de cœur, les supernovas magnéto-rotationnelles et les collapsars ; il « n'était pas évident », écrivent-ils, que les fusions en fassent partie Thielemann 2026.

La seconde observation vient du disque de la Galaxie, et elle est indépendante de la première. Dans le disque, le rapport entre europium et fer baisse quand la teneur en fer des étoiles dépasse le dixième de celle du Soleil. L'europium sert de traceur : c'est un élément du processus r que l'on sait mesurer dans l'atmosphère des étoiles[10]. Avec les fusions pour seule source et la distribution de délais en t^{-1}, Côté et ses coauteurs ne reproduisent pas cette baisse. Une distribution plus raide, en $t^{-1{,}5}$, qui concentre davantage les fusions au début, y parvient ; mais elle contredit la fréquence des sursauts gamma courts dans les galaxies elliptiques, et rend moins probable qu'on ait vu GW170817 dans une galaxie de ce type. Leur solution : un site supplémentaire, actif tôt et qui s'éteint à mesure que la teneur en métaux monte, et qui aurait pu faire environ 50 % de l'europium des premiers temps, avant l'arrivée des supernovas de type Ia Cote 2019.

Les deux arguments reposent sur des modèles d'évolution chimique, avec leurs hypothèses sur les délais, sur ce que rejette chaque source et sur le mélange du gaz. Ils ne réfutent pas les fusions ; ils disent qu'elles auraient du mal à être seules. Le bilan tient en une phrase, dont l'axe est la différence entre prouver l'existence d'une source et prouver son exclusivité : GW170817 prouve que les fusions d'étoiles à neutrons font de l'or, pas qu'elles le font seules.

13.4.1 Reticulum II, un témoin que les deux camps revendiquent

Reticulum II est une galaxie naine ultra-pâle, très ancienne, formée peu après les premières étoiles. En 2016, Alexander Ji et ses coauteurs y observent neuf étoiles en spectroscopie fine : sept sont fortement enrichies en éléments lourds, selon le motif caractéristique du processus r, avec un enrichissement 100 à 1 000 fois plus fort que dans toute autre galaxie naine de ce type Ji 2016. Dans un système aussi petit, un seul événement suffit à marquer tout le gaz. Les auteurs concluent qu'un événement unique et rare a produit cette matière, avec un rendement et une fréquence incompatibles avec les supernovas ordinaires, mais compatibles avec une fusion d'étoiles à neutrons Ji 2016.

Le même objet est invoqué par l'autre camp. Pour Daniel Siegel et ses coauteurs, les étoiles de Reticulum II et l'évolution de l'europium galactique s'accordent mieux avec des supernovas rares agissant à basse métallicité qu'avec des fusions Siegel 2019. Reticulum II établit qu'un événement rare et prolifique a eu lieu tôt. Il

ne dit pas lequel : le motif chimique observé est celui du processus r en général, et il ne porte pas la signature d'un site particulier.

13.5 Les candidats rapides

L'idée du premier candidat rapide vient de la kilonova elle-même. L'analyse de GW170817 attribue l'essentiel de la matière lourde aux vents d'un disque de matière en rotation, dit disque d'accrétion, formé autour du trou noir né de la fusion. Or un disque semblable doit se former dans un collapsar, l'effondrement d'une étoile massive en rotation rapide qui déclenche une supernova. Les simulations de Siegel, Jennifer Barnes et Brian Metzger, en 2019, montrent que ces disques produisent assez d'éléments r. Les collapsars sont plus rares que les fusions, mais chacun éjecte davantage de matière ; les auteurs calculent qu'ils pourraient fournir « plus de 80 % » du processus r de l'Univers Siegel 2019. Et une étoile massive meurt vite : le calendrier est réglé d'avance.

L'observation n'a pas suivi. Shreya Anand et ses coauteurs ont suivi en lumière visible et en proche infrarouge 25 supernovas de type Ic-BL, la classe qu'on associe aux collapsars. Les modèles sans processus r ajustent mieux leurs courbes de lumière, et l'échantillon ne montre pas d'indice clair d'enrichissement Anand 2024. Les auteurs ne concluent pas à l'absence : de petites quantités échapperaient à leurs mesures, et ils demandent davantage d'infrarouge et de spectroscopie tardive pour trancher Anand 2024. Selon Thielemann et Cowan, le rendement des collapsars dépend de façon sensible de la richesse en neutrons de leur disque, qui reste mal connue Thielemann 2026. Les 80 % sont donc un résultat de simulation, que vingt-cinq supernovas n'ont pas confirmé.

Le second candidat rapide est la supernova magnéto-rotationnelle : l'explosion d'une étoile massive dont le cœur tourne vite et porte un champ magnétique intense, ce qui change la manière dont la matière est éjectée[11]. Kobayashi et ses coautrices reproduisent l'évolution de l'europium dans la Galaxie si environ 3 % des hypernovas de 25 à 50 masses solaires sont de ce type et produisent des éléments du processus r Kobayashi 2020. Le choix répond exactement à l'objection du calendrier : des étoiles aussi massives enrichissent le gaz presque aussitôt que la galaxie commence à former des étoiles, et il suffit qu'une petite fraction d'entre elles fasse du processus r pour que les premières générations en contiennent.

La proposition a son prix. La fraction de 3 % et la gamme de masses sont des réglages qui permettent au modèle de reproduire l'europium observé, non des propriétés mesurées des hypernovas, et aucune supernova magnéto-rotationnelle n'a été prise en train de fabriquer de l'or. La revue de 2026 est plus réservée encore : ces supernovas ne seraient le site que d'un processus r « faible », qui n'atteint pas les éléments les plus lourds Thielemann 2026. Le désaccord oppose des simulations différentes ; aucune observation ne le tranche aujourd'hui.

13.6 Un sursaut relu vingt ans après

Parmi les étoiles à neutrons, certaines portent un champ magnétique extrême : ce sont les magnétars. De temps à autre, un magnétar libère brusquement une partie de son énergie en un sursaut de rayons gamma, les photons les plus énergétiques ; les plus violents sont dits sursauts géants[12]. Le magnétar SGR 1806-20 en a connu un en décembre 2004 Patel 2025.

L'enregistrement contenait une composante restée inexpliquée. Après le pic initial, une émission de rayons gamma durs, dont les photons portent des énergies de l'ordre du MeV (le million d'électronvolts), monte pendant une dizaine de minutes jusqu'à un maximum, puis décroît au cours des heures suivantes. En 2025,

Anirudh Patel et ses coauteurs relisent ces données : la courbe de lumière, l'énergie totale reçue et le spectre de cette émission correspondent à la désintégration d'environ 10^{-6} masse solaire d'éléments du processus r fraîchement formés, et le titre de leur article parle de « preuve directe » Patel 2025. Un millionième de masse solaire, c'est de l'ordre d'un tiers de la masse de la Terre[13]. Le mécanisme proposé : le sursaut chauffe par une onde de choc de la matière de la croûte de l'étoile à neutrons et l'éjecte à grande vitesse Patel 2025. Une croûte d'étoile à neutrons est un réservoir de neutrons ; l'arracher, c'est remplir la première condition du cahier des charges.

La forme du signal est l'argument. Une explosion émet sa propre lumière tout de suite ; une émission qui monte pendant dix minutes après le pic, puis s'éteint en quelques heures, suit une autre horloge, celle de la radioactivité. Le raisonnement est le même que pour la kilonova de 2017, à une différence près : en 2017, on a vu la matière chauffée briller en lumière visible et infrarouge ; en 2004, on aurait capté les rayons gamma émis par les désintégrations elles-mêmes[14].

Les auteurs en tirent une estimation pour la Galaxie : les sursauts géants de magnétars contribueraient « au moins à 1–10 % » des abondances galactiques du processus r Patel 2025. La fourchette couvre un facteur dix[15].

L'intérêt du résultat tient au calendrier plus qu'à la quantité. Les magnétars sont des objets jeunes Patel 2025 : nés de la mort d'une étoile massive, ils agissent peu après la formation des étoiles. Les auteurs soulignent les conséquences pour l'évolution chimique, « en particulier aux toutes premières époques sondées par les étoiles pauvres en métaux » Patel 2025. Les magnétars offrent ce qui manque aux fusions, une source prompte, et ce qui manque aux supernovas magnéto-rotationnelles et aux collapsars, un événement observé. Mais 1 à 10 %, c'est une contribution, non l'essentiel de l'or de la Galaxie.

Le résultat a une base étroite : un seul événement, analysé par une seule équipe, à partir de données recueillies vingt ans plus tôt pour d'autres fins. L'expression « sites confirmés » employée par les auteurs Patel 2025 va au-delà de ce qu'un cas unique peut établir. Le résultat ajoute un site d'appoint ; il ne remplace ni les fusions ni le besoin d'un site rapide majeur.

13.7 Ce qui départagerait les candidats

Certaines mesures pèsent déjà sur le choix entre ces sites. Anton Wallner et ses coauteurs ont cherché, dans une croûte rocheuse du fond du Pacifique, deux isotopes radioactifs tombés de l'espace : le fer 60 (demi-vie 2,6 millions d'années), produit surtout par les étoiles massives et leurs supernovas, et le plutonium 244 (demi-vie 80,6 millions d'années), produit uniquement par le processus r. Ils détectent deux arrivées de fer 60 au cours des 10 derniers millions d'années, accompagnées de plutonium en moindre quantité. Le flux de plutonium est plus faible qu'attendu si les supernovas dominaient la production du processus r, ce qui implique une contribution d'autres sources Wallner 2021. L'argument pèse contre les supernovas courantes, celles qui ont livré le fer 60 ; il ne dit rien des supernovas rares, collapsars ou magnéto-rotationnelles.

La chimie des étoiles anciennes en dira davantage, à condition de lire les bons éléments. Les galaxies naines ultra-pâles, chimiquement simples, enregistrent des événements isolés, comme Reticulum II Ji 2016. Les éléments les plus lourds, thorium et uranium, sont un test plus fin : selon Thielemann et Cowan, seule une matière très riche en neutrons, où l'on ne compte qu'environ 5 à 15 protons pour 100 nucléons, produit le troisième pic d'abondance (celui de l'or et du platine) et ces actinides, ce qui peut distinguer les sites Thie-

lemann 2026[16]. Un site qui ne fait qu'un processus r « faible » ne saurait expliquer une vieille étoile riche en uranium.

Les observations attendues se répartissent par candidat. Pour les fusions, chaque nouvelle kilonova associée à des ondes gravitationnelles affine la masse et la composition des éjecta, événement par événement, comme l'ont montré GW170817 et GRB 230307A Kasen 2017Levan 2024 ; le rendement moyen par fusion et le taux de fusions restent la clé du bilan. Pour les collapsars, Anand et ses coauteurs demandent un suivi infrarouge plus profond et une spectroscopie tardive des supernovas Ic-BL, qui détecteraient de petites quantités d'éléments r ou en confirmeraient l'absence Anand 2024. Pour les magnétars, chaque noyau radioactif émet en se désintégrant des photons gamma à des énergies qui lui sont propres, des raies, et Patel et ses coauteurs voient dans la mesure de ces raies un argument fort pour le futur spectromètre COSI de la NASA, qui devrait pouvoir les résoudre lors d'un prochain sursaut géant Patel 2025. Pour l'évolution chimique enfin, Côté et ses coauteurs attendent des simulations hydrodynamiques qui assurent qu'une classe rare de supernovas produit bien un motif r robuste Cote 2019.

13.8 Un or sans origine unique

Rassemblés, les résultats de ce chapitre dessinent un paysage plutôt qu'une réponse.

Site	Statut	Contribution avancée	Délai
Fusions de deux étoiles à neutrons	observé (GW170817, 2017 ; GRB 230307A, 2023)	« un mode dominant » Kasen 2017	long, « trop long » pour les étoiles les plus anciennes Kobayashi 2020
Collapsars	simulation Siegel 2019, non détecté sur 25 supernovas Anand 2024	« plus de 80 % » (modèle)	court
Supernovas magnéto-rotationnelles (≈ 3 % des hypernovas de 25–50 $M_\odot$)	solution de modèle Kobayashi 2020, processus r « faible » selon Thielemann 2026	réglage nécessaire pour reproduire l'europium	court
Sursauts géants de magnétars	un événement relu (2004, publié en 2025)	« au moins 1–10 % » Patel 2025	court (objets jeunes)

Les fusions d'étoiles à neutrons sont le seul site dont on a vu fonctionner le procédé, deux fois, et estimé le bilan. Elles sont probablement une source majeure de l'or de l'Univers. Les autres sont des candidats ou des contributions partielles, qui répondent surtout au problème du calendrier.

Les chiffres de ce tableau ne s'additionnent pas. « Un mode dominant » sort d'une masse éjectée et d'un taux de fusions ; « plus de 80 % » d'une simulation de disques ; « au moins 1–10 % » de l'extrapolation d'un événement unique ; les « 3 % des hypernovas » du réglage d'un modèle d'évolution chimique. Mis bout à bout, les deux premiers, si « dominant » veut dire plus de la moitié, dépassent déjà 100 %. On ne peut pas en tirer un partage de l'or galactique entre les sites, et ce partage n'est pas connu.

Ce qui est établi se dit ainsi : l'or ne vient pas de la vie ordinaire des étoiles, mais de catastrophes rares, au pluriel. La forge s'arrête au fer ; le processus s des étoiles AGB monte jusqu'au plomb Kobayashi 2020 ; l'autre moitié des éléments lourds, dont l'or et le platine, demande une densité de neutrons que seuls fournissent des événements violents Cowan 2021 : des étoiles à neutrons qui se heurtent, et peut-être des étoiles massives qui s'effondrent en tournant vite, ou des magnétars qui arrachent leur propre croûte.

Pour nous, humains faits de la matière de la Terre,, la conséquence se dit au conditionnel, puisque les chapitres suivants auront à établir que la matière de la Terre est bien celle du nuage dont est né le Soleil. Si c'est le cas, l'or de la Terre a été fabriqué, avant la naissance du Soleil, par un ou plusieurs de ces événements, puis dispersé et mêlé au gaz de la Galaxie jusqu'à entrer dans ce nuage. On ne peut pas dire lequel : le gaz d'une galaxie mêle les rejets de toutes les époques, et l'on ne peut même pas compter les générations d'étoiles qui ont précédé le Soleil (→ chap. 12). L'or d'une alliance ne remonte pas à une catastrophe identifiable, mais à un mélange de catastrophes.

Reste l'ironie de l'argument. Les étoiles pauvres en métaux ont servi de pièce à charge contre les fusions seules, et elles ne témoignent que parce que chaque étoile est un fossile chimique du gaz dont elle est née Kobayashi 2020. Le même principe permet de lire bien plus que l'origine de l'or : avec la composition des étoiles anciennes, leur âge et leur mouvement, les astronomes reconstituent l'ordre dans lequel s'est assemblée la Voie lactée, qu'on suivra au chapitre 14.

13.9 Ce qu'on ne sait pas

On ne connaît pas le partage de l'or entre les sites. Les fusions d'étoiles à neutrons sont un site prouvé et, selon Kasen et ses coauteurs, « un mode dominant » Kasen 2017 ; pour Côté et ses coauteurs, elles ne sont probablement pas la seule source Cote 2019. Ce qui départagerait : un échantillon de fusions détectées en ondes gravitationnelles, dont les kilonovas préciseraient la masse éjectée moyenne et le taux ; et des mesures du processus r dans beaucoup d'étoiles très pauvres en métaux, dont la présence, l'abondance et la dispersion d'une étoile à l'autre disent si la source est fréquente ou rare, prompte ou tardive[17]. La confiance est élevée sur le fait que les fusions contribuent beaucoup, faible sur les proportions.

On ne sait pas quelle source a enrichi en processus r les premières générations d'étoiles. C'est la question la plus débattue du chapitre, et les hypothèses s'opposent sur un point précis : la rareté. Les collapsars et les supernovas magnéto-rotationnelles sont rares et prolifiques, les sursauts de magnétars fréquents et modestes, les fusions rares et tardives. Les collapsars ont pour eux une simulation Siegel 2019 et contre eux vingt-cinq supernovas muettes Anand 2024 ; les supernovas magnéto-rotationnelles un modèle Kobayashi 2020 et une revue qui les juge trop faibles Thielemann 2026 ; les magnétars un événement Patel 2025. Les fusions ne sont pas exclues : la conclusion « trop tard » dépend de la distribution des délais supposée, et une distribution plus raide les ramènerait plus tôt, au prix d'un désaccord avec les sursauts gamma courts Cote 2019. Une détection d'éléments r dans une supernova Ic-BL, ou leur absence répétée sur un échantillon plus profond, ferait bouger la balance la première.

On ne sait pas si les magnétars font régulièrement de l'or. Tant qu'un second sursaut géant n'aura pas été observé avec un instrument capable d'en résoudre les raies, comme COSI devrait l'être, leur contribution reste une estimation fondée sur un cas Patel 2025. Confiance faible à modérée.

On connaît mal les noyaux par lesquels passe le processus r. La revue de Cowan place cette incertitude au même rang que celle sur les sites Cowan 2021, et les deux se tiennent : les noyaux gonflés de neutrons, près de la limite de stabilité, décident de ce qu'un site fabrique, combien de chaque élément et dans quelles proportions. Comparer ce qu'un site devrait produire à ce qu'on observe suppose de les connaître ; une incertitude de physique nucléaire devient ainsi une incertitude sur les sites[18].

13.10 Ce que ce chapitre démontre

La forge stellaire s'arrête au nickel 56, qui donne le fer wiki-sib. Au-delà d'une masse d'environ 64, les éléments sont fabriqués surtout par captures de neutrons : processus s vers 10^7 neutrons par centimètre cube, du strontium au plomb, dans les étoiles AGB de faible masse ; processus r au-delà de 10^{20}, où les captures s'empilent plus vite que les désintégrations et font passer la matière par des noyaux très riches en neutrons Kobayashi 2020Cowan 2021. Le processus r produit environ la moitié des éléments lourds de la nature, dont l'or et le platine Cowan 2021Kasen 2017.

Son origine est restée longtemps incertaine Kasen 2017. Le 17 août 2017, la fusion de deux étoiles à neutrons, GW170817, est détectée en ondes gravitationnelles, puis, dans la galaxie NGC 4993 à environ 40 mégaparsecs, en lumière abbott2017mm. Sa kilonova correspond aux modèles de désintégration d'éléments du processus r tout juste formés, avec une composante légère ($A < 140$) et une composante lourde ($A > 140$) ; la masse éjectée et le taux de fusions font de ces fusions « un mode dominant » de production du processus r Kasen 2017. En 2023, le tellure est lu dans une seconde fusion Levan 2024.

Cette preuve ne dit pas que les fusions sont seules. Leurs délais sont trop longs, dans les modèles, pour les étoiles les plus pauvres en métaux Kobayashi 2020, et ne reproduisent pas la baisse de l'europium dans le disque Cote 2019. Les candidats rapides, collapsars Siegel 2019 et supernovas magnéto-rotationnelles Kobayashi 2020, restent sans preuve directe. Le site du processus r et la physique des noyaux très riches en neutrons sont les deux grandes incertitudes du domaine Cowan 2021.

En 2025, Patel et ses coauteurs relisent le sursaut géant du magnétar SGR 1806-20, de décembre 2004 : une émission gamma qui culmine une dizaine de minutes après le pic et décroît en quelques heures correspondrait à environ 10^{-6} masse solaire d'éléments du processus r. Ces sursauts contribueraient au moins à 1–10 % des abondances galactiques et, les magnétars étant jeunes, pourraient avoir enrichi les premières générations d'étoiles. Le résultat repose sur un seul événement ; COSI devrait en résoudre les raies Patel 2025.

L'or vient donc de catastrophes rares, au pluriel, dont une seule sorte a été prise sur le fait. Les étoiles pauvres en métaux qui ont révélé les limites de cette preuve sont des fossiles de la chimie du gaz dont elles sont nées Kobayashi 2020 ; c'est avec elles que se lit l'histoire de la Voie lactée.

Notes

1. Présentation classique de la différence entre processus s et r par la compétition entre capture de neutrons et désintégration bêta. Kobayashi et al. (2020) donnent les densités ; Cowan et al. (2021) situent le chemin de synthèse près de la *neutron drip line*. La description de la course elle-même n'est pas vérifiée sur ces articles. ↩

2. Définition usuelle, non vérifiée sur les sources citées dans ce chapitre. ↩

3. Définition usuelle, non vérifiée sur les sources citées dans ce chapitre. ↩

4. Raisonnement de ce chapitre. Que la matière éjectée lors d'une fusion de deux étoiles à neutrons soit assez riche en neutrons pour le processus r est ce que GW170817 a confirmé (Kasen et al. 2017) ; pour les fusions étoile à neutrons–trou noir, aucune observation n'est citée ici. ↩

5. Kasen et al. (2017) définissent la kilonova comme une lueur thermique alimentée par la désintégration radioactive des noyaux tout juste formés. L'origine du préfixe « kilo » (un éclat de l'ordre de mille fois celui d'une nova) est l'explication usuelle, non vérifiée. ↩

6. Côté et al. (2019) décrivent le délai de coalescence : le couple doit exister, puis spiraler jusqu'au contact. Le rôle des ondes gravitationnelles dans ce rapprochement est la présentation classique, non vérifiée sur cet article. Les ondes gravitationnelles

sont définies au chapitre sur l'inflation (Baumann 2009). ↩

7. Nombres de masse classiques (or : 197 ; platine : vers 194–196), non vérifiés sur les sources citées. Kasen et al. (2017) ne nomment pas l'or à propos des deux composantes ; ils le citent, avec le platine, parmi les éléments lourds dont l'origine était incertaine. ↩

8. Kasen et al. (2017) : « Inferring the ejected mass and a merger rate from GW170817 implies that such mergers are a dominant mode of r-process production in the Universe. » La description du calcul (masse par événement × fréquence × durée, comparée aux abondances) est la logique générale de ce type d'estimation ; les valeurs retenues par les auteurs ne sont pas reprises ici. ↩

9. Le lien entre faible métallicité et naissance précoce est l'hypothèse de travail de l'archéologie galactique (Kobayashi et al. 2020). Il n'est pas strict : une étoile peut être pauvre en métaux parce qu'elle est née dans une petite galaxie peu enrichie, même tardivement. ↩

10. Ji et al. (2016) citent l'europium comme exemple d'élément du processus r ; Kobayashi et al. (2020) et Côté et al. (2019) suivent son évolution. Qu'il vienne presque entièrement du processus r et se mesure bien dans les spectres stellaires est l'explication usuelle de son rôle de traceur, non vérifiée sur ces articles. Le seuil « un dixième du fer solaire » correspond à la notation $[\mathrm{Fe/H}] > -1$ de Côté et al. ↩

11. Définition usuelle, non vérifiée. Kobayashi et al. (2020) et Thielemann et Cowan (2026) nomment ces supernovas sans que le mécanisme soit repris ici. ↩

12. Définition usuelle ; l'origine des sursauts et l'intensité des champs magnétiques des magnétars ne sont pas vérifiées sur les sources citées. Le préfixe SGR désigne, selon l'usage, une source répétitive de rayons gamma mous (*soft gamma repeater*). ↩

13. Calcul fait pour ce chapitre, avec des valeurs classiques : une masse solaire vaut environ 2×10^{30} kg, donc 10^{-6} masse solaire environ 2×10^{24} kg ; la masse de la Terre est d'environ 6×10^{24} kg. ↩

14. Patel et al. (2025) : « This MeV emission component, rising to peak around 10 minutes after the initial spike before decaying away over the next few hours, is direct observational evidence for the synthesis of ~10^{-6} $M_\odot$ of r-process elements. » Le parallèle avec la kilonova est de ce chapitre ; le détail du modèle de transfert des photons gamma n'est pas repris. ↩

15. Patel et al. (2025) : « contributing at least ~1–10% of the total Galactic abundances ». L'origine de la fourchette et le sens précis du « au moins » ne sont pas détaillés dans le résumé de l'article. ↩

16. Thielemann et Cowan (2026) expriment cette condition par la fraction d'électrons Ye, égale au nombre de protons rapporté au nombre de nucléons : « Low Ye-values in the range 0.05 to 0.15 can produce the third peak and the actinides ». Que le troisième pic soit celui de l'or et du platine est la présentation usuelle, non vérifiée sur l'article. ↩

17. Logique usuelle de l'argument : une source rare et abondante par événement produit de grands écarts d'une étoile ancienne à l'autre, une source fréquente les lisse. Ji et al. (2016) en donnent un cas extrême avec Reticulum II. ↩

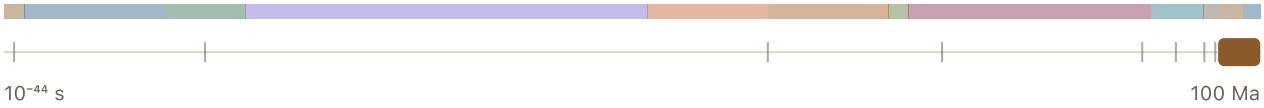
18. Cowan et al. (2021) évoquent les incertitudes sur le chemin de synthèse près de la *neutron drip line*. Que ces noyaux soient pour la plupart hors de portée des mesures de laboratoire est l'explication usuelle, non vérifiée sur l'article. ↩

CHAPITRE 14

Une Galaxie agitée

dès ~0,8 Ga ; fusion il y a 10 à 11 Ga

brouillon · 6966 mots



14.1 Des fossiles qui brillent

Le télescope Webb voit des galaxies jeunes parce que leur lumière a voyagé presque toute l'histoire du cosmos avant de nous atteindre. MoM-z14 nous apparaît telle qu'elle était 280 millions d'années après le Big Bang Naidu 2025 (→ chap. 10). Ce recul dans le temps a une contrepartie. On ne voit jamais une même galaxie à deux âges : chacune est vue à un seul moment de sa vie, celui où sa lumière est partie. La nôtre pose un problème de plus. Nous sommes dedans, et la lumière de ses étoiles nous parvient telle qu'elles sont aujourd'hui, à l'échelle de l'histoire cosmique[1]. Personne n'a vu la Voie lactée jeune, et personne ne la verra. Son passé doit donc se lire dans son présent.

La méthode tient à une propriété des étoiles, établie au chapitre sur la forge (→ chap. 12). Les éléments plus lourds que l'hélium sont fabriqués dans les étoiles, puis rejetés quand elles meurent. La génération suivante naît de nuages de gaz qui les contiennent Kobayashi 2020. Une étoile garde dans son atmosphère la composition du gaz dont elle est née, pendant toute sa vie ou presque[2]. Chaque étoile d'aujourd'hui est donc un fossile de la chimie de son gaz natal, et l'étude qui se sert de ces fossiles porte un nom : l'« archéologie galactique » Kobayashi 2020. Le mot convient. Comme l'archéologue, l'astronome ne remonte pas le temps. Il fouille des objets présents qui ont gardé la marque du moment où ils ont été faits.

Un fossile ordinaire est rare et fragile. Les fossiles stellaires, eux, brillent, et ils se comptent par centaines de milliers dans les relevés dont parle ce chapitre. L'une des études qu'on va suivre en date 250 000 à elle seule Xiang 2022. Les plus anciens ont l'âge de la Galaxie. Une étoile de faible masse vit plus longtemps que l'Univers n'a d'années : celles qui sont nées dans les premiers temps de la Voie lactée brillent encore[3].

La première chose qu'on lit dans un fossile stellaire est sa teneur en métaux. Les astronomes appellent « métaux » tous les éléments plus lourds que l'hélium, et mesurent leur abondance par une notation, [Fe/H]. C'est le logarithme de la teneur en fer d'une étoile, rapportée à celle du Soleil : [Fe/H] = 0 désigne une étoile aussi riche en fer que le Soleil, [Fe/H] = −2 une étoile cent fois plus pauvre (→ chap. 5). Comme chaque génération d'étoiles ajoute des métaux au gaz, la métallicité tend à monter avec le temps. Une étoile pauvre en métaux est en général née tôt, d'un gaz que peu d'étoiles avaient enrichi. C'est une tendance, pas une loi : une étoile peut aussi être pauvre parce qu'elle est née dans une petite galaxie, peu active, même tardivement (→ chap. 13). Ce détail compte dans ce chapitre, où il sera justement question d'une petite galaxie absorbée par la nôtre.

La seconde lecture chimique est plus fine. Le chapitre sur la forge a montré que les éléments ne sont pas tous rendus au gaz au même rythme. Les éléments dits alpha, comme l'oxygène, le magnésium, le silicium, le soufre et le calcium, viennent surtout des étoiles massives, qui meurent en supernovas au bout de quelques millions d'années. Environ la moitié du fer vient des supernovas de type Ia, l'explosion de naines blanches dans des systèmes doubles, qui ne peuvent se produire qu'après la longue vie d'une étoile

moyenne Kobayashi 2020 (→ chap. 12). Le gaz d'une galaxie jeune reçoit donc d'abord des éléments alpha, avec peu de fer ; le fer des Ia arrive ensuite. Le rapport entre éléments alpha et fer baisse ainsi avec le temps, et cette baisse s'explique par « l'enrichissement retardé en fer par les supernovas Ia » Kobayashi 2020. Une étoile riche en éléments alpha par rapport à son fer est née avant que les Ia aient beaucoup contribué ; une étoile au rapport plus bas est née après.

Cette horloge est relative. Elle range les populations d'étoiles dans l'ordre, elle ne donne pas de dates en années (→ chap. 12). Pour obtenir une date, il faut mesurer l'âge des étoiles elles-mêmes, ce qui ne se fait bien que pour certaines d'entre elles. C'est le cas des sous-géantes, des étoiles qui viennent d'épuiser l'hydrogène de leur cœur. Xiang et Rix s'en servent pour dater le début du disque ancien de la Voie lactée Xiang 2022[4].

Il manque encore une dimension, qui n'est pas chimique : le mouvement. Une étoile née dans un disque de gaz qui tourne hérite de la rotation de ce disque. Elle décrit une orbite presque circulaire, dans le plan, avec ses voisines. Une étoile née dans un gaz agité, ou arrachée à une autre galaxie, suit une orbite désordonnée, inclinée, allongée. Dans une galaxie, les étoiles ne se heurtent presque jamais, et leurs orbites ne changent que lentement. Le mouvement d'une étoile garde donc, lui aussi, une trace de ses origines, même après des milliards d'années[5]. Ce mouvement, c'est le satellite Gaia qui le mesure, avec la position des étoiles et leur déplacement sur le ciel. Des relevés spectroscopiques, comme APOGEE, en décomposent la lumière pour mesurer leur composition chimique Belokurov 2022[6].

Chimie, âge, mouvement : avec ces trois coordonnées, on range les étoiles par familles et les familles dans le temps. Une population pauvre en métaux, riche en éléments alpha, âgée et animée de mouvements désordonnés a toutes les chances d'être plus ancienne qu'une population riche en métaux, pauvre en éléments alpha, jeune et qui tourne en bon ordre. On reconstitue ainsi un ordre de formation sans avoir observé le passé de la Galaxie. Trois résultats, publiés en 2018 et en 2022 à partir des données de Gaia et de relevés spectroscopiques, ont donné cet ordre pour les premiers milliards d'années de la Voie lactée Belokurov 2022 Xiang 2022 Helmi 2018.

14.2 Avant le disque : Aurora

Aujourd'hui, la Voie lactée est pour l'essentiel un disque d'étoiles qui tourne, entouré d'un halo, un vaste nuage d'étoiles anciennes aux orbites désordonnées (→ chap. 5). La question de départ est simple à poser : la Galaxie a-t-elle toujours été un disque ?

En 2022, Vasily Belokurov et Andrey Kravtsov cherchent la réponse dans les étoiles les plus pauvres en métaux, en croisant les compositions chimiques d'APOGEE et les mouvements mesurés par Gaia. Ils y isolent une population ancienne et pauvre en métaux, qu'ils nomment « Aurora », l'aurore en latin. Leur article s'intitule d'ailleurs « De l'aube au disque » Belokurov 2022.

Cette population est « cinématiquement chaude ». L'expression vient d'une analogie avec les gaz. Dans un gaz chaud, les molécules s'agitent dans toutes les directions à la fois ; dans un gaz froid, elles bougent peu les unes par rapport aux autres. Une population d'étoiles est dite « chaude » quand les vitesses de ses membres sont dispersées au hasard, dans toutes les directions, et « froide » quand ses étoiles se déplacent ensemble, sur des orbites semblables, comme celles d'un disque qui tourne[7]. Aurora a aussi une « rotation d'ensemble modeste » Belokurov 2022. Ses étoiles tournent un peu autour du centre de la Galaxie, en moyenne, mais cette rotation compte peu à côté de leur agitation. Elles ne forment pas de disque.

Le résultat qui fait l'intérêt de l'étude vient ensuite. Si l'on range les étoiles par métallicité croissante, leur vitesse de rotation reste faible tant que la métallicité reste basse. Puis, au-delà d'un seuil de métallicité, cette vitesse augmente brusquement Belokurov 2022. Les auteurs nomment ce saut le « spin-up », la mise en rotation. En dessous du seuil, les étoiles sont nées dans une structure agitée ; au-dessus, elles naissent dans une structure qui tourne. La valeur de ce seuil n'est pas dans l'extrait de l'article dont dispose ce livre[8].

La métallicité sert ici d'horloge approximative, selon le principe posé plus haut : le gaz s'enrichit avec le temps, et une étoile plus riche est, en général, née plus tard. Le saut de rotation observé en fonction de la métallicité se lit alors comme un saut dans le temps. Belokurov et Kravtsov en tirent un récit en deux temps. D'abord une période d'évolution chaotique, avant tout disque, pendant laquelle la proto-Galaxie forme des étoiles dans un gaz désordonné. Puis une formation rapide du disque, en un à deux milliards d'années Belokurov 2022. La Galaxie n'a donc pas toujours été un disque. Elle l'est devenue, et assez vite.

Le mécanisme de la mise en rotation n'est pas décrit dans les sources de ce livre. On peut en dire le principe général : un gaz qui tombe dans le puits de matière noire d'une galaxie en formation apporte avec lui un peu de rotation, et un gaz qui se refroidit en tournant tend à s'aplatir en disque[9]. Pourquoi ce passage a eu lieu à ce moment-là, et à cette métallicité-là, reste hors de la base.

Trois réserves encadrent ce résultat. La première tient à sa nouveauté : l'étude date de 2022, et la fiche qui sert de base à ce chapitre la range parmi les résultats récents[10]. La deuxième tient à la manière dont on la connaît. Ce livre s'appuie sur le résumé de l'article, paraphrasé, et non sur l'article lui-même ; la source est marquée « à vérifier » dans la base[11]. La troisième tient à l'horloge employée. La métallicité ne date pas une étoile en années. Pour placer le spin-up sur la frise, il faut savoir quel âge correspond au seuil de métallicité, et cette correspondance n'est pas dans l'extrait lu. Les « un à deux milliards d'années » décrivent la durée de la formation du disque, pas sa date.

Une autre étude, publiée la même année et par une autre méthode, donne cette date.

14.3 Un disque dès 13 milliards d'années

Maosheng Xiang et Hans-Walter Rix partent d'un échantillon de 250 000 étoiles sous-géantes dont ils mesurent l'âge et la métallicité Xiang 2022. Les sous-géantes ont une propriété qui en fait de bonnes horloges. Elles traversent une phase brève de leur évolution, pendant laquelle leur luminosité et leur température dépendent fortement de leur âge. Connaître leur position dans cette phase permet d'en tirer un âge en années, avec une précision que les autres étoiles n'offrent pas[4]. Deux cent cinquante mille âges, c'est assez pour tracer, pour la Galaxie entière, la métallicité en fonction du temps.

Le premier résultat est une date. La formation du disque ancien, dit aussi disque « épais », a commencé il y a 13 milliards d'années, soit 0,8 milliard d'années après le Big Bang Xiang 2022. Le disque épais est la composante la plus ancienne du disque de la Voie lactée : ses étoiles s'écartent davantage du plan que celles du disque mince, plus jeune, où se trouve aujourd'hui le Soleil[12]. L'âge de l'Univers est estimé à environ 13,8 milliards d'années wiki-age. Le début du disque tombe donc dans les six premiers pour cent de l'histoire cosmique. Sur l'année cosmique, où cette histoire est ramenée à douze mois, il tombe vers le 22 janvier[13].

Cette date place le début de notre Galaxie dans un autre chapitre de l'histoire cosmique : celui de la réionisation, quand la lumière des premières étoiles et des premières galaxies rend au gaz intergalactique sa charge électrique et le rend transparent aux ultraviolets. La frise de ce livre étend ce processus d'environ 0,3 à environ 1,1 milliard d'années après le Big Bang esa2015reion Bosman 2022 (→ chap. 11). À 0,8 milliard

d'années, la réionisation n'est pas achevée. Des fluctuations qui lui sont liées persistent dans le gaz intergalactique jusque vers 1,1 milliard d'années Bosman 2022. Le disque de la Voie lactée commence donc à se former dans un Univers qui n'a pas fini de se rallumer. Les sources de ce livre ne disent pas si la région où naissait notre Galaxie était, à ce moment, déjà ionisée[14].

La date a une autre conséquence. Les galaxies que Webb observe aux plus grandes distances, comme MoM-z14 à 280 millions d'années ou JADES-GS-z14-0 vers 300 millions d'années, sont les objets les plus anciens qu'on ait vus Naidu 2025 (→ chap. 10). Moins de six cents millions d'années séparent MoM-z14 du début de notre disque. Et ce début n'est pas celui de la Voie lactée tout entière : avant le disque, il y avait la proto-Galaxie chaotique d'Aurora, dont les étoiles sont par définition plus anciennes encore Belokurov 2022. Notre Galaxie est donc presque aussi vieille que l'Univers visible par Webb Xiang 2022[15]. Les galaxies précoces que Webb découvre, et qui surprennent par leur nombre et leur éclat Naidu 2025, appartiennent à la même génération que la nôtre. Webb les voit telles qu'elles étaient ; nous voyons la nôtre telle qu'elle est devenue.

Le deuxième résultat de Xiang et Rix porte sur la forme de la distribution. Si l'on place chaque étoile sur un graphique, l'âge en abscisse et la métallicité en ordonnée, les points ne forment pas un nuage continu. Ils se séparent en deux parties presque disjointes, et la frontière passe à 8 milliards d'années Xiang 2022. D'un côté, les étoiles plus vieilles que 8 milliards d'années ; de l'autre, les plus jeunes, qui ne prolongent pas simplement les premières. Il y a une rupture dans l'histoire de la Galaxie, et on la lit dans la chimie de ses étoiles. L'extrait lu ne dit pas ce qui distingue chimiquement les deux parties, ni quelle cause les auteurs donnent à la coupure[16].

Le troisième résultat porte sur le rythme de l'enrichissement dans la partie ancienne. Pendant les 5 à 6 milliards d'années qui suivent le début du disque, l'enrichissement chimique a été multiplié par dix Xiang 2022. Une précision accompagne ce chiffre : cet enrichissement s'est fait dans un gaz resté bien mélangé Xiang 2022. La précision a un sens concret. Si le gaz du disque ancien avait été fait de poches séparées, certaines enrichies par une supernova voisine, d'autres épargnées, des étoiles nées au même moment auraient eu des métallicités très différentes. Qu'il soit resté bien mélangé veut dire que les étoiles d'un même âge ont à peu près la même métallicité : la relation entre âge et métallicité est une ligne étroite plutôt qu'un nuage épais[17]. Chaque génération d'étoiles rejetait ses produits dans un réservoir commun, qui s'enrichissait d'un bloc.

Les chiffres se tiennent entre eux. Treize milliards d'années moins cinq à six milliards d'années d'enrichissement donnent sept à huit milliards d'années : la phase d'enrichissement du disque ancien se termine à peu près là où passe la coupure de la distribution. Ce rapprochement est fait par ce chapitre, pas par l'extrait de l'article[18]. Il suggère que la partie ancienne de la distribution correspond à l'histoire du disque ancien, et que la partie récente commence après.

Les deux études de 2022 ne se contredisent pas. Belokurov et Kravtsov décrivent un avant-disque chaotique puis un disque formé en un à deux milliards d'années Belokurov 2022. Xiang et Rix datent le début du disque ancien à 13 milliards d'années Xiang 2022. L'une donne l'ordre et la durée, l'autre la date. Les sources de ce livre ne disent pas si les deux équipes ont confronté leurs résultats, ni si le spin-up d'Aurora coïncide avec les 13 milliards d'années de Xiang et Rix. Si c'est le cas, la proto-Galaxie chaotique occuperait les tout premiers temps, avant 0,8 milliard d'années, et le disque se serait mis en place entre 0,8 et environ 2 à 3 milliards d'années après le Big Bang.

C'est dans cet intervalle que survient la collision.

14.4 Gaia-Enceladus

En 2018, Amina Helmi et ses coauteurs publient dans Nature un article dont le titre annonce une fusion : celle qui aurait conduit à la formation du halo stellaire interne et du disque épais de la Voie lactée Helmi 2018. Leur résultat principal tient en une phrase. Le halo interne de la Galaxie, c'est-à-dire la partie du halo proche de nous et du centre, est dominé par les débris d'un objet qui était, à son arrivée, un peu plus massif que le Petit Nuage de Magellan Helmi 2018. Ils baptisent cet objet Gaia-Enceladus, du nom du satellite dont les données ont permis de le reconnaître et de celui d'un géant de la mythologie grecque[19]. Xiang et Rix emploient une variante plus longue, Gaia-Sausage-Enceladus Xiang 2022.

Le Petit Nuage de Magellan, l'étalon de la comparaison, est une galaxie voisine de la nôtre, dont la métallicité vaut le quart de celle du Soleil Howk 2012 (→ chap. 5). Sa masse n'est pas chiffrée dans les sources de ce livre[20]. La comparaison dit l'ordre de grandeur : Gaia-Enceladus n'était pas un petit amas d'étoiles, mais une galaxie à part entière, une galaxie naine de la taille de celles qui accompagnent aujourd'hui la Voie lactée. Les mots « à son arrivée » comptent aussi. Une galaxie qui tombe dans une autre perd de la matière en chemin : la gravité de la plus grosse arrache les étoiles et le gaz de la plus petite, par ses bords, bien avant que la fusion soit achevée[21]. La masse donnée est celle d'avant ce dépouillement.

Ce que l'on voit aujourd'hui de Gaia-Enceladus, ce sont ses étoiles, dispersées dans le halo. Elles ne forment plus une galaxie. Elles partagent pourtant des orbites semblables, héritées du mouvement de la galaxie qui les portait, et cette parenté les distingue des étoiles nées dans la Voie lactée[22]. La définition la plus simple d'une galaxie absorbée est là : un ensemble d'étoiles qui ne sont plus liées entre elles, mais qui se déplacent encore comme si elles l'étaient.

Deux familles d'objets sont associées à ces débris. D'abord des centaines d'étoiles RR Lyrae Helmi 2018. Ce sont des étoiles vieilles, dont l'éclat varie régulièrement en moins d'une journée ; leur éclat moyen est connu, ce qui permet d'en déduire leur distance, et leur présence signale une population ancienne[23]. Ensuite, treize amas globulaires Helmi 2018. Les amas globulaires sont des amas d'étoiles très denses et très anciens, qui gravitent autour de la Voie lactée et des galaxies voisines (→ chap. 10). Treize d'entre eux, dans notre Galaxie, seraient donc des immigrés, apportés par Gaia-Enceladus. Le nombre total d'amas globulaires de la Voie lactée n'est pas dans les sources de ce livre, ce qui empêche de dire quelle part ces treize représentent[24].

La collision a eu des conséquences pour la Galaxie qui a absorbé Gaia-Enceladus. Helmi et ses coauteurs estiment le rapport de masse entre les deux à 4 pour 1 Helmi 2018. La Voie lactée n'était donc que quatre fois plus massive que la galaxie qu'elle a absorbée. Ce n'est pas une petite galaxie avalée sans effet. Avec un tel rapport, la fusion a dû « chauffer » le précurseur du disque épais et contribuer ainsi à former cette composante Helmi 2018. Le mot « chauffer » a le sens cinématique défini plus haut : augmenter l'agitation des étoiles. Les étoiles d'un disque jeune, qui tournaient sur des orbites presque circulaires et presque dans le plan, reçoivent de la collision des vitesses désordonnées. Leurs orbites s'inclinent et s'allongent, et le disque s'épaissit[25]. Le disque épais serait, au moins en partie, un disque qui existait déjà et que la collision a secoué.

L'ordre des événements se précise ainsi. Le disque ancien commence à se former il y a 13 milliards d'années Xiang 2022. La collision avec Gaia-Enceladus survient plus tard, et elle agit sur un disque déjà en place : Helmi et ses coauteurs parlent du « précurseur » du disque épais Helmi 2018. Le halo interne, lui, achève de s'assembler deux milliards d'années après le début de la formation du disque ancien, soit il y a environ 11 milliards d'années Xiang 2022 (→ chap. 11)[26]. L'intuition voudrait que le halo, fait d'étoiles plus désordon-

nées et souvent plus pauvres en métaux, soit plus ancien que le disque. Sur le point de son assemblage final, c'est l'inverse : le disque commence à se former avant que le halo interne soit complet. Le halo interne n'est pas seulement le vestige d'une proto-Galaxie. Il est aussi le dépôt d'une collision survenue quand le disque existait déjà.

Reste à dater cette collision, et les deux études ne donnent pas la même date. Helmi et ses coauteurs situent la contribution de la fusion à la formation du disque épais il y a environ 10 milliards d'années Helmi 2018. Xiang et Rix, de leur côté, trouvent que la majorité des étoiles anciennes se sont formées il y a environ 11 milliards d'années, pendant la fusion avec Gaia-Sausage-Enceladus Xiang 2022. Leur date de l'assemblage final du halo interne, deux milliards d'années après le début du disque, conduit elle aussi vers 11 milliards d'années Xiang 2022. L'écart est d'environ un milliard d'années, et il reste ouvert[27]. Ce chapitre écrit donc que la Voie lactée a absorbé Gaia-Enceladus il y a 10 à 11 milliards d'années, soit entre 2,8 et 3,8 milliards d'années après le Big Bang. Sur l'année cosmique, la fusion tombe entre la mi-mars et le début d'avril[13].

Ce qui sépare les deux dates peut s'énoncer. Les deux équipes ne mesurent pas la même chose avec les mêmes outils. Xiang et Rix disposent d'âges individuels pour 250 000 sous-géantes Xiang 2022, et leur date est celle d'un pic de formation d'étoiles qu'ils attribuent à la fusion. La phrase d'Helmi et de ses coauteurs lue pour ce livre date le moment où la fusion a contribué à former le disque épais, sans dire de quelle mesure d'âge elle vient Helmi 2018. Une fusion entre galaxies n'est pas instantanée : la petite galaxie tourne autour de la grande, perd ses étoiles par ses bords, puis se dissout, et chacune de ces étapes peut durer longtemps. Il est donc possible que les deux dates désignent deux moments différents d'un même processus, le pic de formation d'étoiles déclenché par l'arrivée de Gaia-Enceladus d'un côté, l'effet de la fusion sur le disque de l'autre. C'est une hypothèse de ce chapitre ; les sources de la base ne tranchent pas[27]. Ce qui départagerait, ce sont des âges mesurés directement sur les étoiles des débris de Gaia-Enceladus et sur celles du disque épais les plus touchées par la collision. On saurait alors quelle population a été chauffée, et quand.

Sur le fond, les deux équipes s'accordent. La Voie lactée a subi, dans ses trois ou quatre premiers milliards d'années, une collision majeure avec une galaxie naine assez massive. Cette collision a peuplé son halo interne, lui a apporté des amas globulaires, et a transformé la structure de son disque. Les débris de cette galaxie sont toujours là, dans le halo qui nous entoure. Une part des vieilles étoiles que l'on observe dans notre voisinage galactique ne sont pas nées dans la Voie lactée.

14.5 Ce que le halo garde, ce que la Galaxie transmet

Le halo est une archive, et il garde plus qu'une collision. C'est parmi ses étoiles les plus pauvres en métaux qu'on mesure le lithium des premières minutes Fields 2020 (→ chap. 5). Pour les étoiles dont la métallicité [Fe/H] est comprise entre $-2{,}7$ et $-1{,}5$ environ, plus de cent étoiles au total, l'abondance de lithium est uniforme, avec peu de dispersion : c'est le plateau de Spite. Sa valeur est de $(1{,}6 \pm 0{,}3) \times 10^{-10}$ atome de lithium par atome d'hydrogène Fields 2020. La nucléosynthèse des premières minutes en prédit $4{,}70 \times 10^{-10}$, soit environ trois fois plus Fields 2020. Le chapitre sur les trois premières minutes a exposé ce désaccord, le « problème du lithium », et les pistes qui s'y disputent : une physique nucléaire désormais presque disculpée, une destruction du lithium dans les étoiles elles-mêmes, la piste la plus suivie, et une physique nouvelle très contrainte par le deutérium (→ chap. 5).

Ce chapitre ajoute un point au dossier. Les étoiles qui servent à mesurer le lithium primordial appartiennent au halo, et le halo interne est dominé par les débris de Gaia-Enceladus Helmi 2018. Il est donc

possible qu'une partie des étoiles du plateau de Spite soient nées dans une autre galaxie que la nôtre. La fiche qui sert de base à ce chapitre signale ce lien comme un « pont possible », pas comme un fait établi [28]. Aucune source de la base ne dit quelles étoiles du plateau viennent de Gaia-Enceladus et lesquelles sont nées dans la Voie lactée. Si des étoiles des deux origines portent le même lithium, cette uniformité devient un indice de plus que ce lithium est un héritage commun, antérieur aux deux galaxies, et que ce qui l'a réduit, s'il y a eu réduction, agit de la même façon partout. C'est un raisonnement de ce chapitre, qui attend des données.

Le halo garde ainsi deux strates de l'histoire. La plus profonde est celle des premières minutes : un lithium fabriqué avant toute étoile, que des étoiles pauvres en métaux ont reçu presque intact, à la réserve près du facteur trois. La plus récente est celle de l'assemblage de la Galaxie : la proto-Galaxie chaotique d'Aurora, puis les débris d'une galaxie absorbée il y a 10 à 11 milliards d'années. Ces étoiles anciennes relient donc les premières minutes à l'histoire de notre Galaxie.

Le disque, lui, a continué. Pendant les 5 à 6 milliards d'années qui suivent son début, son enrichissement chimique est multiplié par dix, dans un gaz bien mélangé Xiang 2022. Puis vient la coupure des 8 milliards d'années, et une seconde partie de l'histoire, plus récente Xiang 2022. Le gaz du disque fait tour après tour de la boucle décrite au chapitre sur la forge : des étoiles naissent, forgent des éléments, les rendent au gaz en mourant, et d'autres étoiles naissent de ce gaz enrichi Kobayashi 2020 (→ chap. 12). Les supernovas Ia y ajoutent leur fer avec retard, et le rapport entre éléments alpha et fer baisse Kobayashi 2020. Les catastrophes plus rares du chapitre précédent y ajoutent leur or (→ chap. 13).

C'est de ce gaz travaillé que naît le Soleil, environ 9,2 milliards d'années après le Big Bang, il y a environ 4 567 millions d'années, aux deux tiers de l'histoire cosmique Connelly 2012[29]. Sur l'année cosmique, sa naissance tombe à la fin d'août : le disque de la Voie lactée avait alors sept mois. Le Soleil hérite d'un gaz où les métaux font 1,39 % de la masse Asplund 2021. Il n'est probablement pas né là où il se trouve. Il est plus riche en métaux que ses voisines du même âge, ce qui suggère une naissance plus près du centre de la Galaxie, puis une migration vers l'extérieur ; une étude de 2026 portant sur des milliers d'étoiles semblables au Soleil conclut que ce déplacement, sur plus de 3 kiloparsecs, est « partagé par de nombreuses étoiles du disque interne » Tsujimoto 2026[30]. Où, quand et comment le Soleil est né, et ce que cette naissance tardive lui a donné en héritage, c'est l'objet du chapitre 15.

14.6 Ce qu'on ne sait pas

On ne sait pas dater précisément la fusion avec Gaia-Enceladus. Helmi et ses coauteurs la placent vers 10 milliards d'années Helmi 2018, Xiang et Rix vers 11 milliards d'années Xiang 2022. L'écart d'un milliard d'années peut venir de méthodes d'âge différentes, ou de ce que chaque date désigne un moment différent d'une fusion qui a duré. La base ne permet pas de choisir. Ce qui départagerait : des âges individuels mesurés sur les étoiles des débris et sur les étoiles chauffées du disque épais, obtenus par une même méthode. Confiance élevée sur l'existence de la fusion et sur son rapport de masse d'environ 4 pour 1 tel qu'il est estimé ; confiance modérée sur la date au milliard d'années près.

On ne sait pas bien quand ni pourquoi la proto-Galaxie s'est mise à tourner. Le spin-up d'Aurora est repéré en métallicité, pas en années Belokurov 2022. Pour le placer sur la frise, il faut une relation entre âge et métallicité dans la proto-Galaxie, que les sources de ce livre ne donnent pas. Le mécanisme qui a transformé un gaz désordonné en disque n'y est pas décrit non plus. Le résultat est récent et n'est connu ici que par un résumé paraphrasé. Confiance modérée sur le récit d'ensemble, un avant-disque chaotique puis un disque formé vite ; faible sur la chronologie fine.

On ne sait pas, dans ce livre, ce qui provoque la coupure des 8 milliards d'années. Xiang et Rix observent que la distribution âge-métallicité se sépare en deux parties presque disjointes Xiang 2022. Ce qui distingue chimiquement les deux parties, et la cause que les auteurs avancent, ne sont pas dans l'extrait lu. Le fait est établi par l'étude ; son interprétation manque à la base.

On ne sait pas quelle part du halo, ni quelle part des étoiles du plateau de Spite, vient de Gaia-Enceladus. Le halo interne est « dominé » par ses débris Helmi 2018, mais le mot ne donne pas de proportion. Si une proportion était connue pour les étoiles où l'on mesure le lithium, on pourrait comparer le plateau dans les deux populations : un plateau identique dans des étoiles nées dans deux galaxies différentes renforcerait l'idée d'un héritage commun.

Enfin, l'archéologie galactique a ses propres limites de principe. La métallicité n'est qu'un indicateur approximatif de l'âge, puisqu'une petite galaxie peut rester pauvre en métaux longtemps (→ chap. 13). Or c'est précisément le cas d'une galaxie comme Gaia-Enceladus : ses étoiles pauvres en métaux ne sont pas nécessairement plus vieilles que des étoiles plus riches de la Voie lactée. L'horloge alpha/fer, elle, dépend vraisemblablement du rythme de formation d'étoiles de chaque galaxie, et les sources de ce livre ne documentent pas cette dépendance (→ chap. 12). Les âges des sous-géantes réduisent ces ambiguïtés, sans les supprimer pour les étoiles, nombreuses, qui ne sont pas des sous-géantes.

14.7 Ce que ce chapitre démontre

Les éléments plus lourds que l'hélium sont fabriqués dans les étoiles et rejetés à leur mort ; la génération suivante naît d'un gaz qui les contient. Chaque étoile est donc un fossile de la chimie de son gaz natal : c'est le principe de l'archéologie galactique Kobayashi 2020. Le rapport entre éléments alpha et fer baisse avec le temps, à cause de l'enrichissement retardé en fer par les supernovas Ia Kobayashi 2020. Combiné aux âges des étoiles et à leurs mouvements, mesurés par Gaia, ce rapport permet de reconstituer l'ordre de formation des populations d'étoiles de la Galaxie sans observer son passé.

Dans les données APOGEE et Gaia, Belokurov et Kravtsov isolent une population ancienne et pauvre en métaux, Aurora, cinématiquement chaude et à rotation d'ensemble modeste. Au-delà d'un seuil de métallicité, la rotation des étoiles augmente brusquement. Les auteurs y lisent une évolution chaotique avant le disque, puis la formation rapide de celui-ci en un à deux milliards d'années Belokurov 2022.

À partir de l'âge et de la métallicité de 250 000 sous-géantes, Xiang et Rix montrent que la formation du disque ancien, ou disque épais, a commencé il y a 13 milliards d'années, 0,8 milliard d'années après le Big Bang Xiang 2022. La réionisation s'étendant d'environ 0,3 à environ 1,1 milliard d'années esa2015reion Bosman 2022, le disque commence à se former avant qu'elle soit achevée, et la Voie lactée est presque aussi vieille que l'Univers visible par Webb. La distribution âge-métallicité des étoiles se coupe en deux parties presque disjointes, séparées à 8 milliards d'années. Pendant les 5 à 6 milliards d'années qui suivent le début du disque, l'enrichissement chimique est multiplié par dix, dans un gaz resté bien mélangé Xiang 2022.

En 2018, Helmi et ses coauteurs montrent que le halo interne est dominé par les débris d'une galaxie un peu plus massive, à son arrivée, que le Petit Nuage de Magellan : Gaia-Enceladus. Des centaines d'étoiles RR Lyrae et treize amas globulaires lui sont associés. Avec un rapport de masse estimé à 4 pour 1, la fusion a chauffé le précurseur du disque épais et contribué à le former, il y a environ 10 milliards d'années selon ces auteurs Helmi 2018. Xiang et Rix situent vers 11 milliards d'années le pic de formation des étoiles anciennes, pendant la fusion, et l'assemblage final du halo interne deux milliards d'années après le début du disque Xiang 2022. L'écart d'environ un milliard d'années reste ouvert : la fusion a eu lieu il y a 10 à 11 milliards d'années.

Les vieilles étoiles pauvres en métaux du halo portent encore le lithium des premières minutes, au niveau du plateau de Spite, $(1{,}6 \pm 0{,}3) \times 10^{-10}$, environ trois fois moins que la prédiction Fields 2020. Le disque, lui, a continué de s'enrichir pendant des milliards d'années, et c'est de ce gaz travaillé que naîtra le Soleil, probablement plus près du centre de la Galaxie que là où il se trouve aujourd'hui Tsujimoto 2026.

Notes

1. Raisonnement de ce chapitre. Les distances des étoiles de la Galaxie, et donc le temps de trajet de leur lumière, ne sont pas chiffrés dans les fiches ; l'idée est seulement que ce temps de trajet est négligeable devant les milliards d'années de l'histoire galactique, ce qui vaut pour les étoiles proches dont parlent les relevés cités. ↩

2. La fiche des-etoiles-a-nous (d'après Kobayashi et al. 2020) dit que chaque étoile est « un fossile de la chimie du gaz dont elle est née ». Que l'atmosphère d'une étoile garde cette composition pendant sa vie, parce que les produits de ses propres fusions restent pour l'essentiel dans son cœur, est la présentation classique, non détaillée dans la base. Il y a des exceptions : le lithium, justement, peut être détruit en surface (chapitre sur les trois premières minutes, d'après Korn 2024). ↩

3. Présentation classique, non chiffrée dans les fiches : la durée de vie d'une étoile diminue fortement avec sa masse, et les étoiles moins massives que le Soleil vivent plus longtemps que l'âge actuel de l'Univers. La base ne donne que la durée de combustion de l'hydrogène pour une étoile de 25 masses solaires (10 millions d'années, Wikipédia « Silicon-burning process »). Que les plus vieilles étoiles de la Voie lactée aient l'âge de la Galaxie découle des dates de Xiang et Rix (2022). ↩

4. La fiche frise-cosmique parle de « 250 000 étoiles sous-géantes datées précisément » (Xiang et Rix 2022). La raison pour laquelle les sous-géantes se prêtent bien à la datation (phase brève pendant laquelle luminosité et température dépendent fortement de l'âge) est l'explication usuelle, non documentée dans la base ; la précision des âges obtenus n'y est pas chiffrée non plus. ↩↩

5. Présentation classique de la dynamique galactique, non documentée dans les fiches. Que les étoiles d'une galaxie ne se heurtent presque jamais et que leurs orbites gardent longtemps la trace de leur origine est le principe sur lequel reposent les études de Helmi et al. (2018) et de Belokurov et Kravtsov (2022), mais les extraits lus ne l'énoncent pas. ↩

6. La fiche des-etoiles-a-nous indique que les trois résultats de ce chapitre sont « fondés sur les données Gaia et des relevés spectroscopiques », et nomme APOGEE à propos de Belokurov et Kravtsov (2022). La nature de Gaia (satellite de l'Agence spatiale européenne qui mesure la position et le mouvement des étoiles) et celle d'APOGEE (relevé spectroscopique) sont données ici comme connaissances usuelles ; ni leurs dates, ni le nombre d'étoiles mesurées, ni la précision des mesures ne sont dans la base. ↩

7. L'expression anglaise « kinematically hot » est celle de Belokurov et Kravtsov (2022) selon la fiche. L'explication par l'analogie avec l'agitation thermique d'un gaz est la présentation usuelle, non donnée dans la base. ↩

8. La fiche des-etoiles-a-nous écrit seulement : « Au-delà d'un seuil de métallicité, la vitesse de rotation augmente brusquement ». La valeur du seuil en [Fe/H], la vitesse de rotation avant et après, et le nombre d'étoiles de la population Aurora ne sont pas dans l'extrait lu. ↩

9. Principe général de formation des disques galactiques, non documenté dans la base. Le chapitre sur les âges sombres décrit la chute du gaz ordinaire dans les halos de matière noire ; la manière dont ce gaz acquiert sa rotation et s'aplatit n'est décrite dans aucune fiche. ↩

10. En-tête de la fiche des-etoiles-a-nous, rubrique « récent » : « disque ancien dès 13 Ga (2022) ; proto-Galaxie chaotique « Aurora » (2022) ». ↩

11. Source belokurov2022 : « résumé lu, paraphrasé par l'outil » ; statut « à vérifier », sans document consulté. Les formules entre guillemets de ce chapitre (« cinématiquement chaude », « rotation d'ensemble modeste », « spin-up », évolution « chaotique », formation « rapide » du disque en 1 à 2 Ga) traduisent cette paraphrase. ↩

12. La base emploie « disque ancien (« épais ») » d'après Xiang et Rix (« old (thick) disk ») et parle du « précurseur du disque épais » d'après Helmi et al. La description du disque épais comme composante dont les étoiles s'écartent davantage du plan, distincte d'un disque mince plus jeune, est la présentation classique ; la base ne décrit ni l'épaisseur des deux disques ni leur proportion, ni l'appartenance actuelle du Soleil au disque mince. ↩

13. Calculs de ce chapitre, par règle de trois sur 13,8 milliards d'années ramenés à 365 jours, selon la convention de la fiche frise-cosmique. Début du disque, 0,8 Ga après le Big Bang : 21 jours, soit vers le 22 janvier. Fusion avec Gaia-Enceladus, il y a 11 Ga (2,8 Ga après) : 74 jours, soit vers le 16 mars ; il y a 10 Ga (3,8 Ga après) : 100 jours, soit vers le 11 avril. Naissance du Soleil, 9,2 Ga après : fin août (frise). Le chapitre sur la réionisation place la fin de celle-ci vers le 29 janvier. ↩↩

14. Le chapitre sur la réionisation fait le même rapprochement et signale le même manque : l'état d'ionisation de la région où naissait la Voie lactée n'est documenté par aucune source de la base. ↩

15. La fiche frise-cosmique (section 8) : « Notre Galaxie est donc presque aussi vieille que l'Univers visible par Webb. » La comparaison avec MoM-z14 (280 Ma, Naidu et al. 2025) et l'écart d'environ 520 millions d'années sont de ce chapitre. ↩

16. Xiang et Rix (2022), selon la source : la distribution âge-métallicité « splits into two almost disjoint parts, separated at 8 Gyr ». L'extrait lu (résumé) ne précise ni les caractéristiques des deux parties ni l'interprétation des auteurs. Ce manque est signalé. ↩

17. Interprétation de ce chapitre de la formule de la fiche (« dans un gaz resté bien mélangé »). Que le bon mélange du gaz se traduise par une relation âge-métallicité étroite est la lecture usuelle ; l'extrait lu ne donne pas la dispersion mesurée. ↩

18. Calcul et rapprochement de ce chapitre : 13 Ga − (5 à 6 Ga) = 7 à 8 Ga. La base ne dit pas si Xiang et Rix relient explicitement la fin de la phase d'enrichissement du disque ancien à la coupure des 8 Ga. ↩

19. Le nom est donné par Helmi et al. (2018) (« which we refer to as Gaia-Enceladus »). Son explication (le satellite Gaia, et Encelade, géant de la mythologie grecque) est l'explication usuelle, non documentée dans la base, de même que l'origine du terme « Sausage » employé par Xiang et Rix. ↩

20. La métallicité du Petit Nuage de Magellan (le quart de celle du Soleil) vient de Howk et al. (2012), cités dans la fiche nucleosynthese-primordiale. Sa masse, et donc celle de Gaia-Enceladus, ne sont chiffrées dans aucune source de la base. ↩

21. Présentation classique des effets de marée dans une fusion de galaxies, non documentée dans la base. La formule « at infall » d'Helmi et al. (2018) suppose que la masse a changé depuis l'arrivée, sans que l'extrait lu décrive le mécanisme. ↩

22. L'extrait lu d'Helmi et al. (2018) donne le résultat, pas la méthode d'identification des débris. Que ceux-ci soient reconnus à leurs orbites semblables, et sans doute à leur chimie, est la logique générale de ce type d'étude, formulée par ce chapitre. ↩

23. Définition classique, non donnée dans la fiche, qui dit seulement que « des centaines d'étoiles RR Lyrae » sont associées à Gaia-Enceladus. La période de variation (moins d'une journée) et l'usage des RR Lyrae comme indicateurs de distance et de population ancienne sont des connaissances usuelles, à vérifier. ↩

24. Le nombre total d'amas globulaires de la Voie lactée n'est pas dans la base. ↩

25. Helmi et al. (2018) : « the merger with Gaia-Enceladus must have led to the dynamical heating of the precursor of the Galactic thick disk ». La description de ce chauffage (orbites qui s'inclinent et s'allongent, disque qui s'épaissit) est la présentation usuelle ; l'extrait ne la détaille pas. ↩

26. Fiche frise-cosmique, section 8, d'après Xiang et Rix (2022) : le disque ancien a commencé à se former « two Gigayears earlier than the final assembly of the inner Galactic halo ». Le calcul 13 − 2 = 11 Ga est de ce chapitre ; il est cohérent avec le pic de formation d'étoiles que Xiang et Rix placent vers 11 Ga, pendant la fusion. ↩

27. En-tête de la fiche des-etoiles-a-nous, rubrique « débattu » : « date de la fusion Gaia-Enceladus (≈ 10 ou 11 Ga) ». La fiche recommande de ne pas dater la fusion d'une valeur unique. L'hypothèse selon laquelle les deux dates désigneraient deux moments différents d'une même fusion est de ce chapitre ; elle n'est pas formulée dans les sources. ↩↩

28. Fiche des-etoiles-a-nous, section « Voisines » : « Pont possible : le plateau de Spite est mesuré dans les étoiles du halo, en partie débris de Gaia-Enceladus. » ↩

29. Fiche frise-cosmique, section 8 : naissance du Soleil environ 9,2 milliards d'années après le Big Bang (13,8 − 4,57), d'après l'âge de 4 567,30 ± 0,16 millions d'années des premiers solides des météorites (Connelly et al. 2012, source primaire non lue ; chiffre recoupé par Woitke et al. 2024). Cet âge est discuté depuis 2023 (4 568,4 à 4 568,7 Ma selon Desch et al. 2023 et Piralla et al. 2023) ; le chapitre suivant y revient. ↩

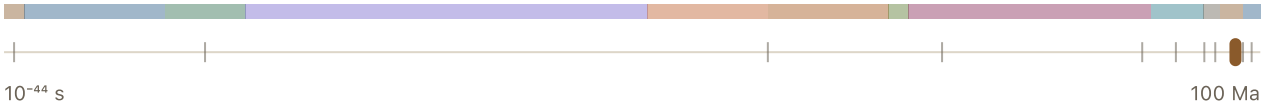
30. Tsujimoto et al. (2026), sur 6 594 « jumeaux solaires » de Gaia DR3. Le kiloparsec est une unité de distance valant environ 3 260 années-lumière (valeur usuelle, non donnée dans la base). La fiche précise que le rayon de naissance exact reste discuté, et que le lien avec la formation de la barre galactique est une hypothèse des auteurs. ↩

CHAPITRE 15

Le Soleil arrive tard

~9,2 Ga (il y a ~4 567 Ma)

brouillon · 6089 mots



15.1 Aux deux tiers de l'histoire

Les plus vieux solides du Système solaire, de petits grains clairs pris dans certaines météorites, ont été datés à 4 567 millions d'années Connelly 2012 Woitke 2024. L'Univers, lui, a environ 13,8 milliards d'années dans le modèle standard de la cosmologie esa2013planck wiki-age (→ chap. 7). La soustraction place la naissance du Soleil environ 9,2 milliards d'années après le Big Bang : 13,8 moins 4,57 Connelly 2012[1]. Neuf virgule deux sur treize virgule huit font un peu plus de 0,66. Le Soleil naît aux deux tiers de l'histoire cosmique.

L'année cosmique, qui ramène les 13,8 milliards d'années à douze mois, rend cette proportion visible. Le fond diffus cosmologique, la plus ancienne lumière qu'on puisse recevoir, y est émis environ un quart d'heure après minuit, le 1er janvier (→ chap. 6). Les premières étoiles s'allument dans la première semaine de janvier (→ chap. 9), la réionisation s'achève vers la fin du même mois (→ chap. 11), le disque de la Voie lactée commence à se former vers le 22 janvier, et la galaxie Gaia-Enceladus est absorbée entre la mi-mars et le début d'avril (→ chap. 14). Le Soleil naît vers la fin d'août ; au calcul exact, aux premières heures du 2 septembre[2]. Il reste environ quatre mois avant le présent.

Le mot « tard » du titre a donc un sens précis. Quand le Soleil se forme, le disque de la Galaxie a déjà plus de huit milliards d'années d'existence : il a commencé il y a 13 milliards d'années Xiang 2022, et 13 moins 4,57 donnent environ 8,4. La collision avec Gaia-Enceladus, datée il y a 10 à 11 milliards d'années Helmi 2018 Xiang 2022, a eu lieu cinq à six milliards d'années avant lui[3]. Dans la distribution des âges et des métallicités des étoiles de la Galaxie, que Maosheng Xiang et Hans-Walter Rix ont établie à partir de 250 000 étoiles, une coupure sépare deux parties presque disjointes, à 8 milliards d'années Xiang 2022. Le Soleil, avec ses 4,57 milliards d'années, appartient sans ambiguïté à la partie récente (→ chap. 14).

Tout ce que les chapitres précédents ont raconté s'est donc produit avant lui. La forge des étoiles massives, qui fabrique l'oxygène et le silicium puis s'arrête au fer (→ chap. 12) ; les naines blanches qui explosent en supernovas de type Ia et fournissent environ la moitié du fer Kobayashi 2020 ; les fusions d'étoiles à neutrons, et peut-être les sursauts de magnétars, qui fabriquent l'or Kasen 2017 Patel 2025 (→ chap. 13) ; l'assemblage agité de la Voie lactée (→ chap. 14). Plus de neuf milliards d'années de ces opérations ont précédé la naissance du Soleil, et leurs produits se trouvaient dans le gaz dont il est né.

Une autre coïncidence de calendrier tombe à ce moment. L'expansion de l'Univers est dominée par l'énergie noire depuis un peu moins de 10 milliards d'années après le Big Bang, plus de 9,8 milliards d'années selon les chronologies de référence wiki-chrono. C'est à peu près le moment où naît le Soleil : l'écart est d'environ six cents millions d'années, deux semaines de l'année cosmique[4]. Depuis, l'expansion accélère Riess 1998. Rien ne relie les deux événements. L'un tient à la dilution de la matière dans un Univers qui grandit, l'autre

à l'effondrement d'un nuage de gaz dans une galaxie parmi des centaines de milliards. Le rapprochement sert seulement de repère : le Soleil appartient à l'Univers qui accélère, et le livre y reviendra au chapitre 22.

15.2 Un héritage de 1,4 %

La composition du Soleil se lit dans sa lumière. La photosphère, la couche d'où s'échappe la lumière visible et qu'on appelle couramment la surface du Soleil, absorbe certaines longueurs d'onde, et chaque élément chimique y laisse des raies qui lui sont propres[5]. En 2021, Martin Asplund, Anish Amarsi et Nicolas Grevesse publient une nouvelle synthèse de ces mesures. En masse, la photosphère contient 74,4 % d'hydrogène, 24,2 % d'hélium et 1,39 % de tous les autres éléments réunis Asplund 2021. Les astronomes notent X, Y et Z ces trois fractions. La dernière, qu'ils appellent la métallicité, vaut Z = 0,0139, avec une incertitude de 0,0006 Asplund 2021. Un kilogramme de surface solaire contient donc environ 744 grammes d'hydrogène, 242 grammes d'hélium, et 14 grammes de tout le reste.

Ces quatorze grammes résument la partie du livre qui s'achève ici. Le carbone, l'oxygène, l'azote, le silicium, le fer, et à l'état de traces l'or et le platine, sont rangés sous le même mot de « métaux », qui en astronomie désigne tous les éléments plus lourds que l'hélium (→ chap. 14). Aucun d'eux, à quelques traces de lithium près, n'existait à la sortie des premières minutes (→ chap. 5). Tous ont été fabriqués dans des étoiles ou dans leurs catastrophes, rejetés dans le gaz de la Galaxie, et repris par les étoiles suivantes Kobayashi 2020. Le chapitre 12 a fait l'inventaire de ce qui vient de quelle source.

Les deux autres fractions demandent autant d'attention que la troisième. Les étoiles ne fabriquent pas d'hydrogène, elles en consomment : leur premier travail est de le changer en hélium wiki-stellarnuc. Les 74,4 % d'hydrogène du Soleil viennent donc des premières minutes de l'Univers (→ chap. 5). La formule selon laquelle « nous sommes faits de poussière d'étoiles » doit être corrigée sur ce point, comme l'a déjà fait le chapitre 12 : elle est vraie des quatorze grammes, pas des sept cent quarante-quatre. Le même raisonnement vaut pour nos corps, puisque aucun hydrogène, où qu'il se trouve, n'a été fabriqué par une étoile[6]. Chaque molécule d'eau porte deux atomes du premier jour pour un atome forgé dans une étoile.

L'hélium pose une question plus fine. La nucléosynthèse des premières minutes en a laissé une fraction de masse d'environ 25 % ; les mesures dans les galaxies les plus pauvres en métaux donnent Yp = 0,2449 ± 0,0040 pour cette valeur primordiale Fields 2020 (→ chap. 5). Pendant les neuf milliards d'années qui ont précédé le Soleil, les étoiles ont changé de l'hydrogène en hélium et en ont rendu une partie au gaz en mourant. On s'attendrait donc à ce que le Soleil contienne plus d'hélium que le gaz primordial. Or sa photosphère en montre 24,2 %, avec une incertitude de 0,5 point Asplund 2021 : autant, ou à peine moins[7]. Cette comparaison conduit directement à la première des deux réserves qui accompagnent ces chiffres.

Les valeurs d'Asplund et de ses coauteurs sont celles de la surface actuelle du Soleil, et cette surface a été un peu modifiée depuis la naissance de l'étoile Asplund 2021. La composition du nuage d'origine n'est donc pas lue directement : elle se déduit de la surface, en corrigeant ce que 4,57 milliards d'années ont changé. Un hélium de surface plus pauvre qu'attendu est l'indice le plus visible de cette correction.

La seconde réserve est plus embarrassante. Les astrophysiciens construisent des modèles de l'intérieur du Soleil, qui calculent sa structure à partir de sa composition. Ces modèles ne s'accordent pas avec les abondances mesurées à la surface, et ce désaccord porte un nom, le « problème de modélisation solaire ». Asplund et ses coauteurs écrivent en 2021 qu'il « reste entier » Asplund 2021. Trois explications restent possibles : la composition de surface est fausse, elle représente mal l'intérieur, ou les modèles ignorent une partie de la physique de l'étoile. La valeur de 1,39 % est donc une mesure solide de la surface, et une estimation de la composition d'origine qui dépend d'un modèle encore en défaut.

Reste à savoir combien d'étoiles ont contribué à ces quatorze grammes. On lit souvent que le Soleil serait une étoile de troisième génération, ou de quatrième. Ce nombre ne se compte pas, et pas faute de mesures. Le chapitre 12 en a donné la raison : une lignée se compte parce que chaque génération y descend d'une seule précédente, alors que le gaz d'une galaxie mélange les rejets d'étoiles de toutes masses, mortes à toutes les époques. L'oxygène d'une étoile massive morte quelques millions d'années avant la naissance du Soleil y côtoie le fer d'une naine blanche formée des milliards d'années plus tôt, et deux atomes voisins n'ont pas la même histoire. L'image juste est celle d'un recyclage, pas d'une lignée[8].

Ce qui se mesure, en revanche, c'est la profondeur du recyclage. Pendant les cinq à six milliards d'années qui ont suivi le début du disque ancien de la Galaxie, l'enrichissement chimique du gaz a été multiplié par dix Xiang 2022. Les vieilles étoiles du halo où l'on mesure le lithium primordial descendent à des teneurs en fer des centaines de fois plus faibles que celle du Soleil Fields 2020 (→ chap. 12). Le Soleil se tient à l'autre bout de cette échelle : il est né d'un gaz qui avait fait beaucoup de tours de la boucle Asplund 2021.

15.3 Né ailleurs

Le Soleil tourne aujourd'hui autour du centre de la Galaxie, dans son disque. On a longtemps pu supposer qu'il était né à peu près sur cette orbite. Sa composition suggère le contraire : le Soleil est plus riche en métaux que ses voisines du même âge Tsujimoto 2026. Parmi des étoiles nées à la même époque, il a reçu plus d'éléments forgés que celles qui l'entourent aujourd'hui.

Le raisonnement qui tire de ce constat une naissance plus près du centre galactique s'appuie sur une propriété du disque : le gaz y est d'autant plus riche en métaux qu'il est proche du centre, où les étoiles se forment en plus grand nombre et enrichissent le gaz plus vite[9]. Une étoile trop riche pour son voisinage et pour son âge a donc vraisemblablement été formée dans une région plus centrale, où le gaz de son époque avait déjà atteint cette richesse, puis a migré vers l'extérieur. Le Soleil est dans ce cas Tsujimoto 2026.

Une étoile peut-elle se déplacer ainsi, de plusieurs milliers d'années-lumière, sans rien perdre de sa composition ? La composition, oui : une étoile garde dans son atmosphère, pour l'essentiel, celle du gaz dont elle est née Kobayashi 2020 (→ chap. 14). Le déplacement suppose que l'orbite de l'étoile change de rayon au cours du temps, ce que les astronomes appellent une migration radiale.

Takuji Tsujimoto et ses coauteurs ont montré en 2026 que ce déplacement est fréquent. Ils étudient 6 594 « jumeaux solaires », des étoiles dont les propriétés mesurées sont très proches de celles du Soleil, repérées dans la troisième publication de données du satellite Gaia (Gaia DR3), qui fournit, en plus des positions et des mouvements, des paramètres tirés de la lumière de millions d'étoiles Tsujimoto 2026[10]. Ils en établissent la distribution des âges. Parmi ces jumeaux proches de nous, ceux âgés de 4 à 6 milliards d'années sont nombreux. Selon les auteurs, cette population nombreuse fournit une preuve « convaincante » que la migration du Soleil sur une longue distance, 3 kiloparsecs ou plus, « est partagée par de nombreuses étoiles du disque interne » Tsujimoto 2026. Un kiloparsec vaut environ 3 260 années-lumière : trois kiloparsecs font près de dix mille années-lumière[11].

L'argument se comprend ainsi. Si le Soleil était une exception, une étoile venue de loin par accident, on trouverait peu d'étoiles comme lui dans son voisinage actuel. Or les étoiles qui lui ressemblent, et qui ont à peu près son âge, abondent autour de lui. Puisqu'elles partagent sa richesse en métaux, elles partagent vraisemblablement son origine, et leur nombre signale un déplacement collectif plutôt qu'un voyage isolé[12]. Le Soleil a migré avec une foule d'étoiles venues du disque interne.

Deux points restent ouverts. Le premier est le rayon de naissance exact du Soleil, la distance du centre galactique à laquelle il s'est formé : il reste discuté, et une migration de 3 kiloparsecs ou plus fixe un ordre de grandeur, pas un lieu. Le second est la cause du déplacement collectif. Tsujimoto et ses coauteurs le relient, peut-être, à l'époque où s'est formée la barre de la Galaxie Tsujimoto 2026, la structure allongée d'étoiles qui occupe la région centrale de la Voie lactée. C'est une hypothèse des auteurs. Ce qui la mettrait à l'épreuve : une date de formation de la barre obtenue indépendamment, par les âges des étoiles qui la composent par exemple, et sa comparaison avec l'âge de la population migrante, 4 à 6 milliards d'années.

La conséquence pour le récit tient en peu de mots. Le Soleil est né dans une région de la Galaxie plus active et plus riche que celle où il se trouve, et le gaz qui l'a formé était plus travaillé que celui de son voisinage actuel. Son héritage de 1,39 % est celui d'un lieu qu'il a quitté.

15.4 Deux horloges dans une pierre

Dater la naissance du Soleil ne se fait pas en observant le Soleil. On date des pierres. Certaines météorites, les chondrites, n'ont jamais fondu et gardent les briques du disque de gaz et de poussière qui entourait le jeune Soleil : des gouttelettes de silicate figées, des grains réfractaires, une matrice de poussière fine Lichtenberg 2023. Pour lire leur âge, on se sert de la radioactivité.

Certains noyaux atomiques sont instables et se transforment spontanément en d'autres. Pour un grand nombre de noyaux d'une même espèce, cette transformation suit une règle simple : au bout d'une durée fixe, propre à l'espèce et appelée demi-vie, la moitié des noyaux s'est transformée ; au bout de deux demi-vies, les trois quarts ; et ainsi de suite[13]. La quantité de noyaux transformés mesure donc le temps écoulé, à condition de savoir combien il y en avait au départ. C'est cette condition qui pose problème, et la méthode plomb-plomb a été conçue pour la contourner.

L'uranium naturel existe sous deux formes, deux isotopes, qui ont la même chimie mais des noyaux de masses différentes. L'uranium 238 se transforme, par une chaîne de désintégrations, en plomb 206, avec une demi-vie de 4,5 milliards d'années. L'uranium 235 se transforme en plomb 207, avec une demi-vie de 0,70 milliard d'années wiki-pbpb Lichtenberg 2023. Les deux horloges tournent dans la même pierre, depuis le même instant, mais à des vitesses très différentes.

Depuis la naissance du Système solaire, il y a 4,57 milliards d'années, l'uranium 238 a traversé à peu près une demi-vie : il en reste environ la moitié. L'uranium 235, lui, a traversé plus de six demi-vies : il en reste environ un pour-cent de la quantité initiale[14]. Les deux plombs ne se sont donc pas accumulés au même rythme. Au début, l'uranium 235, qui se désintègre vite, produisait du plomb 207 en abondance relative ; à mesure qu'il s'est épuisé, la production de plomb 207 a ralenti, pendant que celle de plomb 206 continuait à un rythme presque régulier. Le rapport entre le plomb 207 et le plomb 206 fabriqués dans la pierre change donc avec le temps, d'une manière entièrement fixée par les deux demi-vies et par le rapport entre les deux uraniums[15].

Là est tout l'intérêt de la méthode. La quantité d'uranium que contenait la pierre à l'origine n'intervient pas : une pierre riche en uranium fabrique plus de plomb qu'une pierre pauvre, mais les deux plombs y sont produits dans la même proportion. Le rapport entre les deux plombs suffit à donner un âge, sans qu'on ait besoin de connaître la concentration d'uranium wiki-pbpb. Deux horloges qui tournent à des vitesses différentes dans le même boîtier se lisent l'une par l'autre.

La méthode a daté les météorites dès 1956. Cette année-là, le géochimiste américain Clair Patterson obtient pour elles un âge d'environ 4,55 milliards d'années wiki-pbpb. La valeur actuelle, 4,567 milliards d'années,

n'en diffère que de 17 millions d'années, soit moins de 0,4 %[16]. La méthode a été affinée depuis, pas remplacée.

L'une des corrections modernes touche au cœur du mécanisme. Le rapport entre le plomb 207 et le plomb 206 dépend, on l'a vu, du rapport entre les deux uraniums. On a longtemps supposé que ce rapport entre l'uranium 238 et l'uranium 235 était le même dans toutes les météorites. Il varie en réalité de l'une à l'autre wiki-pbpb. Une valeur supposée constante, appliquée à une pierre qui s'en écarte, fausse l'âge calculé. Les datations modernes mesurent donc ce rapport dans l'échantillon lui-même plutôt que de le supposer. La valeur révisée est de 137,786 ± 0,013 : il y a aujourd'hui environ 138 atomes d'uranium 238 pour un atome d'uranium 235 wiki-pbpb.

15.5 Ce que la date désigne

Parmi les grains des chondrites se trouvent des inclusions riches en calcium et en aluminium, désignées par le sigle anglais CAI, ou « inclusions réfractaires » : elles sont faites de minéraux qui se forment à très haute température[17]. Les CAI sont tenues pour la première matière solide du Système solaire. Leur âge est donc assimilé à l'origine cosmochimique du Système solaire, que les spécialistes notent « t = 0 » Woitke 2024.

Quatre CAI datées par la méthode plomb-plomb donnent 4 567,30 millions d'années, avec une incertitude de 0,16 million d'années Woitke 2024 Amelin 2010 Connelly 2012. C'est la valeur d'où découle la soustraction du début de ce chapitre[18].

Ce que la date mesure demande d'être dit exactement. C'est l'âge des premiers solides du disque qui entourait le jeune Soleil, pas celui du Soleil au sens strict Woitke 2024. Le Soleil s'est formé par l'effondrement d'un nuage ; le disque qui l'entourait a ensuite condensé ses premiers grains ; ces grains sont ceux qu'on date. Entre le début de l'effondrement et la formation des CAI, il s'est donc écoulé un certain temps, que la méthode plomb-plomb ne mesure pas[19].

Ce délai a été estimé. Un modèle publié en 2024 par Peter Woitke et ses coauteurs fait naître les CAI dans les 50 000 premières années de l'évolution du disque Woitke 2024. C'est un résultat de modèle, non une mesure. Mais l'ordre de grandeur suffit au propos : cinquante mille ans représentent environ le tiers de l'incertitude sur l'âge des CAI, qui est de 160 000 ans, et un peu moins de deux minutes de l'année cosmique[20]. À l'échelle de ce livre, la naissance du Soleil et l'âge du Système solaire se confondent, et ce chapitre emploie les deux expressions pour le même instant.

Le vocabulaire des cosmochimistes est plus prudent que celui du récit. Ils ne parlent pas de naissance mais de t = 0, une origine des horloges, comme la cosmologie parle du « début » sans prétendre dater un instant zéro (→ chap. 1). Pour eux aussi, une origine commode peut se révéler moins bien fixée qu'on ne le croyait.

15.6 Un million d'années de désaccord

Le plomb-plomb n'est pas la seule horloge des météorites. Une autre repose sur l'aluminium 26, une forme radioactive de l'aluminium qui se transforme en magnésium 26 avec une demi-vie d'environ 0,72 million d'années Desch 2023 Lichtenberg 2023. Disparu depuis longtemps, il a laissé dans les minéraux formés tôt un excès de magnésium 26, d'autant plus grand que le minéral est ancien. Cette horloge, dont le chapitre 16 détaille le principe, ne donne pas d'âge en années : elle donne l'écart de temps entre la formation de deux objets, à condition que l'aluminium 26 ait été réparti de la même façon dans tout le disque d'origine. C'est

cette condition que teste l'article de Steven Desch et de ses coauteurs publié en 2023, dont le titre annonce « un test de l'homogénéité de l'aluminium 26 » Desch 2023.

Les deux horloges se complètent donc. Le plomb-plomb donne des âges absolus, en millions d'années avant le présent ; l'aluminium-magnésium donne des écarts relatifs, très fins, entre objets anciens. Si les deux sont justes, elles doivent concorder. Desch et ses coauteurs les confrontent sur des achondrites, des météorites issues de corps qui ont fondu Lichtenberg 2023, et plus précisément sur celles qui se sont refroidies rapidement : un refroidissement rapide garantit que les deux horloges ont commencé à compter au même moment[21]. Pour ces pierres, on connaît à la fois l'âge absolu par le plomb et l'écart avec le t = 0 par l'aluminium. On en déduit la date du t = 0 lui-même.

Le résultat est un t = 0 de 4 568,42 millions d'années, avec une incertitude de 0,24 million d'années Desch 2023. Les auteurs soulignent que cette valeur est « significativement plus ancienne » que les quelque 4 567,3 millions d'années mesurés directement sur les CAI par le plomb-plomb Desch 2023. L'écart est d'environ 1,1 million d'années, plusieurs fois les incertitudes déclarées de part et d'autre[22]. Les deux valeurs ne peuvent pas être justes ensemble.

Desch et ses coauteurs proposent une explication : le plomb de certaines CAI aurait été perturbé après leur formation Desch 2023. Si des CAI ont perdu une partie de leur plomb, ou en ont échangé avec leur environnement, leur horloge plomb-plomb indique un âge trop jeune. La mesure directe sur les CAI serait donc biaisée, et le détour par les achondrites donnerait la bonne valeur. Les auteurs en tirent une recommandation de méthode : dater les événements du début du Système solaire par rapport au t = 0, en écart de temps, plutôt qu'en âge absolu Desch 2023. Les écarts relatifs sont plus sûrs que la position de l'origine.

Une seconde équipe va dans le même sens. Maxime Piralla et ses coauteurs, également en 2023, établissent une chronologie unifiée qui combine l'aluminium-magnésium et le plomb-plomb, et réévaluent l'âge des CAI à 4 568,7 millions d'années Woitke 2024[23]. Deux équipes, par des chemins voisins, trouvent donc une origine plus ancienne d'environ un million d'années que la mesure plomb-plomb directe.

Rapporté à l'âge du Système solaire, cet écart vaut 0,02 %, et un peu plus pour la valeur de Piralla[24]. Sur l'année cosmique, il représente trois quarts d'heure environ, aux premières heures du 2 septembre[25]. Pour le récit cosmique, il ne change rien : le Soleil naît toujours environ 9,2 milliards d'années après le Big Bang, aux deux tiers de l'histoire. L'incertitude sur l'âge de l'Univers lui-même, qui dépend du modèle standard et de ses tensions (→ chap. 23), dépasse de loin ce million d'années.

Ce qui départagerait les deux valeurs se laisse énoncer. Il faudrait des CAI dont le plomb est démontré intact, et dont l'âge plomb-plomb coïncide, ou non, avec le t = 0 déduit de l'aluminium. Il faudrait aussi confirmer que l'aluminium 26 était bien réparti de façon homogène dans le disque, puisque toute la construction de Desch et de ses coauteurs en dépend Desch 2023. Si l'homogénéité tombait, l'horloge relative perdrait sa fiabilité, et l'argument contre les 4 567,3 millions d'années avec elle.

Pour la formation des planètes, en revanche, un million d'années compte beaucoup. Les premiers petits corps du Système solaire interne se sont formés moins de 0,3 million d'années après les CAI, et le noyau de Jupiter aurait atteint une vingtaine de masses terrestres en moins d'un million d'années Lichtenberg 2023 Kruijer 2017. Sur une chronologie de cette finesse, déplacer le t = 0 d'un million d'années déplace d'autant chaque événement daté en âge absolu. D'où la recommandation de Desch et de ses coauteurs : les écarts mesurés par rapport au t = 0 restent valables quelle que soit la date du t = 0 lui-même Desch 2023.

Ce t = 0, à 4 567 ou 4 568 millions d'années avant le présent, ferme l'inventaire de la matière : l'hydrogène du premier jour et les quatorze grammes de cendres d'étoiles par kilogramme sont réunis autour d'une

étoile neuve. La suite ne fabrique plus d'éléments, elle les trie et les assemble. Autour du Soleil naissant, le disque qui a condensé les CAI va agréger ses grains en corps de plus en plus gros, jusqu'aux embryons de planètes, et c'est en écarts au t = 0, comme le recommandent Desch et ses coauteurs, que le chapitre 16 en raconte l'histoire.

15.7 Ce qu'on ne sait pas

On ne connaît pas la date absolue du t = 0 à mieux qu'un million d'années près. Deux familles de mesures s'opposent : le plomb-plomb direct sur quatre CAI, 4 567,30 ± 0,16 millions d'années Woitke 2024, et les chronologies qui accordent le plomb-plomb à l'aluminium 26, 4 568,42 ± 0,24 millions d'années pour Desch et ses coauteurs Desch 2023, 4 568,7 pour Piralla et ses coauteurs Woitke 2024. L'hypothèse du plomb perturbé dans certaines CAI expliquerait l'écart ; celle d'un aluminium 26 réparti de façon inégale dans le disque l'expliquerait autrement, et jouerait contre la valeur plus ancienne. Ce qui départagerait : des CAI au plomb démontré intact, et un test indépendant de l'homogénéité de l'aluminium 26. Confiance élevée sur l'âge au dixième de milliard d'années près, 4,57 milliards d'années ; confiance modérée sur le choix entre 4 567 et 4 568 millions d'années.

On ne sait pas exactement combien de temps sépare le début de l'effondrement du nuage solaire de la formation des CAI. Le modèle de Woitke et de ses coauteurs donne 50 000 ans pour l'apparition des CAI dans l'évolution du disque Woitke 2024, mais c'est un modèle, et il ne couvre pas la phase qui précède la formation du disque. L'enjeu reste faible à l'échelle du livre : il faudrait un délai de plusieurs centaines de milliers d'années pour qu'il dépasse l'incertitude des mesures.

On ne connaît pas la composition d'origine du Soleil, seulement celle de sa surface actuelle Asplund 2021. Deux indices montrent que l'écart n'est pas nul : la surface a été un peu modifiée depuis la naissance, selon les auteurs ; et l'hélium de la photosphère, 24,2 %, n'est pas supérieur à la valeur primordiale, alors que neuf milliards d'années d'étoiles en avaient ajouté au gaz. Le « problème de modélisation solaire », désaccord entre ces abondances de surface et les modèles de l'intérieur, reste entier Asplund 2021 : soit la surface est mal mesurée, soit elle représente mal l'intérieur, soit les modèles manquent une physique. Confiance élevée sur les fractions de surface ; plus faible sur leur transposition au nuage d'origine.

On ne sait pas où le Soleil est né. Sa richesse en métaux et la population nombreuse de ses jumeaux âgés de 4 à 6 milliards d'années indiquent une naissance plus près du centre, suivie d'une migration de 3 kiloparsecs ou plus partagée par de nombreuses étoiles Tsujimoto 2026. Le rayon de naissance exact reste discuté. Le lien avec la formation de la barre galactique est une hypothèse des auteurs, que départagerait une date indépendante pour la formation de la barre. Confiance modérée à élevée sur le principe d'une naissance plus centrale ; faible sur le lieu précis et sur la cause.

Enfin, on ne saura pas combien de générations d'étoiles ont précédé le Soleil. Ce n'est pas une lacune que de meilleures mesures combleraient : le recyclage qui mélange les rejets d'étoiles de toutes les époques ne définit pas de générations successives (→ chap. 12).

15.8 Ce que ce chapitre démontre

Le Soleil naît environ 9,2 milliards d'années après le Big Bang, 13,8 moins 4,57, soit aux deux tiers de l'histoire cosmique Connelly 2012 esa2013planck. Sur l'année cosmique, où le fond diffus est émis un quart d'heure après minuit le 1er janvier, sa naissance tombe vers la fin d'août, aux premières heures du 2 septembre au calcul exact. Plus de huit milliards d'années de disque galactique, la collision avec Gaia-Encela-

dus, et toute la forge des éléments l'ont précédé. L'ère où l'énergie noire domine l'expansion commence un peu moins de 10 milliards d'années après le Big Bang, à peu près au moment où naît le Soleil wiki-chrono.

La photosphère solaire contient en masse 74,4 % d'hydrogène, 24,2 % d'hélium et 1,39 % d'autres éléments, $Z = 0{,}0139 \pm 0{,}0006$ Asplund 2021. Ce 1,39 % est la part forgée par les étoiles et leurs catastrophes : carbone, oxygène, fer, or. L'hydrogène, lui, date des premières minutes, et il ne faut pas écrire que tout, dans le Soleil ou dans nos corps, est poussière d'étoiles. Ces valeurs sont celles de la surface actuelle, un peu modifiée depuis la naissance, et le désaccord avec les modèles de l'intérieur solaire persiste Asplund 2021. On ne peut pas compter les générations d'étoiles qui ont précédé le Soleil : l'image juste est celle d'un recyclage, pas d'une lignée.

Le Soleil est plus riche en métaux que ses voisines du même âge, ce qui suggère une naissance plus près du centre galactique, puis une migration vers l'extérieur. Tsujimoto et ses coauteurs, à partir de 6 594 jumeaux solaires de Gaia DR3, concluent qu'une migration de plus de 3 kiloparsecs comme celle du Soleil est partagée par de nombreuses étoiles du disque interne. Le lien avec la formation de la barre galactique reste une hypothèse Tsujimoto 2026.

L'uranium 238 se transforme en plomb 206 avec une demi-vie de 4,5 milliards d'années, l'uranium 235 en plomb 207 avec une demi-vie de 0,70 milliard d'années. Parce que ces deux horloges tournent à des vitesses différentes, le rapport des deux plombs donne un âge sans qu'il faille connaître la quantité d'uranium. Clair Patterson obtient ainsi, en 1956, environ 4,55 milliards d'années pour les météorites. Le rapport entre les deux uraniums varie d'une météorite à l'autre, et les datations modernes le mesurent : $137{,}786 \pm 0{,}013$ wiki-pbpb.

Les inclusions riches en calcium et en aluminium des chondrites, tenues pour la première matière solide du Système solaire, donnent par cette méthode $4\,567{,}30 \pm 0{,}16$ millions d'années sur quatre échantillons Woitke 2024 Connelly 2012. C'est l'âge des premiers solides du disque ; un modèle les fait naître dans les 50 000 premières années de celui-ci Woitke 2024, et à l'échelle du livre la naissance du Soleil et l'âge du Système solaire se confondent. Depuis 2023, Desch et ses coauteurs, en accordant le plomb-plomb et l'aluminium 26, placent le $t = 0$ à $4\,568{,}42 \pm 0{,}24$ millions d'années et jugent que le plomb de certaines CAI a été perturbé Desch 2023 ; Piralla et ses coauteurs arrivent à 4 568,7 millions d'années Woitke 2024. L'écart, environ un million d'années ou 0,02 %, ne change rien au récit cosmique, mais compte pour la chronologie de la formation des planètes.

Notes

1. Calcul : $13{,}8 - 4{,}567 = 9{,}23$; $9{,}23 / 13{,}8 \approx 0{,}67$. Avec l'âge de 13,787 milliards d'années souvent cité pour l'analyse finale de Planck Planck 2018 (valeur non vérifiée sur la publication elle-même), le résultat est le même à la deuxième décimale. ↩

2. Calcul sur 13,8 milliards d'années ramenés à 365 jours (1 jour ≈ 37,8 millions d'années) : il reste $4{,}567 / 13{,}8 \times 365 \approx 120{,}8$ jours avant le 31 décembre à minuit, soit environ 244,2 jours écoulés depuis le 1er janvier, ce qui place le $t = 0$ le 2 septembre vers 5 h (vers 4 h pour un $t = 0$ de 4 568 millions d'années). « Fin août » est l'arrondi courant, qui assimile l'âge du Soleil aux deux tiers exacts de l'histoire. Les autres dates de l'année cosmique sont reprises des chapitres cités. ↩

3. Calculs : $13 - 4{,}57 \approx 8{,}4$ milliards d'années entre le début du disque ancien Xiang 2022 et le Soleil ; $10 - 4{,}57 \approx 5{,}4$ et $11 - 4{,}57 \approx 6{,}4$ milliards d'années entre la fusion avec Gaia-Enceladus Helmi 2018 Xiang 2022 et le Soleil. ↩

4. Début de l'ère dominée par l'énergie noire : « plus de 9,8 milliards d'années » après le Big Bang wiki-chrono. Calcul : $9{,}8 - 9{,}2 \approx 0{,}6$ milliard d'années, soit $0{,}6 / 13{,}8 \times 365 \approx 16$ jours de l'année cosmique. L'absence de lien causal entre les deux événements est un raisonnement de ce chapitre, fondé sur la différence d'échelle des deux phénomènes. ↩

5. Asplund et al. (2021) donnent les fractions de masse de la photosphère actuelle : X = 0,7438 ± 0,0054, Y = 0,2423 ± 0,0054, Z = 0,0139 ± 0,0006 Asplund 2021. La définition de la photosphère et le principe des raies d'absorption sont donnés ici dans leur forme générale, sans source particulière. ↩

6. Le seul fait requis est que les étoiles consomment l'hydrogène sans en produire : leur premier stade est la combustion de l'hydrogène en hélium wiki-stellarnuc. La composition des corps vivants et la part des étoiles dans le corps humain sont traitées au chapitre 19. ↩

7. Comparaison entre Y = 0,2423 ± 0,0054 pour la photosphère actuelle Asplund 2021 et Yp = 0,2449 ± 0,0040 pour l'hélium primordial Fields 2020. Les deux valeurs sont compatibles dans leurs incertitudes, la solaire étant même un peu plus basse. ↩

8. La formule « étoile de troisième génération », d'usage courant, n'est citée ici que pour être écartée ; aucune des sources de ce chapitre ne l'emploie. L'argument du mélange, qui s'appuie sur le partage des éléments entre sources établi par Kobayashi et al. Kobayashi 2020, est développé au chapitre 12. ↩

9. Tsujimoto et al. (2026) tirent de la richesse du Soleil une naissance dans le disque interne Tsujimoto 2026. L'existence d'un gradient de métallicité dans le disque et sa cause sont données ici dans leur présentation générale ; non vérifié sur une source primaire. ↩

10. Tsujimoto, T., Taniguchi, D., Recio-Blanco, A., Palicio, P. A., de Laverny, P. (2026), « Solar twins in Gaia DR3 GSP-Spec II. Age distribution and its implications for the Sun's migration », Astronomy & Astrophysics 707, L11. GSP-Spec désigne les paramètres spectroscopiques tirés des données Gaia. Les tolérances exactes retenues par les auteurs pour définir un jumeau solaire (température, gravité de surface, métallicité) ne sont pas reprises ici ; non vérifié. ↩

11. Le kiloparsec vaut environ 3 260 années-lumière (conversion usuelle). Trois kiloparsecs font donc environ 9 800 années-lumière. ↩

12. Les auteurs résument : « the large number of local twins with ages between 4 and 6 Gyr provides compelling evidence that the Sun's long-distance (>= 3 kpc) migration is shared by many inner disk stars » Tsujimoto 2026. Le raisonnement exposé ici reconstitue cette conclusion ; le détail de l'argumentation de l'article n'est pas vérifié. ↩

13. Définition générale de la demi-vie, valable pour toute désintégration radioactive ; les demi-vies citées dans ce chapitre viennent de Wikipédia, « Lead–lead dating » wiki-pbpb, et de Lichtenberg et al. (2023), qui donnent 4,47 milliards d'années pour l'uranium 238 et 704 millions d'années pour l'uranium 235 Lichtenberg 2023. ↩

14. Calculs : 4,567 / 4,5 ≈ 1,0 demi-vie pour l'uranium 238, d'où environ 50 % restant ; 4,567 / 0,70 ≈ 6,5 demi-vies pour l'uranium 235, d'où $2^{-6{,}5} \approx 1{,}1$ % restant. ↩

15. Principe énoncé dans Wikipédia, « Lead–lead dating » : les deux horloges tournant à des vitesses différentes, le rapport des deux plombs suffit à donner un âge wiki-pbpb. La formule exacte qui relie ce rapport au temps fait intervenir le rapport actuel des deux uraniums, d'où l'importance de sa mesure. ↩

16. Calcul : 4 567 − 4 550 = 17 millions d'années ; 17 / 4 567 ≈ 0,37 %. L'incertitude de la mesure de 1956 n'est pas vérifiée : la comparaison ne dit donc pas si la valeur de Patterson était compatible avec l'actuelle dans ses marges. ↩

17. Woitke et al. (2024) : « the CAIs were the first solid matter; therefore, their age can be equated with the age of the cosmochemical origin of the Solar System » Woitke 2024. Le sens de « réfractaire » est la définition usuelle. ↩

18. Woitke et al. (2024) : « Four CAIs have been dated by using the Pb-Pb chronometer, which yields a Solar System age of 4567.30 ±0.16 Myrs (Amelin 2010; Connelly 2012) » Woitke 2024. Les publications primaires d'Amelin et al. (2010) et de Connelly et al. (2012, Science 338, 651–655) sont citées d'après cette source ; non vérifiées directement. ↩

19. Woitke et al. (2024) situent la formation des CAI dans l'évolution du disque protoplanétaire Woitke 2024. Le scénario d'ensemble (effondrement d'un nuage, puis disque autour de l'étoile naissante) est donné dans sa forme générale. ↩

20. Calculs : 50 000 / 160 000 ≈ 0,31 ; 50 000 / 13,8 × 10^9 × 525 960 minutes ≈ 1,9 minute de l'année cosmique. ↩

21. Desch et al. (2023) font concorder les deux horloges sur des achondrites à refroidissement rapide Desch 2023. Les achondrites viennent de corps parents différenciés, qui ont fondu Lichtenberg 2023. La raison pour laquelle un refroidissement rapide synchronise les horloges (les deux systèmes se ferment au même moment) est donnée ici dans sa forme générale. ↩

22. Calcul : 4 568,42 − 4 567,30 = 1,12 million d'années, à comparer aux incertitudes de 0,24 et 0,16 million d'années. Desch et al. écrivent « significantly older than the ~4567.3 Myr inferred from direct measurements of Pb-Pb ages in CAIs » Desch

2023. ↩

23. Woitke et al. (2024) : « Recently, Piralla 2023 re-evaluated the age of the CAIs to 4568.7 Myrs through unified Al-Mg and Pb-Pb chronology » Woitke 2024. L'article de Piralla et al. (2023) est cité d'après cette source, sans son incertitude ; non vérifié directement. ↩

24. Calculs : 1,12 / 4 567 ≈ 0,025 % pour Desch et al. ; 1,4 / 4 567 ≈ 0,03 % pour Piralla et al. Arrondi d'ensemble : environ un million d'années, soit 0,02 %. ↩

25. Calcul : un million d'années vaut 525 960 / 13 800 ≈ 38 minutes de l'année cosmique ; 1,12 million d'années ≈ 43 minutes ; 1,4 million d'années ≈ 53 minutes. ↩

PARTIE V

Une planète et des vivants

LE SENS

Le Soleil né, la focale se resserre encore : du disque qui l'entoure à une planète, puis au vivant, puis à nous. Cette partie vient après le Soleil parce qu'elle ne fabrique plus d'éléments, elle les assemble : ce sont les atomes inventoriés au chapitre précédent qui deviennent roches, eau, air et corps. Elle vient avant le retour au cosmos entier parce que c'est ici que le « nous » du livre apparaît, et qu'il faut l'avoir rencontré pour comprendre, à la fin, d'où l'histoire est racontée.

L'ARC

Du disque de gaz et de poussière aux planètes, de la Terre et de la Lune à des océans et une atmosphère, de la chimie des étoiles à celle du vivant, puis des premiers microbes à l'humain : en 4,57 milliards d'années, les cendres d'étoiles deviennent des corps, et l'année cosmique, dépliée en entier, place sapiens dans les douze dernières minutes.

LA QUESTION

Comment la matière du Soleil est-elle devenue une planète habitée, puis des vivants qui racontent cette histoire ?

1. Le disque et les planètes brouillon
2. La Terre et la Lune brouillon
3. L'eau, les océans et l'air brouillon
4. Ce dont la vie est faite brouillon
5. Les dernières secondes de décembre brouillon

CHAPITRE 16

Le disque et les planètes

premiers millions d'années après le $t = 0$

brouillon · 7423 mots

16.1 Une autre horloge

Toutes les dates données jusqu'ici par ce livre ont été calculées. L'âge de l'Univers, le moment où la lumière se libère, celui des premières étoiles ou du début du disque de la Voie lactée se lisent dans le modèle standard de la cosmologie : on mesure l'étirement de la lumière d'un objet lointain, et le modèle convertit cet étirement en âge (→ chap. 7). Si le modèle devait être corrigé, ces dates bougeraient avec lui Hogg 1999. Avec le Soleil, la source des dates change. Le chapitre précédent a daté la naissance du Système solaire sur des grains pris dans des météorites, par la radioactivité de l'uranium (→ chap. 15). Ces dates se comptent à rebours depuis aujourd'hui. Elles ne doivent rien au modèle cosmologique : un grain de météorite a le même âge, que l'Univers ait 13,8 milliards d'années ou un peu plus.

Pour les premiers millions d'années du Système solaire, les géochimistes disposent de deux familles d'horloges, qui ne répondent pas à la même question. La première est celle que le chapitre précédent a décrite : les couples uranium-plomb. L'uranium 238 se change en plomb 206 avec une demi-vie de 4,5 milliards d'années, l'uranium 235 en plomb 207 avec une demi-vie de 0,70 milliard d'années wiki-pbpb ; la demi-vie est la durée au bout de laquelle la moitié des noyaux d'un isotope radioactif s'est transformée. Parce que les deux horloges tournent à des vitesses différentes dans la même pierre, le rapport des deux plombs suffit à donner un âge wiki-pbpb. Cet âge est absolu : il se lit en millions d'années avant le présent. Ces horloges tournent encore aujourd'hui, puisque leurs demi-vies sont comparables à l'âge du Système solaire, et elles servent aussi à dater les minéraux terrestres les plus anciens Lichtenberg 2023.

La seconde famille est celle des radioactivités dites éteintes. Deux d'entre elles portent l'essentiel de ce chapitre. L'aluminium 26 se désintègre en magnésium 26, avec une demi-vie d'environ 0,72 million d'années ; l'hafnium 182 se désintègre en tungstène 182, avec une demi-vie d'environ 8,9 millions d'années Lichtenberg 2023. Au regard des 4,57 milliards d'années écoulés, ces durées sont infimes. L'aluminium 26 présent à l'origine a entièrement disparu : au bout de dix demi-vies, soit environ sept millions d'années, il n'en restait plus qu'un millième[1]. D'où le nom de ces horloges : leur isotope père n'existe plus. Elles n'ont fonctionné qu'au début, tant qu'il en restait Lichtenberg 2023.

Une horloge éteinte ne se lit pas par l'isotope père, qui a disparu, mais par ce qu'il a laissé. Un minéral qui se forme alors que l'aluminium 26 est encore abondant en incorpore une partie, qui devient ensuite du magnésium 26. Aujourd'hui, ce minéral contient un excès de magnésium 26 par rapport à un minéral formé plus tard, quand l'aluminium 26 avait déjà décru. Plus l'excès est grand, plus le minéral s'est formé tôt[2]. Ce que l'on obtient ainsi n'est pas une date en années avant le présent, mais un écart de temps entre deux objets. En contrepartie, cet écart est très fin : une demi-vie de 0,72 million d'années fait varier l'excès de magnésium sensiblement d'un objet à l'autre dès que leurs formations sont séparées de quelques centaines de milliers d'années Lichtenberg 2023[3].

L'horloge hafnium-tungstène a une propriété supplémentaire, qui en fait l'instrument privilégié pour dater la formation des noyaux de métal des planètes et des astéroïdes. Les deux éléments n'ont pas les mêmes affinités chimiques : l'hafnium reste dans le silicate, la roche, tandis que le tungstène suit le fer Lichtenberg 2023. Quand un corps fond et que son métal coule vers le centre pour former un noyau, le tungstène part

avec le métal et l'hafnium reste dans le manteau rocheux. Si cette séparation a lieu pendant que l'hafnium 182 existe encore, celui-ci continue de produire du tungstène 182 dans le manteau, qui s'enrichit en cet isotope ; le noyau, privé d'hafnium, n'en reçoit plus. L'excès de tungstène 182 du manteau mesure donc la date de formation du noyau : il est d'autant plus grand que le noyau s'est formé tôt[4]. Avec sa demi-vie de 8,9 millions d'années, cette horloge couvre une période plus longue que celle de l'aluminium, les premières dizaines de millions d'années, ce qui la rendra centrale au chapitre suivant, quand il faudra dater le noyau de la Terre (→ chap. 17).

Les deux familles se complètent. Les radioactivités éteintes donnent l'ordre fin des événements, en écarts de temps ; l'uranium-plomb donne l'ancrage absolu Lichtenberg 2023. Pour convertir un écart en date, il faut ancrer l'horloge relative sur un objet dont on connaît à la fois l'écart et l'âge absolu. C'est dans ce raccord que se loge le désaccord décrit à la section suivante, et c'est pour cette raison que Steven Desch et ses coauteurs recommandent de dater les événements du début du Système solaire par rapport au t = 0, l'âge des premiers solides, plutôt qu'en âge absolu Desch 2023. Ce chapitre suit cette règle. Ses dates s'écrivent « tant de millions d'années après le t = 0 » ; l'âge absolu de ce zéro est traité à part.

16.2 Un zéro incertain d'un million d'années

Le t = 0 des géochimistes est l'âge des inclusions riches en calcium et en aluminium, désignées par le sigle anglais CAI. Ces petits grains clairs, pris dans certaines météorites non fondues, les chondrites, sont les plus vieux solides du Système solaire ; leur âge sert pour cette raison d'origine cosmochimique Woitke 2024 Lichtenberg 2023. Un modèle publié en 2024 par Peter Woitke et ses coauteurs les fait naître dans les 50 000 premières années de l'évolution du disque de gaz et de poussière qui entourait le Soleil naissant Woitke 2024. C'est un résultat de modèle, mais il suffit à confondre, à l'échelle de ce livre, la naissance du Soleil et l'âge du Système solaire (→ chap. 15).

Le chapitre précédent a exposé le désaccord sur la valeur de ce zéro ; les chiffres en sont rappelés ici parce que toute la suite en dépend. Quatre CAI datées par la méthode plomb-plomb donnent 4 567,30 millions d'années, avec une incertitude de 0,16 million d'années Woitke 2024 Connelly 2012. En 2023, Desch et ses coauteurs font concorder l'horloge plomb-plomb et l'horloge aluminium-magnésium sur des achondrites, des météorites issues de corps qui ont fondu, choisies parmi celles qui se sont refroidies rapidement : pour ces pierres, on connaît à la fois l'âge absolu et l'écart au t = 0, et l'on en déduit l'âge du t = 0 lui-même. Ils obtiennent 4 568,42 ± 0,24 millions d'années, une valeur « significativement plus ancienne » que la mesure directe sur les CAI Desch 2023. Selon eux, le plomb de certaines CAI aurait été perturbé après leur formation Desch 2023. La même année, Maxime Piralla et ses coauteurs, par une chronologie unifiée aluminium-magnésium et plomb-plomb, arrivent à 4 568,7 millions d'années Woitke 2024[5].

L'écart est d'environ un million d'années, soit 0,02 % de l'âge du Système solaire Desch 2023 Woitke 2024[6]. Pour le récit cosmique, il ne compte pas. Que le Soleil naisse 9,23 ou 9,232 milliards d'années après le Big Bang ne change ni sa place aux deux tiers de l'histoire, ni l'ordre des événements qui l'ont précédé ; l'incertitude sur l'âge de l'Univers lui-même, et les tensions du modèle qui le calcule, pèsent davantage (→ chap. 23).

Pour ce chapitre, le même million d'années est considérable. Les événements qui suivent se comptent en fractions de million d'années : des premiers petits corps moins de 0,3 million d'années après le t = 0, un noyau de Jupiter en moins d'un million d'années, un disque dissipé vers 4 à 5 millions d'années Lichtenberg 2023 Kruijer 2017. Sur une chronologie de cette finesse, un zéro qui se déplace d'un million d'années déplace d'autant chacune des dates exprimées en âge absolu. Qu'un événement ait eu lieu « il y a 4 567 mil-

lions d'années » peut signifier qu'il coïncide avec le t = 0 ou qu'il le suit d'un million d'années, soit, pour un corps chauffé par l'aluminium 26, la différence entre fondre et ne pas fondre, comme le montre la section suivante.

C'est ici que la règle de Desch et de ses coauteurs prend son sens. Un écart mesuré par une horloge éteinte entre une CAI et un autre objet ne dépend pas de l'âge absolu de la CAI. Si le zéro recule d'un million d'années, tous les événements reculent avec lui, et leurs écarts restent intacts Desch 2023[7]. Le désaccord ne porte que sur l'accrochage de la chronologie relative au calendrier absolu, pas sur la chronologie elle-même. Une réserve limite cette sécurité : les écarts donnés par l'aluminium 26 supposent que cet isotope était réparti de manière homogène dans le disque, et c'est précisément cette condition que teste l'article de Desch et de ses coauteurs, dont le titre annonce « un test de l'homogénéité de l'aluminium 26 » Desch 2023. Si l'aluminium 26 avait été plus abondant ici que là, un excès de magnésium plus faible pourrait signaler une région pauvre plutôt qu'une formation tardive.

16.3 Les petits corps d'abord, et fondus

Les chondrites sont des météorites pierreuses qui n'ont pas fondu depuis leur assemblage. Elles ont gardé les briques du disque dans l'état où elles se sont agglomérées. On y distingue trois ingrédients : les CAI ; des chondres, gouttelettes de silicate fondu puis figé, de taille millimétrique ou moins ; et une matrice de poussière fine qui cimente le tout Lichtenberg 2023. Les chondres ont été fondus, et vite refroidis, avant d'être incorporés à la roche : quelque chose, dans le disque, a chauffé brièvement ces grains à haute température[8]. Les autres météorites, achondrites et météorites de fer, viennent de corps parents qui ont fondu. Leurs grains d'origine ont disparu dans la fusion, et on les date en croisant âges radiométriques et modèles thermiques de leurs corps parents Lichtenberg 2023.

Ces corps parents étaient des planétésimaux, les premiers corps solides assez gros pour que leur gravité compte, de quelques kilomètres à quelques centaines de kilomètres[9]. Le résultat principal des dernières années, selon la synthèse de Tim Lichtenberg et de ses coauteurs, est leur précocité. Les premiers planétésimaux connus du Système solaire interne se sont formés moins de 0,3 million d'années après les CAI Lichtenberg 2023. Ceux du Système solaire externe se sont formés environ un million d'années plus tard : les temps d'accrétion moyens des deux groupes sont de 1,08 ± 0,05 million d'années pour le premier et de 2,27 ± 0,10 millions d'années pour le second Lichtenberg 2023. Moins de trois cent mille ans après l'apparition des premiers grains, des corps de plusieurs dizaines de kilomètres tournaient donc déjà autour du Soleil.

Cette précocité a une conséquence thermique. L'aluminium 26 était alors abondant, et sa désintégration dégage de la chaleur. Dans un grain de poussière isolé, cette chaleur s'échappe aussitôt. Dans un corps de plusieurs dizaines de kilomètres, elle reste piégée, car la roche conduit mal la chaleur et le trajet jusqu'à la surface est long[10]. Lichtenberg et ses coauteurs estiment que les corps de plus de 20 kilomètres de rayon formés dans les deux millions d'années suivant les CAI ont probablement fondu entièrement sous l'effet de l'aluminium 26 Lichtenberg 2023. Fondus, ils se sont différenciés : le métal, plus dense, a coulé vers le centre pour former un noyau, et le silicate est resté autour[11]. Un corps formé plus tard a reçu moins de chaleur : après deux millions d'années, il ne restait qu'environ un septième de l'aluminium 26 initial, et après trois millions d'années, environ un seizième[12].

D'où un ordre qui contredit l'intuition. On attendrait des roches les plus primitives qu'elles soient les plus anciennes, et des roches fondues qu'elles soient plus tardives, issues de corps qui ont eu le temps de mûrir. C'est l'inverse. Les plus anciens planétésimaux sont les corps différenciés dont viennent les météorites de fer et les achondrites ; les chondrites, plus primitives, viennent de corps formés plus tard, quand il ne res-

tait plus assez d'aluminium 26 pour les fondre Lichtenberg 2023. Une météorite de fer est un morceau du noyau métallique d'un des premiers corps du Système solaire, brisé par des collisions[13]. Une chondrite est un morceau d'un corps venu trop tard pour fondre. La primitivité d'une chondrite tient à une naissance tardive : son corps parent a manqué la chaleur qui aurait effacé ses grains.

Reste à comprendre comment des grains millimétriques deviennent en quelques centaines de milliers d'années des corps de dizaines de kilomètres. La croissance grain à grain se heurte à une difficulté connue des modélisateurs : au-delà d'une certaine taille, les grains qui se heurtent rebondissent ou se brisent plutôt que de coller, et ceux qui grossissent dérivent vers le Soleil sous l'effet du gaz[14]. Le mécanisme aujourd'hui privilégié contourne l'obstacle en sautant les tailles intermédiaires. Dans le disque, les solides se concentrent en « galets », des grains de taille millimétrique à centimétrique ; sous l'effet de leur interaction avec le gaz, ces galets s'amassent localement en nuages denses, qui s'effondrent sous leur propre gravité. Ce mécanisme, appelé instabilité de courant, produit directement des corps d'environ 100 kilomètres Lichtenberg 2023[15]. Si ce mécanisme est le bon, les planétésimaux ne sont pas passés par la taille d'un rocher, puis d'une colline : ils sont nés grands.

16.3.1 Ce qui reste débattu

Deux questions restent ouvertes dans ce tableau. La première porte sur la durée de formation des chondres. Datés un à un par plomb-plomb, les chondres étudiés par James Connelly et ses coauteurs en 2012 ont des âges qui s'étalent de 4 567,32 ± 0,42 à 4 564,71 ± 0,30 millions d'années, soit environ trois millions d'années à partir des CAI Connelly 2012. En 2017, Jean Bollard et ses coauteurs, sur 22 chondres datés individuellement, concluent au contraire que leur production primaire s'est limitée au premier million d'années après la formation du Soleil, et que les âges plus jeunes traduisent un long recyclage : des chondres refondus, ou remaniés, bien après leur première formation Bollard 2017. Les deux lectures s'opposent sur l'origine des âges jeunes, formation tardive dans un cas, reprise de grains anciens dans l'autre. Les départager demande de savoir si un chondre daté à trois millions d'années est un objet neuf ou un objet ancien remis à zéro ; la base ne décrit pas les critères par lesquels on les distingue[16]. L'enjeu dépasse les chondres : si l'essentiel des briques du disque était fabriqué en un million d'années, les planétésimaux internes précoces se sont assemblés à partir d'un matériau déjà presque complet.

La seconde question porte sur la suite de la croissance. Une fois formés les planétésimaux d'une centaine de kilomètres, deux voies sont possibles pour arriver aux embryons de planètes, des corps de la taille de la Lune ou de Mars. Dans la première, les planétésimaux se heurtent et s'agglomèrent entre eux. Dans la seconde, dite accrétion de galets, un planétésimal assez gros capture les galets qui dérivent dans le disque vers le Soleil et grossit à leurs dépens Lichtenberg 2023. Les deux voies ne donnent pas les mêmes vitesses de croissance, ni les mêmes compositions, puisque les galets capturés viennent de plus loin que le corps qui les capte[17]. La synthèse de Lichtenberg et de ses coauteurs les présente comme deux possibilités en discussion, sans trancher.

16.4 Jupiter et les deux réservoirs

Les météorites ne portent pas seulement une date. Elles portent aussi une signature de provenance. Les proportions de certains isotopes, qui varient légèrement d'une région du disque à l'autre, les rangent en deux super-familles. Les unes sont dites « carbonées », notées CC d'après l'anglais ; les autres « non carbonées », notées NC Lichtenberg 2023. Les noms viennent d'une classification des météorites ; la différence qui compte ici est isotopique. On interprète les météorites carbonées comme venant du Système solaire ex-

terne, et les non carbonées comme venant du Système solaire interne, la région où se sont formées les planètes rocheuses Lichtenberg 2023[18].

Ce qui est mesuré tient en trois éléments. D'abord la signature : chaque météorite appartient à l'une ou l'autre famille, sans intermédiaire. Ensuite les âges : les météorites de fer, qui sont des noyaux de planétésimaux précoces, peuvent être datées par le couple hafnium-tungstène, qui donne l'âge de formation de leur noyau. Thomas Kruijer et ses coauteurs ont croisé, sur des fers des deux familles, les isotopes du molybdène et du tungstène, qui donnent la famille, et les âges hafnium-tungstène Kruijer 2017. Le résultat est le troisième élément : les deux réservoirs ont coexisté et sont restés séparés dans l'espace entre environ un million et environ trois à quatre millions d'années après le t = 0 Kruijer 2017. Pendant ce temps, des corps se formaient de part et d'autre, et aucun ne mélangeait les deux signatures.

Ce résultat pose une difficulté physique. Un disque de gaz et de poussière n'est pas une structure figée : la poussière y dérive vers le Soleil, le gaz y est brassé[19]. Deux régions voisines devraient finir par se mélanger en bien moins de trois millions d'années. Quelque chose les a tenues séparées. Kruijer et ses coauteurs jugent que le mécanisme « le plus plausible » est la formation de Jupiter Kruijer 2017. Une planète géante qui grossit dans le disque y ouvre un sillon, une bande appauvrie en gaz le long de son orbite, qui arrête la dérive des solides venus de l'extérieur[20]. Les galets du Système solaire externe s'accumulent au bord de ce sillon au lieu de le traverser, et les deux réservoirs restent séparés tant que la barrière tient.

Pour que la barrière soit en place dès un million d'années, il faut que Jupiter ait grossi très vite. Kruijer et ses coauteurs en déduisent que son noyau a atteint environ 20 masses terrestres en moins d'un million d'années, puis environ 50 vers trois à quatre millions d'années Kruijer 2017. Jupiter serait ainsi la plus vieille planète du Système solaire, formée alors que les planétésimaux internes venaient à peine d'apparaître et bien avant que la Terre ne prenne forme Kruijer 2017.

Cette conclusion n'a pas le même statut que les données qui la portent. Les signatures isotopiques et les âges hafnium-tungstène des fers sont des mesures. La séparation des deux réservoirs pendant deux à trois millions d'années est une déduction directe de ces mesures. La barrière de Jupiter, elle, est une interprétation : elle explique la séparation, mais elle n'est pas observée, et les auteurs eux-mêmes la présentent comme le mécanisme le plus plausible, non comme le seul Kruijer 2017. La masse du noyau de Jupiter à un million d'années est la conséquence de cette interprétation, pas une mesure de Jupiter. Si un autre mécanisme de séparation était établi, par exemple une structure du disque qui aurait arrêté la dérive des solides sans planète, l'âge de Jupiter perdrait son principal appui[21]. La base de ce livre ne présente pas de mécanisme concurrent chiffré ; le verdict est donc provisoire.

La Terre, enfin, n'appartient à aucune des deux familles : elle est un mélange des deux réservoirs Lichtenberg 2023. La matière de notre planète n'est pas seulement celle du disque solaire proche du Soleil ; elle a reçu aussi de la matière venue d'au-delà de la barrière. Le moment et la manière de ce mélange ne sont pas établis par la base : ils supposent qu'à un certain stade, des corps du réservoir externe aient franchi la région de Jupiter[22]. Le chapitre sur l'eau reviendra sur ce passage, puisque l'eau terrestre pourrait en partie venir de corps nés au-delà de la ligne où la glace se condensait (→ chap. 18).

16.5 La fin du disque

Le disque de gaz n'a pas duré. D'après le paléomagnétisme des météorites, il s'est dissipé vers quatre à cinq millions d'années après le t = 0 Lichtenberg 2023. Le paléomagnétisme est l'étude du magnétisme fossile des roches : certains minéraux, en se refroidissant ou en se formant, enregistrent le champ magnétique am-

biant. Tant que le disque de gaz existait, il portait un champ magnétique, que des météorites ont enregistré ; les météorites formées plus tard n'en portent plus la trace[23]. Le moment où cette trace disparaît date la fin du disque de gaz.

Avant cette date, certains corps avaient déjà grandi beaucoup. Mars est le cas le mieux contraint. Elle aurait atteint la moitié de sa masse en 1,8 million d'années, avec une incertitude qui va de 0,8 à 2,7 millions d'années, et achevé l'essentiel de son accrétion en dix à quinze millions d'années Lichtenberg 2023. Son noyau se serait formé entre deux à quatre millions d'années et dix à quinze millions d'années après le t = 0, selon les auteurs Lichtenberg 2023. Mars a donc fait l'essentiel de sa croissance pendant la vie du disque. Elle n'a ensuite presque plus grossi. La lecture la plus probable, selon la fiche de chronologie, est que Mars est un embryon planétaire resté à l'état d'embryon : un de ces corps de la taille de Mars qui, ailleurs, se sont heurtés et fondus en planètes plus grandes, et qui, dans son cas, a échappé à ces collisions[24].

La Terre a pris un autre chemin. Pendant toute la vie du disque, la proto-Terre n'aurait pas dépassé environ 0,6 masse terrestre Lichtenberg 2023. À la dissipation du gaz, la future Terre n'était donc pas une planète achevée, mais un ou plusieurs embryons dont la masse cumulée restait au plus à six dixièmes de la masse actuelle[25]. Le reste est venu après, et autrement.

Tant que le gaz était là, il freinait les embryons. Un corps qui se déplace dans le gaz y perd un peu d'énergie de mouvement, et ce frottement amortit les écarts de son orbite : les orbites restent presque circulaires et bien séparées[26]. Le gaz parti, ce frein disparaît. Les attractions mutuelles des embryons déforment alors leurs orbites, qui s'allongent et finissent par se croiser. C'est le début de l'étape des impacts géants, où des corps de la taille de la Lune ou de Mars se percutent Lichtenberg 2023. Le chapitre suivant raconte ce qu'il en résulte pour la Terre, et pour la naissance de la Lune (→ chap. 17).

Les planètes géantes ont connu leur propre bouleversement. Plusieurs modèles de l'histoire du Système solaire font passer les planètes géantes par une phase d'instabilité : leurs orbites se modifient brutalement et leurs perturbations dispersent les petits corps Lichtenberg 2023[27]. La date de cette instabilité est discutée entre les modèles. En 2024, Graham Edwards et ses coauteurs en proposent une trace datée. Ils utilisent la thermochronologie potassium-argon : le potassium 40 se désintègre en argon 40, un gaz qui s'échappe de la roche tant qu'elle est chaude et qui s'y accumule quand elle refroidit. L'argon accumulé date le dernier épisode où la roche a été fortement chauffée, par exemple par un choc[28]. Sur des météorites issues d'astéroïdes, Edwards et ses coauteurs identifient ainsi un bombardement qui commence 11,3 millions d'années après la naissance du Soleil, et qu'ils attribuent à l'instabilité des planètes géantes Edwards 2024.

L'incertitude de cette date est large et asymétrique : de 9,5 millions d'années en plus à 6,6 millions d'années en moins Edwards 2024. Le bombardement peut donc avoir commencé entre environ 5 et environ 21 millions d'années après le t = 0[29]. Même avec cette marge, il tombe dans les premières dizaines de millions d'années, et le résultat va dans le sens des modèles qui placent l'instabilité des géantes tôt Lichtenberg 2023. Deux étapes séparent toutefois la mesure de l'interprétation. La mesure date un réchauffement des roches de la ceinture d'astéroïdes. L'attribution de ce réchauffement à des impacts, puis de ces impacts à l'instabilité des géantes, est l'interprétation des auteurs. C'est un résultat récent, d'une équipe.

Le chapitre s'arrête à ce point. Vers dix millions d'années après le t = 0, le gaz est parti, Jupiter est formée, Mars a presque fini de grandir, les géantes réarrangent peut-être leurs orbites. La Terre, elle, n'est pas finie : son noyau n'achèvera de se former qu'environ 30 millions d'années ou plus après le t = 0, et la Lune n'existe pas encore Lichtenberg 2023 (→ chap. 17).

16.6 La matinée du 2 septembre

L'année cosmique, que Carl Sagan a popularisée en 1977 dans *The Dragons of Eden* puis en 1980 dans la série *Cosmos*, ramène les 13,8 milliards d'années de l'histoire cosmique à douze mois wiki-cosmiccal. Un jour y vaut 37,8 millions d'années, une heure 1,58 million d'années, une minute environ 26 000 ans wiki-cosmiccal[30]. Le 1er janvier à 0 h est le début conventionnel des horloges cosmiques (→ chap. 1).

Le t = 0 du Système solaire tombe sur ce calendrier le 2 septembre, entre 4 h et 5 h du matin selon la valeur retenue[31]. Les chapitres précédents l'ont placé à la fin d'août, en suivant la frise de ce livre qui arrondit l'âge du Soleil aux deux tiers de l'histoire cosmique Connelly 2012 (→ chap. 15). Le calcul exact le décale de quelques heures : quand 9,23 milliards d'années se sont écoulés sur 13,8, 244,2 jours du calendrier sont passés, et le 31 août s'est achevé à minuit au bout de 243 jours[31]. La correction ne change rien au sens : le Soleil naît à la charnière de l'été et de la rentrée, avec quatre mois devant lui.

Sur ce calendrier, tout le contenu de ce chapitre tient dans une matinée. Les premiers planétésimaux du Système solaire interne apparaissent au plus une dizaine de minutes après le t = 0. Le noyau de Jupiter atteint ses 20 masses terrestres en moins de 40 minutes, si l'interprétation de Kruijer et de ses coauteurs est juste. Les chondres se forment dans les 40 premières minutes ou dans les deux premières heures, selon l'équipe qu'on suit. Le gaz du disque se dissipe vers 7 h ou 8 h. L'instabilité des géantes survient vers la fin de la matinée, avec une marge qui va de 7 h du matin au milieu de l'après-midi. Mars achève sa croissance entre 10 h et 14 h[32].

Le désaccord sur le t = 0 se lit sur la même échelle. Entre 4 567,3 et 4 568,7 millions d'années, il y a 1,4 million d'années, soit une cinquantaine de minutes de l'année cosmique [33]. Sur l'histoire entière, c'est une broutille : moins d'une heure sur 8 760. Sur la matinée du 2 septembre, cette heure recouvre les premiers planétésimaux et le noyau de Jupiter. Le calendrier rend visible ce que la section sur le zéro a établi en millions d'années : une incertitude négligeable pour situer le Soleil dans l'histoire cosmique est du même ordre que les intervalles qui séparent les premiers événements de la formation des planètes.

Une autre différence sépare les deux manières de compter. Ce calendrier suppose l'âge de 13,8 milliards d'années pour l'Univers : c'est lui qui fixe la longueur d'un jour et la date du 2 septembre wiki-cosmiccal. Si l'âge de l'Univers était révisé, toutes les heures de cette matinée glisseraient. Les écarts au t = 0, eux, n'en dépendent pas : un planétésimal formé 0,3 million d'années après les CAI l'est quel que soit l'âge du cosmos, puisque cet écart se lit dans l'excès de magnésium d'une pierre. L'année cosmique est une image, rapportée à un âge calculé ; la chronologie du disque est une mesure, faite sur des pierres. La version du calendrier que donne Wikipédia place d'ailleurs le Système solaire au 9 septembre, parce qu'elle retient d'autres âges pour l'Univers et pour le Soleil wiki-cosmiccal.

La journée n'est pas finie. Le noyau de la Terre n'achève de se former qu'environ 30 millions d'années ou plus après le t = 0 : sur le calendrier, vers 23 h le 2 septembre, ou plus tard Lichtenberg 2023[32]. La Lune naîtra entre le 3 et le 5 septembre, selon les datations qui s'opposent sur son âge Lichtenberg 2023 Nimmo 2024. Ce sont les sujets du chapitre suivant (→ chap. 17).

16.7 Ce qu'on ne sait pas

On ne connaît pas l'âge absolu du t = 0 à mieux qu'un million d'années près : 4 567,30 ± 0,16 millions d'années par le plomb-plomb direct sur quatre CAI Woitke 2024, 4 568,42 ± 0,24 par l'accord du plomb-plomb et de l'aluminium 26 Desch 2023, 4 568,7 selon Piralla et ses coauteurs Woitke 2024. Deux explica-

tions s'opposent : un plomb perturbé dans certaines CAI, qui rajeunirait leur âge apparent, ou un aluminium 26 réparti de façon inégale dans le disque, qui fausserait l'accord des deux horloges et jouerait contre la valeur la plus ancienne. Ce qui départagerait : des CAI au plomb démontré intact, et un test indépendant de l'homogénéité de l'aluminium 26. Confiance élevée sur l'âge à quelques millions d'années près ; modérée sur le choix entre les deux valeurs. Les écarts au t = 0 sont plus sûrs que le zéro lui-même, à la condition d'homogénéité près.

On ne sait pas combien de temps a duré la formation des chondres : environ trois millions d'années selon Connelly et ses coauteurs Connelly 2012, un million d'années suivi d'un long recyclage selon Bollard et ses coauteurs Bollard 2017. La question porte sur la nature des chondres datés au-delà du premier million d'années, neufs ou remaniés. La publication de Connelly et de ses coauteurs n'a pas été lue directement pour ce livre ; son contenu est connu par un résumé[34]. Confiance faible sur la durée.

On ne sait pas comment les planétésimaux ont grossi jusqu'aux embryons : par collisions entre eux, ou par capture des galets qui dérivaient dans le disque Lichtenberg 2023. Le mécanisme qui forme les planétésimaux eux-mêmes, l'instabilité de courant, est privilégié, mais la base ne dit pas quelle observation l'a imposé plutôt qu'une croissance progressive. Confiance modérée sur la formation directe de corps d'environ 100 kilomètres ; faible sur la croissance ultérieure.

On ne sait pas si c'est Jupiter qui a séparé les deux réservoirs du disque. La séparation est mesurée ; son attribution à un sillon ouvert par Jupiter est jugée la plus plausible par Kruijer et ses coauteurs Kruijer 2017. L'âge du noyau de Jupiter, moins d'un million d'années, dépend entièrement de cette interprétation. Confiance élevée sur l'existence des deux réservoirs et sur leur séparation entre environ un et trois à quatre millions d'années ; modérée sur la barrière de Jupiter ; plus faible encore sur la masse de son noyau à un million d'années.

On ne sait pas précisément quand les planètes géantes sont devenues instables. Le bombardement daté par Edwards et ses coauteurs à 11,3 millions d'années après la naissance du Soleil a une incertitude qui va de 5 à 21 millions d'années environ, et son attribution à l'instabilité des géantes est une interprétation Edwards 2024. C'est le résultat récent d'une équipe ; il favorise les modèles d'instabilité précoce Lichtenberg 2023. Une confirmation par une autre horloge ou sur d'autres familles de météorites le consoliderait.

16.8 Ce que ce chapitre démontre

À partir du Soleil, les dates du livre ne sont plus calculées dans le modèle cosmologique : elles se lisent dans des météorites. Deux familles d'horloges se complètent. Les radioactivités éteintes, l'aluminium 26 qui devient magnésium 26 avec une demi-vie d'environ 0,72 million d'années, l'hafnium 182 qui devient tungstène 182 avec une demi-vie d'environ 8,9 millions d'années, ne fonctionnent qu'au début et donnent des écarts de temps très fins ; le couple hafnium-tungstène date la formation des noyaux de métal, parce que l'hafnium reste dans la roche et que le tungstène suit le fer Lichtenberg 2023. Les couples uranium-plomb, par le rapport entre plomb 207 et plomb 206, donnent l'âge absolu wiki-pbpb.

Le t = 0 est l'âge des CAI, les premiers solides, nés selon un modèle dans les 50 000 premières années du disque Woitke 2024. Le plomb de quatre CAI donne 4 567,30 ± 0,16 millions d'années Woitke 2024 ; Desch et ses coauteurs obtiennent 4 568,42 ± 0,24 millions d'années en accordant le plomb et l'aluminium 26 Desch 2023, Piralla et ses coauteurs 4 568,7 Woitke 2024. Cet écart d'environ un million d'années, 0,02 % de l'âge, ne change rien au récit cosmique, mais il est du même ordre que les intervalles de la formation des planètes. D'où la règle de Desch et de ses coauteurs : dater en écarts au t = 0, qui restent valables quand le zéro bouge Desch 2023.

Les premiers planétésimaux du Système solaire interne se forment moins de 0,3 million d'années après les CAI, ceux du Système solaire externe environ un million d'années plus tard. Les corps de plus de 20 kilomètres de rayon formés dans les deux premiers millions d'années fondent entièrement sous la chaleur de l'aluminium 26. Les plus anciens planétésimaux sont donc les corps différenciés, d'où viennent les météorites de fer et les achondrites ; les chondrites, plus primitives, viennent de corps plus tardifs. Le mécanisme privilégié, l'instabilité de courant, forme directement des corps d'environ 100 kilomètres Lichtenberg 2023. La durée de formation des chondres, un ou trois millions d'années, et le mode de croissance ultérieur, collisions ou capture de galets, restent débattus Connelly 2012 Bollard 2017 Lichtenberg 2023.

Les météorites se rangent en deux réservoirs isotopiques, non carboné pour le Système solaire interne, carboné pour l'externe, restés séparés entre environ un et trois à quatre millions d'années ; la Terre est un mélange des deux Lichtenberg 2023 Kruijer 2017. Selon Kruijer et ses coauteurs, la séparation s'explique le plus plausiblement par Jupiter, dont le noyau aurait atteint environ 20 masses terrestres en moins d'un million d'années, ce qui en ferait la plus vieille planète ; c'est une interprétation, non une mesure Kruijer 2017.

Le gaz du disque se dissipe vers quatre à cinq millions d'années, d'après le paléomagnétisme des météorites. Mars a atteint la moitié de sa masse en 1,8 million d'années et achevé l'essentiel de sa croissance en dix à quinze millions d'années ; la proto-Terre, pendant la vie du disque, n'a pas dépassé 0,6 masse terrestre. Privées du frein du gaz, les orbites des embryons se déstabilisent et l'étape des impacts géants commence Lichtenberg 2023. Un bombardement de la ceinture d'astéroïdes, attribué à l'instabilité des planètes géantes, est daté à 11,3 (+9,5/−6,6) millions d'années après la naissance du Soleil Edwards 2024.

Sur l'année cosmique fondée sur 13,8 milliards d'années, le t = 0 tombe le 2 septembre entre 4 h et 5 h du matin, et non à la fin d'août ; tout ce chapitre tient dans la matinée de ce jour, et le désaccord sur le t = 0 n'y vaut qu'une cinquantaine de minutes. Ce calendrier dépend de l'âge de l'Univers ; les écarts au t = 0 n'en dépendent pas.

Notes

1. Calcul de ce chapitre à partir de la demi-vie donnée par la fiche de-la-nebuleuse-a-la-terre (≈ 0,72 Ma) : 10 × 0,72 ≈ 7,2 Ma ; $2^{-10} \approx 1/1\,024$. Pour l'hafnium 182 (≈ 8,9 Ma), dix demi-vies font environ 90 Ma. ↩

2. Principe usuel de la chronologie aluminium-magnésium, non détaillé dans la base ; déjà exposé au chapitre précédent. La fiche de-la-nebuleuse-a-la-terre dit seulement que ces horloges « ne servent qu'au début, tant que l'isotope père existe » et qu'elles « donnent des écarts relatifs très fins ». ↩

3. La base ne chiffre pas la résolution temporelle de la méthode. L'ordre de grandeur donné ici (quelques centaines de milliers d'années) se déduit de la demi-vie et de la valeur des écarts publiés (≲ 0,3 Ma entre les CAI et les premiers planétésimaux, 1,08 ± 0,05 Ma et 2,27 ± 0,10 Ma pour les temps d'accrétion moyens), qui supposent une précision meilleure que 0,1 Ma. La précision réelle d'une datation dépend de l'échantillon et n'est pas documentée ici. ↩

4. La fiche donne le principe (« l'hafnium reste dans le silicate, le tungstène suit le fer ») d'après Lichtenberg et al. (2023). Le raisonnement sur l'excès de tungstène 182 dans le manteau est l'explication de ce chapitre, selon la présentation usuelle de la méthode. La fiche signale que les âges de noyau varient parce que le métal d'un impacteur ne s'équilibre pas forcément avec le manteau : la méthode suppose un équilibre chimique qui n'est pas toujours atteint (voir le chapitre suivant). ↩

5. La publication de Piralla et al. (2023) n'a pas été lue ; elle est connue par la citation qu'en fait Woitke et al. (2024), qui ne donne pas son incertitude. Elle n'a pas de clé propre dans la base. Les publications primaires de la valeur de 4 567,30 Ma (Amelin et al. 2010, Connelly et al. 2012) n'ont pas été lues non plus ; le chiffre est vérifié sur Woitke et al. (2024). ↩

6. Calcul : 1,12 / 4 567 ≈ 0,025 % (Desch et al.) ; 1,4 / 4 567 ≈ 0,03 % (Piralla et al.). La fiche des-etoiles-a-nous arrondit à « environ 1 million d'années, soit 0,02 % ». ↩

7. Raisonnement de ce chapitre sur la recommandation de Desch et al. (2023), rapportée par la fiche de-la-nebuleuse-a-la-terre. Il vaut pour les écarts mesurés par une horloge relative ; les écarts calculés en soustrayant deux âges plomb-plomb dépendent, eux, de la justesse de chaque âge. ↩

8. Que les chondres aient été fondus puis figés découle de leur définition dans la fiche (« gouttelettes de silicate fondu »). La source de chaleur qui les a fondus (ondes de choc, éclairs, collisions, selon les hypothèses usuelles) n'est pas documentée dans la base. ↩

9. Définition usuelle ; la base emploie le terme sans le définir. La fourchette de tailles est indicative ; la base mentionne des corps de plus de 20 km de rayon et des corps d'environ 100 km. ↩

10. Explication usuelle de ce chapitre (rapport entre la chaleur produite, qui croît avec le volume, et la chaleur évacuée, qui dépend de la surface et de la conduction). La fiche dit seulement que l'aluminium 26 était « leur source de chaleur » et donne le seuil de 20 km de rayon. ↩

11. Description usuelle de la différenciation. La fiche l'implique en appelant « différenciés » les corps parents des fers et des achondrites, et en décrivant pour la Terre la « séparation en couches (noyau, manteau, puis croûte) ». ↩

12. Calcul de ce chapitre : $2 / 0{,}72 \approx 2{,}8$ demi-vies, $2^{-2{,}8} \approx 0{,}14$; $3 / 0{,}72 \approx 4{,}2$ demi-vies, $2^{-4{,}2} \approx 0{,}055$. Le seuil au-delà duquel un corps ne fond plus dépend aussi de sa taille, que ce calcul ne prend pas en compte. ↩

13. Que les météorites de fer soient des fragments de noyaux métalliques de planétésimaux est la présentation usuelle ; la fiche le suppose en appliquant aux fers la datation hafnium-tungstène des noyaux (Kruijer et al. 2017). Le mécanisme qui a exposé ces noyaux (collisions ayant brisé leurs corps parents) n'est pas documenté dans la base. ↩

14. Difficulté usuelle de la théorie de la formation des planétésimaux (« barrière du mètre », rebond, fragmentation, dérive radiale), non documentée dans la base. Elle est donnée ici pour faire comprendre pourquoi un mécanisme d'effondrement collectif est privilégié ; ce lien n'est pas établi par la fiche. ↩

15. La fiche écrit : « l'effondrement gravitationnel de nuages de "galets" (instabilité de courant), qui produit directement des corps d'environ 100 km ». La taille des galets et le mécanisme de concentration par interaction avec le gaz sont la présentation usuelle, non détaillée dans la base. « Instabilité de courant » traduit l'anglais *streaming instability*. ↩

16. La fiche indique que les âges plomb-plomb des chondres de Connelly et al. (2012) ont été lus dans un résumé, la publication étant restée inaccessible ; ceux de Bollard et al. (2017) viennent de l'article. Les critères qui distinguent un chondre formé tard d'un chondre ancien refondu ne sont pas documentés. ↩

17. Raisonnement de ce chapitre sur la différence entre les deux modes de croissance ; la fiche mentionne seulement l'alternative (« par collisions entre planétésimaux, ou par capture de galets en dérive dans le disque (pebble accretion) »). ↩

18. La fiche ne précise pas quels isotopes définissent la distinction en général ; pour les fers, Kruijer et al. (2017) utilisent ceux du molybdène et du tungstène. L'origine des noms « carbonée » et « non carbonée », tirés des chondrites carbonées, est la présentation usuelle. ↩

19. Présentation usuelle de la dynamique d'un disque protoplanétaire, non documentée dans la base. La fiche mentionne la « dérive » des galets dans le disque, dans le cadre de l'accrétion de galets. ↩

20. La fiche écrit : « l'ouverture d'un sillon dans le disque par Jupiter ». Le mécanisme par lequel ce sillon arrête la dérive des solides (accumulation des galets à son bord extérieur, où la pression du gaz est maximale) est la présentation usuelle, non détaillée dans la base. ↩

21. Le mécanisme alternatif cité ici est donné à titre d'exemple, selon la présentation usuelle ; aucune fiche de la base ne le documente. Il est signalé dans les manques. ↩

22. La fiche dit seulement que « la Terre est un mélange des deux » (Lichtenberg et al. 2023). La proportion de chaque réservoir et le moment du mélange ne sont pas donnés. La fiche mentionne, à propos de l'eau, des planétésimaux « dispersés vers l'intérieur par la croissance et la migration des géantes » (Izidoro et Piani 2022). ↩

23. La fiche dit : « une datation fondée sur le paléomagnétisme des météorites ». Le principe décrit ici (enregistrement du champ du disque par des minéraux, disparition de ce champ avec le gaz) est la présentation usuelle ; la base ne dit pas quelles météorites ont été mesurées. ↩

24. La fiche écrit : « Mars est ainsi, sans doute, un embryon planétaire resté à l'état d'embryon. » L'explication de ce qui a épargné Mars n'est pas donnée dans la base. L'incertitude sur la demi-masse (1,8 $+0{,}9/-1{,}0$ Ma) donne la fourchette 0,8 à 2,7 Ma. ↩

25. La fiche parle de « la proto-Terre » au singulier. Qu'il s'agisse d'un embryon principal ou de plusieurs corps destinés à former la Terre n'est pas précisé ; la formulation de ce chapitre laisse les deux possibilités ouvertes. ↩

26. La fiche écrit : « Privées de ce frein, les orbites des embryons se déstabilisent. » Le mécanisme d'amortissement par le gaz et la déstabilisation par les attractions mutuelles sont la présentation usuelle, non détaillée dans la base. ↩

27. La fiche ne décrit pas les modèles d'instabilité des planètes géantes (ni leur nom, ni le déroulement de l'instabilité). Elle dit seulement que le résultat d'Edwards et al. (2024) « va dans le sens des modèles qui placent cette instabilité tôt ». La description donnée ici est générale. ↩

28. La fiche donne la méthode (« thermochronologique (^{40}K-^{40}Ar) ») sans la décrire. Le principe exposé (l'argon 40 s'échappe à chaud et s'accumule à froid) est la présentation usuelle de la thermochronologie potassium-argon. ↩

29. Calcul de ce chapitre : 11,3 − 6,6 = 4,7 Ma ; 11,3 + 9,5 = 20,8 Ma. ↩

30. Les valeurs d'un jour et d'une heure sont celles de Wikipédia, « Cosmic Calendar » (fiche vie-et-humanite). La minute se calcule : 1,58 Ma / 60 ≈ 26 000 ans. L'attribution à Sagan vient de la même source. ↩

31. Calcul de ce chapitre, conforme à la fiche de-la-nebuleuse-a-la-terre (« 2 septembre, vers 4 h ») et à la fiche vie-et-humanite (« vers 5 h »). Avec 4 567,3 Ma : (13,8 − 4,5673) / 13,8 × 365 ≈ 244,20 jours écoulés ; 243 jours écoulés correspondent au 1er septembre à 0 h, donc 244,20 jours au 2 septembre vers 4 h 45. Avec 4 568,7 Ma : ≈ 244,16 jours, soit le 2 septembre vers 3 h 55. La fiche frise-cosmique écrit « vers la fin août » ; le chapitre sur le Soleil, « à la toute fin d'août » ; le chapitre sur les dernières secondes de décembre, « le 1er septembre vers 5 heures », ce qui semble décalé d'un jour. ↩↩

32. Calculs de ce chapitre, à partir d'un t = 0 vers 4 h 45 (valeur de 4 567,3 Ma) et d'une heure cosmique de 1,58 Ma, cohérents avec le tableau de la fiche de-la-nebuleuse-a-la-terre (section 11). Planétésimaux : 0,3 Ma ≈ 11 min. Jupiter : 1 Ma ≈ 38 min. Chondres : 1 à 3 Ma ≈ 38 min à 1 h 55. Disque : 4 à 5 Ma ≈ 2 h 30 à 3 h 10 après le t = 0. Instabilité : 11,3 Ma ≈ 7 h 10 après, marge de 4,7 à 20,8 Ma, soit de 3 h à 13 h 10 après. Mars : 10 à 15 Ma ≈ 6 h 20 à 9 h 30 après. Noyau terrestre : 30 Ma ≈ 19 h après. Lune : 4,53 Ga tombe le 3 septembre vers 4 h, 4,43 Ga le 5 septembre vers 20 h. Avec un t = 0 de 4 568,7 Ma, retirer environ 50 minutes à toutes ces heures. ↩↩

33. Calcul : 1,4 Ma / 1,58 Ma par heure ≈ 0,89 heure, soit environ 53 minutes. Pour l'écart de Desch et al. (1,12 Ma), environ 43 minutes. ↩

34. La fiche signale `connelly2012` comme non vérifié : lu dans un résumé de moteur de recherche, la publication étant inaccessible après plusieurs tentatives. ↩

CHAPITRE 17

La Terre et la Lune

brouillon · 6496 mots

17.1 Le disque se vide, les embryons se heurtent

Le chapitre 16 s'est arrêté sur une Terre inachevée. Vers quatre à cinq millions d'années après le t = 0, l'âge des premiers solides du Système solaire, le gaz du disque qui entourait le jeune Soleil s'est dissipé ; la date vient du magnétisme fossile que certaines météorites ont enregistré tant que le disque portait un champ magnétique Lichtenberg 2023. Ce gaz freinait les embryons de planètes, des corps de la taille de la Lune ou de Mars, et gardait leurs orbites presque circulaires et bien séparées. Sans lui, leurs attractions mutuelles allongent ces orbites, qui finissent par se croiser. Les embryons se percutent : c'est l'étape des impacts géants Lichtenberg 2023.

À ce moment, la future Terre n'est pas une planète. Pendant toute la vie du disque, la proto-Terre n'aurait pas dépassé environ 0,6 masse terrestre Lichtenberg 2023. Quatre dixièmes au moins de sa masse actuelle restaient donc à venir, et ils ne pouvaient plus venir du gaz ni des galets qui dérivaient en lui, puisque le disque était parti. Ils sont venus pour l'essentiel par collisions entre gros corps[1].

Mars sert de témoin. Elle aurait atteint la moitié de sa masse en 1,8 million d'années (entre 0,8 et 2,7 millions d'années) et achevé l'essentiel de son accrétion en dix à quinze millions d'années Lichtenberg 2023. Presque toute sa croissance a eu lieu pendant la vie du disque ou peu après : Mars est probablement un embryon planétaire resté à l'état d'embryon, un corps du même genre que ceux dont la Terre s'est nourrie Lichtenberg 2023. La différence entre les deux planètes voisines tient au calendrier. Mars a fini de grandir avant que le gaz ne disparaisse, ou peu après ; la Terre a fait le gros de sa croissance après, par une suite de chocs étalée sur des dizaines de millions d'années.

Une planète qui se construit par chocs successifs n'a pas de date de naissance au sens où un grain de météorite en a une. Chaque impact géant apporte de la masse, fond une partie de la planète, mélange des matériaux d'origines différentes. La question « quel âge a la Terre ? » se décompose alors en plusieurs questions, chacune avec son horloge : quand son métal s'est-il séparé de sa roche, quand a eu lieu le dernier grand choc, quand la surface a-t-elle refroidi, quand se sont formés les premiers minéraux qui nous sont parvenus.

17.2 Le métal coule : l'horloge hafnium-tungstène

La Terre n'est pas homogène. Elle a un noyau de fer, entouré d'un manteau de silicates, les minéraux qui forment la roche, surmonté d'une croûte mince Lichtenberg 2023. Cette structure en couches s'appelle la différenciation. Elle se produit quand la planète est assez chaude pour fondre en grande partie : le métal, plus dense, coule vers le centre, et la roche reste au-dessus. Les impacts géants fournissaient cette chaleur en abondance[2].

Cette séparation se date avec l'horloge hafnium-tungstène, dont le chapitre 16 a décrit le principe : l'hafnium 182, qui se désintègre en tungstène 182 avec une demi-vie d'environ 8,9 millions d'années, reste dans le silicate, alors que le tungstène suit le fer ; l'excès de tungstène 182 que garde le manteau dit quand le métal est parti Lichtenberg 2023. Au bout d'une dizaine de demi-vies, quatre-vingt-dix millions d'années

environ, il ne restait presque plus d'hafnium 182, et l'horloge devient de moins en moins sensible aux événements tardifs[3].

Appliquée au manteau terrestre, cette horloge donne, selon la synthèse de Tim Lichtenberg et de ses coauteurs, une formation du noyau, et donc une fin de la phase d'accrétion principale de la Terre, environ trente millions d'années ou plus après le t = 0. Certaines estimations la repoussent jusqu'à 142 ± 25 millions d'années, en la liant à l'impact qui a formé la Lune Lichtenberg 2023. L'écart entre ces deux valeurs dépasse un facteur quatre, et il a une cause précise.

Le calcul suppose que le métal, en coulant, s'est mis en équilibre chimique avec le manteau qu'il traversait, c'est-à-dire qu'il a échangé son tungstène avec la roche environnante avant de rejoindre le noyau. Or le métal d'un impacteur ne s'équilibre pas forcément avec le manteau terrestre Lichtenberg 2023. S'il plonge vers le centre sans échanger, il emporte une signature en tungstène qui n'est pas celle du manteau, et l'excès de tungstène 182 mesuré aujourd'hui ne se traduit plus en une date unique : selon la part de métal qui s'est équilibrée, le même excès donne un noyau précoce ou un noyau tardif[4]. La fourchette des âges publiés reflète d'abord cette incertitude sur le degré d'équilibre, plutôt qu'une imprécision de la mesure.

La séparation en couches n'est donc pas un instant, mais une série d'épisodes, que chaque horloge date à sa manière Lichtenberg 2023. Chaque impact géant apporte son métal, qui rejoint le noyau en s'équilibrant plus ou moins avec le manteau. L'« âge du noyau » que donne l'horloge hafnium-tungstène est une date moyenne, pondérée par un modèle de ces épisodes. Les trente millions d'années sont une borne basse : le noyau n'a pas pu achever de se former plus tôt, mais il a pu le faire plus tard.

La conséquence la plus solide tient dans une phrase. L'âge de 4 567 millions d'années, que l'on donne souvent comme celui de la Terre, est celui des premiers solides du disque, les inclusions réfractaires des météorites que l'on désigne par le sigle CAI, datées par le plomb comme l'a montré le chapitre 15 Woitke 2024. La Terre n'a pas cet âge : elle achève sa croissance principale au moins trente millions d'années après ces premiers grains Lichtenberg 2023. Ces trente millions d'années font moins de 1 % de l'âge du Système solaire[5], mais ils séparent deux objets différents, un grain de poussière du disque et une planète.

17.3 Le choc qui fait la Lune

La Lune est un satellite anormalement gros pour sa planète, et sa naissance a longtemps été une énigme. Depuis une conférence tenue en 1984, l'hypothèse dominante est celle d'un impact géant : un corps de la taille d'une planète aurait heurté la jeune Terre, et la Lune se serait assemblée à partir des débris projetés en orbite Canup 2021[6].

L'hypothèse s'est imposée parce qu'elle explique quatre faits d'un coup, selon la revue de Robin Canup et de ses coauteurs : la rotation rapide de la Terre primitive, le petit noyau de la Lune, une Lune chaude à sa naissance, et la similitude des isotopes de l'oxygène entre la Terre et la Lune Canup 2021[7]. Les isotopes sont les variantes d'un même élément qui diffèrent par le nombre de neutrons de leur noyau ; leurs proportions varient légèrement d'une région du disque protoplanétaire à l'autre et servent de signature de provenance, comme pour les deux réservoirs de météorites décrits au chapitre 16.

Le quatrième fait est aussi celui qui pose problème. Le modèle dit « canonique » fait intervenir un impacteur de la taille de Mars en fin d'accrétion. Il rend compte de la dynamique, c'est-à-dire de la masse de la Lune et de la rotation du système Terre-Lune. Mais dans ce modèle, la Lune se forme surtout à partir de la matière de l'impacteur, pas de celle de la Terre Canup 2021. Un corps formé ailleurs dans le disque devrait porter une autre signature isotopique que la Terre ; une Lune faite de l'impacteur devrait donc différer de la

Terre. Elle ne diffère presque pas : les deux corps ont des compositions isotopiques presque identiques, ce qui s'expliquerait le plus simplement si la Lune s'était formée à partir de la Terre Canup 2021. Certains ont parlé d'une « crise isotopique » du modèle de l'impact géant Canup 2021.

Cette crise a suscité de nombreux scénarios d'impact concurrents Canup 2021, qui cherchent soit une Lune tirée surtout de la Terre, soit un mélange assez complet pour que les deux corps finissent avec la même signature. Ce qui est établi se sépare nettement en deux. Qu'un impact géant ait formé la Lune n'est pas contesté : c'est l'hypothèse qui explique les quatre faits. Lequel, avec quels paramètres, reste ouvert Canup 2021. Pour départager les scénarios, il faudrait des signatures isotopiques d'autres éléments, capables de distinguer un mélange complet d'une Lune tirée de la Terre, et des simulations qui reproduisent à la fois la dynamique et la chimie[8].

L'impact géant se raccorde aussi à l'horloge du noyau. Les estimations les plus tardives de la formation du noyau terrestre, vers 142 millions d'années après le t = 0, la lient justement à l'impact qui a formé la Lune Lichtenberg 2023. Le dernier grand choc aurait apporté le dernier métal. Dater la Lune, c'est donc aussi dater la fin de la construction de la Terre.

17.4 Quel âge pour la Lune ?

La Lune ne se date pas sur la Terre. Les dates viennent des échantillons rapportés par les missions Apollo, et des horloges longues qui y tournent encore, en particulier l'uranium-plomb Barboni 2017. Ces horloges ne donnent pas l'instant du choc. Elles donnent la date à laquelle un minéral lunaire s'est formé, ou la dernière fois qu'il a été assez chauffé pour que son horloge soit remise à zéro[9]. Passer de cette date à celle de l'impact demande un raisonnement.

Avant 2017, les estimations s'étalaient d'environ 4,45 à 4,47 milliards d'années, pour une Lune formée une centaine de millions d'années après le t = 0, à 4,35 à 4,42 milliards d'années pour un impact tardif, jusqu'à 150 à 200 millions d'années après le t = 0 Barboni 2017. L'écart atteint une centaine de millions d'années, plus de trois fois la durée qui sépare le t = 0 de la formation du noyau terrestre dans l'estimation basse.

En 2017, Melanie Barboni et ses coauteurs datent des zircons des échantillons d'Apollo 14. Le zircon, un silicate de zirconium, se date par l'uranium-plomb et résiste à presque tout, ce qui en fait l'objet préféré de ces datations Valley 2014 Lichtenberg 2023[10]. Barboni et ses coauteurs combinent deux horloges : l'uranium-plomb, qui donne l'âge de cristallisation de chaque grain, et le couple lutécium-hafnium, qui renseigne sur l'histoire de la matière dont le grain est issu[11]. Ils concluent que la croûte lunaire s'était déjà différenciée à 4,51 milliards d'années, ce qui place la formation de la Lune dans les soixante premiers millions d'années environ après la naissance du Système solaire Barboni 2017. Le raisonnement tient à l'ordre des événements : il faut que la Lune existe, qu'elle ait fondu et qu'elle se soit séparée en couches avant qu'une croûte différenciée puisse cristalliser des zircons. Un âge de croûte est donc une borne : la Lune est au moins aussi vieille.

Restait à expliquer pourquoi tant d'échantillons lunaires donnent des âges plus jeunes, groupés vers 4,35 milliards d'années. En 2024, Francis Nimmo, Thorsten Kleine et Alessandro Morbidelli proposent une réponse : cet amas d'âges n'aurait rien à voir avec la naissance de la Lune, il daterait une refonte de la Lune provoquée par les marées Nimmo 2024. Les déformations que la gravité terrestre impose à la Lune y dissipent de la chaleur ; selon ce modèle, cette chaleur aurait refondu une partie de l'intérieur lunaire vers 4,35 milliards d'années[12]. La refonte aurait remis à zéro les horloges d'une partie des roches, qui affichent depuis l'âge de la refonte et non celui de leur première formation. Nimmo et ses coauteurs en concluent que la

Lune s'est formée bien avant 4,35 milliards d'années, « probablement » entre 4,43 et 4,53 milliards d'années Nimmo 2024.

Un même âge mesuré peut donc dater deux événements différents. L'amas à 4,35 milliards d'années peut être lu comme la naissance de la Lune, ou comme la remise à zéro tardive d'une Lune déjà ancienne : les deux lectures s'appuient sur les mêmes mesures et divergent sur ce qu'elles mesurent. La lecture tardive circule encore : dans sa synthèse de 2025 sur les premières traces de vie, Frances Westall place l'impact qui forme la Lune vers 4,35 milliards d'années Westall 2025. Le même chiffre sert ainsi, dans deux publications à un an d'intervalle, à dater la naissance de la Lune et à dater autre chose.

La tendance récente favorise une Lune ancienne, formée dans les cent premiers millions d'années, mais sans consensus Barboni 2017 Nimmo 2024. Il n'y a donc pas d'âge unique à donner, mais une fourchette : de 4,43 à 4,53 milliards d'années pour l'estimation la plus récente, avec une borne de 4,51 milliards d'années tirée des zircons d'Apollo 14 si l'on suit Barboni et ses coauteurs. Les deux résultats sont compatibles : une Lune née entre 4,51 et 4,53 milliards d'années satisfait l'un et l'autre[13]. Ce qui départagerait les lectures, ce sont des échantillons lunaires dont on saurait qu'ils n'ont pas été remis à zéro par la refonte, et un modèle thermique de la Lune qui reproduise, seul, la distribution des âges observés.

17.5 Après le dernier choc : placage tardif et océan de magma

Le manteau terrestre contient trop de certains métaux. Le fer, l'or, le platine ont une forte affinité pour le métal : pendant la formation du noyau, ils auraient dû couler avec lui[14]. Or le manteau en contient plus que ce que prévoit cette séparation Lichtenberg 2023.

L'explication proposée est un « placage tardif ». Après le dernier impact géant, donc après la dernière grande formation de noyau, de la matière chondritique, semblable à celle des météorites non fondues, aurait continué à tomber sur la Terre. Sa masse aurait été faible, au plus 0,5 à 0,8 % de celle de la Terre, mais elle est arrivée trop tard pour que ses métaux rejoignent le noyau : ils sont restés dans le manteau, où ils forment l'excès mesuré aujourd'hui Lichtenberg 2023. L'or lui-même a été forgé bien avant, dans des collisions d'étoiles à neutrons et peut-être d'autres sites (→ chap. 13) ; le placage tardif ne dit que la manière dont une partie de cet or est restée dans le manteau au lieu de couler au centre[15].

Le placage tardif repose sur un raisonnement par défaut : il comble l'écart entre l'abondance mesurée et celle que prévoit la formation du noyau, et sa masse est une borne supérieure déduite de cet écart Lichtenberg 2023. Il tient tant qu'aucun autre processus ne peut garder ces métaux dans le manteau.

Le dernier impact laisse la surface de la Terre dans un état qu'aucune roche actuelle n'enregistre directement. Elle est couverte d'un océan de magma, de la roche fondue sur une grande profondeur, surmonté d'une atmosphère de vapeur de silicates Lichtenberg 2023. Selon les modèles, la solidification complète d'une planète de la taille de la Terre prend de 10^5 à 10^8 ans, de cent mille à cent millions d'années Lichtenberg 2023. La fourchette couvre trois ordres de grandeur et reste une hypothèse de modèle. La durée dépend de la vitesse à laquelle la chaleur s'échappe vers l'espace, que l'atmosphère recouvrant le magma freine plus ou moins selon son épaisseur[16]. Les deux bornes ne racontent pas la même Terre. À cent mille ans, la surface est solide presque aussitôt après le choc ; à cent millions d'années, elle reste fondue pendant une durée comparable à tout ce qui s'est passé depuis le $t = 0$.

Les impacts géants n'ont pas seulement fondu la Terre : ils ont aussi emporté son air. La Terre a pu posséder très tôt une enveloppe primordiale d'hydrogène et d'hélium, captée dans le disque de gaz. Mais elle est aujourd'hui fortement appauvrie en néon et en argon, et cet appauvrissement indique que les impacts géants

ont arraché ses atmosphères successives Lichtenberg 2023. Le raisonnement passe par les gaz rares. Le néon et l'argon ne se combinent presque pas chimiquement ; ils ne peuvent pas se cacher dans les roches sous forme de minéraux. Une planète qui aurait conservé l'atmosphère captée dans le disque en garderait une grande quantité ; leur rareté sur Terre signale que cette atmosphère a été perdue[17].

L'air et l'eau que la Terre possède aujourd'hui sont donc venus après, par un dégazage de l'intérieur et par des apports dont l'origine est discutée : c'est l'histoire du chapitre 18.

17.6 Ce qui reste de la Terre hadéenne

Les géologues appellent Hadéen le premier éon de l'histoire de la Terre, d'environ 4,567 à environ 4,0 milliards d'années. De sa croûte, il ne reste presque rien Lichtenberg 2023. Les roches de cette époque ont été refondues, enfouies, érodées ou transformées par la chaleur et la pression[18]. La Terre, restée géologiquement active, a recyclé sa surface. C'est pour cette raison que la Lune et les météorites gardent des témoins plus anciens que la Terre elle-même.

La plus vieille roche entière connue avec certitude a 4,02 milliards d'années : c'est le complexe de gneiss d'Acasta, au Canada Lichtenberg 2023. Un gneiss est une roche transformée par la chaleur et la pression, dont les minéraux se sont réorganisés en bandes[19]. Il date la fin de l'Hadéen, pas son début.

Pour remonter plus haut, il ne reste que des grains. Dans les collines de Jack Hills, en Australie occidentale, des quartzites d'environ trois milliards d'années contiennent des zircons dits détritiques : des cristaux arrachés par l'érosion à des roches plus anciennes, transportés, puis déposés dans un sédiment qui a durci à son tour Mojzsis 2001. La roche d'où venaient ces grains a disparu ; les grains ont survécu, parce que le zircon résiste à presque tout Lichtenberg 2023. Leurs âges uranium-plomb atteignent environ 4,4 milliards d'années Lichtenberg 2023. Le record est un grain de 4 404 ± 8 millions d'années, publié en 2001 par Simon Wilde et ses coauteurs Wilde 2001[20].

Un âge aussi ancien sur un grain unique appelait une objection : dans un vieux cristal, le plomb produit par l'uranium peut se déplacer et se concentrer par endroits, et une mesure tombant sur un tel amas donnerait un âge faussement élevé[21]. En 2014, John Valley et ses coauteurs ont examiné un zircon de 4,4 milliards d'années par tomographie à sonde atomique, une technique qui reconstruit en trois dimensions la position des atomes dans un minuscule volume du cristal. L'âge hadéen a été confirmé, ce qui écarte l'objection d'un plomb déplacé ; le titre de leur article qualifie ce grain de zircon « postérieur à l'océan de magma » Valley 2014. Valley et ses coauteurs rappellent que les zircons sont la seule preuve physique qui subsiste des premières phases de l'évolution terrestre Valley 2014. Ces grains portent aussi des traces chimiques qui renseignent sur la croûte, l'état d'oxydation et le climat de la Terre hadéenne Lichtenberg 2023 ; ce qu'ils disent de l'eau est l'objet du chapitre 18.

Le cas de Nuvvuagittuq, au Québec, montre ce que coûte l'absence de zircons. Cette ceinture de roches vertes, des roches volcaniques anciennes transformées, pourrait être plus vieille qu'Acasta. Son âge va d'environ 3,75 à 4,32 milliards d'années selon la méthode wiki-nuvvuagittuq. Les 3,75 milliards d'années viennent de l'uranium-plomb sur les zircons de granites qui recoupent la ceinture : ces granites se sont mis en place à travers des roches déjà là, et leur âge est donc un minimum pour la ceinture[22]. Les 4,32 milliards d'années viennent d'une autre horloge, le samarium-néodyme, appliquée aux roches elles-mêmes wiki-nuvvuagittuq. La controverse vient de ce que ces roches basaltiques n'ont presque pas de zircons propres wiki-nuvvuagittuq : on ne peut pas leur appliquer l'horloge la plus éprouvée, et celle qu'on leur applique à la place est discutée[23]. En 2025, un filon de gabbro, une roche magmatique sombre, qui recoupe l'une des uni-

tés de la ceinture a été daté de 4 157 millions d'années wiki-nuvvuagittuq. Par le même raisonnement, cet âge est un minimum pour la roche recoupée : il ne tranche pas entre 4,16 et 4,32 milliards d'années, mais il repousse l'âge minimal de 3,75 à 4,16 milliards d'années et plaide pour une origine hadéenne wiki-nuvvuagittuq. Si cet âge se confirmait, Nuvvuagittuq serait plus ancienne qu'Acasta d'environ 140 millions d'années au moins[24].

Une règle en découle. Vers 4,4 milliards d'années, on date des minéraux, pas des roches Lichtenberg 2023. Dire que « la plus vieille roche a 4,4 milliards d'années » confond un grain survivant et la roche disparue dont il est tombé. La plus vieille roche entière sûre a 4,02 milliards d'années ; une autre a peut-être 4,16 milliards d'années ou plus ; entre ces âges et la formation de la Terre, il n'y a que des grains et, plus haut encore, des pierres venues d'ailleurs.

17.7 Une date, un objet, une horloge

Chaque date de ce chapitre se lit sur un objet précis, avec une horloge précise, et ne vaut que pour l'événement que cet objet a enregistré.

Le t = 0 se lit dans les CAI des météorites ; ses valeurs s'échelonnent de 4 567,3 à 4 568,7 millions d'années selon les auteurs, et le chapitre 15 a dit pourquoi Woitke 2024 Desch 2023. La fin du disque de gaz se lit dans le magnétisme fossile des météorites, vers quatre à cinq millions d'années après ce zéro Lichtenberg 2023. Le noyau de la Terre se lit dans le tungstène 182 du manteau terrestre : trente millions d'années ou plus après le t = 0, peut-être jusqu'à 142 ± 25 millions d'années selon le degré d'équilibre du métal Lichtenberg 2023. La Lune se lit dans les zircons rapportés par Apollo, par l'uranium-plomb et le lutécium-hafnium : croûte différenciée dès 4,51 milliards d'années, naissance probablement entre 4,43 et 4,53 milliards d'années Barboni 2017 Nimmo 2024. Les premiers grains de Terre se lisent dans les zircons australiens des Jack Hills, par l'uranium-plomb : 4 404 ± 8 millions d'années Wilde 2001 Valley 2014. La première roche entière se lit dans un gneiss canadien : 4,02 milliards d'années Lichtenberg 2023.

Ces objets ne sont pas de même nature. Les deux premières dates viennent de pierres tombées du ciel, la troisième du manteau terrestre tout entier, la quatrième d'un autre astre, les deux dernières de la croûte terrestre. Aucune ne date « la Terre » en bloc. Chacune date un moment où un système chimique s'est fermé : un grain qui cristallise, un métal qui se sépare, une roche qui refroidit. C'est la condition de toute datation radiométrique : l'horloge ne compte qu'à partir du moment où l'isotope fils ne peut plus s'échapper ni l'isotope père entrer, et elle se remet à zéro si ce système se rouvre[25]. L'amas lunaire à 4,35 milliards d'années en est l'exemple : une refonte a rouvert le système, et les horloges affichent la refonte.

Le Grand Bombardement tardif montre ce qui arrive quand on oublie cette règle. Selon cette hypothèse, la Terre et la Lune auraient subi un pic d'impacts entre environ 4,1 et 3,8 milliards d'années, déduit des âges des roches lunaires rapportées par Apollo Lichtenberg 2023. L'hypothèse est aujourd'hui contestée, pour deux raisons Lichtenberg 2023. La première tient à l'horloge : ces âges ont été obtenus par la méthode argon-argon, une variante de la thermochronologie potassium-argon présentée au chapitre 16, qui date le dernier épisode où la roche a été assez chaude pour laisser fuir son argon, et ces âges argon-argon posent problème Lichtenberg 2023[26]. La seconde tient à l'objet : le bassin d'Imbrium, un immense cratère d'impact de la face visible de la Lune, a pu projeter ses débris sur une grande partie de la surface et contaminer les échantillons d'Apollo Lichtenberg 2023[27]. Si beaucoup d'échantillons datent en fait un seul et même gros impact, leur regroupement dans le temps signale un biais d'échantillonnage plutôt qu'un pic de bombardement. Le relevé des impacts pourrait alors s'expliquer par un déclin graduel Lichtenberg 2023.

Le cas du Grand Bombardement tardif ne dit pas que les dates étaient fausses. Il dit que la question « de quoi cet âge est-il l'âge ? » n'avait pas été assez posée. Le même avertissement vaut pour l'âge de la Lune et pour Nuvvuagittuq. Lire une date sans savoir quel objet la porte, et quel événement a fermé son horloge, revient à lire un cachet de la poste sans savoir quelle lettre il a timbré.

Sur l'année cosmique, où un jour vaut 37,8 millions d'années et une minute environ 26 000 ans wiki-cosmiccal, le t = 0 tombe le 2 septembre vers 4 h 45, comme l'a établi le chapitre 16. Le disque de gaz disparaît vers 7 h ou 8 h. Le noyau terrestre achève de se former, dans l'estimation basse, vers minuit, à la fin du 2 septembre ; dans l'estimation haute, le 5 septembre vers 23 h, à un jour et demi près. La Lune naît entre le 3 septembre vers 4 h et le 5 septembre vers 20 h ; la croûte lunaire datée par Barboni et ses coauteurs existe dès le 3 septembre en fin d'après-midi. L'océan de magma se solidifie en quelques minutes cosmiques ou en deux jours et demi, selon le modèle. Le plus vieux zircon des Jack Hills cristallise le 6 septembre vers midi et demi. La refonte lunaire par les marées tombe à minuit entre le 7 et le 8 septembre. Le filon de gabbro de Nuvvuagittuq se met en place le 13 septembre vers 1 h, le gneiss d'Acasta se forme le 16 septembre dans l'après-midi. Le Grand Bombardement tardif, s'il a eu lieu, s'étendrait du 14 au 22 septembre[28].

Tout ce qui fait la Terre et la Lune tient ainsi dans les quatre premiers jours de septembre, et les plus vieux grains de Terre que l'on puisse tenir entre les doigts arrivent le sixième. Les plus vieilles roches entières attendent la deuxième quinzaine. Ce calendrier dépend de l'âge de l'Univers, qui fixe la longueur d'un jour ; les dates elles-mêmes, lues dans des pierres et comptées depuis aujourd'hui, n'en dépendent pas.

17.8 Ce qu'on ne sait pas

On ne sait pas quand le noyau terrestre a achevé de se former à mieux qu'un facteur quatre près : trente millions d'années ou plus après le t = 0, peut-être jusqu'à 142 ± 25 millions d'années Lichtenberg 2023. La mesure n'est pas en cause ; ce qui manque, c'est la part du métal des impacteurs qui s'est mise en équilibre avec le manteau avant de rejoindre le noyau. Ce qui départagerait : des modèles d'impact qui fixent ce degré d'équilibre, ou une autre horloge sensible à la même séparation. Confiance élevée sur la borne basse (pas avant trente millions d'années) ; faible sur la date de fin.

On ne sait pas quel impact a formé la Lune. L'impact géant est acquis ; le modèle canonique, avec un impacteur de la taille de Mars, rend compte de la dynamique mais prédit une Lune faite surtout de l'impacteur, ce que contredit la quasi-identité isotopique de la Terre et de la Lune Canup 2021. Les scénarios concurrents sont nombreux, et aucun ne s'est encore imposé en reproduisant à la fois la masse, la rotation et la signature isotopique. Confiance élevée sur l'existence d'un impact géant ; faible sur ses paramètres.

On ne sait pas l'âge de la Lune à mieux qu'une centaine de millions d'années près. La lecture ancienne (croûte différenciée dès 4,51 milliards d'années, naissance probablement entre 4,43 et 4,53 milliards d'années) gagne du terrain Barboni 2017 Nimmo 2024 ; la lecture tardive, vers 4,35 milliards d'années, est encore reprise dans des synthèses récentes Westall 2025. L'opposition porte sur ce que date l'amas d'âges à 4,35 milliards d'années : la naissance, ou une refonte. Confiance modérée pour une Lune ancienne.

On ne sait pas combien de temps l'océan de magma a mis à se solidifier : de 10^5 à 10^8 ans selon les modèles Lichtenberg 2023. La durée dépend de l'atmosphère qui recouvrait le magma, elle-même mal connue. Confiance faible.

On ne sait pas l'âge de Nuvvuagittuq : entre 3,75 et 4,32 milliards d'années selon la méthode, avec un minimum de 4,16 milliards d'années fixé par le filon de gabbro daté en 2025 wiki-nuvvuagittuq. Ce résultat est

récent et n'a pas encore été confronté à d'autres datations. Confiance modérée sur une origine hadéenne ; faible sur l'âge exact.

On ne sait pas si le Grand Bombardement tardif a eu lieu. Le pic d'impacts entre 4,1 et 3,8 milliards d'années est contesté pour des raisons d'horloge (les âges argon-argon) et d'échantillonnage (la contamination par Imbrium), et un déclin graduel pourrait rendre compte des données Lichtenberg 2023. Des échantillons prélevés loin d'Imbrium, sur d'autres régions de la Lune, permettraient de trancher. Confiance faible dans l'hypothèse d'un pic.

17.9 Ce que ce chapitre démontre

Le gaz du disque se dissipe vers quatre à cinq millions d'années après le t = 0, d'après le magnétisme fossile des météorites ; privés de ce frein, les embryons se heurtent, et l'étape des impacts géants commence. La proto-Terre n'avait alors pas dépassé environ 0,6 masse terrestre, quand Mars avait atteint la moitié de sa masse en 1,8 million d'années et achevé l'essentiel de sa croissance en dix à quinze millions d'années : Mars est probablement un embryon resté embryon, la Terre une planète construite par chocs Lichtenberg 2023.

Le noyau terrestre se date par l'horloge hafnium-tungstène, parce que l'hafnium reste dans le silicate et que le tungstène suit le fer. Il achève de se former trente millions d'années ou plus après le t = 0, jusqu'à 142 ± 25 millions d'années selon certaines estimations ; l'écart vient du degré d'équilibre entre le métal des impacteurs et le manteau Lichtenberg 2023. L'âge de 4 567 millions d'années est celui des premiers solides, pas celui de la Terre Woitke 2024.

La Lune naît d'un impact géant, hypothèse dominante depuis 1984 parce qu'elle explique la rotation rapide de la Terre primitive, le petit noyau lunaire, la Lune chaude et la similitude isotopique. Le modèle canonique prédit pourtant une Lune faite surtout de l'impacteur, ce que contredit l'identité isotopique des deux corps : l'impact est acquis, ses paramètres ne le sont pas Canup 2021. Les zircons d'Apollo 14 montrent une croûte différenciée dès 4,51 milliards d'années Barboni 2017 ; l'amas d'âges à 4,35 milliards d'années daterait une refonte par les marées, et la Lune serait née probablement entre 4,43 et 4,53 milliards d'années Nimmo 2024. Un même âge mesuré peut dater deux événements différents.

Après le dernier choc, un placage tardif de matière chondritique, au plus 0,5 à 0,8 % de la masse terrestre, expliquerait l'excès de fer, d'or et de platine du manteau. La surface est un océan de magma, dont la solidification prend de 10^5 à 10^8 ans selon les modèles. L'appauvrissement de la Terre en néon et en argon indique que les impacts géants ont arraché ses atmosphères primitives Lichtenberg 2023.

De l'Hadéen, il ne reste presque rien. La plus vieille roche entière sûre est le gneiss d'Acasta, 4,02 milliards d'années Lichtenberg 2023 ; le plus vieux grain, un zircon détritique des Jack Hills, a 4 404 ± 8 millions d'années Wilde 2001, et l'âge d'un grain de 4,4 milliards d'années a été confirmé par tomographie à sonde atomique Valley 2014. Nuvvuagittuq a entre 3,75 et 4,32 milliards d'années selon la méthode, et au moins 4,16 milliards d'années d'après un filon qui la recoupe wiki-nuvvuagittuq. Vers 4,4 milliards d'années, on date des minéraux, pas des roches.

Chaque date se lit sur un objet et une horloge : les CAI pour le t = 0, le manteau pour le noyau, les zircons lunaires pour la Lune, les zircons australiens pour les premiers grains, un gneiss canadien pour la première roche. Le Grand Bombardement tardif, tiré d'âges argon-argon d'échantillons peut-être contaminés par Imbrium, est aujourd'hui contesté Lichtenberg 2023. Sur l'année cosmique, tout cela tient dans la première quinzaine de septembre : le noyau à la fin du 2, la Lune entre le 3 et le 5, le plus vieux zircon le 6 vers midi, la refonte lunaire à l'entrée du 8, Acasta le 16.

Notes

1. Lichtenberg, Schaefer, Nakajima et Fischer (2023), « Geophysical Evolution During Rocky Planet Formation », *Protostars and Planets VII*, arXiv:2203.10023, pour la borne de 0,6 masse terrestre et pour l'étape des impacts géants après la dissipation du gaz. La part de masse apportée après le disque par de petits corps, plutôt que par des embryons, n'y est pas chiffrée ; « pour l'essentiel » est une lecture de ce chapitre. ↩

2. Description générale de la différenciation planétaire. Lichtenberg et al. (2023) décrivent un océan de magma après l'impact lunaire ; que les impacts géants aient fourni l'essentiel de la chaleur de fusion de la Terre est une présentation courante, non vérifiée sur une source primaire. ↩

3. Calcul : $10 \times 8{,}9 \approx 89$ millions d'années ; $2^{-10} \approx 1/1\,024$. Après 60 millions d'années (environ 6,7 demi-vies), il reste environ 1 % de l'hafnium 182 initial. ↩

4. Lichtenberg et al. (2023) : les chiffres varient parce que le métal de l'impacteur ne s'équilibre pas forcément avec le manteau terrestre. L'image d'un noyau d'impacteur qui plonge sans échanger son tungstène illustre ce cas ; quels modèles donnent les 30 et les 142 millions d'années n'est pas vérifié ici. ↩

5. Calcul : $30 / 4\,567 \approx 0{,}66$ %. Pour la borne de 142 millions d'années : environ 3,1 %. ↩

6. Canup, Righter, Dauphas et al. (2021), « Origin of the Moon », chapitre de *New Views of the Moon II*, arXiv:2103.02045. Le lieu et l'organisation de la conférence de 1984 ne sont pas précisés ici. ↩

7. Canup et al. (2021). La manière dont l'impact rend compte de chacun des trois premiers faits (rotation transmise par le choc, débris pauvres en fer, énergie du choc) n'est pas détaillée ici. ↩

8. Déduction de ce chapitre. Les systèmes isotopiques utilisés pour tester les scénarios et l'état actuel de la confrontation entre modèles ne sont pas documentés ici. ↩

9. Principe général des datations radiométriques : une horloge date la fermeture d'un système (cristallisation, refroidissement) et peut être remise à zéro par un réchauffement suffisant. ↩

10. Valley et al. (2014), « Hadean age for a post-magma-ocean zircon confirmed by atom-probe tomography », *Nature Geoscience* 7, 219–223 : les zircons « can be dated using the U–Th–Pb geochronometer ». Leur résistance : Lichtenberg et al. (2023). ↩

11. Barboni, Boehnke, Keller et al. (2017), « Early formation of the Moon 4.51 billion years ago », *Science Advances* 3, e1602365 : « Our data indicate differentiation of the lunar crust by 4.51 billion years ». Le principe du couple lutécium-hafnium (lutécium 176 → hafnium 176) et la manière exacte dont il contraint la différenciation ne sont pas vérifiés ici. ↩

12. Nimmo, Kleine et Morbidelli (2024), « Tidally driven remelting around 4.35 billion years ago indicates the Moon is old », *Nature* 636, 598–602. Le chauffage de marée est un mécanisme général ; l'étape de l'évolution orbitale de la Lune où le modèle place la refonte n'est pas vérifiée ici. ↩

13. Déduction de ce chapitre : la borne de Barboni et al. (Lune formée avant 4,51 milliards d'années) et la fourchette de Nimmo et al. (4,43 à 4,53) se recouvrent entre 4,51 et 4,53 milliards d'années. Que Nimmo et al. discutent explicitement le résultat de Barboni et al. n'est pas vérifié. ↩

14. Lichtenberg et al. (2023). Les géochimistes appellent ces éléments « sidérophiles », d'après leur affinité pour le fer. La valeur de l'excès mesuré n'est pas donnée ici. ↩

15. Précision de ce chapitre : Lichtenberg et al. (2023) parlent de l'excès dans le manteau ; la part de l'or aujourd'hui exploité dans la croûte qui proviendrait du placage tardif n'est pas établie ici. ↩

16. Lichtenberg et al. (2023) donnent la fourchette de 10^5 à 10^8 ans et décrivent une atmosphère de vapeur de silicates puis de volatils dégazés. Le rôle de l'atmosphère dans la vitesse de refroidissement est une présentation courante ; les facteurs qui ouvrent la fourchette ne sont pas vérifiés ici. ↩

17. Lichtenberg et al. (2023) : le fort appauvrissement de la Terre en néon et en argon indique que les impacts géants ont arraché ses atmosphères. La valeur de l'appauvrissement et la référence à laquelle il se mesure (Soleil, météorites) ne sont pas données ici. ↩

18. Lichtenberg et al. (2023) : il ne reste presque rien de la croûte hadéenne. La liste des processus de destruction est générale ; la date de début de la tectonique des plaques n'est pas établie ici. ↩

19. Définition courante. Lichtenberg et al. (2023) : « the oldest known whole rocks are 4.02 Ga in the Acasta Gneiss Complex ». ↩

20. Wilde, Valley, Peck et Graham (2001), « Evidence from detrital zircons for the existence of continental crust and oceans on the Earth 4.4 Gyr ago », *Nature* 409, 175–178 ; publication lue par son résumé. L'ordre de grandeur (environ 4,4 milliards d'années) est recoupé par Lichtenberg et al. (2023). ↩

21. L'objection est décrite ici dans sa forme courante (migration du plomb radiogénique et concentration en amas) ; Valley et al. (2014) disent que la tomographie à sonde atomique confirme l'âge hadéen, sans que le détail de leur argument soit vérifié ici. ↩

22. Principe de recoupement : une roche qui en traverse une autre lui est postérieure. « Roches vertes » : roches volcaniques anciennes métamorphisées, définition courante. ↩

23. Wikipédia (en), « Nuvvuagittuq Greenstone Belt », consulté le 30 septembre 2026, qui résume des publications de 2007 (environ 3 750 millions d'années), 2012 (samarium-néodyme, 4 321 millions d'années) et juin 2025 (filon de gabbro, 4 157 millions d'années). Les publications originales n'ont pas été lues ; les raisons pour lesquelles l'application du samarium-néodyme est contestée ne sont pas vérifiées. ↩

24. Calcul : $4\,157 - 4\,020 = 137$ millions d'années. Le recoupement ne fixe qu'un minimum. ↩

25. Principe général des datations radiométriques. ↩

26. Lichtenberg et al. (2023) disent que les âges argon-argon posent problème sans que la nature du problème soit précisée ici. ↩

27. Lichtenberg et al. (2023) : le bassin d'Imbrium a pu contaminer les échantillons d'Apollo. La description du bassin (grand cratère de la face visible) est courante ; la concentration des sites d'Apollo sur la face visible n'est pas vérifiée ici. ↩

28. Échelle d'après Wikipédia (en), « Cosmic Calendar » (37,8 millions d'années par jour, 1,58 million par heure ; la minute vaut donc environ 26 000 ans). Calculs de ce chapitre sur 13,8 milliards d'années ramenés à 365 jours, avec un $t = 0$ de 4 567,3 millions d'années (244,20 jours écoulés). Disque : 4 à 5 millions d'années, soit 2 h 30 à 3 h 10 après le $t = 0$. Noyau à 30 millions d'années : environ 19 h après, vers minuit. Noyau à 142 millions d'années : 3,76 jours, le 5 septembre vers 23 h ; $\pm$ 25 millions d'années valent $\pm$ 16 heures environ. Lune : 4,53 milliards d'années, 3 septembre vers 4 h ; 4,43, 5 septembre vers 20 h ; 4,51, 3 septembre vers 17 h. Océan de magma : 10^5 ans $\approx$ 4 minutes ; 10^8 ans $\approx$ 2,6 jours. Zircon de 4 404 millions d'années : 6 septembre vers 12 h 30. Refonte à 4,35 milliards d'années : minuit entre le 7 et le 8 septembre. Gabbro de 4 157 millions d'années : 13 septembre vers 1 h. Acasta à 4,02 milliards d'années : 16 septembre vers 16 h. Grand Bombardement tardif : 4,1 milliards d'années, 14 septembre vers 13 h ; 3,8 milliards d'années, 22 septembre vers 12 h. Avec un $t = 0$ de 4 568,7 millions d'années, les dates exprimées en écart au $t = 0$ (disque, noyau) avancent d'environ 50 minutes ; les dates absolues (Lune, zircons, roches) ne bougent pas. ↩

CHAPITRE 18

L'eau, les océans et l'air

brouillon · 6744 mots

18.1 Deux atomes du premier jour, un atome d'étoile

Une molécule d'eau compte trois atomes : deux d'hydrogène, un d'oxygène. Ces deux éléments n'ont pas été fabriqués au même endroit ni au même moment. L'histoire de chacun a déjà été racontée dans ce livre. L'eau est la première matière commune où ces deux histoires se rejoignent atome par atome.

L'hydrogène vient du premier jour. La nucléosynthèse primordiale, qui fabrique les premiers noyaux, se déroule pour l'essentiel entre trois et vingt minutes après le début de l'expansion wiki-chrono. Vers vingt minutes, la température et la densité sont devenues trop basses pour que la fusion continue de manière significative wiki-bbn. Cette fabrique ne produit que de l'hydrogène, de l'hélium et des traces de lithium. Il n'existe aucun noyau stable de masse 5 ou 8, et la chaîne des fusions s'arrête faute de ces deux marches fields2014pdg. Le chapitre 5 a décrit cette course entre la désintégration des neutrons et le refroidissement. Depuis, la quantité d'hydrogène de l'Univers n'a fait que baisser. Les étoiles le brûlent pour en faire de l'hélium, puis des éléments plus lourds, et aucune ne le fabrique. Tout élément de masse 12 ou plus, du carbone à l'uranium, a été formé dans les étoiles Kobayashi 2020, et l'hydrogène n'en fait pas partie. Chaque atome d'hydrogène d'une molécule d'eau date donc des premières minutes[1]. Sur l'année cosmique, qui ramène les 13,8 milliards d'années de l'histoire à douze mois, ces vingt minutes tiennent dans le premier dixième de microseconde du 1er janvier[2].

L'oxygène vient des étoiles. Il fait partie des éléments dits « alpha », avec le magnésium, le silicium, le soufre et le calcium. Selon les modèles d'évolution chimique de Chiaki Kobayashi, Amanda Karakas et Maria Lugaro, ces éléments sont surtout produits dans les étoiles massives, puis éjectés par les supernovas à effondrement de cœur, l'explosion qui suit l'écroulement du cœur de fer d'une étoile massive Kobayashi 2020. Le chapitre 12 a décrit cette forge, qui monte de l'hélium au carbone, puis à l'oxygène et au silicium, et s'arrête au fer. Le mot « surtout » a un sens précis. Il résume un partage calculé par un modèle, qui combine les rendements de chaque type d'étoile et l'histoire de la formation d'étoiles de la Galaxie. Ce partage vaut pour l'ensemble de la Galaxie, et aucune mesure ne l'établit pour un atome particulier. La base ne permet donc pas de dire quelle fraction exacte de l'oxygène terrestre sort des supernovas. Elle permet de dire que c'est la source principale. Sur l'année cosmique, cet oxygène a été forgé à un moment quelconque entre janvier et la fin août, avant la naissance du Soleil, et par des générations d'étoiles qu'on ne sait pas compter.

Une molécule d'eau réunit donc les deux usines du livre. En nombre d'atomes, elle vient pour deux tiers du premier jour et pour un tiers des étoiles. En masse, le rapport s'inverse : un atome d'oxygène pèse environ seize fois un atome d'hydrogène, si bien que l'hydrogène ne fait qu'un neuvième de la masse de l'eau et l'oxygène les huit neuvièmes[3]. Le corps humain rend ce double compte concret. L'eau y représente environ 53 % de la masse d'un adulte, avec de fortes variations individuelles wiki-corps. L'essentiel des atomes d'hydrogène du corps, qui sont à eux seuls 62 % de ses atomes, est lié dans cette eau wiki-corps. Le chapitre 19 fera le compte complet pour tous les éléments du vivant.

Les deux histoires des atomes sont connues. Celle de leur assemblage sur la Terre l'est beaucoup moins. Des molécules d'eau existaient dans le disque de gaz et de poussière qui entourait le jeune Soleil Izidoro 2022. La Terre s'est formée dans une région de ce disque où l'eau ne pouvait pas rester à l'état solide.

18.2 Trop près du Soleil

Dans le disque du jeune Soleil, la température baissait avec la distance à l'étoile. L'eau n'y condensait en glace qu'au-delà d'une certaine distance, la « ligne des glaces », où la température tombait sous 170 kelvins Izidoro 2022, soit environ -103 °C[4]. En deçà, l'eau restait à l'état de vapeur. Les solides qui s'y assemblaient, grains, galets puis planétésimaux, ne pouvaient donc pas l'incorporer sous forme de glace. La région où se formaient les planètes rocheuses, dont la Terre, était trop chaude pour que l'eau y soit incorporée sur place Izidoro 2022.

Le chapitre 16 a montré que le disque se partageait en deux réservoirs isotopiques, que l'on reconnaît aux proportions de certains isotopes dans les météorites. Les météorites « non carbonées » (NC) viendraient du Système solaire interne, les « carbonées » (CC) du Système solaire externe, et ces deux réservoirs sont restés séparés entre environ un et trois à quatre millions d'années après le $t = 0$, l'âge des premiers solides du disque Lichtenberg 2023 Kruijer 2017. La ligne des glaces et cette frontière isotopique sont deux notions distinctes. La première se définit par une température, la seconde par une signature. La base ne dit pas comment elles se placent l'une par rapport à l'autre[5]. Elles pèsent pourtant dans le même sens. Les matériaux riches en eau se trouvaient au loin, et la Terre s'est formée près du Soleil.

Or la Terre est humide, et bien plus que ne le suggèrent ses océans. En comptant le manteau, les océans et l'atmosphère, elle contient l'équivalent d'environ 3 à 11 océans d'eau Lichtenberg 2023. L'unité de ce compte est la masse des océans actuels. L'océan et l'atmosphère se mesurent directement. La largeur de la fourchette vient donc de l'eau stockée dans le manteau, sous forme d'hydrogène pris dans les minéraux[6]. Même à la borne basse, l'essentiel de l'eau de la planète ne se voit pas : elle est dans la roche.

Le problème se pose ainsi. Une planète née là où l'eau ne gelait pas contient plusieurs océans d'eau. Il faut qu'elle soit arrivée d'ailleurs, ou qu'elle ait été présente sous une autre forme que la glace. Ces deux voies sont exactement les deux pistes étudiées aujourd'hui.

18.3 Venue de loin, ou déjà là

La première piste fait venir l'eau de l'extérieur. Au-delà de la ligne des glaces, les planétésimaux incorporaient de la glace et pouvaient être riches en eau. Pour qu'ils nourrissent la Terre, il faut qu'ils aient traversé le disque vers l'intérieur. André Izidoro et Laurette Piani invoquent pour cela la croissance et la migration des planètes géantes, qui auraient dispersé vers l'intérieur une partie de ces corps Izidoro 2022. Le mécanisme est gravitationnel. Une planète géante qui grossit ou change d'orbite perturbe les petits corps voisins, et certains sont projetés vers le Soleil. Le chapitre 16 a présenté Jupiter comme une barrière probable entre les deux réservoirs, et signalé une instabilité des planètes géantes datée vers 11 millions d'années après le $t = 0$ Edwards 2024. Il a aussi établi que la Terre est un mélange des réservoirs interne et externe Lichtenberg 2023. De la matière du réservoir externe a donc bien atteint la région de la Terre. La base ne dit ni quand ni par quel épisode, et elle ne relie pas l'instabilité datée par Edwards et ses coauteurs à l'apport d'eau[7].

La seconde piste renverse le problème. La ligne des glaces empêche l'incorporation d'eau sous forme de glace, mais pas l'incorporation d'hydrogène sous une autre forme, lié aux minéraux de la roche elle-même. En 2020, Laurette Piani et ses coauteurs ont mesuré l'hydrogène des chondrites à enstatite. Ce sont des météorites non fondues, dominées par un silicate de magnésium, l'enstatite, et formées dans un milieu très pauvre en eau[8]. Ces météorites sont isotopiquement proches de la Terre, ce qui en fait les meilleurs témoins disponibles des matériaux dont elle s'est assemblée Lichtenberg 2023. Piani et ses coauteurs y

trouvent assez d'hydrogène pour livrer au moins trois fois l'eau des océans Piani 2020. Ils trouvent aussi que les isotopes de leur hydrogène et de leur azote ressemblent à ceux de la Terre Piani 2020.

L'argument isotopique fonctionne comme celui des réservoirs NC et CC. L'hydrogène a deux isotopes stables. L'hydrogène ordinaire a un noyau fait d'un seul proton, et le deutérium ajoute un neutron à ce proton. Le rapport entre les deux varie d'un corps du Système solaire à l'autre et sert de signature de provenance[9]. Une source d'eau dont la signature différerait de celle de la Terre ne pourrait pas en être la source principale sans que le mélange trahisse l'écart. Les chondrites à enstatite passent ce test pour l'hydrogène et pour l'azote Piani 2020. La base ne donne pas les valeurs mesurées, ni celles des autres familles de météorites et des comètes. Elle ne permet donc pas de refaire la comparaison ici, seulement d'en rapporter la conclusion[10].

Les deux pistes ne s'excluent pas. Izidoro et Piani, dans leur synthèse de 2022, les combinent. Pour eux, l'eau des planètes rocheuses vient de matériaux porteurs d'hydrogène propres au disque interne, et elle a été complétée par des planétésimaux riches en eau formés au-delà de la ligne des glaces Izidoro 2022. La part de chaque source n'est pas chiffrée dans la base. La question n'est donc plus de choisir entre un héritage local et un apport lointain. Elle porte sur le partage entre les deux, et sur le calendrier.

Deux sources candidates sont écartées ou minorées. La part des comètes, ces corps glacés venus des confins du Système solaire, est jugée faible Lichtenberg 2023. Le placage tardif, la petite quantité de matière de type chondritique tombée sur la Terre après le dernier impact géant, était probablement sec Lichtenberg 2023. Le chapitre 17 a montré que ce placage expliquerait l'excès d'or et de platine du manteau. Il n'a apparemment pas apporté l'eau. L'essentiel de l'apport d'eau se place donc plus tôt, pendant l'accrétion elle-même, quand la Terre grossissait par collisions entre embryons Lichtenberg 2023. Une autre voie reste discutée, celle d'un hydrogène capté directement dans le gaz du disque et dissous dans l'océan de magma de la jeune Terre Lichtenberg 2023. La base n'en dit pas davantage[11].

Cet apport précoce entraîne une conséquence. Si l'eau est arrivée pendant l'accrétion, elle a dû traverser les impacts géants, qui ont fondu la planète et, on va le voir, arraché ses premières atmosphères. Pour qu'elle soit encore là, il faut qu'une grande partie de cette eau ait été gardée à l'intérieur, dans la roche fondue ou solide, plutôt que dans une enveloppe de gaz exposée aux chocs. C'est une déduction de ce chapitre, cohérente avec les 3 à 11 océans dont la plupart sont encore dans le manteau[12]. Le statut de l'ensemble est clair. L'origine de l'eau terrestre est débattue Lichtenberg 2023. Ce qui a changé récemment, c'est que la piste locale, longtemps jugée impossible par l'argument de la ligne des glaces, dispose d'un réservoir mesuré.

18.4 Des atmosphères arrachées

L'eau des océans est passée par l'air avant de former une mer. Or la Terre n'a pas eu une atmosphère mais plusieurs, et les premières n'ont pas survécu.

La première a pu être une enveloppe primordiale d'hydrogène et d'hélium, captée dans le gaz du disque pendant que la proto-Terre grossissait Lichtenberg 2023. Le conditionnel tient à ce qu'il n'en reste aucune trace directe. La Terre actuelle est fortement appauvrie en néon et en argon, deux gaz rares qui ne se combinent presque pas chimiquement et ne peuvent donc pas se cacher dans les roches. Une planète qui aurait gardé son air d'origine en conserverait beaucoup. Leur rareté indique que les impacts géants ont arraché les premières atmosphères Lichtenberg 2023. Le chapitre 17 a exposé ce raisonnement[13]. Il suffit ici d'en retenir la conséquence : l'air que la Terre a eu ensuite ne descend pas de l'air du disque.

Après l'impact qui forma la Lune, la surface de la Terre est un océan de magma, de la roche fondue sur une grande profondeur. Une atmosphère de vapeur de silicates le surmonte, c'est-à-dire de roche vaporisée Lichtenberg 2023. À mesure que ce magma refroidit, les silicates retombent, et l'atmosphère se remplit de volatils dégazés, les substances légères que la roche fondue libère en refroidissant Lichtenberg 2023. La solidification complète d'une planète de la taille de la Terre prend de 10^5 à 10^8 ans selon les modèles, soit de cent mille à cent millions d'années Lichtenberg 2023. Sur l'année cosmique, cela va de quelques minutes à deux jours et demi[14]. La fourchette couvre trois ordres de grandeur, et elle dépend en partie de l'atmosphère même qui recouvre le magma et freine son refroidissement, comme l'a noté le chapitre précédent.

La composition de ce premier air dégazé dépend d'une propriété du manteau, son état d'oxydation. Le terme désigne la quantité d'oxygène disponible dans la roche pour se lier aux autres éléments[15]. Si le manteau est oxydé, l'hydrogène sort lié à l'oxygène, sous forme de vapeur d'eau (H_2O), et le carbone sous forme de dioxyde de carbone (CO_2). S'il est réduit, c'est-à-dire pauvre en oxygène disponible, le dégazage libère de l'hydrogène (H_2), du monoxyde de carbone (CO) ou du méthane (CH_4) Lichtenberg 2023. Les deux cas donnent deux premiers airs très différents. Le premier est une vapeur d'eau et de gaz carbonique qui peut condenser en mer. Le second est un mélange de gaz combustibles où l'eau ne vient pas d'emblée. Le dégazage oxydé est « aujourd'hui considéré comme le scénario standard » pour la Terre Lichtenberg 2023. La fiche de la base range ce scénario parmi les hypothèses, et ne dit pas sur quels indices il repose[16].

Si l'on suit ce scénario, le premier air durable de la Terre est donc fait surtout de vapeur d'eau et de dioxyde de carbone, sorti de l'intérieur de la planète. L'eau y est présente dès le départ, sous forme de gaz. Ce premier air ne contient pas d'oxygène libre. L'oxygène y est tout entier lié, dans l'eau et dans le gaz carbonique. La base ne donne ni la pression de cette atmosphère ni la part de chaque gaz, et elle ne dit rien de l'azote, qui domine l'air actuel[17].

18.5 Le premier océan, lu dans un grain

Quand la surface refroidit assez, la vapeur d'eau condense et tombe. Ce premier océan n'a laissé aucune roche. Le chapitre 17 a montré que de l'Hadéen, le premier éon de l'histoire terrestre, jusque vers 4,0 milliards d'années, il ne reste presque rien Lichtenberg 2023. L'indice le plus ancien de l'eau liquide tient dans un grain de sable.

Ce grain est un zircon détritique des Jack Hills, en Australie occidentale : un cristal arraché à une roche disparue, puis déposé dans un sédiment plus récent. Le plus vieux de ces grains a 4 404 ± 8 millions d'années Wilde 2001, et son âge hadéen a été confirmé en 2014 par tomographie à sonde atomique Valley 2014. L'article de Simon Wilde et de ses coauteurs, en 2001, porte dans son titre la double conclusion qu'ils en tirent : l'existence d'une croûte continentale et d'océans sur la Terre il y a 4,4 milliards d'années Wilde 2001.

Pour l'eau, l'argument ne vient pas de l'âge du grain. Il vient de son oxygène. L'oxygène a plusieurs isotopes, et leurs proportions dans une roche changent quand celle-ci interagit avec de l'eau liquide à basse température. Un zircon qui cristallise dans un magma enregistre les proportions de ce magma[18]. Selon Wilde et ses coauteurs, les rapports isotopiques mesurés dans le zircon de 4,4 milliards d'années « désignent l'intervention de matériaux supracrustaux ayant subi une interaction à basse température avec une hydrosphère liquide » Wilde 2001. « Supracrustaux » désigne des matériaux formés à la surface de la croûte. « Hydrosphère liquide » désigne de l'eau liquide en surface.

Le raisonnement compte quatre étapes, et chacune ajoute une inférence. D'abord, le grain a cristallisé dans un magma dont il porte la signature d'oxygène. Ensuite, cette signature n'est pas celle d'un magma issu di-

rectement du manteau. Elle suppose que le magma a incorporé de la matière venue de la surface. Puis cette matière de surface avait été altérée par de l'eau liquide à basse température. Enfin, il y avait donc de l'eau liquide à la surface de la Terre avant 4,4 milliards d'années. La synthèse de Lichtenberg et de ses coauteurs en tire une date. D'après les zircons, de l'eau liquide aurait été présente en surface dès 150 millions d'années environ après le t = 0 Lichtenberg 2023. La fiche de la base qualifie cette conclusion d'inférence largement acceptée, non d'observation d'un océan[19]. Le grain ne dit ni l'étendue de cette eau, ni sa profondeur, ni sa durée. Il dit qu'elle a existé, liquide et froide, assez longtemps pour altérer des roches qui ont été refondues ensuite.

Deux mises en garde s'imposent. La première tient à l'objet daté. On date un minéral, pas une roche. La plus vieille roche entière connue avec certitude, le gneiss d'Acasta au Canada, a 4,02 milliards d'années Lichtenberg 2023. Entre le zircon et Acasta, près de quatre cents millions d'années ne sont documentées que par des grains. La seconde tient au statut de la conclusion. L'océan hadéen est une reconstruction qui passe par la chimie d'un magma disparu. Chaque étape du raisonnement est plausible, et la conclusion dépend de toutes.

Frances Westall, dans sa synthèse de 2025 sur les premières traces de vie, place des océans « habitables » dès 4,34 milliards d'années Westall 2025. Cette date est un peu plus tardive que l'indice des zircons. Elle suit, dans le même texte, un impact lunaire placé vers 4,35 milliards d'années Westall 2025. Or le chapitre 17 a montré que cette date lunaire tardive est aujourd'hui contestée. L'amas d'âges vers 4,35 milliards d'années daterait une refonte de la Lune par les marées, et la Lune serait née entre 4,43 et 4,53 milliards d'années Nimmo 2024. Les deux lectures ne donnent pas la même histoire de l'eau. Avec une Lune ancienne, la suite est ordonnée : l'impact, puis l'océan de magma, puis une eau liquide dès 4,40 milliards d'années, que les zircons enregistrent. Avec une Lune à 4,35 milliards d'années, le zircon de 4,40 milliards d'années témoignerait d'une eau antérieure au dernier impact géant, qui aurait refondu la surface après elle. Les océans habitables de Westall suivraient alors ce choc de dix millions d'années à peine[20].

Reste le Grand Bombardement tardif. Selon cette hypothèse, un pic d'impacts aurait frappé la Terre et la Lune entre environ 4,1 et 3,8 milliards d'années. Elle est aujourd'hui contestée, parce que les âges lunaires sur lesquels elle reposait posent problème et que les échantillons d'Apollo ont pu être contaminés par les débris d'un seul grand bassin, Imbrium. Le relevé des impacts pourrait s'expliquer par un déclin graduel Lichtenberg 2023. Le chapitre précédent a détaillé cette contestation. Pour l'histoire de l'eau, l'enjeu est chronologique. Un tel pic aurait frappé une planète qui portait déjà de l'eau liquide depuis plusieurs centaines de millions d'années, si l'on suit les zircons. La base ne dit pas ce qu'il aurait fait de ces océans, ni s'il les aurait vaporisés en tout ou en partie[21].

Sur l'année cosmique, la suite se lit ainsi. Le t = 0 tombe le 2 septembre vers 4 h 45 du matin. L'eau liquide des zircons apparaît environ quatre jours plus tard, et le plus vieux zircon cristallise le 6 septembre vers midi et demi. Les océans habitables de Westall suivent le 8 septembre, vers 5 h du matin. Le gneiss d'Acasta, la première roche entière, n'arrive que le 16 septembre. Le Grand Bombardement tardif, s'il a eu lieu, s'étendrait du 14 au 22 septembre[22]. La Terre aurait donc eu de l'eau liquide moins d'une semaine cosmique après la naissance du Soleil.

18.6 Un Soleil trop pâle pour de l'eau liquide

Cette eau liquide pose un second problème, de climat. Selon les modèles d'évolution stellaire, la Terre primitive recevait du Soleil environ 25 % d'énergie en moins qu'aujourd'hui Feulner 2012. Georg Feulner, qui a fait en 2012 la revue de ce qu'on appelle le « paradoxe du jeune Soleil pâle », en tire la conséquence. Avec

l'atmosphère actuelle, la Terre aurait dû être gelée pendant ses deux premiers milliards d'années Feulner 2012. Or la géologie montre de l'eau liquide à l'Archéen, l'éon qui va de 3,8 à 2,5 milliards d'années, et la vie y apparaît Feulner 2012. Les zircons hadéens repoussent le problème plus loin encore dans le passé. La base n'explique pas pourquoi un Soleil jeune brille moins. Elle rapporte seulement le chiffre, tiré des modèles d'étoiles[23].

Le paradoxe est un conflit entre deux sources indépendantes. L'une est la physique des étoiles, qui donne l'énergie reçue. L'autre est la géologie, qui montre de l'eau liquide. Pour les réconcilier, il faut que la Terre ait retenu davantage de la chaleur reçue, ou qu'elle en ait moins renvoyé vers l'espace. La plupart des solutions invoquent une atmosphère plus riche en gaz à effet de serre, ces gaz qui laissent passer la lumière solaire mais retiennent une partie de la chaleur que la surface réémet Feulner 2012[24]. Trois candidats sont en tête : le dioxyde de carbone, le méthane et l'ammoniac Feulner 2012. Le premier est justement le gaz que le scénario standard de dégazage met dans le premier air. Le méthane figure parmi les produits d'un dégazage réduit.

Aucune de ces solutions ne suffit aujourd'hui. Selon Feulner, « toutes présentent des difficultés considérables », et le problème reste ouvert Feulner 2012. La base ne détaille pas ces difficultés. Elle ne dit ni quelle quantité de chaque gaz serait nécessaire, ni ce qui la rend improbable, ni quelles solutions sans gaz à effet de serre ont été proposées[25]. Ce qui départagerait les hypothèses est pourtant clair dans son principe. Il faudrait mesurer, dans des roches archéennes, la composition de l'air qui les a touchées, et chiffrer ainsi la teneur en gaz carbonique ou en méthane de l'époque. La base ne rapporte aucune mesure de ce genre.

Le chapitre doit donc laisser ce paradoxe ouvert. L'eau liquide ancienne est bien établie, par les zircons pour l'Hadéen et par la géologie pour l'Archéen. L'énergie solaire plus faible est une prédiction robuste des modèles d'étoiles. Ce qui manque, c'est le mécanisme qui a tenu la Terre au-dessus du point de gel pendant deux milliards d'années, soit plus de cinquante jours de l'année cosmique, de début septembre à la fin octobre[26].

18.7 Un air sans oxygène

Le premier air de la Terre n'était pas respirable. Pendant environ la moitié de son histoire, l'atmosphère n'a pas contenu d'oxygène libre, c'est-à-dire de molécules d'O_2 non liées à d'autres éléments Poulton 2021[27]. L'oxygène ne manquait pas sur la Terre, puisqu'il forme la plus grande part de la masse de l'eau et des roches. Il y était tout entier lié, dans l'eau, le gaz carbonique et les minéraux. Le dégazage oxydé du scénario standard donne un air plein d'atomes d'oxygène, mais sans une seule molécule d'oxygène libre.

La date de l'arrivée de l'oxygène libre est connue avec une précision remarquable, et elle a été affinée récemment. Selon Simon Poulton et ses coauteurs, la concentration d'oxygène dans l'atmosphère dépasse pour la première fois 10^{-5} du niveau actuel vers 2,43 milliards d'années Poulton 2021, soit un cent-millième de la teneur de l'air d'aujourd'hui. Ce seuil, très bas, est celui que les roches permettent de repérer. C'est le début de ce qu'on appelle la Grande Oxydation. La montée ne s'est pas faite d'un coup. D'après les isotopes du soufre et les systèmes chimiques qui associent fer, soufre et carbone dans les sédiments, l'oxygène a ensuite oscillé pendant environ deux cents millions d'années, montant et redescendant. Il ne s'est installé de façon permanente que vers 2,22 milliards d'années, au moment d'une anomalie des isotopes du carbone connue sous le nom d'excursion de Lomagundi Poulton 2021. La base ne détaille pas comment ces isotopes enregistrent la présence ou l'absence d'oxygène[28].

Ces deux dates n'ont pas le même statut. Le début, vers 2,43 milliards d'années, est bien établi. L'instabilité pendant deux cents millions d'années et la date de 2,22 milliards d'années pour l'oxygénation permanente sont des résultats récents, publiés en 2021 par une équipe Poulton 2021. Une autre présentation, encyclopédique, fait commencer la Grande Oxydation entre 2,46 et 2,426 milliards d'années et la fait s'achever vers 2,06 milliards d'années wiki-goe. Les deux s'accordent sur le début. Elles diffèrent sur la fin, parce qu'elles ne définissent pas l'événement de la même manière. L'une date le moment où l'oxygène ne redescend plus, l'autre la fin d'une période plus longue de montée[29].

Sur l'année cosmique, l'oxygène franchit son premier seuil le 28 octobre, vers 17 h 30. Il oscille pendant un peu plus de cinq jours et s'installe pour de bon le 3 novembre, vers 7 h du matin[22]. Depuis les océans des zircons, le 6 septembre, il s'est écoulé près de deux mois cosmiques. Pendant tout ce temps, la Terre avait de l'eau liquide et un air sans oxygène libre.

La cause de ce changement est biologique. On l'attribue aux cyanobactéries, des micro-organismes dont la photosynthèse rejette de l'oxygène wiki-goe. Ce que ces organismes sont, depuis quand ils existent et de quoi ils sont faits relève des chapitres suivants, à commencer par le chapitre 19. L'eau et l'air sont en place. Ce qui les changera est vivant.

18.8 Ce qu'on ne sait pas

On ne sait pas d'où vient l'eau de la Terre, ni dans quelles proportions. Deux sources s'opposent sans s'exclure. L'une est un hydrogène propre au disque interne, dont les chondrites à enstatite montrent qu'il pouvait suffire à au moins trois océans, avec des isotopes d'hydrogène et d'azote semblables à ceux de la Terre Piani 2020. L'autre est un apport de planétésimaux riches en eau venus d'au-delà de la ligne des glaces Izidoro 2022. La synthèse la plus récente de la base les combine sans chiffrer leur partage Izidoro 2022. Ce qui départagerait : la comparaison des signatures isotopiques de l'eau terrestre, manteau compris, avec celles de chaque famille de météorites, et des modèles de formation qui prédisent la quantité de matière externe reçue par la Terre. Confiance élevée sur la faible part des comètes et sur un apport pendant l'accrétion plutôt que par le placage tardif Lichtenberg 2023 ; faible sur le partage entre les deux sources principales. La mesure de Piani et de ses coauteurs est connue dans la base par un communiqué, non par l'article.

On ne sait pas combien d'eau la Terre contient : de 3 à 11 océans Lichtenberg 2023. Une fourchette d'un facteur presque quatre, qui tient à l'eau du manteau. Confiance modérée.

On ne sait pas exactement de quoi était fait le premier air durable. Le scénario standard est un dégazage oxydé, de vapeur d'eau et de gaz carbonique. Un manteau réduit aurait donné de l'hydrogène, du monoxyde de carbone ou du méthane Lichtenberg 2023. La base classe ce scénario comme hypothèse et ne dit pas sur quels indices il l'emporte. Elle ne donne ni pression ni composition chiffrée. Confiance modérée sur le caractère oxydé ; faible sur tout le reste.

On ne sait pas depuis quand exactement il y a des océans. L'indice le plus ancien, l'oxygène d'un zircon de 4 404 ± 8 millions d'années, suggère de l'eau liquide en surface dès 150 millions d'années environ après le t = 0 Wilde 2001 Lichtenberg 2023. C'est une inférence en quatre étapes, largement acceptée, mais qui ne dit rien de l'étendue ni de la durée de cette eau. La publication de Wilde et de ses coauteurs n'a été lue que par un résumé. L'âge de la Lune pèse sur la lecture. Avec une Lune ancienne, l'eau suit le dernier impact géant. Avec une Lune vers 4,35 milliards d'années, comme chez Westall Westall 2025, le zircon précéderait ce choc. Confiance modérée sur une eau liquide avant 4,3 milliards d'années.

On ne sait pas si un Grand Bombardement tardif a frappé ces océans. Le pic d'impacts entre 4,1 et 3,8 milliards d'années est contesté, et un déclin graduel pourrait rendre compte des données Lichtenberg 2023. Confiance faible dans l'hypothèse d'un pic.

On ne sait pas comment la Terre a gardé son eau liquide sous un Soleil 25 % moins lumineux. Les solutions par gaz à effet de serre, dioxyde de carbone, méthane et ammoniac, présentent toutes des difficultés considérables selon Feulner Feulner 2012. Ce qui départagerait : des mesures, dans des roches archéennes, de la composition de l'air ancien. Le problème est ouvert depuis au moins la revue de 2012, et la base ne rapporte pas de progrès plus récent.

On ne sait pas avec certitude comment l'oxygène s'est installé. Le premier franchissement du seuil de 10^{-5} du niveau actuel vers 2,43 milliards d'années est établi. L'instabilité pendant deux cents millions d'années et l'installation définitive vers 2,22 milliards d'années reposent sur une étude de 2021 Poulton 2021. D'autres présentations font durer la Grande Oxydation jusque vers 2,06 milliards d'années wiki-goe. Confiance élevée sur le début ; modérée sur le rythme.

18.9 Ce que ce chapitre démontre

Une molécule d'eau porte deux atomes du premier jour pour un atome d'étoile. Son hydrogène date de la nucléosynthèse primordiale, entre trois et vingt minutes, qui ne produit que de l'hydrogène, de l'hélium et des traces de lithium. Les étoiles consomment l'hydrogène et n'en fabriquent pas fields2014pdg wiki-bbn Kobayashi 2020. Son oxygène est surtout produit dans les étoiles massives et éjecté par les supernovas à effondrement de cœur, selon des modèles d'évolution chimique Kobayashi 2020. En masse, l'eau est aux huit neuvièmes de l'oxygène d'étoile. Elle fait environ 53 % de la masse d'un adulte wiki-corps.

Dans le disque du jeune Soleil, la glace ne condensait qu'au-delà de la ligne des glaces, sous 170 kelvins. La région des planètes rocheuses était trop chaude pour incorporer de l'eau sur place Izidoro 2022. La Terre contient pourtant l'équivalent de 3 à 11 océans, dont l'essentiel dans son manteau Lichtenberg 2023.

Deux sources expliquent cette eau. D'une part, un hydrogène local : les chondrites à enstatite, isotopiquement proches de la Terre, en contiennent assez pour au moins trois océans, avec des isotopes d'hydrogène et d'azote semblables aux siens Piani 2020. D'autre part, des planétésimaux riches en eau, dispersés depuis l'extérieur par la croissance et la migration des géantes. Izidoro et Piani combinent les deux Izidoro 2022. Les comètes comptent peu, le placage tardif était probablement sec, et l'essentiel de l'eau est arrivé pendant l'accrétion Lichtenberg 2023.

Les premières atmosphères, dont une enveloppe possible d'hydrogène et d'hélium captée dans le disque, ont été arrachées par les impacts géants, comme l'indique le déficit de la Terre en néon et en argon. Après l'impact lunaire, un océan de magma, qui met de 10^5 à 10^8 ans à se solidifier selon les modèles, dégaze un nouvel air. Selon le scénario standard, un manteau oxydé libère surtout de la vapeur d'eau et du dioxyde de carbone Lichtenberg 2023.

Le premier océan se lit dans un grain. L'oxygène d'un zircon des Jack Hills de 4 404 ± 8 millions d'années suggère un magma nourri de matière altérée par de l'eau liquide à basse température Wilde 2001. On en infère de l'eau liquide en surface dès 150 millions d'années environ après le $t = 0$ Lichtenberg 2023, et Westall place des océans habitables dès 4,34 milliards d'années Westall 2025. On date un minéral, non une roche : la plus vieille roche entière, Acasta, a 4,02 milliards d'années Lichtenberg 2023. Le Grand Bombardement tardif est contesté Lichtenberg 2023.

Cette eau liquide coexiste avec un Soleil qui donnait 25 % d'énergie en moins. Aucune solution par gaz à effet de serre ne lève le paradoxe sans difficulté considérable Feulner 2012.

L'air est resté sans oxygène libre pendant la moitié de l'histoire de la Terre. L'oxygène dépasse un cent-millième du niveau actuel vers 2,43 milliards d'années, oscille pendant environ deux cents millions d'années et ne devient permanent que vers 2,22 milliards d'années Poulton 2021. Sur l'année cosmique, le t = 0 tombe le 2 septembre vers 4 h 45. Le plus vieux zircon cristallise le 6 septembre vers midi et demi, les océans habitables de Westall apparaissent le 8. L'oxygène franchit son premier seuil le 28 octobre et s'installe le 3 novembre. L'eau et l'air étaient prêts deux mois cosmiques avant que le vivant ne les change.

Notes

1. La fiche vie-et-humanite (section 3) formule cette déduction : « Les étoiles ne fabriquent pas d'hydrogène : elles en consomment. L'hydrogène du corps date donc des premières minutes. » Elle s'appuie sur la fiche nucleosynthese-primordiale et sur Kobayashi et al. (2020). Aucune source de la base ne l'énonce en ces termes pour l'eau terrestre ; le raisonnement vaut pour tout hydrogène. ↩

2. Calcul de la fiche vie-et-humanite : la fin de la nucléosynthèse, vers vingt minutes, tombe à environ 0,09 microseconde du 1er janvier, sur une échelle de 13,8 Ga ramenés à 365 jours (une seconde cosmique ≈ 437 ans). ↩

3. Calcul de ce chapitre, avec les masses atomiques usuelles (hydrogène ≈ 1, oxygène ≈ 16, en unités de masse atomique ; valeurs non données dans la base) : une molécule d'eau pèse environ 18, dont 2 pour l'hydrogène (≈ 11 %, un neuvième) et 16 pour l'oxygène (≈ 89 %). Le deutérium, plus lourd, est assez rare pour ne pas changer ces proportions. ↩

4. Conversion : 170 − 273,15 ≈ −103 °C. Izidoro et Piani (2022) définissent la ligne des glaces comme « la position, dans le disque gazeux natal du Soleil, où les températures étaient inférieures à 170 K ». La base ne donne pas la distance au Soleil de cette ligne, qui a pu se déplacer à mesure que le disque refroidissait. ↩

5. La base ne dit pas si la ligne des glaces coïncidait avec la frontière entre réservoirs NC et CC, ni avec l'orbite de Jupiter. On rapproche souvent ces notions dans la littérature ; ce rapprochement n'est pas documenté ici. ↩

6. Déduction de ce chapitre : la masse de l'océan actuel sert d'unité, et celle de l'atmosphère est connue. La fourchette de 3 à 11 océans (Lichtenberg et al. 2023) ne peut donc refléter que l'incertitude sur le contenu en eau de l'intérieur. La base ne dit pas comment cette eau est estimée, ni si le noyau en contient. ↩

7. La fiche de-la-nebuleuse-a-la-terre situe l'instabilité des géantes vers 11,3 (+9,5/−6,6) Ma (Edwards et al. 2024) et, séparément, la dispersion de planétésimaux riches en eau par « la croissance et la migration des géantes » (Izidoro et Piani 2022). Elle ne relie pas les deux. Rien dans la base ne permet de dire si l'instabilité a contribué à l'apport d'eau. ↩

8. Définition usuelle ; la base nomme les chondrites à enstatite sans les décrire. Qu'elles se soient formées dans un milieu pauvre en eau est la présentation usuelle, et c'est ce qui rendait leur richesse en hydrogène inattendue. La base ne le dit pas explicitement. Le résultat de Piani et al. (2020) est connu par le communiqué de presse (phys.org), l'article étant en accès restreint. ↩

9. Définition usuelle du deutérium. La fiche nucleosynthese-primordiale rappelle que le deutérium est lui aussi un produit de la nucléosynthèse primordiale, avec D/H ≈ 2,55 × 10^{-5} mesuré dans des nuages lointains (Fields et al. 2020). La base ne donne pas le rapport D/H de l'eau terrestre, et ne dit pas si le deutérium de la Terre est entièrement primordial. ↩

10. Lacune signalée dans les manques : les rapports D/H et $^{15}N/^{14}N$ de la Terre, des chondrites carbonées, des chondrites à enstatite et des comètes. ↩

11. La fiche dit : « La part des comètes est jugée faible, et la dissolution d'hydrogène du disque dans l'océan de magma reste discutée. Le placage tardif était probablement sec, ce qui situe l'essentiel de l'apport d'eau plus tôt dans l'accrétion » (d'après Lichtenberg et al. 2023). Les raisons de juger le placage tardif sec et la part des comètes faible ne sont pas données. ↩

12. Déduction de ce chapitre, non formulée dans la base : un apport pendant l'accrétion et l'arrachement des atmosphères par les impacts géants ne sont compatibles que si l'eau a été retenue à l'intérieur de la planète. La base ne dit pas quelle part de l'eau a pu être perdue lors des impacts. ↩

13. La fiche de-la-nebuleuse-a-la-terre ne chiffre pas l'appauvrissement en néon et en argon et ne précise pas la référence (Soleil, météorites) par rapport à laquelle il est mesuré. Le raisonnement sur l'inertie chimique des gaz rares est la présentation usuelle, déjà exposée au chapitre précédent. ↩

14. Calcul sur 13,8 Ga = 365 jours (un jour ≈ 37,8 Ma) : 10^5 ans ≈ 0,0026 jour ≈ 4 minutes ; 10^8 ans ≈ 2,6 jours. ↩

15. Définition simplifiée de ce chapitre ; la base emploie les termes « oxydé » et « réduit » sans les définir. ↩

16. Citation de Lichtenberg et al. (2023) reprise par la fiche, qui classe ce point en « hypothèse » dans son en-tête de confiance. Les indices qui font préférer un manteau oxydé ne sont pas documentés. ↩

17. La base ne documente pas l'azote de l'atmosphère primitive, ni la pression atmosphérique de l'Hadéen ou de l'Archéen. Que la vapeur d'eau condensée ait laissé une atmosphère dominée par le gaz carbonique est une conséquence plausible du scénario standard, non établie ici. ↩

18. Principe usuel de la géochimie des isotopes de l'oxygène ; la base ne le détaille pas. Selon la présentation usuelle, l'altération par l'eau à basse température enrichit la roche en oxygène 18 ; la base ne précise ni le sens ni l'ampleur de l'écart mesuré dans le zircon. La citation de Wilde et al. (2001) est lue dans un résumé de moteur de recherche (Nature inaccessible, deux tentatives) ; la traduction est de ce chapitre. ↩

19. La fiche de-la-nebuleuse-a-la-terre écrit : « Ce n'est pas une observation d'océan ; c'est une inférence, largement acceptée. » Elle classe les « océans liquides dès ≈ 4,4 Ga » parmi les hypothèses. Lichtenberg et al. (2023) écrivent « ≥ 150 Ma après le t = 0 » ; la décomposition en quatre étapes est de ce chapitre. ↩

20. Déduction de ce chapitre à partir des dates de la base : 4 404 ± 8 Ma pour le zircon (Wilde et al. 2001), 4,35 Ga pour l'impact lunaire selon Westall (2025), 4,43–4,53 Ga selon Nimmo et al. (2024). Aucune source de la base ne discute ce conflit. Il suppose que le dernier impact géant est celui qui forme la Lune, ce que la fiche admet. ↩

21. La présentation usuelle prête à un bombardement intense la capacité de vaporiser tout ou partie des océans et de stériliser la surface ; la base ne documente pas ces effets. Elle dit seulement que l'hypothèse est contestée (Lichtenberg et al. 2023). ↩

22. Calculs de ce chapitre sur 13,8 Ga = 365 jours (un jour ≈ 37,8 Ma), le 31 août s'achevant après 243 jours et le 31 octobre après 304. t = 0 à 4 567,3 Ma : 244,20 jours, le 2 septembre vers 4 h 45 (la fiche écrit « vers 4 h ») ; 150 Ma après : + 3,97 jours. Zircon de 4 404 Ma : 248,52 jours, le 6 septembre vers 12 h 30. Océans de Westall à 4,34 Ga : 250,21 jours, le 8 septembre vers 5 h. Acasta à 4,02 Ga : 258,67 jours, le 16 septembre. Grand Bombardement tardif : 4,1 Ga (14 septembre) à 3,8 Ga (22 septembre). Oxygène à 2,43 Ga : 300,73 jours, le 28 octobre vers 17 h 30 ; à 2,22 Ga : 306,28 jours, le 3 novembre vers 6 h 45 ; 200 Ma ≈ 5,3 jours. ↩↩

23. Feulner (2012) : « For the early Earth, models of stellar evolution predict a solar energy input to the climate system which is about 25% lower than today. » Le mécanisme qui fait croître la luminosité du Soleil au cours de sa vie n'est pas documenté dans la base. ↩

24. Définition usuelle de l'effet de serre ; la base ne la donne pas. ↩

25. Lacune signalée dans les manques. Feulner (2012) est une revue de plusieurs dizaines de pages ; la fiche n'en rapporte que la conclusion générale. ↩

26. Calcul : 2 000 Ma / 37,8 Ma ≈ 53 jours. Depuis le 2 septembre, cela mène à la fin d'octobre. ↩

27. La fiche de-la-nebuleuse-a-la-terre écrit : « Pendant la moitié de son histoire, la Terre a eu une atmosphère sans oxygène libre. » Calcul : de 4,567 Ga à 2,43 Ga, il s'écoule environ 2,14 Ga, soit 47 % de l'âge de la Terre ; jusqu'à 2,22 Ga, environ 51 %. ↩

28. Poulton et al. (2021) s'appuient sur les isotopes du soufre et sur les systèmes fer-soufre-carbone. La manière dont ces signatures enregistrent l'oxygène atmosphérique n'est pas décrite dans la base. ↩

29. Interprétation de ce chapitre. La fiche vie-et-humanite (d'après Wikipédia, « Great Oxidation Event ») donne 2,46–2,426 Ga pour le début et 2,06 Ga pour la fin ; la fiche de-la-nebuleuse-a-la-terre (d'après Poulton et al. 2021) donne 2,43 Ga et 2,22 Ga. La base ne dit pas ce que marque la date de 2,06 Ga. ↩

CHAPITRE 19

Ce dont la vie est faite

brouillon · 7608 mots

19.1 Peser, puis compter

Un adulte moyen compte environ 7×10^{27} atomes, soit un sept suivi de vingt-sept zéros wiki-corps. On y détecte des traces de soixante éléments chimiques, c'est-à-dire de soixante sortes d'atomes différentes. Six d'entre eux font pourtant à peu près 99 % de la masse du corps : l'oxygène, le carbone, l'hydrogène, l'azote, le calcium et le phosphore wiki-corps. Les cinquante-quatre autres, dont le fer du sang, se partagent le centième restant.

Ce corps peut se décrire de deux façons, et les deux descriptions ne se ressemblent pas. On peut le peser, élément par élément, et dire quelle fraction de sa masse revient à chacun. On peut aussi compter ses atomes et dire quelle fraction de leur nombre revient à chaque élément. Les deux comptes figurent côte à côte dans le même tableau wiki-corps :

Élément	Part de la masse	Part des atomes
Oxygène	65,0 %	24,0 %
Carbone	18,5 %	12,0 %
Hydrogène	9,5 %	62,0 %
Azote	2,6 %	1,1 %
Calcium	1,3 %	0,22 %
Phosphore	0,6 %	0,22 %

Pesé, le corps est d'abord de l'oxygène : près des deux tiers de sa masse. Le carbone vient ensuite, avec un peu moins d'un cinquième. L'hydrogène n'arrive qu'en troisième position, avec moins d'un dixième. Compté, le corps est d'abord de l'hydrogène : un peu plus de six atomes sur dix. L'oxygène ne fournit plus qu'un atome sur quatre, le carbone un sur huit.

L'inversion tient au poids des atomes. L'hydrogène est le plus léger de tous. Un atome d'oxygène pèse environ seize fois plus qu'un atome d'hydrogène, un atome de carbone environ douze fois plus[1]. Il faut donc beaucoup d'hydrogène pour faire peu de masse, et peu d'oxygène pour en faire beaucoup. Un calcul approché, qui divise la part de masse de chaque élément par le poids de son atome, retrouve l'ordre du tableau : environ six atomes sur dix pour l'hydrogène, l'oxygène loin derrière[2]. L'ordre ne dépend d'aucun arrondi : l'élément le plus léger est aussi le plus nombreux.

La plus grande part de cet hydrogène est liée dans l'eau. L'eau représente environ 53 % de la masse d'un adulte, avec de fortes variations individuelles : 48 % en moyenne chez les femmes, avec un écart type de 6 points, et 58 % chez les hommes, avec un écart type de 8 points wiki-corps. Le chapitre 18 a montré qu'une molécule d'eau tient pour un neuvième de sa masse à ses deux atomes d'hydrogène et pour huit neuvièmes à son atome d'oxygène. Appliqué à 53 % d'eau, ce partage donne environ 6 % de la masse du corps en hydrogène de l'eau, un peu plus de la moitié de tout l'hydrogène du corps, et environ 47 % en oxygène de l'eau, près des trois quarts de tout son oxygène[3]. Le reste de l'hydrogène et de l'oxygène est pris dans les autres molécules du corps, avec le carbone, l'azote et le phosphore.

Ces chiffres sont des moyennes. Ils changent d'une personne à l'autre avec la teneur en eau et en graisse wiki-corps. L'écart entre les moyennes des femmes et des hommes, dix points d'eau, suffit à le montrer : un corps plus riche en eau est un peu plus riche en hydrogène et en oxygène, et un peu moins riche en carbone. La masse de l'adulte « moyen » de ces tableaux n'est pas précisée par leur source, ni les limites dans lesquelles varie la part de chaque élément[4]. Les conclusions qui suivent ne dépendent pas de la première décimale.

19.2 L'hydrogène, seul héritage du premier jour

Le chapitre 5 a raconté la fabrique des premiers noyaux. Il suffit d'en retenir le bilan : entre trois et vingt minutes environ après le début de l'expansion, elle ne produit que de l'hydrogène, de l'hélium et des traces de lithium, et elle ne peut pas monter plus haut, faute de noyau stable à cinq ou à huit nucléons wiki-chrono fields2014pdg.

Depuis ces vingt minutes, aucune usine n'a fabriqué d'hydrogène en quantité. Les étoiles en consomment : leur premier travail est de changer leur hydrogène en hélium par fusion wiki-stellarnuc. Elles fabriquent ensuite, selon leur masse, du carbone, de l'oxygène et des éléments plus lourds, mais jamais de l'hydrogène. La quantité d'hydrogène de l'Univers n'a donc fait que baisser depuis les premières minutes, et chaque atome d'hydrogène du corps humain date de la nucléosynthèse primordiale[5].

Le chapitre précédent l'avait établi pour une molécule d'eau, dont deux atomes sur trois datent du premier jour. Le tableau du corps étend la conclusion à tout l'organisme : les 62 % d'atomes d'hydrogène du corps, qu'ils soient pris dans l'eau ou dans les autres molécules, ont tous la même date de fabrication. Rapporté aux 7×10^{27} atomes d'un adulte, cela fait environ 4×10^{27} atomes du premier jour dans un seul corps[6].

Ce qui date des premières minutes, c'est le noyau de l'atome d'hydrogène, un proton. Les molécules dont cet atome a fait partie ont changé d'innombrables fois : il a pu passer par le gaz d'une nébuleuse, par l'eau d'une roche ou d'un océan, par la nourriture d'un repas. La chimie défait et refait les liaisons entre atomes sans toucher aux noyaux ; seules les réactions nucléaires des étoiles changent un noyau en un autre, et elles détruisent l'hydrogène au lieu d'en créer. L'âge d'un noyau d'hydrogène ne dépend donc d'aucun de ces passages[7].

Sur l'année cosmique, qui ramène les 13,8 milliards d'années de l'histoire à douze mois, ces vingt minutes tiennent dans le premier dixième de microseconde du 1er janvier, environ 0,09 microseconde wiki-cosmic-cal[8]. La matière la plus nombreuse du corps humain a été fabriquée là, bien avant que la première lumière ne se libère, vers minuit et quart.

L'autre grand produit de ces minutes manque dans le corps. L'hélium fait environ un quart de la masse de la matière sortie du premier jour fields2014pdg, et 24,2 % de la masse de la photosphère du Soleil, la couche d'où s'échappe sa lumière Asplund 2021. Il est absent du tableau du corps. L'hélium ne se lie à rien : il ne forme aucune molécule et ne peut donc entrer dans aucune de celles dont un corps est fait[9]. Le chapitre 18 a rencontré la même propriété chez deux autres gaz rares, le néon et l'argon, que la Terre n'a pas su retenir. Des deux grands produits du premier jour, le vivant n'a gardé que l'hydrogène.

Le lithium, troisième produit, ne figure ni parmi les six éléments majeurs ni parmi les cinq suivants. Un lithium présent en traces ne pourrait d'ailleurs pas être daté du premier jour à coup sûr : des novae, des explosions à la surface de certaines étoiles, en ont fabriqué plus tard, au moins dans une galaxie voisine, le Petit Nuage de Magellan Izzo 2022. Pour le premier jour, le compte du corps se résume à l'hydrogène.

19.3 Les grandes usines : oxygène, carbone, azote

Tout le reste du tableau vient des étoiles. Le chapitre 12 a montré comment une étoile franchit la marche de masse 8 que les premières minutes n'avaient pas pu franchir, en soudant trois noyaux d'hélium en un noyau de carbone. Kobayashi, Karakas et Lugaro en tirent la règle : les éléments de masse atomique douze ou plus, du carbone à l'uranium, « ne sont pas produits pendant le Big Bang mais formés à l'intérieur des étoiles » Kobayashi 2020. Le carbone compte douze nucléons, l'azote quatorze, l'oxygène seize : tous trois sont au-delà de la limite, comme le calcium, le phosphore et les traces de tous les autres éléments du corps.

Savoir que ces éléments viennent des étoiles ne dit pas encore de quelles étoiles. La réponse sort de modèles d'évolution chimique, qui font naître dans une galaxie des étoiles de toutes masses, attribuent à chacune ce qu'elle rejette en mourant, et comparent le mélange obtenu aux compositions mesurées (→ chap. 12). Kobayashi et ses coautrices ont reconstruit ainsi l'origine de tous les éléments stables du carbone à l'uranium Kobayashi 2020. Leur partage s'applique aux lignes du corps une à une.

L'oxygène. L'oxygène appartient à la famille des éléments dits « alpha », avec le magnésium, le silicium, le soufre et le calcium. Ces éléments sont surtout produits dans les étoiles massives, puis éjectés par les supernovas à effondrement de cœur Kobayashi 2020, l'explosion qui suit l'écroulement du cœur de fer d'une étoile massive à court de combustible wiki-sib. L'essentiel de l'oxygène se forme pendant la vie calme de ces étoiles, bien avant l'explosion, mais il reste enfermé en elles jusqu'à leur mort Kobayashi 2020 (→ chap. 12). L'oxygène qui fait 65 % de la masse du corps a donc été fabriqué au cœur d'étoiles massives et libéré par leur fin violente. Le mot « surtout » dit que ces étoiles en sont la source principale dans le modèle, sans dire que tout l'oxygène en vient.

Le carbone et l'azote. Environ la moitié du carbone, de l'azote et du fluor vient d'étoiles de masse faible ou moyenne, pendant la phase de leur fin de vie que les astronomes appellent branche asymptotique des géantes, ou phase AGB Kobayashi 2020. Ces étoiles n'explosent pas. Elles rendent leur matière par des vents, en perdant peu à peu leurs couches extérieures Kobayashi 2020. Le carbone qui fait 18,5 % de la masse du corps, et l'azote qui en fait 2,6 %, doivent donc à peu près la moitié de leurs atomes à des étoiles mourantes qui ont soufflé leur enveloppe.

19.4 Le calcium, le phosphore et le dernier centième

Après les six éléments majeurs viennent cinq éléments qui ne font ensemble qu'environ 0,85 % de la masse du corps : le potassium, le soufre, le sodium, le chlore et le magnésium. Ces onze éléments sont tous nécessaires à la vie, et plus d'une douzaine d'éléments à l'état de traces le sont aussi wiki-corps. Leurs parts sont minuscules : 0,25 % pour le soufre, 0,15 à 0,2 % pour le potassium, 0,15 % pour le sodium et autant pour le chlore, 0,05 % pour le magnésium, soixante millionièmes pour le fer, trente-deux pour le zinc, cent soixante milliardièmes pour l'iode wiki-corps. Pour un adulte de 70 kilos, cela fait environ 175 grammes de soufre, 100 à 140 grammes de potassium, une centaine de grammes de sodium et autant de chlore, 35 grammes de magnésium, 4 grammes de fer et une dizaine de milligrammes d'iode[10]. Aucun n'est primordial : tous ont un noyau de masse douze ou plus Kobayashi 2020. La question est seulement de savoir quelles étoiles, et avec quelle certitude.

19.4.1 Une hiérarchie de feux

La plupart de ces éléments sortent des mêmes étoiles massives, à des étages différents de leur forge. Dans les étoiles d'au moins quatre masses solaires, le carbone fusionne au-delà de 500 millions de degrés et laisse surtout un mélange d'oxygène, de néon, de sodium et de magnésium. Cette phase est brève : environ

mille ans pour une étoile de 25 masses solaires, contre dix millions d'années pour son hydrogène wiki-cburn. Plus profond et plus chaud, entre 1,5 et 2,6 milliards de degrés, l'oxygène fusionne à son tour. Ses principaux produits sont le silicium, le soufre, le chlore, l'argon, le potassium et le calcium, et le cœur épuise son oxygène en quelques jours à quelques années selon la masse de l'étoile wiki-oxyburn. L'explosion qui suit disperse le tout. Le sel du corps, sodium et chlore, et le potassium dont dépend le fonctionnement des nerfs sortent ainsi des derniers milliers d'années, puis des dernières années, d'étoiles massives.

Le sodium a une particularité. Comme les autres éléments dont le noyau compte un nombre impair de protons, l'aluminium, le phosphore ou le cuivre, sa production dépend d'un excès de neutrons dans l'étoile, et elle croît donc avec la richesse en métaux de l'étoile qui le fabrique Kobayashi 2020. Le modèle de Kobayashi et de ses coautrices reproduit aujourd'hui le sodium observé, après correction de certains taux de réaction, et produit un peu moins de magnésium qu'on n'en mesure Kobayashi 2020.

Le calcium et le soufre rappellent que « surtout » n'est pas « tout ». Dans le même modèle, calculé pour le voisinage du Soleil, 29 % du soufre et 39 % du calcium viennent non des étoiles massives, mais des supernovas de type Ia, les explosions de naines blanches, ces cœurs mis à nu d'étoiles moyennes Kobayashi 2020 (→ chap. 12). Ces parts seraient plus fortes encore si les naines blanches qui explosent étaient plus légères qu'on ne le suppose d'ordinaire. Ce sont des chiffres de modèle, sensibles aux hypothèses faites sur ces explosions, et les mesures qui les testent sont délicates : le soufre est « difficile à mesurer » dans la lumière des étoiles, et le calcium prédit reste environ un quart sous le calcium observé Kobayashi 2020[11]. Le calcium des os doit donc près de six atomes sur dix aux étoiles massives et près de quatre aux naines blanches, si le modèle est juste.

19.4.2 Le phosphore, vu en train de naître

Le phosphore, sixième élément majeur et pilier de l'ADN, est censé naître dans les étoiles massives et se disperser lors de leur explosion. On l'a vu. En 2013, Bon-Chul Koo et ses coauteurs observent en infrarouge le reste de la supernova Cassiopée A, un nuage de débris encore jeune : le rapport entre phosphore et fer de la matière éjectée y atteint jusqu'à cent fois la moyenne de la Voie lactée, ce qui confirme que les supernovas fabriquent du phosphore Koo 2013. Le lieu est établi par l'observation directe, ce qui n'est le cas d'aucun autre élément mineur du corps.

La quantité, elle, fait débat. Pour Thomas Masseron et ses coauteurs, les modèles d'évolution chimique « sous-prédisent » le phosphore du Système solaire Masseron 2020. Kenji Bekki et Takuji Tsujimoto jugent eux aussi que des modèles nourris aux seules supernovas à effondrement reproduisent mal la façon dont le rapport entre phosphore et fer évolue d'une génération d'étoiles à l'autre Bekki 2024. Le modèle de Kobayashi et de ses coautrices trouve au contraire un accord « raisonnablement bon » avec des observations encore peu nombreuses Kobayashi 2020. Deux équipes manquent de phosphore, une troisième n'en manque pas : ce qui les sépare tient aux rendements attribués aux étoiles et au petit nombre d'étoiles où l'on a mesuré cet élément.

Trois résultats récents déplacent la question sans la clore. En 2020, Masseron et ses coauteurs découvrent quinze étoiles riches en phosphore, qui ont aussi un excès d'oxygène, de magnésium, de silicium, d'aluminium et de cérium ; aucune prédiction théorique n'explique ce mélange, et les auteurs avancent la rotation des étoiles ou des réactions dans leurs régions brassées Masseron 2020. En 2024, Bekki et Tsujimoto ajoutent une autre source, les novae de naines blanches dites oxygène-néon, de plus de 1,25 masse solaire : leur modèle reproduit les tendances observées, et il fait une prédiction, à savoir que le chlore doit suivre le phosphore d'une génération d'étoiles à l'autre, ce qui reste à vérifier Bekki 2024. En 2026, enfin, Sergueï Andrievsky et Sergueï Korotin refont les mesures du phosphore en tenant compte d'effets que les analyses

simples négligent ; les corrections ne changent ni la forme de la distribution du phosphore, ni l'existence des étoiles qui en sont riches Andrievsky 2026. L'origine stellaire du phosphore est donc sûre ; la part des supernovas, des novae et d'éventuelles autres sources ne l'est pas. Une mesure du chlore dans les mêmes étoiles testerait directement la piste des novae.

19.4.3 Le potassium, que les modèles ne savent pas faire

Le potassium est le cas le plus net d'un échec reconnu. Avec le scandium, le vanadium et le titane, il est « sous-produit à toutes les métallicités » par les modèles théoriques, c'est-à-dire dans les étoiles de toutes les époques Kobayashi 2020. Dans le modèle de Kobayashi et de ses coautrices, l'écart atteint environ un facteur six : le modèle fabrique six fois moins de potassium qu'on n'en mesure dans les étoiles. Le chlore prédit est aussi bas Kobayashi 2020[12]. Les mesures elles-mêmes demandent de fortes corrections, parce que l'atmosphère des étoiles n'est pas en équilibre thermique ; pour le potassium, elles peuvent changer l'abondance déduite d'un facteur cinq Kobayashi 2020.

Plusieurs remèdes sont proposés. Les neutrinos émis en masse par une supernova pourraient fabriquer du potassium en frappant les noyaux, et la rotation des étoiles pourrait en augmenter la production, ainsi que celle du chlore Kobayashi 2020. Christian Ritter et ses coauteurs proposent une autre piste : dans les étoiles massives, la fusion de deux couches en combustion, l'une d'oxygène et l'autre de carbone. Si de tels épisodes surviennent dans plus de la moitié des étoiles massives, les tendances observées du phosphore, du chlore, du potassium et du scandium sont reproduites Ritter 2018. Aucune piste n'est tranchée, et ce qui les départagerait serait de savoir, par des simulations ou des observations de ces étoiles, combien d'entre elles connaissent réellement ces processus. L'origine stellaire du potassium de nos cellules n'est pas en cause : on sait où il a été fait, pas encore combien chaque sorte d'étoile en a fait.

19.4.4 Le fer et les traces

Le fer naît de la combustion explosive du silicium, et deux sortes d'explosions le produisent : les supernovas de type Ia, explosions de naines blanches dans des systèmes doubles, où deux étoiles tournent l'une autour de l'autre, et les supernovas à effondrement de cœur Kobayashi 2020. Le partage dépend de la manière de compter. Kobayashi et ses coautrices écrivent d'abord que la moitié des éléments du « pic du fer », du chrome au zinc, viennent des Ia ; ils précisent ensuite que, si l'on a longtemps cru que la plupart du fer venait des Ia, leur modèle ne leur en attribue que 60 %, le reste venant surtout des hypernovas, des explosions d'étoiles de 20 à 50 masses solaires plus énergiques que les supernovas ordinaires Kobayashi 2020. Le cobalt, le cuivre et le zinc y seraient surtout l'œuvre de ces hypernovas. Le poids qu'on leur donne est un choix du modèle, pas une mesure. Les quatre grammes de fer d'un adulte renvoient donc pour moitié ou un peu plus à des naines blanches, et pour le reste à des étoiles massives qui ont explosé.

L'iode, le sélénium et le molybdène, présents en traces dans le corps, sont plus lourds que le fer. Comme tous ces éléments, ils sont fabriqués par captures de neutrons, soit lentes, dans les étoiles AGB, soit rapides, dans des événements violents dont le chapitre 13 discute les sites Kobayashi 2020. La part de chaque voie pour chacun de ces trois éléments reste à établir.

19.4.5 Ce que valent ces partages

Ces résultats n'ont pas tous la même solidité. Le site, d'abord, est établi : les étoiles massives et leurs supernovas pour le sodium, le magnésium, le phosphore, le soufre, le chlore, le potassium et la plus grande part du calcium, les naines blanches pour une grande part du fer, et, dans le cas du phosphore, l'observation directe Koo 2013. Les parts chiffrées sont des sorties de modèles ; pour les éléments alpha, leur incertitude

est d'environ un facteur 1,6 dans un sens ou dans l'autre Kobayashi 2020. Les échecs, enfin, sont reconnus : le potassium et le chlore, et peut-être le phosphore, ne sont pas encore produits en quantité suffisante par les modèles.

Ces partages valent aussi pour la Galaxie, pas pour un corps. Ils disent d'où vient en moyenne le carbone ou l'oxygène de la matière galactique, pas l'histoire d'un atome de carbone particulier : un noyau de carbone 12 soufflé par une géante AGB est identique à un noyau de carbone 12 éjecté par une supernova[13]. Ils valent enfin pour le voisinage actuel du Soleil, et le Soleil n'est probablement pas né là où il se trouve. Plus riche en métaux que ses voisines du même âge, il serait né plus près du centre de la Galaxie, puis aurait migré vers l'extérieur de trois kiloparsecs ou plus, environ dix mille années-lumière, comme beaucoup d'étoiles du disque interne Tsujimoto 2026[14]. Le gaz de la Galaxie est resté bien mélangé au fil de son enrichissement Xiang 2022, ce qui justifie d'appliquer au nuage solaire des moyennes galactiques. Mais de combien le partage des sources différait au rayon où le Soleil est né n'a pas été chiffré.

19.5 Le compte fermé

Les deux tableaux se croisent maintenant. Le premier donne ce qu'est le corps, en masse et en nombre. Le second donne, pour chaque élément, l'usine qui l'a fabriqué. Puisque l'hydrogène vient tout entier des premières minutes et que tous les autres éléments viennent des étoiles, le partage du corps entre ces deux origines se lit directement dans la ligne de l'hydrogène wiki-corps Kobayashi 2020 :

Origine	Part de la masse	Part des atomes	Nombre d'atomes	Date sur l'année cosmique
Le premier jour (hydrogène)	environ 9,5 %	environ 62 %	environ 4×10^{27}	1er janvier, premier dixième de microseconde
Les étoiles (tout le reste)	environ 90 %	environ 38 %	environ $2{,}7 \times 10^{27}$	de janvier au 2 septembre

Le premier jour fournit donc un peu moins d'un dixième de la masse du corps, mais six atomes sur dix. Les étoiles fournissent les neuf dixièmes de la masse, mais moins de quatre atomes sur dix[15].

La date de la seconde ligne a une borne : la naissance du Soleil. Les plus vieux solides du Système solaire ont 4 567 millions d'années Woitke 2024 ; le chapitre 15 a dit comment on les date. Sur l'année cosmique, cela tombe le 2 septembre, vers 5 h du matin[16]. Les éléments que les étoiles ont forgés pour le corps humain l'ont été avant cette date, dans des étoiles mortes avant la formation du nuage solaire, entre les premières étoiles de janvier et la fin du mois d'août.

Le partage entre étoiles se chiffre aussi, avec moins de précision. L'oxygène, qui fait 65 % de la masse, vient surtout des étoiles massives éjectées par leurs supernovas. En gros, les deux tiers de la masse du corps sortent donc d'étoiles massives qui ont explosé Kobayashi 2020. La moitié environ du carbone et de l'azote vient des vents de géantes AGB, soit environ 9 % de la masse pour le carbone et un peu plus de 1 % pour l'azote. Au total, à peu près un dixième de la masse du corps a été soufflé par des étoiles mourantes, sans explosion ; en nombre d'atomes, cette part tombe à environ un atome sur quinze[17]. Les naines blanches, par le calcium et le fer, ajoutent une part plus petite, de l'ordre d'un demi-centième de la masse[18]. Ces chiffres multiplient des proportions approchées par des pourcentages moyens et ne valent que comme ordres de grandeur. Ils suffisent à établir qu'une part non négligeable du corps n'est pas passée par une explosion.

Ce compte permet de reprendre une formule connue. « Nous sommes poussière d'étoiles » : la phrase dit vrai si l'on pèse, et faux si l'on compte. Pesé, le corps est fait à 90 % de matière forgée dans les étoiles. Compté, il est fait à 62 % de matière qu'aucune étoile n'a fabriquée, et qui date des premières minutes. Le chapitre 12 avait posé cette correction sans pouvoir la chiffrer. Le tableau du corps permet de la formuler exactement : nous sommes poussière d'étoiles pour neuf dixièmes de notre poids, et matière du premier jour pour six atomes sur dix.

Les deux comptes sont légitimes, et ils ne répondent pas à la même question. La masse est ce que mesure une balance. Elle dit quelle part de la matière d'un corps a été forgée dans les étoiles, et l'oxygène y domine parce que ses atomes sont lourds. Le nombre est ce que compte la chimie. Une molécule se forme atome par atome, et une molécule d'eau contient deux atomes d'hydrogène pour un d'oxygène, quel que soit leur poids. Pour savoir de quels atomes le vivant est construit, c'est le nombre qui compte, et en nombre, la brique la plus fréquente du corps a été fabriquée avant toute étoile.

Le calendrier donne à ce double compte sa forme la plus nette. Six atomes sur dix du corps humain ont été fabriqués dans le premier dixième de microseconde de l'année cosmique. Les quatre autres l'ont été au long des huit mois qui suivent, dans des étoiles massives qui ont explosé, dans des étoiles moyennes qui ont soufflé leur enveloppe, dans des naines blanches qui ont sauté. Tous ont attendu le 2 septembre pour se trouver réunis dans le même nuage, puis dans le disque et sur la planète dont les chapitres précédents ont décrit la formation (→ chap. 16). Le vivant n'a fabriqué aucun noyau. Il a assemblé ce que ces deux usines avaient laissé.

19.6 Là où la chaîne s'arrête

On sait désormais d'où vient chaque atome du vivant. On ne sait pas comment ces atomes se sont mis à vivre. Jusqu'ici, chaque maillon de la chaîne avait un mécanisme décrit et des mesures pour le vérifier. La nucléosynthèse primordiale est devenue « essentiellement une théorie sans paramètre » depuis que le fond diffus fixe la densité de matière ordinaire, et le deutérium qu'elle prédit est retrouvé dans des nuages lointains à un pour cent près Fields 2020. La forge des étoiles a ses réactions et ses rendements, et le phosphore a même été vu dans les débris d'une supernova Kobayashi 2020 Koo 2013 ; l'âge du Système solaire a ses horloges radioactives Woitke 2024 ; l'eau de la Terre a ses signatures isotopiques (→ chap. 18). Au passage du non-vivant au vivant, la chaîne n'a plus de mécanisme établi.

Le passage du non-vivant au vivant « n'a pas été observé expérimentalement » wiki-abiogenesis. Aucune expérience n'a fait naître un organisme de molécules inertes. Même reconstituer, à partir de composants simples, le dernier ancêtre commun de tous les êtres vivants actuels reste « loin d'être compris » wiki-abiogenesis. Ce qu'on possède tient en quelques repères, de statuts différents.

Le premier repère est une expérience. En 1952, Stanley Miller et Harold Urey ont montré que des molécules organiques, c'est-à-dire des molécules bâties autour du carbone comme celles des êtres vivants, peuvent se former spontanément à partir de composés plus simples wiki-abiogenesis[19]. Le résultat établit qu'une partie des briques du vivant n'a pas besoin du vivant pour apparaître. Il n'établit rien de plus. Entre un mélange de molécules organiques et un organisme, il manque tout ce qui fait qu'un organisme vit : un système qui se maintient, se copie et transmet ce qui le définit. Miller et Urey n'ont pas recréé la vie.

Le deuxième repère est une hypothèse, le monde ARN. Dans une cellule actuelle, deux fonctions sont séparées : l'ADN garde l'information héréditaire, et les protéines accélèrent les réactions chimiques, ce qu'on appelle la catalyse[20]. L'hypothèse du monde ARN décrit une Terre primitive où une seule sorte de molécule, l'ARN, aurait tenu les deux rôles : un ARN capable de se copier et de catalyser des réactions, antérieur à

l'ADN et aux protéines wiki-abiogenesis. Beaucoup de chercheurs jugent qu'un tel monde a dû précéder la vie à ADN wiki-abiogenesis. Le mot « jugent » marque le statut de la proposition : c'est une reconstruction plausible, soutenue par une large part de la communauté, pas un résultat.

Le troisième repère est un débat de méthode. Les approches dites « réplication d'abord » cherchent comment sont apparues des molécules capables de se copier elles-mêmes. Les approches dites « métabolisme d'abord » cherchent comment une catalyse naturelle, des réactions chimiques entretenues sans organisme, a pu fournir les précurseurs de ces molécules wiki-abiogenesis. Les deux ne s'opposent pas sur les ingrédients du vivant, mais sur l'ordre de leur apparition : la première fait commencer la vie par l'information, la seconde par la chimie qui l'alimente. Le monde ARN relève de la première famille. Ce qui les départagerait serait une expérience qui obtiendrait sans intervention l'une des deux étapes, dans des conditions tenues pour celles de la Terre primitive, et montrerait qu'elle conduit à l'autre[21].

Le lieu reste lui aussi ouvert. Deux cadres sont proposés : les sources hydrothermales, où de l'eau chauffée par la roche sort du fond des océans, et les mares de surface wiki-abiogenesis. Aucune de ces pistes n'est un résultat établi.

On connaît en revanche la fenêtre. D'après le registre géologique, la vie est très probablement apparue sur Terre entre 4,32 et 3,48 milliards d'années wiki-abiogenesis. La borne récente est l'âge des stromatolithes de la formation de Dresser, en Australie-Occidentale, des structures attribuées à des communautés de microbes dont la plupart des scientifiques acceptent l'origine biologique Westall 2025 wiki-earliestlife. La borne ancienne est proche de la date où Frances Westall place les premiers océans habitables, 4,34 milliards d'années Westall 2025[22]. Sur l'année cosmique, la fenêtre s'ouvre le 8 septembre, six jours après la naissance du Soleil, et se ferme le 30 septembre au soir : trois semaines cosmiques, 840 millions d'années[23].

La fenêtre dit que la vie est apparue tôt, au cours du premier milliard d'années de la Terre, sur une planète qui avait déjà de l'eau liquide. Elle ne dit rien du mécanisme. Pour l'hydrogène du corps, on connaît la date à la minute près, la réaction, et la mesure qui la vérifie. Pour le passage de ces atomes à la vie, on connaît une fenêtre de 840 millions d'années et aucun mécanisme observé. C'est la plus grande inconnue de la chaîne qui va du premier jour à nous. Le chapitre 20 commence après ce passage, avec les premières traces que le vivant a laissées dans les roches et ce qu'elles prouvent.

19.7 Ce qu'on ne sait pas

On ne connaît le partage des éléments entre les étoiles qu'à travers des modèles d'évolution chimique Kobayashi 2020. Les « environ la moitié » pour le carbone, l'azote et le fer, et le « surtout » pour l'oxygène, dépendent de ce que chaque sorte d'étoile rejette en mourant et du rythme de ces morts ; pour les éléments alpha, l'incertitude atteint un facteur 1,6. Le même modèle donne pour le fer tantôt « la moitié », tantôt 60 % aux naines blanches, selon qu'on compte tout le pic du fer ou le fer seul. Le sens du partage est établi : l'oxygène aux étoiles massives, une grande part du carbone et de l'azote aux vents des étoiles moyennes, une grande part du fer aux naines blanches. Les chiffres qui en découlent pour le corps, deux tiers de la masse pour les étoiles massives, un dixième pour les vents des géantes AGB, sont des ordres de grandeur. Confiance élevée sur le sens, modérée sur les proportions.

On ne sait pas encore fabriquer, dans les modèles, tout le potassium et tout le chlore qu'on mesure : l'écart atteint un facteur six pour le potassium Kobayashi 2020. Pour le phosphore, les équipes ne s'accordent pas sur l'existence même d'un déficit Masseron 2020 Kobayashi 2020. Les remèdes proposés, neutrinos des supernovas, rotation des étoiles, fusions de couches d'oxygène et de carbone, novae de naines blanches oxygène-néon, sont des hypothèses Ritter 2018 Bekki 2024. La plus directement testable est celle des novae : si

elles font le phosphore, le chlore doit suivre le phosphore d'une génération d'étoiles à l'autre Bekki 2024. Confiance élevée sur le lieu de fabrication de ces éléments, faible sur leur recette exacte.

On ne sait pas si le nuage d'où est né le Soleil avait le mélange moyen du voisinage solaire actuel. Le Soleil serait né plus près du centre, puis aurait migré de trois kiloparsecs ou plus Tsujimoto 2026, et le gaz galactique est resté bien mélangé Xiang 2022. Ce qui trancherait : des modèles d'évolution chimique calculés au rayon de naissance du Soleil. Ce doute touche le partage entre étoiles, pas le partage entre premier jour et étoiles, qui ne dépend que de la ligne de l'hydrogène.

Les chiffres du corps sont des moyennes tirées d'une source encyclopédique wiki-corps, pour un adulte dont la masse de référence n'est pas précisée. Ils varient avec la teneur en eau, de 48 à 58 % en moyenne selon le sexe, avec des écarts types de six à huit points. Un recalcul approché des parts d'atomes à partir des parts de masse retrouve l'hydrogène à environ 61 %, mais donne un peu plus d'oxygène et un peu moins de carbone que le tableau. La conclusion principale, six atomes sur dix du premier jour, n'en dépend pas. Ces chiffres demandent à être recoupés sur des données physiologiques de référence. Confiance élevée sur l'ordre de grandeur, modérée sur la seconde décimale.

On ne sait pas comment la vie est apparue. Le passage du non-vivant au vivant n'a pas été observé wiki-abiogenesis. L'expérience de Miller et Urey établit la formation spontanée de molécules organiques, rien au-delà. Le monde ARN est une hypothèse largement partagée, non un résultat. Les approches « réplication d'abord » et « métabolisme d'abord » s'opposent sur l'ordre d'apparition de l'information et de la chimie qui l'alimente ; une expérience qui ferait naître l'une de l'autre dans des conditions plausibles les départagerait. Le lieu, sources hydrothermales ou mares de surface, est ouvert. La confiance porte sur la fenêtre, pas sur le mécanisme.

On ne connaît la date de l'apparition de la vie qu'à 840 millions d'années près : entre 4,32 et 3,48 milliards d'années, très probablement wiki-abiogenesis. La borne récente repose sur des stromatolithes acceptés par la plupart des scientifiques, sans que des explications non biologiques soient entièrement écartées wiki-earliestlife. Les traces candidates plus anciennes, et ce qu'elles valent, sont l'objet du chapitre suivant.

19.8 Ce que ce chapitre démontre

Un adulte moyen compte environ 7×10^{27} atomes. Six éléments font environ 99 % de sa masse : 65 % d'oxygène, 18,5 % de carbone, 9,5 % d'hydrogène, 2,6 % d'azote, 1,3 % de calcium et 0,6 % de phosphore. Compté en atomes, l'ordre s'inverse, parce que l'hydrogène est le plus léger : 62 % d'hydrogène, 24 % d'oxygène, 12 % de carbone. L'essentiel de cet hydrogène est lié dans l'eau, qui fait environ 53 % de la masse d'un adulte, 48 % en moyenne chez les femmes et 58 % chez les hommes. Potassium, soufre, sodium, chlore et magnésium font ensemble environ 0,85 % de la masse ; le fer, quelques grammes wiki-corps.

La nucléosynthèse primordiale ne produit que de l'hydrogène, de l'hélium et des traces de lithium, faute de noyau stable de masse 5 ou 8 fields2014pdg. Les étoiles consomment l'hydrogène et n'en fabriquent pas wiki-stellarnuc. Tout l'hydrogène du corps date donc des premières minutes, soit, sur l'année cosmique, du premier dixième de microseconde du 1er janvier. L'hélium, second produit de ces minutes, ne se lie à rien et manque dans le corps : du premier jour, le vivant n'a gardé que l'hydrogène.

Les éléments de masse 12 ou plus, du carbone à l'uranium, sont formés dans les étoiles Kobayashi 2020. Selon les modèles d'évolution chimique, l'oxygène vient surtout des étoiles massives, éjecté par les supernovas à effondrement de cœur. Environ la moitié du carbone et de l'azote vient des vents de géantes AGB, qui n'explosent pas. Le sodium et le magnésium sortent de la combustion du carbone dans les étoiles massives,

le soufre, le chlore, le potassium et le calcium de celle de l'oxygène wiki-cburn wiki-oxyburn, avec près de 40 % du calcium venu des naines blanches. Le fer vient pour moitié à 60 % de naines blanches qui explosent, pour le reste surtout d'étoiles massives Kobayashi 2020. Le phosphore a été vu dans les débris d'une supernova Koo 2013, mais sa quantité est disputée, et les modèles font six fois trop peu de potassium. Ces partages valent pour la Galaxie, pas pour un atome ni pour un corps.

Le premier jour fournit environ 9,5 % de la masse du corps et 62 % de ses atomes, soit environ 4×10^{27} atomes. Les étoiles fournissent environ 90 % de la masse et 38 % des atomes, forgés avant la naissance du Soleil, le 2 septembre de l'année cosmique Woitke 2024 wiki-cosmiccal. Environ les deux tiers de la masse du corps sortent d'étoiles massives qui ont explosé, et environ un dixième a été soufflé par des étoiles mourantes. « Nous sommes poussière d'étoiles » vaut pour neuf dixièmes de notre masse, pas pour la majorité de nos atomes.

Le passage du non-vivant au vivant n'a pas été observé expérimentalement. L'expérience de Miller et Urey (1952) montre que des molécules organiques peuvent se former spontanément ; le monde ARN est une hypothèse ; l'ordre entre réplication et métabolisme, comme le lieu, reste ouvert. D'après le registre géologique, la vie est très probablement apparue entre 4,32 et 3,48 milliards d'années wiki-abiogenesis, du 8 au 30 septembre de l'année cosmique. On connaît l'origine de chaque atome du vivant, à la minute près pour l'hydrogène, et l'on ignore encore comment ces atomes se sont mis à vivre.

Notes

1. Masses atomiques usuelles, en unités de masse atomique : hydrogène ≈ 1, carbone ≈ 12, azote ≈ 14, oxygène ≈ 16, phosphore ≈ 31, calcium ≈ 40. Valeurs standard, non référencées dans ce chapitre ; la « masse 12 » du carbone est celle qu'emploient Kobayashi, Karakas et Lugaro (2020), *The Astrophysical Journal* 900, 179. ↩

2. Calcul de ce chapitre. En divisant chaque part de masse par la masse atomique usuelle (O : 65/16 ≈ 4,06 ; C : 18,5/12 ≈ 1,54 ; H : 9,5/1,008 ≈ 9,42 ; N : 2,6/14 ≈ 0,19 ; Ca : 1,3/40 ≈ 0,03 ; P : 0,6/31 ≈ 0,02), puis en normalisant, on obtient environ 61 % d'hydrogène, 26 % d'oxygène et 10 % de carbone. Le tableau source (Wikipédia, « Composition of the human body », consulté en 2026) donne 62, 24 et 12, sans détailler comment ses parts d'atomes sont calculées ; l'écart peut tenir à des données d'origine différentes pour les deux colonnes. Il ne change ni l'ordre des éléments ni la conclusion sur l'hydrogène. ↩

3. Calcul de ce chapitre, sur l'eau moyenne de 53 % : hydrogène de l'eau ≈ 53 × 1/9 ≈ 5,9 % de la masse du corps, soit environ 62 % des 9,5 % d'hydrogène ; oxygène de l'eau ≈ 53 × 8/9 ≈ 47 % de la masse du corps, soit environ 73 % des 65 % d'oxygène. « L'essentiel » de l'hydrogène est donc dans l'eau au sens d'une majorité, pas d'une quasi-totalité. ↩

4. Wikipédia, « Composition of the human body » : « The average adult human body contains approximately 7×10^27 atoms », sans masse de référence dans le passage cité. Chiffres encyclopédiques, non recoupés sur une source physiologique de référence. ↩

5. Déduction tirée de deux faits sourcés : la nucléosynthèse primordiale ne produit que H, He et des traces de Li (Fields, Molaro et Sarkar 2014, revue du Particle Data Group, *Chinese Physics C* 38, 090001) ; les étoiles commencent par changer leur hydrogène en hélium (Wikipédia, « Stellar nucleosynthesis »). Aucun processus produisant de l'hydrogène en quantité après les premières minutes n'est connu des sources citées ici. ↩

6. Calcul : 62 % de $7 \times 10^{27} \approx 4{,}3 \times 10^{27}$, arrondi à 4×10^{27}. ↩

7. Présentation usuelle de la différence entre chimie et physique nucléaire, non vérifiée sur une source dans ce chapitre. Ce qui est daté ici est la fabrication des noyaux ; l'origine des électrons n'est pas traitée. ↩

8. Calcul de ce chapitre : sur 13,8 milliards d'années ramenés à 365 jours, une seconde cosmique vaut environ 437 ans (438 selon Wikipédia, « Cosmic Calendar »). Vingt minutes, soit 1 200 secondes, font environ $3{,}8 \times 10^{-5}$ an, donc environ $8{,}7 \times 10^{-8}$ seconde cosmique, soit 0,09 microseconde. La fin de la nucléosynthèse vers vingt minutes : Wikipédia, « Big Bang nucleosynthesis » et « Chronology of the universe ». ↩

9. L'inertie chimique de l'hélium, gaz rare comme le néon et l'argon, est la présentation usuelle ; elle n'est pas appuyée ici sur une source propre, pas plus que son absence du corps (non vérifié). ↩

10. Fractions de masse de Wikipédia, « Composition of the human body » : K 1,5–2 × 10^{-3} ; S 2,5 × 10^{-3} ; Na 1,5 × 10^{-3} ; Cl 1,5 × 10^{-3} ; Mg 500 × 10^{-6} ; Fe 60 × 10^{-6} ; Zn 32 × 10^{-6} ; I 160 × 10^{-9}. Conversion en grammes faite par ce chapitre pour une masse de 70 kg, choisie pour le calcul : S 175 g ; K 105–140 g ; Na et Cl 105 g chacun ; Mg 35 g ; Fe 4,2 g ; Zn 2,2 g ; I 11 mg. La somme des cinq éléments K, S, Na, Cl, Mg dans ce tableau fait 0,75 à 0,8 %, un peu moins que les 0,85 % donnés par le texte de la même source. ↩

11. Les astronomes expriment ces écarts en « dex », un dex valant un facteur dix. Kobayashi et al. (2020) donnent le calcium prédit environ 0,1 dex sous les observations, soit environ 25 % ; et une incertitude de « ~ ±0.2 dex » pour les éléments alpha, soit un facteur 1,6 (p. 30-31). Fractions venues des Ia : « 22% of Si, 29% of S, 34% of Ar, and 39% of Ca come from SNe Ia ». ↩

12. Kobayashi, Karakas et Lugaro (2020) : « K, Sc, V and Ti are known to be under-produced at all metallicity ranges in theoretical models » ; « the predicted [Cl/Fe] is negative overall, giving −0.8 at [Fe/H] = −2, which is as low as for K and Sc ». Le facteur six (10 ^ 0,8 ≈ 6,3) est une lecture de leur figure 21 pour le potassium, faite pour ce chapitre. Les corrections hors équilibre des mesures du potassium vont jusqu'à −0,7 dex, soit un facteur cinq. ↩

13. Raisonnement de ce chapitre. Il porte sur les noyaux d'un même isotope ; la question de savoir si des rapports isotopiques pourraient trahir, dans un échantillon, la part de chaque source stellaire n'est pas traitée ici. ↩

14. Conversion usuelle : un kiloparsec vaut environ 3 260 années-lumière, donc trois kiloparsecs environ 10 000 années-lumière. Tsujimoto et al. (2026), *Astronomy & Astrophysics* 707, L11 : « the Sun's long-distance (>= 3 kpc) migration is shared by many inner disk stars ». Le rayon de naissance exact n'est pas chiffré dans cet article. ↩

15. Calcul de ce chapitre, à partir du tableau de Wikipédia. Part des étoiles en masse : 100 − 9,5 ≈ 90 %, l'hélium étant absent et le lithium négligeable. Part des étoiles en atomes : 100 − 62 = 38 % ; somme de contrôle sur les cinq autres éléments majeurs : 24 + 12 + 1,1 + 0,22 + 0,22 ≈ 37,5 %, le reste venant des éléments mineurs et des traces. Nombre : 38 % de 7 × 10^{27} ≈ 2,7 × 10^{27}. ↩

16. Calcul de ce chapitre : 13 800 − 4 567 = 9 233 millions d'années après le début, soit 244,2 jours à raison de 37,8 millions d'années par jour ; le 31 août s'achève après 243 jours, d'où le 2 septembre vers 5 h. Le calendrier de Wikipédia (« Cosmic Calendar ») place le Système solaire au 9 septembre, avec d'autres âges retenus. L'âge de 4 567,30 ± 0,16 millions d'années est celui des inclusions riches en calcium et aluminium datées par plomb-plomb (Woitke et al. 2024, *Astronomy & Astrophysics* 687, A65) ; une révision à 4 568,4 millions d'années est défendue par Desch et al. (2023), ce qui déplacerait la date d'une quarantaine de minutes cosmiques. ↩

17. Calcul de ce chapitre, sur la base d'« environ la moitié » (Kobayashi et al. 2020 : « Roughly half of the light elements such as C, N and F are produced by low- and intermediate-mass stars during their asymptotic giant branch (AGB) phase »). En masse : 18,5/2 ≈ 9,3 % pour le carbone et 2,6/2 ≈ 1,3 % pour l'azote, soit environ 10,5 %. En atomes : 12/2 = 6 % et 1,1/2 ≈ 0,55 %, soit environ 6,5 %, un peu moins d'un atome sur quinze. Les « deux tiers de la masse » pour les étoiles massives reposent sur les 65 % d'oxygène, dont la part exacte venue de ces étoiles n'est pas chiffrée. ↩

18. Calcul de ce chapitre : 39 % du calcium (1,3 % de la masse) ≈ 0,5 % de la masse du corps ; le fer (60 millionièmes) et le soufre (29 % de 0,25 %, soit environ 0,07 %) ne changent pas cet ordre de grandeur. Proportions de Kobayashi et al. (2020), valables pour le voisinage solaire dans leur modèle. ↩

19. Wikipédia, « Abiogenesis » : l'expérience a montré que des molécules organiques peuvent se former spontanément. Le mélange de gaz employé, la source d'énergie et la nature des molécules produites ne sont pas détaillés ici. ↩

20. Définitions usuelles de l'ADN, des protéines et de la catalyse, non référencées dans ce chapitre. ↩

21. Raisonnement de ce chapitre sur ce qui départagerait les deux approches. ↩

22. La borne récente (3,48 milliards d'années) coïncide avec l'âge des stromatolithes de Dresser (Westall 2025, *Philosophical Transactions of the Royal Society B*) ; la borne ancienne (4,32 milliards d'années) est donnée par Wikipédia (« Abiogenesis ») sans justification dans le passage cité. Le rapprochement avec les océans habitables de Westall (4,34 milliards d'années) est de ce chapitre. ↩

23. Calcul sur 13,8 milliards d'années = 365 jours (un jour ≈ 37,8 millions d'années). 4,32 : (13,8 − 4,32)/0,0378 ≈ 250,7 jours, le 8 septembre vers 17 h. 3,48 : (13,8 − 3,48)/0,0378 ≈ 272,9 jours, le 30 septembre vers 22 h. Écart : 0,84 milliard d'années ≈ 22 jours. ↩

CHAPITRE 20

Les dernières secondes de décembre

des premières traces de vie (~3,5 Ga, candidats plus anciens contestés) à aujourd'hui

brouillon · 5525 mots

20.1 Une année pour ranger l'histoire

Le livre s'est servi de l'année cosmique depuis son premier chapitre, par fragments, chaque fois qu'une durée devenait trop grande pour être lue. Ce chapitre la déplie en entier. La règle est une simple règle de trois : les 13,8 milliards d'années de l'histoire de l'Univers sont ramenés à 365 jours, le début conventionnel des horloges tombant le 1er janvier à minuit et le présent le 31 décembre à minuit. À cette échelle, un jour vaut environ 37,8 millions d'années, une heure 1,58 million d'années, une minute environ 26 000 ans et une seconde environ 438 ans wiki-cosmiccal[1]. L'astronome américain Carl Sagan a popularisé cette image en 1977, dans *Les Dragons de l'Éden*, puis en 1980 dans la série télévisée *Cosmos* wiki-cosmiccal. Les dates qui suivent ont été recalculées sur la même règle. La conversion, elle, ne comporte aucune incertitude. Celles qu'on lira viennent toutes des âges convertis.

Le début de l'année est saturé. Les noyaux d'hydrogène et d'hélium, fabriqués entre 3 et 20 minutes environ après le début wiki-chrono, sont achevés dans le premier dixième de microseconde du 1er janvier (→ chap. 5). La première lumière, celle que nous recevons comme fond diffus cosmologique, part vers minuit et quart, quand l'Univers a 380 000 ans esa2013planck. La galaxie MoM-z14, vue telle qu'elle était 280 millions d'années après le début Naidu 2025, brille le 8 janvier vers 10 h (→ chap. 10). Le Soleil arrive bien plus tard. Les plus vieux solides du Système solaire ont 4 567 millions d'années, peut-être un million de plus Woitke 2024 Desch 2023. Le chapitre 15 a dit comment on les date. Le Soleil naît donc environ 9,2 milliards d'années après le Big Bang, aux deux tiers de l'histoire cosmique, et sur le calendrier le 2 septembre vers 5 h du matin[2]. Le chapitre 25 montrera que ce raccord entre l'âge calculé de l'Univers et l'âge lu dans les plus vieilles pierres a un lieu et un instant précis.

Il reste quatre mois. Tout ce que les chapitres précédents ont placé dans ces mois tient dans leurs premiers jours. Les planètes se forment le 2 septembre, et la Lune naît entre le 3 et le 5 (→ chap. 17). Le plus vieux grain de Terre, un zircon australien, cristallise le 6 septembre et porte déjà l'indice d'une eau liquide en surface Wilde 2001 (→ chap. 18). Le reste de l'année appartient au vivant.

20.2 Septembre : une planète habitable, une vie déduite

La géologue Frances Westall place des océans « habitables » dès 4,34 milliards d'années, soit le 8 septembre de l'année cosmique Westall 2025. Le mot « habitable » ne dit pas que ces océans étaient tranquilles. Selon le modèle de bombardement de Simone Marchi et de ses coauteurs, calé sur les cratères de la Lune et sur la chimie de la Terre, la jeune Terre aurait reçu trois à sept corps de plus de 500 km, chacun capable de vaporiser l'océan entier. Le dernier d'entre eux frapperait vers 4,3 milliards d'années dans la moitié des simulations, et vers 4 milliards d'années dans une sur dix Marchi 2014. L'eau vaporisée retombe ensuite en pluie. Mais vaporiser l'océan ne suffit pas à stériliser la planète. Une vie enfouie dans la roche pourrait survivre, et seule la fusion de toute la surface garantirait la stérilisation. Pour cela, il faudrait un impacteur de 2 000 à 2 700 km de diamètre Citron 2022. Le début de septembre est donc une période où la vie devient possible sur Terre, sans qu'elle y soit forcément à l'abri.

Aucune roche de cette époque ne montre de vie. Le premier argument pour une vie très précoce vient des gènes. Tous les êtres vivants actuels descendent d'un dernier ancêtre commun universel, qu'on désigne par l'acronyme anglais LUCA. En 2024, Edmund Moody et ses coauteurs l'ont daté par une horloge moléculaire, c'est-à-dire en convertissant en temps le nombre de différences accumulées entre des gènes apparentés. La difficulté est d'enraciner un arbre qui n'a aucun groupe extérieur. Les auteurs la contournent avec des familles de gènes qui s'étaient déjà dédoublées avant LUCA, et dont on retrouve les deux copies chez les bactéries comme chez les archées. Treize points de calibration ancrent l'arbre dans le temps géologique. La borne la plus ancienne est l'impact qui a formé la Lune, 4 510 millions d'années à 10 millions près, avant lequel aucune vie n'aurait survécu Moody 2024. Le résultat est d'environ 4,2 milliards d'années, entre 4,09 et 4,33 selon le modèle d'horloge Moody 2024 : LUCA vit entre le 8 et le 14 septembre, moins de deux semaines cosmiques après la naissance du Soleil[3].

Ce résultat demande deux précautions. La première tient à ce qu'est LUCA. Pour le biologiste Greg Fournier, LUCA « n'est pas la première cellule, pas le premier microbe, pas le premier de quoi que ce soit » : il marque plutôt la fin de l'histoire de l'origine de la vie quanta2024luca. Le portrait qu'en tirent Moody et ses coauteurs est celui d'une cellule déjà complète, sans oxygène, qui tirerait son énergie de l'hydrogène et du gaz carbonique et posséderait un système de défense contre les virus Moody 2024. Si LUCA a 4,2 milliards d'années, la vie est plus ancienne encore. Selon Aaron Goldman et Arturo Becerra, l'évolution qui va de l'origine de la vie à LUCA aurait alors tenu en 100 à 200 millions d'années, soit trois à cinq jours de l'année cosmique Goldman 2024. La seconde précaution tient à la méthode. Le temps n'entre dans l'arbre que par les calibrations, et l'âge bouge si l'une d'elles est révisée Moody 2024. Patrick Forterre, de l'Institut Pasteur, juge « très difficile d'imaginer » un LUCA antérieur à 4 milliards d'années, parce que la Terre aurait eu besoin de plus de temps pour refroidir. Luis Delaye accepte l'ancienneté, mais doute qu'il ait été aussi complexe quanta2024luca. Ces objections sont des réserves. Aucune contre-analyse publiée n'a encore proposé une autre date. LUCA vers 4,2 milliards d'années reste un résultat de modèle, récent, que rien dans les roches ne confirme.

20.3 Le 30 septembre : la première trace sûre

Les roches donnent une réponse plus tardive, et plus sûre. À partir de 3,5 milliards d'années, des signes de vie abondants apparaissent dans des roches mieux conservées, formées en milieu sans oxygène Westall 2025. Les plus anciens sont les stromatolithes de la formation de Dresser, en Australie-Occidentale, datés de 3,48 milliards d'années. Les stromatolithes sont des structures en couches que bâtissent des tapis de microbes en piégeant des sédiments, couche après couche. Ceux de Dresser sont suivis, vers 3,4 milliards d'années, par les structures microbiennes du chert de Strelley Pool, dans la même région Westall 2025. Pour Dresser, « la plupart des scientifiques acceptent leur origine biologique », sans que des explications non biologiques soient tout à fait exclues wiki-earliestlife. Sur le calendrier, cette première trace largement admise tombe le 30 septembre, vers 23 h[4]. Entre LUCA et Dresser s'étendent plus de 600 millions d'années, deux semaines et demie cosmiques, pendant lesquelles la vie est déduite des gènes et non vue dans les roches.

Plusieurs candidats prétendent combler cet intervalle. Aucun n'est accepté.

Isua, Groenland, 3,7 milliards d'années (25 septembre). En 2016, Allen Nutman et ses coauteurs décrivent dans des carbonates de 3 700 millions d'années, dégagés par la fonte de la neige, des stromatolithes de 1 à 4 cm de haut, antérieurs de 220 millions d'années à ceux de Dresser Nutman 2016. En 2018, Abigail Allwood et ses coauteurs, dont le spécialiste d'Isua Minik Rosing, concluent qu'il s'agit plus plausiblement de structures de déformation, formées dans la roche longtemps après son enfouissement Allwood 2018. En 2020, une nouvelle étude, dont Allwood est coautrice, ne trouve dans ces structures aucune lamination in-

terne : leur litage apparent viendrait de l'altération inégale des surfaces, et les formes seraient tectoniques zawaski2020egu. En août 2019, une douzaine de chercheurs des deux camps et de tiers se sont retrouvés sur l'affleurement. Ils sont repartis « sans réel consensus », mais d'accord sur un point : les indices présentés ne franchissaient pas la barre élevée qu'exige la plus ancienne trace de vie nasa2019isua. Il ne faut pas confondre ces formes avec le graphite d'Isua, du carbone que de nouvelles analyses jugent plutôt d'origine biologique wiki-earliestlife.

Nuvvuagittuq, Québec. Des filaments d'hématite, un oxyde de fer, y ont été interprétés comme des microfossiles de bactéries qui oxydaient le fer. Des processus non biologiques pourraient pourtant expliquer à la fois leur forme et leurs isotopes Westall 2025. L'âge de la roche est lui-même disputé : de 3,75 milliards d'années selon les zircons des granites qui la recoupent à 4,32 milliards d'années selon une autre méthode. En 2025, un filon qui la traverse a été daté de 4 157 millions d'années : la roche est donc au moins aussi vieille, ce qui écarte l'âge de 3,75 milliards d'années wiki-nuvvuagittuq.

Jack Hills, Australie, 4,1 milliards d'années (14 septembre). Un zircon y enferme du graphite dont la composition en isotopes du carbone est compatible avec une origine biologique, mais aussi avec des processus de la croûte ou une origine extraterrestre Westall 2025. C'est la plus ancienne trace chimique proposée, et elle est contestée wiki-earliestlife.

Les trois dossiers butent sur le même obstacle. Une forme, une texture ou un rapport entre isotopes peuvent naître sans vie, et dans des roches chauffées, écrasées et recristallisées, les processus physiques et chimiques produisent des signes qui imitent ceux du vivant. Dresser se distingue parce que ses roches sont mieux conservées et ses signes abondants et variés Westall 2025. Ce qui ferait avancer les candidats plus anciens est connu dans son principe : des signes indépendants qui concordent dans une même roche peu déformée, ou des cartographies chimiques assez fines pour exclure la déformation. Nutman lui-même estimait en 2019 qu'il faudrait « cinq à dix ans » pour trancher le cas d'Isua nasa2019isua.

D'après le registre géologique, la vie est très probablement apparue sur Terre entre 4,32 et 3,48 milliards d'années, du 8 au 30 septembre de l'année cosmique wiki-abiogenesis. La date est connue à trois semaines cosmiques près. Le mécanisme ne l'est pas : le passage du non-vivant au vivant « n'a pas été observé expérimentalement » wiki-abiogenesis. Les pistes qu'on explore, le monde ARN, l'ordre entre la réplication et le métabolisme, les sources hydrothermales ou les mares de surface, ont été présentées au chapitre 19. Aucune n'est un résultat établi.

20.4 Octobre et novembre : deux mois de microbes

Une fois apparu, le vivant reste microbien très longtemps. Les cyanobactéries, des bactéries dont la photosynthèse rejette de l'oxygène, existent au moins depuis 2,45 à 2,32 milliards d'années, et « probablement dès 2,7 milliards d'années » wiki-goe, soit le 21 octobre de l'année cosmique. La date exacte de cette invention reste discutée. L'oxygène, lui, n'entre dans l'air que plus tard. Le chapitre 18 a raconté la Grande Oxydation. L'oxygène franchit un premier seuil vers 2,43 milliards d'années, oscille pendant environ deux cents millions d'années et s'installe pour de bon vers 2,22 milliards d'années Poulton 2021. Une présentation plus large fait courir la Grande Oxydation de 2,46 à 2,06 milliards d'années wiki-goe. Sur le calendrier, l'oxygène arrive entre le 27 et le 28 octobre et s'installe le 3 novembre ; la période large s'achève le 7 novembre[5]. Si les cyanobactéries existaient dès le 21 octobre, une semaine cosmique, plus de deux cents millions d'années, sépare la fabrique d'oxygène de l'oxygène libre dans l'air. Si les cyanobactéries n'apparaissent que vers 2,45 milliards d'années, le décalage disparaît presque. C'est la date d'apparition des cyanobactéries qui décide de sa durée.

La cellule à noyau, l'eucaryote, naît d'une union. Une archée sans oxygène, parente des archées dites d'Asgard, s'est associée à une bactérie qui respirait l'oxygène, une alphaprotéobactérie, qui est devenue la mitochondrie, la centrale énergétique des cellules actuelles wiki-eukaryote. Le moment de l'union n'est pas daté directement. Les plus anciens fossiles qui pourraient être des eucaryotes viennent du groupe de Ruyang, en Chine, et ont de 1,8 à 1,6 milliard d'années wiki-eukaryote : ils placent la cellule complexe entre le 14 et le 19 novembre. *Grypania*, une forme spiralée jusqu'à 2,1 milliards d'années, reste contestée wiki-eukaryote. Selon une autre synthèse, le registre montre des eucaryotes dès 1,9 à 1,4 milliard d'années, mais leur histoire ancienne reste « mal résolue » Gibson 2018.

La cellule complexe reste ensuite discrète pendant près d'un mois. Pour le Protérozoïque moyen, de 1,8 à 0,8 milliard d'années, les isotopes du chrome indiquent un oxygène atmosphérique qui ne dépassait pas 0,1 % du niveau actuel Planavsky 2014. D'autres traceurs donnent des valeurs plus hautes Tostevin 2020. La plus ancienne algue qui ait encore des descendants, l'algue rouge *Bangiomorpha*, est datée de 1,047 milliard d'années, le 4 décembre Gibson 2018. Pourtant, d'après les molécules fossiles propres aux eucaryotes, les bactéries restent les seuls producteurs notables des océans jusqu'au Cryogénien, vers 720 millions d'années Brocks 2017. Pendant les deux tiers de son histoire, la vie terrestre a été microbienne.

20.5 Décembre : glaces, algues, animaux

Le Cryogénien porte deux glaciations globales. La première, dite sturtienne, commence vers 717 millions d'années et dure 57 à 59 millions d'années. La seconde, dite marinoenne, s'achève vers 635 millions d'années Hoffman 2017. Des glaciers ont alors touché la mer aux basses latitudes, et la sortie de chaque glaciation est due au gaz carbonique des volcans, accumulé pendant des millions d'années sous un ciel où la glace bloquait l'altération des roches qui l'aurait consommé Hoffman 2017. On ignore encore si tout l'océan était gelé ou si une bande d'eau libre subsistait à l'équateur. Sur le calendrier, la Terre blanche occupe le 13 et le 14 décembre ; après un répit, elle revient le 14 au soir et repart le 15 vers 5 h. Entre les deux glaciations, vers 659 à 645 millions d'années, les algues planctoniques prennent la mer Brocks 2017.

Les animaux viennent ensuite, mais leur date dépend de la façon dont on la cherche. Les horloges moléculaires placent l'origine du groupe actuel des animaux entre 833 et 650 millions d'années, du 9 au 14 décembre. Leurs auteurs préviennent que ces dates ne sont pas assez précises pour tester un lien avec les glaciations Dosreis 2015. La plus ancienne trace attribuée aux éponges, une molécule fossile du Cryogénien, s'est révélée être probablement d'origine algale Bobrovskiy 2021. Dans les roches, les premiers grands organismes, ceux d'Avalon, apparaissent vers 575 millions d'années, le 16 décembre au soir wiki-avalon. Un spécimen de *Dickinsonia* âgé de 558 millions d'années contient du cholestérol, marque de la vie animale. C'est l'un des plus anciens animaux confirmés, le 17 décembre vers 6 h Bobrovskiy 2018. L'air de l'époque n'était pas encore le nôtre. L'oxygène y était intermédiaire et très variable, et ne se serait stabilisé près de son niveau actuel qu'à la fin du Paléozoïque Tostevin 2020.

L'« explosion cambrienne » commence vers 538,8 millions d'années, le 17 décembre vers 18 h. Elle dure de 13 à 25 millions d'années, soit huit à seize heures cosmiques, et presque tous les embranchements animaux y font leur première apparition dans les fossiles wiki-cambrian. Une analyse statistique la trouve pourtant « pas plus rapide » que les autres radiations animales, et les horloges moléculaires font diverger les lignées animales avant 580 millions d'années wiki-cambrian. Les animaux surgissent donc dans les fossiles le 17 décembre, alors que leurs lignées divergent quelques jours plus tôt. La part de cet écart qui tient à la conservation, des corps mous qui ne fossilisent pas, des coquilles qui le font, reste débattue.

20.6 Cinq coupures

La fin de l'année est rythmée par cinq grandes extinctions, du 20 au 30 décembre, à la fin de l'Ordovicien, du Dévonien, du Permien, du Trias et du Crétacé.

Extinction	Il y a	Pertes	Année cosmique
Fin de l'Ordovicien	445–444 millions d'années	85 % des espèces	20 décembre
Dévonien supérieur	372 millions d'années	au moins 70 %	22 décembre
Fin du Permien	252 millions d'années	environ 81 % des espèces marines	25 décembre, vers 8 h
Fin du Trias	201 millions d'années	70 à 75 %	26 décembre
Fin du Crétacé	66 millions d'années	75 %	30 décembre, vers 6 h

On attribue la crise de la fin du Permien au gaz carbonique des éruptions géantes de Sibérie. Celle de la fin du Crétacé est liée à l'impact d'un astéroïde il y a 66 millions d'années wiki-extinction. Le chiffre de cinq est lui-même une convention : aucune mesure ne sépare nettement ces cinq crises des nombreuses autres extinctions, et d'autres méthodes de calcul changent le classement wiki-extinction.

L'astéroïde frappe le 30 décembre vers 6 h. Les mammifères existaient bien avant lui, aux côtés des dinosaures. Après lui, ils se diversifient vite. À Corral Bluffs, au Colorado, ils retrouvent leur taille d'avant la catastrophe en 100 000 ans, moins de quatre minutes cosmiques aaas2019corralbluffs. Le plus ancien fossile de la lignée des primates, *Purgatorius*, un petit mangeur d'insectes et de fruits du Montana, vit 105 000 à 139 000 ans après l'extinction : quatre à cinq minutes après l'impact sur le calendrier uw2021purgatorius. Les génomes placent l'ancêtre commun de tous les primates actuels entre 68 et 65 millions d'années, autour de l'impact bgi2023primates. Vers midi, pendant un brusque réchauffement de 5 à 8 °C, il y a 56 millions d'années, les premiers primates d'aspect moderne se répandent sur trois continents wiki-petm sciencedaily2006teilhardina. Le 31 décembre vers 2 h 30, l'Antarctique se couvre de glace wiki-eot. Vers 8 h, il y a 25,2 millions d'années, la lignée des grands singes et celle des singes de l'Ancien Monde sont déjà séparées Stevens 2013. L'après-midi, les grands singes se ramifient l'un après l'autre. Les gibbons se détachent entre 12 h 30 et 16 h 20, les orangs-outans vers 16 h 20, les gorilles entre 18 h 15 et 18 h 55, fourchette qui chevauche celle de la séparation suivante wiki-hominidae wiki-primevol. Ces trois dernières dates viennent d'horloges moléculaires résumées, que les sources ne donnent pas au million d'années près.

20.7 Le soir du 31 décembre

D'après la génétique, les lignées humaine et chimpanzé se séparent d'un ancêtre commun entre 9 et 7 millions d'années wiki-humanevol, le 31 décembre entre 18 h 17 et 19 h 33[7]. L'homme ne descend pas du chimpanzé : les deux espèces descendent d'un ancêtre commun, dont elles sont deux branches sœurs. *Sahelanthropus tchadensis*, au Tchad, âgé d'environ 7 millions d'années, est le plus ancien fossile que certains rattachent à la lignée humaine, et ce rattachement est disputé wiki-humanevol.

Le genre *Homo* paraît à 22 h 13. Son plus ancien représentant documenté est la mâchoire de Ledi, en Éthiopie, datée de 2,75 à 2,8 millions d'années wiki-humanevol. *Homo erectus* est le premier à sortir d'Afrique, entre 1,8 et 1,3 million d'années wiki-humanevol, entre 22 h 51 et 23 h 10. En 2025, la reconstruction du crâne de Yunxian 2, en Chine, vieux d'environ un million d'années, conclut que les lignées menant à *Homo sapiens*, aux Néandertaliens et à *Homo longi*, le groupe des Dénisoviens, étaient déjà séparées il y a plus d'un million d'années nhm2025yunxian. Sur le calendrier, cette séparation tombe avant 23 h 22. Le coauteur Chris Stringer souligne que des fossiles africains de la même période n'ont pas pu être inclus nhm2025yun-

xian. Le résultat recule l'âge de la lignée de sapiens, pas celui de l'espèce reconnaissable, et rouvre la question du lieu.

Homo sapiens apparaît en Afrique vers 300 000 ans, entre 260 000 et 350 000 ans selon les indices wiki-humanevol. Les plus anciens fossiles attribués à l'espèce viennent de Jebel Irhoud, au Maroc. Daniel Richter et ses coauteurs les ont datés de 315 000 ans, à 34 000 ans près, et en concluent que l'émergence de l'espèce et celle des industries du Middle Stone Age sont proches dans le temps, peut-être à l'échelle de toute l'Afrique Richter 2017. Sur le calendrier, sapiens arrive à 23 h 48. La version de Sagan disait 23 h 52, ce qui correspond à l'ancienne date d'environ 200 000 ans wiki-cosmiccal. Les humains modernes quittent l'Afrique il y a 100 000 à 50 000 ans, entre 23 h 56 et 23 h 58. Ils se mêlent en chemin à d'autres humains : tous les non-Africains portent 1,5 à 2,6 % d'ADN néandertalien, et certaines populations de Mélanésie jusqu'à 6 % d'ADN dénisovien wiki-humanevol. On ignore encore si la « modernité comportementale », l'art, les parures et les outils complexes, est apparue brusquement vers 50 000 ans ou graduellement au cours du Paléolithique moyen wiki-humanevol. Ce qui départagerait les deux lectures, ce sont des traces de ces comportements nettement plus anciennes que 50 000 ans, et assez nombreuses pour ne pas passer pour des exceptions.

L'écriture arrive à la toute fin. On reconnaît en général quatre inventions indépendantes : en Mésopotamie vers 3400–3100 avant notre ère, en Égypte vers 3250, en Chine avant 1250, en Mésoamérique avant le début de notre ère wiki-writing. L'écriture véritable, celle dont un lecteur ultérieur peut reconstituer exactement l'énoncé, succède à des systèmes de symboles qui servaient d'aide-mémoire wiki-writing. L'écriture mésopotamienne tombe à 23 h 59 min 48 s, douze secondes avant minuit. Sagan la plaçait à 23 h 59 min 47 s wiki-cosmiccal[8].

20.8 Trois histoires humaines

On dit souvent que « toute l'histoire humaine tient dans les dernières secondes du 31 décembre ». La formule confond trois histoires, et le calendrier les sépare.

L'histoire au sens des historiens, celle qu'on lit dans des textes, commence avec l'écriture : elle occupe les **douze dernières secondes**. L'ère chrétienne en occupe 4,6, une vie humaine de quatre-vingts ans un peu moins de deux dixièmes de seconde. L'histoire de l'espèce, depuis les premiers *Homo sapiens* de Jebel Irhoud, occupe les **douze dernières minutes**, soixante fois plus. L'histoire de la lignée, depuis la séparation d'avec les chimpanzés, occupe les **quatre heures et demie** dernières, près de six heures si l'on retient la date la plus ancienne. Entre l'espèce et la lignée, le genre *Homo* occupe 1 h 47[9]. La formule courante est donc exacte pour la première histoire et fausse pour les deux autres. Elle reste vraie dans un sens : à l'échelle de l'année, même la lignée humaine est un événement du dernier soir.

Le calendrier situe aussi la matière dont ces humains sont faits. Le chapitre 19 a compté les atomes d'un corps. Six sur dix sont des atomes d'hydrogène, fabriqués dans le premier dixième de microseconde du 1er janvier. Les quatre autres ont été forgés dans des étoiles, entre janvier et la fin d'août. La formule « nous sommes poussière d'étoiles » ne vaut que pour ces éléments plus lourds. Ce corps qui écrit depuis 23 h 59 min 48 s le 31 décembre est fait, pour la majorité de ses atomes, de matière du premier instant de l'année.

Une dernière date encadre tout ce chapitre. L'Univers ne s'est pas contenté d'attendre pendant que la Terre se peuplait. Au fil de l'expansion, la matière se dilue, et l'énergie noire, qui ne se dilue pas, finit par l'emporter. L'ère qu'elle domine commence un peu moins de 10 milliards d'années après le Big Bang, deux semaines cosmiques après la naissance du Soleil wiki-chrono, soit vers le 16 septembre du calendrier[10]. Depuis, l'expansion accélère : la découverte date de 1998, quand des supernovas lointaines se sont révélées de 10 à 15

% plus éloignées que prévu sans énergie noire Riess 1998. Dresser, l'oxygène, les animaux et les humains appartiennent tous à un Univers dont l'expansion accélère. Le chapitre 22 reprend là.

20.9 Ce qu'on ne sait pas

On ne sait pas comment la vie est apparue. On en connaît la fenêtre, entre 4,32 et 3,48 milliards d'années, du 8 au 30 septembre wiki-abiogenesis, et aucun mécanisme n'a été observé. Une expérience qui ferait naître, dans des conditions plausibles pour la Terre primitive, un système capable de se copier ferait passer l'une des hypothèses au rang de mécanisme démontré.

On ne sait pas quand la vie est apparue à l'intérieur de cette fenêtre. Deux sortes d'indices tirent en sens opposés. Les gènes placent LUCA vers 4,2 milliards d'années, ce qui suppose une vie plus ancienne encore Moody 2024. Les roches ne donnent une trace largement acceptée qu'à 3,48 milliards d'années Westall 2025. L'écart de plus de 600 millions d'années peut tenir à des roches trop rares et trop transformées pour garder une trace, ou à des horloges moléculaires mal calibrées. Une révision des calibrations, ou un candidat ancien validé par des signes indépendants dans une roche peu déformée, réduirait l'écart. Confiance élevée sur Dresser ; modérée sur LUCA vers 4,2 milliards d'années, dont la date et la complexité sont discutées quanta2024luca ; faible sur Isua, Nuvvuagittuq et Jack Hills.

On ne sait pas si les océans de septembre ont été continus. Selon un modèle de bombardement, ils ont pu être vaporisés plusieurs fois jusque vers 4,3 milliards d'années, peut-être 4 milliards Marchi 2014. Le nombre de ces épisodes dépend d'un flux d'impacts lui-même discuté, et du seuil de taille retenu pour vaporiser un océan Citron 2022.

On ne sait pas quand les cyanobactéries ont inventé la photosynthèse qui rejette de l'oxygène : entre 2,7 milliards d'années ou plus tôt, et 2,45 à 2,32 milliards d'années au plus tard wiki-goe. De cette date dépend la durée du décalage entre leur apparition et l'oxygène dans l'air. On sait que l'oxygène a oscillé avant de s'installer, mais le rythme de cette installation repose sur une étude récente Poulton 2021. Le niveau d'oxygène du long intervalle qui suit, et son rôle dans l'arrivée des animaux, restent disputés : un oxygène très bas selon le chrome Planavsky 2014, des valeurs plus hautes selon d'autres traceurs Tostevin 2020.

On ne sait pas exactement quand les animaux sont nés. Les horloges moléculaires les placent au Cryogénien, à 833–650 millions d'années, et aucune trace dans les roches ne le confirme Dosreis 2015 Bobrovskiy 2021. La rapidité de l'explosion cambrienne est discutée, et une part en revient sans doute à la conservation des fossiles wiki-cambrian.

Pour la lignée humaine, les dates de séparation d'avec les grands singes ne sont pas connues au million d'années près wiki-hominidae. Le statut de *Sahelanthropus*, le lieu où la lignée de sapiens s'est séparée de ses voisines, et l'origine graduelle ou brusque de la modernité comportementale restent ouverts wiki-humane-vol nhm2025yunxian.

20.10 Ce que ce chapitre démontre

Ramenés à une année, les 13,8 milliards d'années de l'Univers donnent un jour pour 37,8 millions d'années, une seconde pour environ 438 ans wiki-cosmiccal. Les noyaux d'hydrogène et d'hélium sont achevés dans le premier dixième de microseconde, la première lumière part vers minuit et quart le 1er janvier esa2013-planck, et MoM-z14 brille le 8 janvier Naidu 2025. Le Soleil naît environ 9,2 milliards d'années après le Big Bang, aux deux tiers de l'histoire, le 2 septembre. Les quatre derniers mois appartiennent à la Terre et au vivant.

Des océans existent peut-être dès le 8 septembre Westall 2025. Les horloges moléculaires placent LUCA, l'ancêtre commun de tous les vivants actuels, entre le 8 et le 14 septembre, vers 4,2 milliards d'années, mais c'est un résultat de modèle Moody 2024. Les roches ne donnent une trace sûre que le 30 septembre, avec les stromatolithes de Dresser, datés de 3,48 milliards d'années Westall 2025 wiki-earliestlife. Les candidats plus anciens d'Isua, de Nuvvuagittuq et de Jack Hills restent contestés, parce qu'une forme ou un isotope peut naître sans vie dans des roches transformées Allwood 2018 Westall 2025. On sait dans quelle fenêtre la vie est apparue, pas par quel mécanisme wiki-abiogenesis.

Le vivant reste ensuite microbien pendant deux mois. Les cyanobactéries existent peut-être dès le 21 octobre, l'oxygène entre dans l'air du 27 octobre au début de novembre et oscille avant de s'installer wiki-goe Poulton 2021. La cellule à noyau, née de l'union d'une archée et d'une bactérie, apparaît vers la mi-novembre wiki-eukaryote. Après deux glaciations globales, les animaux surgissent dans les fossiles le 17 décembre, avec le Cambrien, alors que leurs lignées ont divergé plus tôt wiki-cambrian Dosreis 2015. Cinq grandes extinctions, du 20 au 30 décembre, rythment la fin de l'année, et l'astéroïde frappe le 30 vers 6 h wiki-extinction.

Le 31 décembre, les lignées humaine et chimpanzé se séparent entre 18 h 17 et 19 h 33. *Homo* paraît à 22 h 13, *Homo sapiens* à 23 h 48 ; il sort d'Afrique vers 23 h 56, et l'écriture arrive à 23 h 59 min 48 s wiki-humanevol Richter 2017 wiki-writing. « L'histoire humaine » désigne trois durées : douze secondes pour l'histoire écrite, douze minutes pour l'espèce, environ quatre heures et demie pour la lignée. Presque tout cela s'est passé dans un Univers dont l'expansion accélère depuis le 16 septembre wiki-chrono Riess 1998.

Notes

1. Calcul de ce chapitre : 13,8 × 10^9 / 365 ≈ 37,8 millions d'années par jour ; / 24 ≈ 1,58 million d'années par heure ; / 60 ≈ 26 300 ans par minute ; / 60 ≈ 438 ans par seconde. Ces valeurs sont celles que donne la page « Cosmic Calendar » de Wikipédia (en), qui attribue la popularisation de l'image à Carl Sagan, *The Dragons of Eden* (1977) et *Cosmos* (1980). Les ouvrages de Sagan n'ont pas été consultés. ↩

2. Calcul de ce chapitre : (13,8 − 4,567) / 13,8 × 365 ≈ 244,2 jours ; le 31 août s'achève après 243 jours, d'où le 2 septembre vers 5 h. Âge des plus vieux solides : Woitke et al. (2024), *Astronomy & Astrophysics* 687, A65, qui rapportent 4 567,30 ± 0,16 millions d'années ; une datation croisée par l'aluminium 26 donne 4 568,42 ± 0,24 millions d'années (Desch et al. 2023, *Icarus*), soit une quarantaine de minutes plus tôt sur le calendrier. En arrondissant la naissance du Soleil aux « deux tiers » de l'histoire, on obtient la fin d'août, date qu'on rencontre aussi. La version de Sagan, avec d'autres âges de référence, place le Système solaire au 9 septembre (Wikipédia, « Cosmic Calendar »). ↩

3. Moody, E. R. R., et al. (2024), « The nature of the last universal common ancestor and its impact on the early Earth system », *Nature Ecology & Evolution* 8, 1654–1666 : « LUCA lived ~4.2 Ga (4.09–4.33 Ga) » ; deux modèles d'horloge, 4,18–4,33 et 4,09–4,32 milliards d'années. Calcul de ce chapitre : 4,33 milliards d'années tombent le 8 septembre vers midi, 4,2 le 11 septembre au soir, 4,09 le 14 septembre au soir. ↩

4. Calcul de ce chapitre : (13,8 − 3,48) / 0,0378 ≈ 273,0 jours, soit le 30 septembre vers 23 h. Isua (3,7 milliards d'années) tombe le 25 septembre, le graphite de Jack Hills (4,1) le 14 septembre, le filon de Nuvvuagittuq (4,157) le 13 septembre. La citation sur Dresser vient de Wikipédia (en), « Earliest known life forms » ; Westall (2025), *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, donne l'âge et le contexte. ↩

5. Calcul de ce chapitre : 2,7 milliards d'années, 21 octobre vers 14 h ; 2,46, 27 octobre vers 22 h ; 2,43, 28 octobre vers 17 h ; 2,22, 3 novembre vers 7 h ; 2,06, 7 novembre vers midi. Dates de Poulton et al. (2021), « A 200-million-year delay in permanent atmospheric oxygenation », *Nature* 592, 232–236, et de Wikipédia (en), « Great Oxidation Event ». Le décalage d'au moins 400 millions d'années parfois cité suppose une photosynthèse oxygénique plus ancienne que 2,7 milliards d'années ; il n'a pas été vérifié sur une source primaire. ↩

6. Dates et pertes : Wikipédia (en), « Extinction event ». Calculs de ce chapitre sur 37,8 millions d'années par jour : 445 millions d'années, 20 décembre vers 5 h ; 372, 22 décembre vers 5 h ; 252, 25 décembre vers 8 h ; 201, 26 décembre vers 16 h ; 66, 30

décembre vers 6 h. ↩

7. Calcul de ce chapitre, sur 1,58 million d'années par heure comptées à rebours depuis minuit : 9 millions d'années, 5 h 43 avant minuit, soit 18 h 17 ; 7 millions d'années, 19 h 33 ; 2,8 millions d'années, 22 h 13 ; 1,8 et 1,3 million d'années, 22 h 51 et 23 h 10 ; un million d'années, 23 h 22 ; 315 000 ans, 12 minutes avant minuit, soit 23 h 48 ; 100 000 et 50 000 ans, 23 h 56 et 23 h 58. ↩

8. Calcul de ce chapitre : 3400 à 3100 avant notre ère, soit environ 5 400 à 5 100 ans avant 2026 ; divisés par 438 ans par seconde, 12,4 à 11,7 secondes avant minuit. Dates de Wikipédia (en), « History of writing ». ↩

9. Calcul de ce chapitre : écriture, environ 12 secondes ; ère chrétienne, 2 026 / 438 ≈ 4,6 secondes ; vie de 80 ans, 80 / 438 ≈ 0,18 seconde ; *Homo sapiens* (315 000 ans), 12 minutes ; genre *Homo* (2,8 millions d'années), 1 h 47 ; séparation d'avec les chimpanzés, 4 h 26 pour 7 millions d'années et 5 h 43 pour 9 millions d'années. ↩

10. Wikipédia (en), « Chronology of the universe » : l'ère dominée par l'énergie noire commence après environ 9,8 milliards d'années. Calcul de ce chapitre : 9,8 / 13,8 × 365 ≈ 259 jours, soit le 16 septembre environ, deux semaines cosmiques après la naissance du Soleil. Aucun lien de cause ne relie les deux événements. ↩

PARTIE VI

L'Univers qui accélère

LE SENS

Après la Terre et nous, le récit relève les yeux vers le cosmos entier, qui a changé de régime peu après la naissance du Soleil : tout ce que la partie précédente a raconté s'est déroulé dans un Univers qui accélère. Cette partie vient après parce que le présent est l'époque la moins bien comprise, et que le futur dépend de ce qu'on y ignore. Elle ramène le livre à une limite de la physique, comme le seuil l'avait ouvert.

L'ARC

Des 95 % invisibles à l'accélération découverte en 1998, puis aux deux tensions actuelles, et enfin aux futurs possibles : le connu redevient incertain.

LA QUESTION

De quoi l'Univers est-il fait, pourquoi son expansion accélère-t-elle, et qu'est-ce que cela décide de sa fin ?

1. Ce qu'on ne voit pas brouillon
2. Le tournant brouillon
3. Deux mesures qui ne s'accordent pas brouillon
4. Un ciel qui se vide brouillon

CHAPITRE 21

Ce qu'on ne voit pas

brouillon · 7420 mots

21.1 Un bilan à 5 %

Tout ce que ce livre a suivi jusqu'ici est fait de la même étoffe. L'hydrogène et l'hélium des premières minutes, les atomes neutres de la première lumière, le gaz des âges sombres, les étoiles, l'oxygène, l'or, le Soleil : autant d'assemblages de protons, de neutrons et d'électrons. Les cosmologistes appellent cette matière « ordinaire », ou « baryonique », d'après le nom de la famille de particules à laquelle appartiennent les protons et les neutrons[1]. Dans le modèle standard de la cosmologie, elle ne représente qu'environ 5 % du contenu de l'Univers. La matière noire en représente 26,8 %, et l'énergie noire 68,2 % : ce sont les valeurs publiées par la mission Planck en 2013 wiki-dm. Les tables finales de 2018, une fois converties en pourcentages, donnent environ 4,9 % de matière ordinaire, 26,4 % de matière noire et 68,5 % d'énergie noire planck2018tab[2]. Le chiffre de « 27 % » qu'on lit souvent pour la matière noire est un arrondi entre ces deux analyses. Tout ce que le livre a raconté depuis la fin du seuil tient donc dans un vingtième du total.

Le modèle standard porte ces deux inconnues dans son nom. ΛCDM se lit « lambda CDM » : Λ désigne la constante cosmologique, la forme la plus simple d'énergie noire, et CDM l'abréviation anglaise de « matière noire froide » (→ chap. 7)[3]. Les deux termes n'ont en commun que l'adjectif. La matière noire est de la matière : elle attire et se rassemble sous l'effet de sa propre gravité, et elle pèse à peu près cinq fois plus que la matière ordinaire, soit environ 85 % de toute la matière wiki-dm. L'énergie noire n'est pas de la matière. C'est le nom donné à ce qui accélère l'expansion wiki-dm, et le chapitre suivant lui est consacré (→ chap. 22). Il ne sera question ici que de la première.

Trois précautions encadrent ces pourcentages. La première tient au moment : ils valent aujourd'hui. Au fil de l'expansion, la matière se dilue, parce que la même quantité occupe un volume toujours plus grand ; l'énergie noire, elle, ne se dilue pas wiki-de. Les parts relatives changent donc avec le temps. L'énergie noire ne l'emporte sur la matière que depuis un peu moins de dix milliards d'années après le Big Bang wiki-chrono, ce qui veut dire qu'il y a dix milliards d'années la matière dominait le contenu de l'Univers (→ chap. 20). Les 68 % d'énergie noire ne s'appliquent pas au passé que ce livre a raconté.

La deuxième précaution tient à la méthode. Aucun de ces trois nombres n'est mesuré séparément, comme on pèserait trois sacs sur une balance. Ils sortent d'un ajustement de l'ensemble du modèle ΛCDM aux données du fond diffus cosmologique, complétées par d'autres mesures planck2018tab. Le chapitre sur l'âge de l'Univers a montré comment se construit ce calcul, étage par étage, et ce qu'il suppose (→ chap. 7). Les densités de matière ordinaire et de matière noire sont les grandeurs les plus directement lues sur la carte du fond diffus ; la part d'énergie noire est obtenue par différence (→ chap. 7). Si le modèle était faux, les pourcentages le seraient aussi.

La troisième précaution tient au mot. « Noire » ne veut pas dire sombre au sens d'un nuage opaque qui cacherait ce qui se trouve derrière lui. Un tel nuage absorbe la lumière, donc interagit avec elle. La matière noire, elle, n'interagit pas avec la lumière : elle n'en émet pas, n'en absorbe pas, n'en diffuse pas wiki-dm[4]. Elle est transparente plutôt qu'obscure, et invisible à tous les instruments qui recueillent de la lumière, de la radio aux rayons gamma. Le seul moyen de la détecter qui ait réussi jusqu'ici est sa gravité. Toute l'histoire qui suit est donc celle d'une masse déduite de ses effets sur ce qu'on voit.

21.2 Des galaxies trop agitées, des galaxies qui tournent trop vite

La première pesée date de 1933. L'astronome suisse Fritz Zwicky étudie l'amas de Coma, un rassemblement de plusieurs centaines de galaxies liées par leur gravité mutuelle[5]. Il lui applique le théorème du viriel wiki-dm. Ce théorème relie, dans un système stable, l'agitation de ses membres à la gravité qui les retient. Un amas qui ne se disperse pas et ne s'effondre pas est en équilibre : ses galaxies vont assez vite pour ne pas tomber toutes au centre, et pas assez pour s'échapper. Plus la masse de l'amas est grande, plus elle peut retenir des galaxies rapides. Mesurer la dispersion des vitesses des galaxies donne donc la masse totale nécessaire pour les retenir[6].

Le résultat de Zwicky ne cadre pas avec ce qu'on voit. Les galaxies de Coma s'agitent trop vite pour que la seule matière lumineuse de l'amas puisse les retenir wiki-dm. Il faut, pour que l'amas tienne, une masse qu'on ne voit pas. Zwicky lui donne un nom en allemand : *dunkle Materie*, matière sombre wiki-dm. L'expression a traversé le siècle. La base de ce livre ne dit ni quel facteur Zwicky trouvait entre la masse nécessaire et la masse visible, ni comment son résultat a été reçu[7].

Le deuxième indice vient de l'intérieur des galaxies, et il est d'une autre nature. Dans les années 1970, l'astronome américaine Vera Rubin et son collègue Kent Ford mesurent, avec un spectrographe nouveau, la vitesse des étoiles et du gaz dans des galaxies spirales vues par la tranche wiki-dm. Une galaxie vue ainsi présente un bord qui s'approche de nous et un bord qui s'éloigne ; le décalage des raies de son spectre, vers le bleu d'un côté et vers le rouge de l'autre, donne la vitesse de rotation à chaque distance du centre[8]. On obtient ainsi une « courbe de rotation » : la vitesse en fonction de la distance au centre.

Ce qu'on attendait de ces courbes suit des lois connues depuis le XVIIe siècle. Selon les lois de Kepler, un corps en orbite autour d'une masse concentrée tourne d'autant plus lentement qu'il en est loin, comme les planètes lointaines du Système solaire tournent plus lentement que les proches wiki-dm[9]. Dans une galaxie spirale, la lumière se concentre vers le centre et s'éteint vers le bord du disque. Si la masse suivait la lumière, la vitesse devrait donc décroître au-delà de la région où se trouvent la plupart des étoiles.

Elle ne décroît pas. Loin du centre, là où il n'y a presque plus d'étoiles, la vitesse reste à peu près constante : les courbes sont « plates » wiki-dm. En 1980, Rubin, Ford et Norbert Thonnard publient les courbes de 21 galaxies spirales, des plus petites aux plus grandes : la plus petite, NGC 4605, a un rayon de 4 kiloparsecs, la plus grande, UGC 2885, de 122 kiloparsecs, soit environ 13 000 et 400 000 années-lumière Rubin 1980[10]. Aucune ne montre de courbe descendante. La plupart montent même encore au point le plus éloigné qu'on a pu mesurer Rubin 1980. Ce résultat n'a été lu, pour ce livre, que dans un résumé ; il n'a pas été vérifié sur la publication[11].

Une courbe plate se traduit directement en masse. Pour un corps en orbite circulaire, le carré de la vitesse est proportionnel à la masse contenue à l'intérieur de l'orbite, divisée par le rayon de l'orbite. Si la vitesse reste la même quand le rayon double, la masse intérieure doit doubler aussi[12]. Loin du centre, là où la lumière s'éteint, la masse continue donc de croître, à peu près en proportion de la distance. Il faut une masse invisible qui s'étend bien au-delà du disque visible et l'enveloppe : un halo wiki-dm. Chaque galaxie spirale se trouve ainsi plongée dans une concentration de masse plus vaste qu'elle, dont elle n'est que la partie lumineuse.

Les deux pesées, celle de Zwicky et celle de Rubin et Ford, reposent sur le même principe : on mesure des mouvements et l'on en déduit, par la loi de la gravitation, la masse qui les gouverne. Elles reposent aussi sur la même hypothèse, que cette loi s'applique telle quelle à l'échelle des galaxies et des amas. Deux expli-

cations restent donc ouvertes à ce stade : ou bien une masse invisible existe, ou bien la loi de la gravitation change de forme à ces échelles. Les pesées suivantes départagent ces deux explications.

21.3 Peser la lumière déviée : l'amas du Boulet

Une masse courbe la trajectoire de la lumière qui passe près d'elle. Un amas de galaxies agit ainsi comme une loupe imparfaite sur les galaxies situées loin derrière lui : leurs images sont déformées, étirées, parfois dédoublées. Ce phénomène porte le nom de lentille gravitationnelle, et mesurer ces déformations pèse la masse totale de l'amas, qu'elle brille ou non Clowe 2006[13]. La méthode a un avantage sur les deux précédentes. Elle ne suppose rien des mouvements du système, ni qu'il soit en équilibre : elle mesure la masse par son seul effet sur la lumière qui la traverse, et donne sa répartition dans le ciel.

L'amas du Boulet est le cas où cette méthode a été la plus parlante. Il s'agit de deux amas de galaxies qui sont entrés en collision. Dans un amas, l'essentiel de la matière ordinaire n'est pas dans les étoiles des galaxies, mais dans un gaz très chaud qui remplit l'espace entre elles Clowe 2006[14]. Pendant la collision, les deux nuages de gaz se sont heurtés et ont été freinés, comme deux jets d'eau qui se croisent. La masse mesurée par lentille, elle, est passée au travers, sans être ralentie Clowe 2006. Au moment où nous l'observons, la collision a donc séparé les deux composantes. Le gaz, qui porte l'essentiel de la matière ordinaire, est resté en arrière, au milieu. La masse est allée plus loin, de part et d'autre.

Douglas Clowe et ses coauteurs publient cette mesure en 2006 sous un titre qui ne ménage pas la nuance : « Une preuve empirique directe de l'existence de la matière noire ». Le centre de la masse totale est décalé du centre de la matière ordinaire, avec une significativité de 8σ Clowe 2006. La lettre σ, sigma, désigne un écart-type : un décalage de 8σ vaut huit fois l'incertitude de la mesure, bien au-delà du seuil de 5σ qu'on exige d'ordinaire pour une découverte[15]. Selon les auteurs, ce décalage « ne peut être expliqué par une modification de la loi de la gravitation », et il prouve que la majorité de la matière du système est invisible Clowe 2006.

L'argument contre une gravité modifiée tient au lieu où l'on trouve la masse. Si l'on changeait la loi de la gravitation sans ajouter de matière, la seule source de gravité resterait la matière ordinaire, et la déviation de la lumière la plus forte se trouverait là où cette matière est la plus abondante, c'est-à-dire dans le gaz. Une loi différente pourrait renforcer ou affaiblir la déviation, pas la déplacer vers une région presque vide de matière visible. Or c'est ce qu'on observe : l'essentiel de la masse se trouve là où il n'y a presque rien à voir[16]. La collision a fait ce qu'aucune galaxie isolée ne permet de faire : séparer physiquement la masse invisible de la matière ordinaire.

Elle en dit aussi quelque chose sur la nature de cette masse. La matière noire de chacun des deux amas a traversé celle de l'autre sans se freiner. Les particules qui la composent, quelles qu'elles soient, se heurtent donc très peu entre elles, et très peu avec le gaz. Elles se comportent comme une population de corps qui ne sentent que la gravité[17].

Zwicky avait pesé des amas par leurs mouvements, Rubin et Ford des galaxies par leur rotation, Clowe et ses collègues un amas en collision par la lumière déviée. Aucune de ces trois pesées ne dit encore de quoi est faite la masse invisible. On pourrait imaginer des atomes qui ne brillent pas : du gaz trop froid pour émettre, des étoiles éteintes, des planètes errantes. Il faut, pour écarter cette possibilité, une pesée d'un autre genre, qui compte les atomes eux-mêmes.

21.4 Pas des atomes cachés

Cette pesée a eu lieu pendant les premières minutes. Tout atome existant aujourd'hui, qu'il appartienne à une étoile, à une planète, à un nuage froid ou à une étoile morte, était au départ fait de protons et de neutrons. Entre environ trois et vingt minutes après le début, ces protons et ces neutrons ont pris part à la fabrication des premiers noyaux (→ chap. 5). Quoi qu'ils soient devenus ensuite, ils y ont laissé une trace comptable.

Cette fabrication, la nucléosynthèse primordiale, ne dépend dans le modèle standard que d'un seul paramètre : le rapport entre le nombre de baryons et le nombre de photons, noté η Fields 2020. Or ce rapport, le fond diffus le mesure indépendamment, par une physique toute différente. Planck donne $\eta = (6{,}104 \pm 0{,}058) \times 10^{-10}$ Fields 2020. Avec cette valeur, la nucléosynthèse devient, selon Brian Fields et ses coauteurs, « essentiellement une théorie sans paramètre » : on ne peut plus rien y régler, il ne reste qu'à comparer ses prédictions aux mesures Fields 2020.

Le deutérium est la mesure la plus fine. Ce noyau d'hydrogène lourd, fait d'un proton et d'un neutron, est un reste de la nucléosynthèse, et sa quantité est très sensible à la densité de baryons ; c'est pourquoi on le présente comme le « baryomètre » de l'Univers Fields 2020[18]. Avec le η de Planck, la nucléosynthèse prédit un rapport entre deutérium et hydrogène de $2{,}559 \times 10^{-5}$. Mesuré dans des nuages de gaz lointains éclairés par des quasars, ce rapport vaut $(2{,}55 \pm 0{,}03) \times 10^{-5}$ en moyenne sur onze mesures Fields 2020. Les deux valeurs s'accordent à mieux qu'un pour cent. Une physique nucléaire qui opère pendant les premières minutes et une physique acoustique qui opère jusqu'à 380 000 ans comptent la même quantité de matière ordinaire (→ chap. 6).

Cette quantité est celle des 4,9 % de Planck. La matière totale, elle, pèse environ 31 % du contenu de l'Univers planck2018tab. Si la masse manquante était faite d'atomes, elle aurait été faite de protons et de neutrons pendant les premières minutes, et il y aurait eu environ six fois et demie plus de baryons que Planck n'en compte[19]. Le deutérium prédit, calculé avec cette densité-là, ne tomberait plus sur la valeur mesurée. La base de ce livre ne chiffre pas de combien il s'en écarterait. Elle établit en revanche que le deutérium mesuré ne laisse de place qu'à la densité de baryons de Planck, à un pour cent près, et qu'il contraint désormais très fortement toute modification de la nucléosynthèse Fields 2020Ganguly 2026. Il n'y a pas assez de baryons pour faire la matière noire.

Un seul désaccord subsiste dans ce tableau, et il ne touche pas l'argument. Le lithium 7 mesuré dans les vieilles étoiles est environ trois fois moins abondant que prévu Fields 2020. Mais corriger ce désaccord en changeant η désaccorderait le deutérium et l'hélium fields2014pdg, et aucune piste sérieuse n'y cherche un surplus de baryons (→ chap. 5).

La deuxième pesée des atomes est indépendante de la première et se lit sur la carte du fond diffus. Avant 380 000 ans, la matière ordinaire était un plasma d'électrons libres et de noyaux, lié aux photons par les chocs incessants entre électrons et lumière. Ce fluide oscillait : la gravité le comprimait, la pression de la lumière le repoussait, et ces ondes sonores se sont figées dans la carte (→ chap. 6)wiki-cmb. La matière noire, elle, ne participait pas à ces oscillations, puisqu'elle n'interagit pas avec la lumière ; elle ne faisait que creuser les puits de gravité dans lesquels le fluide oscillait (→ chap. 6). Le fond diffus distingue ainsi les deux sortes de matière par la propriété même qui définit la matière noire : l'une était couplée à la lumière, l'autre non.

Les pics du spectre de puissance, qui mesure l'amplitude des taches de la carte selon leur taille, enregistrent cette différence. Le rapport entre le premier et le deuxième pic renseigne sur la densité de baryons ; le troi-

sième, sur la densité de matière noire wiki-cmb. Le modèle ajusté à la carte compte donc deux paramètres de densité distincts, et Planck les mesure tous les deux : $\Omega b\ h^2 = 0{,}02237 \pm 0{,}00015$ pour les baryons, $\Omega c\ h^2 = 0{,}1200 \pm 0{,}0012$ pour la matière noire froide planck2018tab. Ces « densités physiques » sont proportionnelles aux densités réelles des deux composantes[20]. Leur rapport vaut environ 5,4 : la matière noire pèse un peu plus de cinq fois la matière ordinaire, et fait environ 84 % de la matière totale, la valeur de 85 % couramment citée wiki-dm[21]. Chacune des deux densités est connue à un pour cent près. Il est exclu qu'elles soient la même chose.

Les deux arguments, celui des premières minutes et celui de 380 000 ans, se renforcent. Le premier compte les baryons, et en trouve trop peu pour faire la masse manquante. Le second distingue, dans la matière de l'époque, une part qui oscillait avec la lumière et une part cinq fois plus lourde qui ne le faisait pas. La matière noire n'est donc ni un gaz trop froid pour briller, ni des étoiles éteintes, ni des planètes errantes, ni aucune autre forme d'atomes cachés planck2018tabFields 2020. Elle est d'une autre nature que tout ce dont sont faits les étoiles et nous-mêmes. Le mot savant est « non baryonique » : elle n'est pas faite de protons et de neutrons.

Un contrôle inattendu vient de l'amas du Boulet lui-même. Si l'un des deux amas avait été fait d'antimatière, la collision aurait produit des rayons gamma d'annihilation ; on n'en voit pas, ce qui limite la fraction d'antimatière du système à moins de trois millionièmes Canetti 2012. La masse qui a traversé la collision sans se freiner n'est donc pas non plus un reflet d'antimatière de la matière ordinaire[22].

21.5 Elle était déjà là

Ce qu'on vient d'établir oblige à relire l'histoire que ce livre a déjà racontée. La matière noire n'est pas apparue avec les galaxies qu'on a pesées : elle était présente dans chacun des épisodes précédents, et elle y tenait déjà le premier rôle gravitationnel.

Avant 380 000 ans, dans le plasma qui deviendra le fond diffus, la gravité qui comprime les surdensités est dominée par la matière noire wiki-cmb(→ chap. 6). Son rapport à la matière ordinaire était alors le même qu'aujourd'hui, un peu plus de cinq, parce que les deux se diluent de la même manière avec l'expansion[23]. C'est elle qui fournissait l'essentiel du ressort des ondes sonores, et c'est pourquoi le troisième pic du fond diffus en porte la marque wiki-cmb. La plus vieille lumière de l'Univers est aussi, à ce titre, la plus ancienne pesée de la matière noire.

Après la recombinaison, la matière ordinaire perd son lien avec la lumière. Les électrons se sont attachés aux noyaux, la pression des photons n'a plus de prise sur le gaz, et celui-ci cesse d'osciller pour tomber dans les puits que la matière noire a continué de creuser pendant ce temps (→ chap. 8)[24]. Les âges sombres, décrits comme l'époque où rien ne brille, sont aussi celle où la matière ordinaire rattrape son retard sur une matière qui n'avait jamais cessé de se rassembler. Les ondes figées de cette époque ont laissé une autre empreinte, dans la répartition des galaxies elles-mêmes : en 2005, Daniel Eisenstein et ses coauteurs détectent dans la répartition de 46 748 galaxies une distance privilégiée d'environ 100 h^{-1} mégaparsecs, conforme à la trace prévue des oscillations acoustiques Eisenstein 2005(→ chap. 8).

Au bout de la nuit, la matière noire s'est rassemblée en halos, les mêmes concentrations que Rubin et Ford devinaient autour des galaxies spirales. Le gaz ordinaire tombé dans ces halos y forme un réservoir, et ce réservoir fixe une limite. Selon Michael Boylan-Kolchin, « la masse d'étoiles d'une galaxie est limitée par le réservoir de matière ordinaire disponible dans son halo de matière noire » Boylankolchin 2023. Comme la matière ordinaire pèse environ un sixième de la matière totale, un halo contient au plus environ 16 % de sa

masse sous forme de gaz capable de faire des étoiles (→ chap. 10)[25]. Combiné au nombre de halos de chaque masse que le modèle prévoit à chaque époque, ce réservoir donne un plafond à la masse d'étoiles qu'on peut trouver dans l'Univers à un moment donné.

Les premiers candidats galaxies du télescope Webb, en 2022, se situaient « à la limite même » de ce plafond Boylankolchin 2023. Le chapitre consacré à ces galaxies a montré ce que cette situation mettait en jeu : une erreur de mesure, une formation d'étoiles plus efficace que prévu, ou une faille du modèle cosmologique lui-même (→ chap. 10). Depuis, la spectroscopie a écarté beaucoup des candidats les plus massifs, et la plupart des explications proposées restent dans le modèle standard (→ chap. 10)[26]. Mais la question elle-même montre la place de la matière noire dans le raisonnement : pour décider si une galaxie est « trop tôt », on compte d'abord les halos de matière noire qui pouvaient l'accueillir.

Chaque galaxie de ce livre, de MoM-z14 à la Voie lactée, s'est donc formée au fond d'un puits creusé par une matière qu'on ne voit pas. Le gaz y est tombé, s'y est refroidi, y a fait des étoiles ; les étoiles y ont forgé les éléments lourds ; le Soleil est né de ce gaz recyclé (→ chap. 15). La matière noire n'a participé à aucune de ces transformations, puisqu'elle ne sent que la gravité. Elle en a fourni le cadre : l'invisible a servi d'échafaudage à tout ce qui brille, depuis les ondes du plasma primordial jusqu'aux halos des galaxies.

21.6 Ce qu'elle pourrait être, et ce qu'on n'a pas trouvé

On sait combien pèse la matière noire, où elle se trouve, et quelques-unes de ses propriétés : elle n'interagit pas avec la lumière, ses particules se heurtent très peu, elle n'est pas faite de baryons. On ne sait pas ce qu'elle est.

Une première classification porte sur la vitesse de ses particules. On distingue une matière noire « froide », « tiède » ou « chaude », selon que ses particules se déplacent lentement ou à une vitesse proche de celle de la lumière, et les modèles récents favorisent la matière noire froide wiki-dm. C'est l'hypothèse inscrite dans le nom du modèle standard, le CDM de ΛCDM. La base de ce livre ne détaille pas les raisons de cette préférence[27].

On connaît une matière noire chaude, et une seule : les neutrinos. Ces particules existent, n'interagissent pas avec la lumière, et traversent la matière presque sans la toucher ; elles sont si légères qu'elles filent à une vitesse proche de celle de la lumière wiki-dm[28]. Mais elles pèsent beaucoup trop peu pour faire la masse manquante. Le relevé de galaxies DESI borne la somme des masses des trois espèces de neutrinos à moins de 0,064 électronvolt, dans le cadre du modèle ΛCDM Desi 2025. L'électronvolt est ici une unité de masse ; l'électron, déjà très léger, en pèse environ 511 000[29]. Les neutrinos sont bien une matière noire, mais une part infime de la matière noire.

Les candidats sérieux sont donc des particules ou des objets qu'on n'a jamais observés. Ils se répartissent en trois grandes familles : les WIMP, sigle anglais de « particules massives interagissant faiblement », les axions, particules hypothétiques très légères, et les trous noirs primordiaux wiki-dm[30]. Aucune de ces trois familles n'a été détectée wiki-dm. S'y ajoutent des propositions plus ciblées, comme celle qui ajoute au modèle standard trois neutrinos dits « stériles », plus lourds que les neutrinos connus, pour expliquer à la fois les oscillations des neutrinos, la matière noire et l'excès de matière sur l'antimatière Canetti 2012.

Les WIMP ont été la piste la plus poursuivie, et les résultats nuls s'y accumulent. Les recherches directes, qui guettent le choc d'une particule de matière noire sur un noyau atomique dans un détecteur protégé du reste du rayonnement, n'ont rien trouvé dans les gammes de masse standard wiki-dm[31]. Le résultat le plus

récent de la base vient de l'expérience LZ, une cuve de xénon liquide installée sous terre. Annoncé en décembre 2025, il porte sur 417 jours de données prises entre mars 2023 et avril 2025 : l'analyse n'a trouvé « aucun signe de WIMP » Lz 2025. Les limites qui en découlent sont les meilleures au monde pour les particules de plus de 5 GeV/c², soit à peu près cinq fois la masse d'un proton, et elles « resserrent encore » les possibilités de ce que la matière noire pourrait être Lz 2025[32]. Un résultat nul de ce genre ne réfute pas les WIMP en général. Il exclut une région de plus dans l'espace des masses et des probabilités d'interaction où ils pouvaient se trouver.

Reste l'autre branche de l'alternative ouverte par Zwicky et Rubin : modifier la loi de la gravitation plutôt qu'ajouter de la matière. Les théories de ce type, dont la plus connue porte le nom de MOND (pour « dynamique newtonienne modifiée »), rendent bien compte des courbes de rotation des galaxies wiki-dm. Mais elles ne décrivent pas toutes les observations à la fois wiki-dm, et l'amas du Boulet est l'objection la plus citée : une loi modifiée placerait la masse avec le gaz, et on la trouve ailleurs Clowe 2006. MOND reste une position minoritaire, défendue par des chercheurs qui publient dans les revues du domaine, et non une hérésie[33]. La base ne documente pas ce que ces théories prévoient pour le fond diffus.

L'état de la question se résume en deux énoncés de statut différent. L'existence d'une masse invisible est établie, par des méthodes indépendantes qui vont de la galaxie isolée à l'Univers entier : mouvements des amas, rotation des galaxies, lentilles, abondances des premières minutes, pics du fond diffus. Sa nature est inconnue. Et cette ignorance n'est pas seulement une lacune de l'astronomie. Aucune particule du modèle standard de la physique des particules ne convient. La matière noire compte ainsi, avec l'excès de matière sur l'antimatière et les oscillations des neutrinos, parmi les trois indices expérimentaux d'une physique au-delà de ce modèle Canetti 2012(→ chap. 4). Le livre s'était ouvert sur une limite de la physique connue, le seuil d'avant l'inflation (→ chap. 2). La matière noire en est une autre, et elle occupe l'Univers présent.

21.7 Il manque encore 68 %

Même une fois la matière noire comptée, le bilan ne boucle pas. Le premier pic du fond diffus mesure la courbure de l'espace : la physique du plasma fixe la taille réelle des ondes sonores, la géométrie de l'espace traversé par la lumière fixe la taille apparente sous laquelle on les voit, et les données s'accordent avec un espace plat wiki-cmbHu 2002(→ chap. 6). Un espace plat a une densité totale bien définie, que les cosmologistes appellent la densité critique ; c'est l'univers « à densité critique » que la découverte des pics a établi Hu 2002. Toute la matière de l'Univers, ordinaire et noire, n'en fournit qu'environ 31 % : Planck donne $\Omega m = 0{,}3153 \pm 0{,}0073$ planck2018tab.

Il manque donc environ 68 %. Ce qui les fournit n'est pas de la matière, noire ou non. Toute matière se dilue quand l'Univers grandit ; cette composante-là garde la même densité wiki-de. Elle ne se rassemble pas dans des halos, ne dévie pas la lumière autour des amas, ne laisse pas de pic dans le fond diffus. Dans le modèle ΛCDM, sa part s'obtient d'abord par différence : l'espace étant plat, elle vaut ce qui manque pour atteindre la densité critique, soit $\Omega\Lambda = 0{,}6847 \pm 0{,}0073$ planck2018tab(→ chap. 7).

Une composante déduite par soustraction pourrait n'être qu'un artefact du modèle. Elle ne l'est pas, parce que deux autres méthodes, sans rapport avec la courbure, réclament la même quantité : les supernovas lointaines, dont la luminosité mesure la distance, et les oscillations acoustiques inscrites dans la répartition des galaxies planck2018tabEisenstein 2005. Trois méthodes différentes aboutissent au même manque. La première a surpris ses auteurs en 1998, en montrant que l'expansion de l'Univers accélère Riess 1998Perlmutter 1999. Ce qu'on sait de ces 68 %, et ce que leur nature décide de l'avenir, fait l'objet du chapitre suivant (→ chap. 22).

21.8 Ce qu'on ne sait pas

On ne sait pas de quoi est faite la matière noire. C'est l'incertitude centrale, et elle est de nature, pas de degré : aucune particule candidate n'a été détectée. Les trois familles en lice, WIMP, axions et trous noirs primordiaux, prédisent des signaux différents, et une seule détection suffirait à trancher. Pour les WIMP, le résultat nul de LZ en 417 jours, meilleur au monde au-dessus de 5 GeV/c², a réduit l'espace des possibles sans l'épuiser Lz 2025. La base ne documente ni les expériences qui cherchent les axions, ni les contraintes sur les trous noirs primordiaux, ni la manière dont ces derniers échapperaient à l'argument des premières minutes. Confiance très élevée sur l'existence de la matière noire ; aucune sur sa nature.

On ne sait pas si la gravité est exactement celle qu'on croit aux grandes échelles. L'hypothèse d'une gravité modifiée reste défendue par une minorité. Elle rend compte des courbes de rotation, mais pas de l'ensemble des observations wiki-dm, et l'amas du Boulet, où la masse s'est séparée du gaz à 8σ, est l'objection la plus difficile à contourner Clowe 2006. Ce qui la relancerait serait un phénomène que la matière noire ne peut pas reproduire ; la base n'en documente aucun. Confiance élevée dans l'explication par une matière invisible.

On ne connaît les pourcentages qu'à l'intérieur du modèle ΛCDM. Les densités de matière ordinaire et de matière noire sont lues presque directement sur les pics du fond diffus et vérifiées, pour les baryons, par le deutérium planck2018tabFields 2020. La traduction en parts du total dépend en revanche du taux d'expansion actuel, qui fait l'objet d'une tension de plus de cinq écarts-types entre deux méthodes de mesure (→ chap. 23). Si la solution de cette tension passait par une modification du modèle, les 4,9 %, 26,4 % et 68,5 % bougeraient. Le rapport d'environ cinq entre matière noire et matière ordinaire, qui repose sur les densités physiques, en dépend beaucoup moins. De même, la borne de DESI sur la masse des neutrinos, 0,064 électronvolt, est calculée dans ΛCDM Desi 2025 et changerait avec lui.

On ne sait pas si les galaxies précoces de Webb imposent quelque chose à la matière noire. Les premiers candidats touchaient le plafond fixé par le gaz des halos Boylankolchin 2023 ; les confirmations spectroscopiques ont réduit l'écart, et les explications en tête relèvent de la formation des galaxies plutôt que du modèle cosmologique (→ chap. 10). Confiance modérée : la question reste ouverte tant que l'excès de galaxies brillantes, mesuré à plus de cent fois les prévisions d'avant Webb Naidu 2025, n'est pas expliqué.

Enfin, deux points d'histoire restent à consolider. Le résultat de Rubin, Ford et Thonnard sur 21 galaxies n'a été lu, pour ce livre, que dans un résumé Rubin 1980, et les dates exactes des premières publications de Rubin et Ford ne sont pas documentées. Le facteur que trouvait Zwicky entre la masse nécessaire et la masse visible de Coma n'est pas non plus dans la base.

21.9 Ce que ce chapitre démontre

Dans le modèle ΛCDM, le contenu de l'Univers se répartit aujourd'hui en environ 5 % de matière ordinaire, 26,8 % de matière noire et 68,2 % d'énergie noire selon Planck 2013 ; les tables de 2018 donnent environ 4,9 %, 26,4 % et 68,5 % wiki-dmplanck2018tab. Ces parts valent pour aujourd'hui, puisque la matière se dilue avec l'expansion et l'énergie noire non, et elles sont calculées dans le modèle, non mesurées une à une wiki-deplanck2018tab. « Noire » signifie sans interaction avec la lumière.

La matière noire a été pesée par ses effets gravitationnels. En 1933, Zwicky applique le théorème du viriel à l'amas de Coma et y trouve une masse invisible, qu'il nomme *dunkle Materie* wiki-dm. Dans les années 1970, Rubin et Ford trouvent des courbes de rotation plates dans les galaxies spirales, là où les lois de Kepler prévoient une décroissance ; sur 21 galaxies, Rubin, Ford et Thonnard ne trouvent aucune courbe descendante

wiki-dmRubin 1980. Une vitesse constante impose une masse qui croît avec la distance : chaque galaxie est plongée dans un halo invisible. Dans l'amas du Boulet, la masse mesurée par lentille gravitationnelle a traversé la collision tandis que le gaz, qui porte l'essentiel de la matière ordinaire, était freiné ; le décalage entre les deux est significatif à 8σ et ne peut s'expliquer, selon Clowe et ses coauteurs, par une modification de la loi de la gravitation Clowe 2006.

Cette masse n'est pas faite d'atomes. La nucléosynthèse ne dépend que du rapport baryons/photons, que Planck mesure à $(6{,}104 \pm 0{,}058) \times 10^{-10}$; le deutérium prédit, $2{,}559 \times 10^{-5}$, et le deutérium mesuré, $(2{,}55 \pm 0{,}03) \times 10^{-5}$, s'accordent à un pour cent près Fields 2020. Il n'y a pas assez de baryons pour faire la matière manquante. Le fond diffus, de son côté, distingue la matière qui oscillait avec la lumière de celle qui ne le faisait pas : $\Omega b\, h^2 = 0{,}02237 \pm 0{,}00015$ et $\Omega c\, h^2 = 0{,}1200 \pm 0{,}0012$ planck2018tab. La matière noire pèse un peu plus de cinq fois la matière ordinaire et fait environ 85 % de la matière wiki-dm.

Elle a servi d'échafaudage à toute l'histoire racontée jusqu'ici. Avant 380 000 ans, elle dominait la gravité qui comprimait le plasma, et le troisième pic du fond diffus en porte la marque wiki-cmb. Ensuite, chaque galaxie s'est formée dans un halo de matière noire dont le gaz plafonne la masse d'étoiles ; les premiers candidats de Webb touchaient ce plafond Boylankolchin 2023.

On ne sait pas ce qu'elle est. Les modèles favorisent une matière noire froide ; les neutrinos, seule matière noire chaude connue, ont une somme de masses inférieure à 0,064 électronvolt wiki-dmDesi 2025. Aucun des candidats, WIMP, axions ou trous noirs primordiaux, n'a été détecté, et LZ n'a trouvé aucun signe de WIMP en 417 jours de données wiki-dmLz 2025. Les théories de gravité modifiée rendent compte des courbes de rotation mais pas de l'ensemble des observations wiki-dm. La matière noire compte, avec l'excès de matière sur l'antimatière et les oscillations des neutrinos, parmi les trois indices d'une physique au-delà du modèle standard Canetti 2012.

Même avec elle, le compte ne boucle pas. Le fond diffus impose un Univers plat, dont la matière totale ne fournit qu'environ 31 % ($\Omega m = 0{,}3153 \pm 0{,}0073$) planck2018tabHu 2002. Les 68 % restants ne sont pas de la matière et ne se diluent pas avec l'expansion wiki-de.

Notes

1. Les électrons ne sont pas des baryons, mais ils pèsent environ deux mille fois moins qu'un proton ; l'usage cosmologique range toute la matière faite d'atomes sous le nom de « baryonique ». Cette convention et le rapport de masse sont d'usage courant, non documentés dans les fiches ; la fiche baryogenese précise seulement qu'« ici "matière" veut dire baryons ». ↩

2. Calcul fait par la fiche fond-diffus-cosmologique à partir des tables Planck 2018, avec $h = 0{,}6736$: $\Omega b = 0{,}02237 / 0{,}6736^2 \approx 0{,}049$; $\Omega c = 0{,}1200 / 0{,}6736^2 \approx 0{,}264$; $\Omega\Lambda = 0{,}6847$. La somme des deux premières (0,314) est un peu inférieure à $\Omega m = 0{,}3153$, qui inclut aussi la petite contribution des neutrinos. ↩

3. Voir le chapitre sur l'âge de l'Univers, et la note correspondante au chapitre sur les galaxies précoces : Λ pour la constante cosmologique, CDM pour *cold dark matter*. ↩

4. La fiche energie-matiere-noires écrit : « "noire" veut dire invisible (sans interaction avec la lumière), pas sombre au sens d'un nuage opaque ». La décomposition en émission, absorption et diffusion est une explicitation de ce chapitre. ↩

5. Le nombre de galaxies de l'amas de Coma n'est pas documenté dans la base ; « plusieurs centaines » est un ordre de grandeur donné pour le lecteur, à vérifier. Le prénom et la nationalité de Zwicky ne figurent pas non plus dans les fiches. ↩

6. Présentation classique du théorème du viriel, non détaillée dans les fiches, qui disent seulement que Zwicky « applique le théorème du viriel » et que les galaxies de Coma « s'y agitent trop vite pour que la seule matière lumineuse les retienne ». Sous sa forme usuelle, le théorème dit que, pour un système gravitationnel stable, l'énergie cinétique moyenne vaut la moitié de la valeur absolue de l'énergie potentielle. ↩

7. La fiche energie-matiere-noires ne rapporte ni le rapport masse/lumière obtenu par Zwicky, ni l'écart de près de quarante ans entre sa mesure et celles de Rubin et Ford. Aucun des deux n'est donc discuté ici. ↩

8. Principe de l'effet Doppler appliqué à la rotation d'une galaxie, présentation classique non détaillée dans la fiche, qui dit seulement que Rubin et Ford mesurent la vitesse des étoiles « avec un nouveau spectrographe » dans des galaxies « vues par la tranche ». Le chapitre sur l'âge de l'Univers explique le décalage vers le rouge dû à l'expansion, phénomène distinct. ↩

9. La fiche énonce la prévision (« selon les lois de Kepler, la vitesse devrait décroître loin du centre ») ; l'exemple des planètes est ajouté pour le lecteur et n'est pas documenté dans la base. ↩

10. Les rayons en kiloparsecs sont dans le titre de l'article de 1980. Conversion faite pour ce chapitre avec 1 kiloparsec ≈ 3 260 années-lumière (le chapitre sur les dernières secondes de décembre donne trois kiloparsecs pour « près de dix mille années-lumière ») : $4 \times 3\,260 \approx 13\,000$; $122 \times 3\,260 \approx 398\,000$. ↩

11. Fiche energie-matiere-noires, source rubin1980 : « lu dans un résumé de moteur de recherche ; ADS refusé (405), Semantic Scholar vide — deux tentatives », marquée « non vérifié ». La citation du résumé : « Most rotation curves are rising slowly even at the farthest measured point. Neither high nor low luminosity Sc galaxies have falling rotation curves. » Les galaxies étudiées sont de type Sc, une catégorie de spirales. La fiche signale aussi comme à vérifier les dates des publications de Rubin et Ford (1970 et 1980). ↩

12. Relation classique de la mécanique newtonienne, $v^2 = GM(r)/r$, non énoncée dans les fiches, qui tirent directement la conclusion : « Il faut donc une masse invisible qui s'étend bien au-delà du disque visible : un halo. » Si v est constante, M(r) est proportionnelle à r. ↩

13. La fiche energie-matiere-noires énonce le principe : « La masse courbe la lumière des objets situés derrière ; mesurer cette déformation pèse la masse totale, visible ou non. » L'image de la loupe, les images dédoublées et l'avantage de la méthode (ne rien supposer des mouvements) sont des explicitations de ce chapitre. La théorie qui prévoit cette déviation, la relativité générale, n'est pas documentée dans la base. ↩

14. La fiche écrit : « le gaz chaud (l'essentiel de la matière ordinaire) ». La manière dont on localise ce gaz (par son rayonnement X, dans la présentation usuelle) et la position des galaxies elles-mêmes pendant la collision ne sont pas documentées dans la base. L'image des jets d'eau est de ce chapitre. ↩

15. Le seuil de 5σ pour une découverte est rappelé par la fiche energie-matiere-noires à propos de DESI (« the gold standard in physics that represents the threshold for a discovery », source lbl-desi2025). ↩

16. Explicitation de ce chapitre de la phrase de Clowe et al. : « An 8-sigma significance spatial offset of the center of the total mass from the center of the baryonic mass peaks cannot be explained with an alteration of the gravitational force law ». Les auteurs, selon la fiche, en tirent que « the majority of the matter in the system is unseen ». ↩

17. Déduction de ce chapitre à partir du fait, rapporté par la fiche, que la masse mesurée par lentille « est passée au travers ». La base ne chiffre pas la limite qu'on en tire sur les collisions des particules de matière noire entre elles. ↩

18. Le terme « baryomètre » est employé par la fiche baryogenese, avec la clé fields2020. Le sens de la dépendance (plus de baryons, moins de deutérium restant, parce que le deutérium est alors plus efficacement brûlé en hélium) est la présentation usuelle, non documentée dans les fiches, qui ne donnent la loi de dépendance en η que pour le lithium (η à la puissance 2,1 environ). ↩

19. Calcul de ce chapitre : $\Omega m / \Omega b \approx 0{,}3153 / 0{,}0493 \approx 6{,}4$. Le rapport baryons/photons η est proportionnel à la densité de baryons, le nombre de photons étant fixé par la température du fond diffus. ↩

20. Voir la note du chapitre sur l'âge : la densité critique est proportionnelle au carré du taux d'expansion actuel, et h désigne H0 divisé par 100 km/s/Mpc ; le produit Ωh^2 est donc proportionnel à la densité absolue, indépendamment de H0. C'est pourquoi ces deux grandeurs sont les plus directement lues sur la carte. ↩

21. Calculs de ce chapitre : $0{,}1200 / 0{,}02237 \approx 5{,}36$; $0{,}1200 / (0{,}1200 + 0{,}02237) \approx 0{,}843$. Avec les pourcentages de 2013 : $26{,}8 / (26{,}8 + 4{,}9) \approx 0{,}845$. La fiche energie-matiere-noires donne « environ 85 % » et « à peu près cinq fois » ; les chapitres sur la première lumière et les âges sombres écrivent « environ cinq fois et demie ». ↩

22. Fiche baryogenese, section 1 : « dans l'amas du Boulet, à 3×10^{-6} » (Canetti et al. 2012). Le lien avec la question de la matière noire est de ce chapitre ; la fiche précise que « matière » y désigne les baryons et que la matière noire « est une autre question ». ↩

23. Raisonnement de ce chapitre : matière ordinaire et matière noire sont toutes deux de la matière non relativiste, dont la densité baisse comme le volume ; leur rapport ne change donc pas avec l'expansion. Les fiches ne l'énoncent pas sous cette forme, mais la fiche energie-matiere-noires dit que « la matière se dilue avec l'expansion » sans distinguer les deux sortes. ↩

24. Comme au chapitre sur les âges sombres, ce raisonnement est classique mais n'est pas énoncé tel quel dans les fiches, qui disent seulement que la gravité qui comprime les surdensités est « dominée par la matière noire ». ↩

25. Calcul fait au chapitre sur les galaxies précoces : 0,02237 / (0,02237 + 0,1200) ≈ 0,157. ↩

26. La fiche aube-cosmique écrit : « Depuis, la spectroscopie a écarté beaucoup de candidats photométriques trop massifs, et la plupart des explications proposées restent dans le modèle standard ». Cette phrase n'est adossée à aucune clé de source propre ; le chapitre sur les galaxies précoces en discute les éléments (sursauts sans rétroaction, formation en dents de scie, absence de poussière). ↩

27. La fiche energie-matiere-noires donne la classification (« selon la vitesse de ses particules ») et la préférence des modèles, sans la justifier. La raison usuellement avancée, qu'une matière noire chaude effacerait les petites structures, n'est pas documentée dans la base. ↩

28. La fiche energie-matiere-noires qualifie les neutrinos de « seule matière noire "chaude" connue » et dit qu'ils « ne pèsent presque rien ». Qu'ils traversent la matière presque sans interagir et se déplacent à une vitesse proche de celle de la lumière découle de la définition de la matière noire chaude donnée par la fiche ; le chapitre sur les premières minutes rappelle qu'ils cessent d'interagir vers une seconde. ↩

29. La masse de l'électron (environ 511 000 électronvolts, ou 0,511 MeV) est une valeur d'usage courant, non documentée dans les fiches. La fiche nucleosynthese-primordiale donne l'équivalence 1 MeV ≈ 10^{10} K pour les températures. ↩

30. La fiche energie-matiere-noires se contente de nommer les trois familles. La définition des WIMP est la traduction de leur sigle ; la caractérisation des axions comme « très légers » est la présentation usuelle, non documentée dans la base. ↩

31. La fiche cite Wikipédia : les recherches directes « accumulent ainsi des résultats nuls pour les WIMP dans les gammes de masse standard ». Le principe de la détection directe (un choc sur un noyau atomique) n'est pas décrit dans la base ; il est donné pour le lecteur, à vérifier. ↩

32. Source lz2025 : « world-leading results above 5 GeV/c2 further narrow down possibilities of what dark matter might be ». L'équivalence d'environ un GeV/c^2 pour la masse d'un proton (0,938 GeV/c^2) est d'usage courant, non documentée dans la base. Le communiqué annonce aussi un « nouveau regard sur les neutrinos du cœur du Soleil », que la fiche ne détaille pas. ↩

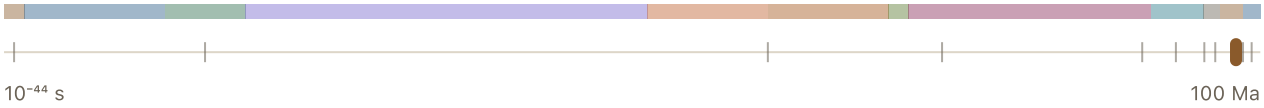
33. Fiche energie-matiere-noires : « C'est une position minoritaire, pas une hérésie. » Le développement du sigle MOND (*Modified Newtonian Dynamics*) est d'usage courant ; la fiche emploie le sigle sans le développer. ↩

CHAPITRE 22

Le tournant

~9,8 Ga (découverte en 1998)

brouillon · 6069 mots



22.1 Une expansion qui devait ralentir

Le chapitre précédent s'est arrêté sur un compte qui ne boucle pas. Toute la matière de l'Univers, ordinaire et noire, ne fournit qu'environ 31 % de la densité qu'exige un espace plat. Les 68 % qui manquent ne sont pas de la matière : ils ne se rassemblent pas en halos, ne dévient pas la lumière autour des amas et ne laissent pas de pic dans le fond diffus planck2018tab(→ chap. 21). Pendant presque toute l'histoire que ce livre a racontée, ces 68 % n'ont pourtant joué aucun rôle visible. Les premières étoiles, les galaxies de Webb, l'assemblage de la Voie lactée et la naissance du Soleil ont eu lieu dans un Univers gouverné par la matière.

Dans un tel Univers, l'expansion ralentit. Chaque morceau de matière attire tous les autres, et cette attraction s'oppose à l'éloignement mutuel des galaxies. Pendant la plus grande partie de l'histoire cosmique, la gravité de la matière a ainsi freiné l'expansion : les distances grandissaient autrefois plus vite qu'aujourd'hui (→ chap. 7)wiki-age. Jusqu'en 1998, les cosmologistes supposaient d'ailleurs un Univers fait de matière seule, dont l'expansion n'aurait jamais cessé de ralentir (→ chap. 7)Perlmutter 1999. La question ouverte portait sur l'ampleur de ce freinage, et deux équipes s'étaient donné pour but de la mesurer[1].

Tout ce chapitre repose sur un principe : la matière et l'énergie noire ne réagissent pas de la même façon à l'expansion. La matière se dilue wiki-de. Une quantité fixe de particules occupe un volume qui grandit, et sa densité baisse donc en proportion du volume. Quand les distances doublent, le volume est multiplié par huit, et la densité de la matière divisée par huit[2]. L'énergie noire, elle, garde la même densité à mesure que l'espace grandit wiki-de. Elle ne se raréfie pas, et la part de chacune des deux composantes change donc avec le temps.

On peut suivre ce changement en remontant le temps avec les chiffres d'aujourd'hui. Planck donne, pour le présent, une densité de matière de 31,5 % et une densité d'énergie noire de 68,5 % de la densité critique planck2018tab. La matière pèse donc aujourd'hui un peu moins de la moitié de l'énergie noire. Quand l'Univers avait la moitié de sa taille actuelle, la matière était huit fois plus dense et l'énergie noire aussi dense qu'aujourd'hui. La matière faisait alors près de 80 % du total, l'énergie noire à peine plus de 20 %. À l'époque de la galaxie MoM-z14, vue 280 millions d'années après le début Naidu 2025, l'Univers était plus de quinze fois moins étiré, et l'énergie noire ne représentait plus que 0,06 % environ du contenu de l'Univers. Au moment où la première lumière s'est libérée, elle en faisait de l'ordre du milliardième[3].

Deux conséquences en découlent. La première concerne les pourcentages. Les 68 % d'énergie noire du bilan cosmique ne valent qu'aujourd'hui. Il y a dix milliards d'années, la matière dominait, et ces 68 % ne s'appliquent à aucune des époques que les chapitres précédents ont décrites wiki-dewiki-chrono(→ chap. 21). C'est aussi pourquoi les dates du premier jour, les trois minutes de la nucléosynthèse et les 380 000 ans de la première lumière, ne dépendent presque pas de ce qu'est l'énergie noire (→ chap. 7).

La seconde conséquence concerne l'avenir de ce rapport de forces. Une densité qui baisse sans cesse finit toujours par passer sous une densité qui ne change pas, à condition que la seconde ne soit pas nulle. Aucun événement n'a donc déclenché la bascule qui suit. Elle découle des deux manières de se diluer, et le seul fait qu'il reste à établir est sa date.

22.2 La bascule, un peu après le Soleil

Les chronologies de référence font commencer l'ère dominée par l'énergie noire un peu moins de 10 milliards d'années après le Big Bang, plus de 9,8 milliards d'années wiki-chrono. Le Soleil naît environ 9,2 milliards d'années après le Big Bang : on obtient ce chiffre en retranchant les 4,57 milliards d'années des plus vieux solides du Système solaire des 13,8 milliards d'années de l'Univers Connelly 2012Woitke 2024(→ chap. 15). Quelques centaines de millions d'années séparent les deux dates, environ six cents. Sur l'année cosmique, la naissance du Soleil tombe à la charnière d'août et de septembre, et la bascule vers la mi-septembre, deux semaines plus tard (→ chap. 20).

Les deux dates n'ont pas le même statut. Celle du Soleil est lue dans des pierres, par la radioactivité, sans passer par la cosmologie. Celle de la bascule est calculée dans le modèle standard, comme toutes les dates du livre depuis le fond diffus. Personne n'a observé l'instant où l'énergie noire a dépassé la matière. On mesure des décalages vers le rouge, c'est-à-dire de combien l'Univers s'est étiré depuis que la lumière est partie, et l'on convertit ces décalages en âges en intégrant une histoire de l'expansion supposée par le modèle Hogg 1999(→ chap. 7). Le calcul peut se vérifier à la main pour la taille de l'Univers au moment de la bascule. Avec les densités de Planck, matière et énergie noire s'égalent quand l'Univers mesurait environ les trois quarts de sa taille actuelle[4]. Convertir cette taille en années demande en plus le taux d'expansion actuel, qui fait l'objet d'une tension ouverte (→ chap. 23). La date de 9,8 milliards d'années est donc précise dans le modèle et dépendante de lui.

Le moment où l'énergie noire l'emporte n'est pas celui où l'expansion commence à accélérer. Les tables du Particle Data Group, calculées avec les paramètres de Planck, placent le début de l'accélération à 7,70 milliards d'années, avec une incertitude de 0,10, pour un décalage vers le rouge de 0,636 pdg2019-astro. L'accélération a donc commencé environ deux milliards d'années avant que l'énergie noire ne domine, et un milliard et demi d'années avant la naissance du Soleil. Le Soleil est né dans un Univers qui accélérait déjà, mais où la matière pesait encore plus lourd que l'énergie noire[5].

L'écart entre les deux dates a une cause précise, et le calcul la fait apparaître. À un décalage vers le rouge de 0,636, la densité de la matière vaut, avec les chiffres de Planck, à peu près deux fois celle de l'énergie noire[6]. L'énergie noire suffit donc à accélérer l'expansion dès qu'elle atteint la moitié de la densité de la matière. Autrement dit, à densité égale, son effet accélérateur est deux fois plus fort que l'effet de freinage de la matière. La raison tient à ce que la fiche appelle sa « pression négative », sur laquelle on reviendra plus bas wiki-de. Le mot « tournant » désigne donc, selon qu'on regarde le mouvement ou le bilan, deux moments distincts : vers 7,7 milliards d'années, l'expansion cesse de ralentir ; vers 9,8 milliards d'années, l'énergie noire devient la composante principale de l'Univers.

Depuis, l'expansion accélère, et cette accélération isole peu à peu les amas de galaxies les uns des autres[7]. Un amas est un rassemblement de galaxies que leur gravité mutuelle retient ; celui de Coma, où Zwicky a pesé la première masse invisible, en est un (→ chap. 21). L'accélération n'agit pas sur ce qu'une gravité retient : la Galaxie, le Système solaire et la Terre ne grandissent pas. Elle agit sur les distances qui séparent les amas, et ces distances grandissent de plus en plus vite. Ce que cela implique pour le ciel des astronomes à venir relève d'un autre chapitre 24Krauss 2007.

Aucune relation de cause ne relie la naissance du Soleil à la bascule, comme l'a déjà souligné le chapitre sur l'année cosmique (→ chap. 20). L'une tient à la dilution de la matière dans un Univers qui grandit. L'autre tient à l'effondrement d'un nuage de gaz dans une galaxie parmi des milliards. La coïncidence de date situe seulement le Soleil, et avec lui tout ce qui sera fait de sa matière, dans un Univers qui accélère.

22.3 1998 : chercher un freinage, trouver une accélération

Pour mesurer un freinage de l'expansion, il faut comparer deux choses pour des objets lointains : de combien leur lumière a été étirée, et à quelle distance ils se trouvent. La première se lit directement dans leur spectre, sous la forme du décalage vers le rouge Hogg 1999. La seconde est difficile à obtenir. La méthode la plus simple consiste à trouver des objets qui ont tous le même éclat réel. L'éclat apparent d'une source diminue comme le carré de sa distance : une source deux fois plus loin paraît quatre fois moins brillante. Si l'on connaît l'éclat réel d'une source, son éclat apparent donne donc sa distance[8].

Les supernovas de type Ia jouent ce rôle. Le chapitre sur la forge les a rencontrées comme une source du fer : ce sont des explosions de naines blanches carbone-oxygène dans des systèmes doubles, où deux étoiles tournent l'une autour de l'autre Kobayashi 2020(→ chap. 12). Une naine blanche est le cœur mis à nu d'une étoile de masse faible ou moyenne qui a perdu son enveloppe. Ces explosions ont une luminosité quasi standard, et leur éclat apparent donne leur distance[9]. Elles sont en outre assez brillantes pour être vues à des distances où la lumière a voyagé plusieurs milliards d'années. La base de ce livre ne dit ni pourquoi leur éclat varie si peu, ni comment les astronomes corrigent ce « quasi » ; elle ne décrit pas non plus le mécanisme de l'explosion (→ chap. 12).

Le test repose sur un raisonnement simple. Le décalage vers le rouge d'une supernova lointaine dit de combien l'Univers s'est étiré pendant le trajet de sa lumière. Il ne dit pas combien de temps cet étirement a pris. Si l'expansion a ralenti, elle était plus rapide autrefois, et l'étirement mesuré s'est accompli en peu de temps : la lumière a voyagé moins longtemps, et la source est plus proche. Si l'expansion a accéléré, elle était plus lente autrefois, et le même étirement a pris plus de temps : la lumière a voyagé plus longtemps, et la source est plus loin, donc moins brillante[10]. Pour un même décalage vers le rouge, une supernova trop faible trahit une expansion qui a moins ralenti que prévu, ou qui a accéléré.

C'est ce que trouve l'équipe d'Adam Riess. Son article de 1998 porte un titre qui annonce le résultat : « Indices observationnels, tirés des supernovas, d'un Univers en accélération et d'une constante cosmologique ». Les supernovas Ia à grand décalage vers le rouge y sont, en moyenne, « 10 à 15 % plus lointaines » qu'attendu dans un Univers de faible densité de matière sans constante cosmologique Riess 1998. La comparaison est choisie pour être prudente. Un Univers peu dense est le moins freiné des Univers faits de matière seule, celui où les supernovas devraient déjà paraître le plus loin ; elles sont encore plus loin que cela[11]. En éclat apparent, 10 à 15 % de distance en plus font des supernovas environ 17 à 24 % plus faibles que prévu[12].

L'équipe de Saul Perlmutter, le Supernova Cosmology Project, arrive au même résultat par ses propres observations. Elle analyse 42 supernovas à décalages vers le rouge compris entre 0,18 et 0,83 Perlmutter 1999. Pour un Univers plat, elle trouve une densité de matière Ωm de 0,28, avec une incertitude de $+0{,}09$ et $-0{,}08$, et une constante cosmologique positive avec une probabilité de 99 % Perlmutter 1999. La lettre Ω désigne une densité exprimée en fraction de la densité critique, celle qui rend l'espace plat (→ chap. 7). Dans un Univers plat, si la matière en fournit 28 %, il reste environ 72 % pour la constante cosmologique. Vingt ans plus tard, Planck donne 31,5 % de matière et 68,5 % d'énergie noire, des valeurs qui tombent dans la marge de 1999[13].

Le résultat a pris ses auteurs à contre-pied. Les deux équipes cherchaient à mesurer de combien l'expansion ralentissait. Elles ont trouvé qu'elle ne ralentit plus : elle accélère[1]. Que deux équipes indépendantes, avec leurs propres supernovas et leurs propres analyses, soient arrivées à la même conclusion en fait la force. Le prix Nobel de physique 2011 a récompensé Saul Perlmutter, Brian Schmidt et Adam Riess pour cette découverte wiki-de[14].

La découverte a résolu en passant un problème plus ancien. Avant 1998, un Univers fait de matière seule, calculé avec les taux d'expansion mesurés à l'époque, paraissait plus jeune que ses plus vieilles étoiles Perlmutter 1999(→ chap. 7). L'accélération allonge l'âge calculé. Un Univers qui accélère aujourd'hui s'étendait plus lentement dans son passé récent, et il lui a fallu plus de temps pour atteindre sa taille actuelle wiki-age. L'équipe de Perlmutter en déduisait, pour un Univers plat, un âge d'environ 14,9 milliards d'années, calculé pour un taux d'expansion correspondant à h = 0,63, c'est-à-dire 63 kilomètres par seconde et par mégaparsec Perlmutter 1999. L'Univers cessait d'être plus jeune que ses étoiles. Le chapitre sur l'âge a montré que ce chiffre, ramené au taux d'expansion de Planck, tombe à moins de 1 % de la valeur actuelle (→ chap. 7).

22.4 Trois méthodes, un même trou

Une découverte qui ne reposerait que sur les supernovas resterait exposée à une objection. Une seule méthode, appuyée sur une seule sorte d'objet, peut être trompée par une propriété de cet objet que l'on comprend mal. Si les supernovas lointaines étaient réellement moins brillantes que les proches, pour une raison propre à leur explosion ou à leur environnement, elles paraîtraient plus loin sans que l'expansion y soit pour rien. La base ne documente pas les vérifications qu'ont faites les deux équipes sur ce point. Elle documente en revanche deux méthodes indépendantes, qui ne font appel à aucune explosion d'étoile.

La première lit une règle inscrite dans la répartition des galaxies. Avant 380 000 ans, la matière ordinaire et la lumière formaient un plasma parcouru d'ondes sonores, que la libération de la lumière a figées (→ chap. 6). La distance maximale qu'une de ces ondes a pu parcourir, l'horizon sonore, se calcule par la physique du plasma : 144,43 mégaparsecs, en distance ramenée à l'échelle d'aujourd'hui planck2018-tab(→ chap. 7). Les ondes ont laissé une trace dans la matière elle-même. Autour de chaque surdensité initiale, un peu de matière s'est retrouvée à cette distance, et les galaxies qui en sont nées gardent une légère préférence pour cet écart entre elles. Les cosmologistes appellent cette trace les oscillations acoustiques des baryons, en abrégé BAO[15].

En 2005, Daniel Eisenstein et ses coauteurs la détectent dans la répartition de 46 748 galaxies rouges lumineuses du relevé SDSS. Ils trouvent un pic dans la corrélation entre galaxies à une séparation de 100 h^{-1} mégaparsecs, qui correspond « excellemment » à la forme et à la position prédites de l'empreinte des oscillations de l'époque de la recombinaison Eisenstein 2005. L'unité h^{-1} Mpc exprime une distance dont la valeur dépend du taux d'expansion actuel, h valant ce taux divisé par 100 km/s/Mpc. Avec la valeur de Planck, la séparation vaut environ 148 mégaparsecs, soit près de 480 millions d'années-lumière, du même ordre que l'horizon sonore calculé[16].

Cette empreinte fournit une règle dont on connaît la longueur. On la retrouve à différentes distances, donc à différentes époques ; l'angle sous lequel on la voit et son décalage vers le rouge donnent chaque fois une distance, et l'on peut ainsi retracer l'histoire de l'expansion indépendamment des supernovas Eisenstein 2005. La physique en jeu n'a rien de commun avec celle des supernovas. L'une repose sur l'acoustique d'un plasma primordial, l'autre sur l'éclat d'explosions d'étoiles. Le relevé DESI a porté la méthode à une autre échelle : ses données de 2025 comptent plus de 14 millions de galaxies et de quasars Desi 2025, et forment

la plus vaste carte en trois dimensions de l'Univers jamais construite, qui retrace l'influence de l'énergie noire sur les onze derniers milliards d'années Lbl-desi 2025.

La seconde méthode indépendante est celle du chapitre précédent. La taille apparente du premier pic du fond diffus renseigne sur la courbure de l'espace wiki-cmb, et les données s'accordent avec un espace plat, un Univers « à densité critique » Hu 2002. Toute la matière, ordinaire et noire, n'en fournit qu'environ 31 % : Planck donne $\Omega m = 0{,}3153 \pm 0{,}0073$ planck2018tab. L'espace étant plat, ce qui manque vaut $\Omega\Lambda = 0{,}6847 \pm 0{,}0073$ planck2018tab. Le fond diffus seul contraint l'énergie noire moins directement que la matière et la courbure wiki-age : il la fixe par soustraction, en s'appuyant sur la platitude. Cette méthode ne dit donc rien de la manière dont l'énergie noire agit dans le temps. Elle dit combien il en faut.

Les trois méthodes se recoupent. Les supernovas mesurent un éclat d'explosions vues à des décalages vers le rouge inférieurs à 1. Les oscillations acoustiques mesurent une règle dans la répartition des galaxies sur onze milliards d'années. Le fond diffus mesure une géométrie sur une lumière émise vers 380 000 ans. Toutes aboutissent au même manque, d'environ 68 à 70 % de la densité critique, que la matière ne peut pas fournir planck2018tabPerlmutter 1999Eisenstein 2005. La fiche qui porte ces résultats le résume en une formule : trois méthodes différentes, un même trou. L'existence de l'accélération, et d'une composante qui ne se dilue pas, est établie par cet accord. Sa cause ne l'est pas.

Une contestation minoritaire porte sur l'existence même de l'accélération. Le modèle dit *timescape*, défendu par David Wiltshire, soutient que les horloges des galaxies, situées dans des régions denses, et celles des grands vides en expansion libre divergent assez pour fausser tout modèle homogène ajusté à l'Univers. L'accélération serait alors une apparence, et l'énergie noire une « identification erronée » Wiltshire 2007. En 2025, Antonia Seifert et ses coauteurs trouvent, sur l'échantillon de supernovas Pantheon+, une préférence statistique « très forte » pour ce modèle sur le modèle standard Seifert 2025. Le résultat est récent et ne repose que sur des supernovas. Les analyses de Planck, d'ACT, de SPT et de DESI supposent un Univers homogène et s'y ajustent bien (→ chap. 7). Pour que le *timescape* l'emporte, il faudrait qu'il rende compte aussi des oscillations acoustiques et du fond diffus ; la base ne dit pas s'il le fait.

22.5 Un nom sur un trou : la constante et ses 120 ordres de grandeur

L'hypothèse la plus simple pour remplir le trou porte un nom depuis longtemps : la constante cosmologique, notée Λ. C'est un terme qu'on ajoute aux équations d'Einstein, celles de la relativité générale, et on peut l'interpréter comme l'énergie du vide wiki-de. Le Λ du modèle standard ΛCDM, celui de la matière noire froide et de la constante cosmologique, désigne ce terme (→ chap. 21). La base ne retrace pas l'histoire de cette constante avant 1998[17].

L'idée que le vide ait une énergie n'est pas nouvelle dans ce livre. Le chapitre sur le rien a montré que le vide des physiciens n'est pas l'absence de tout : c'est l'état de plus basse énergie des champs qui décrivent la matière et la lumière, et cet état possède des propriétés, dont une énergie smeenk-sep(→ chap. 2). Si l'espace vide porte une énergie propre, cette énergie ne se dilue pas quand l'espace grandit : chaque volume nouveau apporte la même énergie par unité de volume que les anciens. C'est la propriété qui fait tout ce chapitre[18].

Sa densité est infime : environ 7×10^{-30} gramme par centimètre cube wiki-de. Cela représente à peu près la masse de quatre atomes d'hydrogène par mètre cube[19]. Dans un laboratoire, dans le Système solaire ou à l'intérieur d'une galaxie, cette densité est écrasée par celle de la matière présente, et aucune expérience locale ne la détecte. Elle l'emporte seulement à l'échelle de l'Univers entier, parce qu'elle est la même partout, dans les immenses espaces entre les amas comme ailleurs, alors que la matière s'y est diluée wiki-de.

La constante cosmologique a une autre propriété, qui explique l'accélération. Les cosmologistes caractérisent chaque composante de l'Univers par son « équation d'état », notée w : le rapport entre sa pression et sa densité d'énergie. Pour la constante cosmologique, $w = -1$: sa pression est négative, égale en valeur à sa densité d'énergie, et une telle pression accélère l'expansion wiki-de. En relativité générale, la pression d'une composante contribue elle aussi à sa gravité. Une pression négative assez forte produit l'effet inverse d'une attraction[20]. C'est ce qui donne à l'énergie noire, à densité égale, un effet accélérateur deux fois plus fort que l'effet de freinage de la matière, et qui explique pourquoi l'accélération commence, vers 7,7 milliards d'années, bien avant que l'énergie noire ne domine pdg2019-astro.

L'Univers a déjà connu une telle expansion accélérée. L'inflation, décrite au début du livre, était elle aussi une phase d'expansion accélérée, portée par un champ, mais brève et d'une tout autre intensité (→ chap. 3). La base ne relie pas les deux épisodes, et rien ne dit qu'ils aient une même cause.

Reste le problème qui fait de la constante cosmologique une énigme plutôt qu'une explication. Si l'énergie noire est l'énergie du vide, la physique devrait pouvoir en calculer la valeur. Elle le fait, avec la théorie quantique des champs, qui décrit les particules élémentaires, et le résultat est environ 120 ordres de grandeur trop grand wiki-de. Un ordre de grandeur est un facteur dix ; 120 ordres de grandeur font un facteur 10^{120}, un 1 suivi de cent vingt zéros. C'est l'un des désaccords les plus massifs de la physique. La base ne détaille pas comment ce calcul est fait. Sa conséquence logique est pourtant claire. Si l'observation est juste, et trois méthodes la confirment, alors ou bien le calcul théorique est faux, ou bien il omet quelque chose qui compense presque exactement la valeur calculée, et que rien de connu n'explique[21].

L'alternative à la constante est un champ dynamique, qu'on appelle la quintessence, dont l'énergie pourrait varier dans le temps wiki-de. Dans ce cas, l'énergie noire ne garderait pas exactement la même densité : son w s'écarterait de -1. C'est précisément ce que le relevé DESI croit entrevoir. Ses mesures de 2025, combinées au fond diffus, préfèrent une énergie noire variable, avec $w0 > -1$ et $wa < 0$, à 3,1 écarts-types ; avec les supernovas, la préférence va de 2,8 à 4,2 écarts-types selon l'échantillon Desi 2025. En clair, l'énergie noire se comporterait aujourd'hui un peu moins qu'une constante, et sa densité serait en léger déclin. Le chiffre le plus élevé reposait sur les supernovas du Dark Energy Survey. Leur recalibration, en 2026, le ramène à 3,2 écarts-types, ce que ses auteurs qualifient de « faible préférence » Popovic 2026. Aucune combinaison n'atteint les 5 écarts-types qu'on exige d'une découverte Lbl-desi 2025.

Le principe de ce chapitre n'en serait pas renversé. Une énergie noire en léger déclin se diluerait encore beaucoup moins vite que la matière, et la bascule aurait bien eu lieu ; sa date et, surtout, l'avenir de l'expansion changeraient. Le détail de ce signal, et de l'autre désaccord qui secoue aujourd'hui la cosmologie, celui sur le taux d'expansion actuel, fait l'objet du chapitre 23.

22.6 Ce qu'on ne sait pas

On ne sait pas ce qu'est l'énergie noire. L'existence d'une accélération, et d'une composante qui ne se dilue pas, est établie par trois méthodes indépendantes Riess 1998Perlmutter 1999Eisenstein 2005planck2018-tab. Sa nature est inconnue. Deux hypothèses s'opposent : une constante, l'énergie du vide, dont la densité ne change jamais ; ou un champ, dont la densité évolue. Elles se distinguent par une seule grandeur mesurable, l'équation d'état w, et par sa variation dans le temps. En 2026, la préférence pour un champ variable se situe autour de 3 écarts-types et dépend de la calibration des supernovas Desi 2025Popovic 2026. Une analyse limitée aux données de l'Univers tardif n'en trouve pas de trace robuste, entre 1,1 et 2,3 écarts-types Chaudhary 2025. Plusieurs analyses situent vers un décalage vers le rouge de 0,5 un passage de w d'une valeur inférieure à -1 dans le passé à une valeur supérieure aujourd'hui Chaudhary 2025. Deux évolutions

départageraient les hypothèses : des données DESI plus nombreuses, et une calibration des supernovas qui ne bouge plus d'une analyse à l'autre. Si le signal franchissait 5 écarts-types, la constante cosmologique serait écartée ; s'il retombait, elle resterait l'hypothèse la plus simple. Confiance très élevée sur l'accélération ; faible sur sa cause.

On ne sait pas pourquoi l'énergie du vide calculée dépasse de 120 ordres de grandeur la valeur observée wiki-de. La base ne documente ni le détail de ce calcul, ni les solutions proposées. Tant que ce désaccord dure, interpréter l'énergie noire comme l'énergie du vide reste une hypothèse, que la théorie de référence contredit massivement.

On ne connaît la date de la bascule que dans le modèle. Les 9,8 milliards d'années viennent d'une chronologie de synthèse wiki-chrono, et les 7,70 milliards d'années du début de l'accélération d'une table calculée avec Planck seul pdg2019-astro. Les rapports de taille se vérifient à la main à partir des densités de Planck ; leur conversion en années dépend du taux d'expansion actuel, sur lequel deux méthodes de mesure s'opposent à plus de cinq écarts-types (→ chap. 23). Une énergie noire variable déplacerait aussi ces dates. Ni l'un ni l'autre effet n'est chiffré dans la base.

On ne sait pas si l'accélération est réelle ou apparente, au sens du *timescape*. La thèse est minoritaire ; elle a reçu en 2025 un appui statistique sur des supernovas Seifert 2025, et la base ne dit pas si elle rend compte des oscillations acoustiques et du fond diffus, qui soutiennent l'accélération de façon indépendante. Confiance élevée dans l'accélération réelle.

Enfin, la brique observationnelle de 1998 est mal documentée ici. La base affirme que les supernovas Ia ont un éclat quasi standard, sans expliquer ni pourquoi, ni comment on le corrige, ni pourquoi une naine blanche explose (→ chap. 12). Le rôle de Brian Schmidt dans la découverte n'y est pas décrit, et le fait que les deux équipes cherchaient un ralentissement n'y est pas adossé à une source primaire.

22.7 Ce que ce chapitre démontre

La matière se dilue avec l'expansion ; l'énergie noire garde la même densité wiki-de. C'est pourquoi l'énergie noire finit par dominer, et pourquoi les pourcentages du bilan cosmique, environ 31,5 % de matière et 68,5 % d'énergie noire planck2018tab, ne valent que pour aujourd'hui. Il y a dix milliards d'années, la matière dominait wiki-chrono. Quand l'Univers avait la moitié de sa taille actuelle, elle faisait près de 80 % du total, et à l'époque des premières galaxies de Webb l'énergie noire pesait moins d'un millième.

L'ère dominée par l'énergie noire commence un peu moins de 10 milliards d'années après le Big Bang, plus de 9,8 milliards d'années selon les chronologies de référence wiki-chrono. Le Soleil naît environ 9,2 milliards d'années après le Big Bang, 13,8 moins 4,57 Connelly 2012. L'accélération elle-même commence plus tôt, vers 7,70 milliards d'années, quand la densité de l'énergie noire atteint la moitié de celle de la matière pdg2019-astro. Ces dates sont calculées dans le modèle standard. Depuis, l'expansion accélère et isole peu à peu les amas de galaxies les uns des autres.

La découverte date de 1998. Les supernovas de type Ia, explosions de naines blanches carbone-oxygène dans des systèmes doubles, ont un éclat quasi standard qui donne leur distance Kobayashi 2020. L'équipe de Riess les trouve en moyenne 10 à 15 % plus lointaines qu'attendu dans un Univers de faible densité sans constante cosmologique Riess 1998. L'équipe de Perlmutter, sur 42 supernovas entre $z = 0{,}18$ et 0,83, obtient $\Omega m \approx 0{,}28$ pour un Univers plat et une constante cosmologique positive avec 99 % de probabilité, et en déduit un âge d'environ 14,9 milliards d'années pour $h = 0{,}63$, ce qui lève le paradoxe d'un Univers plus

jeune que ses étoiles Perlmutter 1999. Perlmutter, Schmidt et Riess reçoivent le prix Nobel de physique 2011 wiki-de.

L'accélération ne repose pas sur les seules supernovas. En 2005, sur 46 748 galaxies du SDSS, Eisenstein et ses coauteurs détectent à 100 h^{-1} Mpc l'empreinte des oscillations acoustiques de l'époque de la recombinaison, une règle de longueur connue qui retrace l'expansion indépendamment Eisenstein 2005 ; DESI en a tiré la plus vaste carte en trois dimensions de l'Univers, sur onze milliards d'années Lbl-desi 2025. Le fond diffus impose un Univers plat, dont la matière ne fournit qu'environ 31 % ; il manque environ 68 %, ce que réclament aussi supernovas et oscillations acoustiques planck2018tab.

L'hypothèse la plus simple est la constante cosmologique, interprétable comme l'énergie du vide, d'une densité d'environ 7×10^{-30} g/cm³, identique partout, et d'équation d'état $w = -1$, une pression négative qui accélère l'expansion wiki-de. La théorie quantique des champs prédit pour cette énergie une valeur environ 120 ordres de grandeur trop grande wiki-de. L'alternative est un champ dynamique, la quintessence, dont l'énergie varierait wiki-de ; DESI en voit un indice, ramené à 3,2 écarts-types en 2026 Desi 2025Popovic 2026. L'existence de l'accélération est établie ; sa cause ne l'est pas.

Notes

1. La fiche energie-matiere-noires, dans sa section « Ce que le livre peut en tirer », écrit : « en 1998, deux équipes qui cherchaient à mesurer le *ralentissement* de l'expansion trouvent une accélération ». La phrase n'est adossée à aucune clé de source propre ; le programme scientifique initial des deux équipes n'est pas documenté dans les extraits lus de Riess et al. (1998) et de Perlmutter et al. (1999). L'hypothèse d'un Univers de matière seule avant 1998 est reprise du chapitre sur l'âge, qui s'appuie sur Perlmutter et al. ↩↩

2. Calcul de ce chapitre : le volume varie comme le cube des distances, $2^3 = 8$. La fiche energie-matiere-noires énonce seulement que « la matière se dilue avec l'expansion, l'énergie noire non » (source wiki-de). La loi de dilution en cube s'applique à la matière non relativiste, ordinaire ou noire, comme le rappelle le chapitre précédent ; le rayonnement se dilue plus vite encore, mais il ne domine plus depuis environ 47 000 ans (wiki-chrono). ↩

3. Calculs de ce chapitre, à partir de $\Omega m = 0{,}3153$ et $\Omega\Lambda = 0{,}6847$ (tables Planck 2018) et de la loi de dilution en cube, en négligeant le rayonnement. Rapport matière/énergie noire aujourd'hui : $0{,}3153 / 0{,}6847 \approx 0{,}46$. À la moitié de la taille actuelle ($z = 1$) : $0{,}46 \times 8 \approx 3{,}7$, soit $3{,}7 / 4{,}7 \approx 79$ % de matière. À $z = 14{,}44$ (MoM-z14) : $15{,}44^3 \approx 3\,680$, rapport $\approx 1\,700$, soit une énergie noire à environ 0,06 %. À $z \approx 1\,090$ (fond diffus) : $1\,091^3 \approx 1{,}3 \times 10^9$, rapport $\approx 6 \times 10^8$, soit une énergie noire de l'ordre de 2×10^{-9} de la matière. Le rayonnement, négligé ici, n'est pas négligeable à $z \approx 1\,090$; il ne ferait que réduire encore la part de l'énergie noire. Ces calculs supposent une énergie noire constante. ↩

4. Calcul de ce chapitre : matière et énergie noire s'égalent quand $(1 + z)^3 = 0{,}6847 / 0{,}3153 \approx 2{,}17$, soit $1 + z \approx 1{,}30$ et $z \approx 0{,}30$. L'Univers mesurait alors environ $1 / 1{,}30 \approx 77$ % de sa taille actuelle. La conversion en âge n'est pas faite ici ; la valeur de 9,8 milliards d'années est celle de wiki-chrono, citée par la fiche frise-cosmique, section 9. ↩

5. La fiche frise-cosmique écrit que l'expansion accélère « depuis » la domination de l'énergie noire, sans distinguer les deux moments ; la table du PDG (source pdg2019-astro, fiche temps-cosmique) donne « age when acceleration was zero 7.70(10) Gyr ». Le chapitre sur l'année cosmique a déjà relevé l'écart. Calcul de ce chapitre : $9{,}8 - 7{,}7 \approx 2{,}1$ milliards d'années ; $9{,}2 - 7{,}7 \approx 1{,}5$ milliard d'années. La table du PDG est calculée avec Planck seul (âge actuel 13,797 milliards d'années), la frise avec 13,787 ; l'écart est sans effet à cette précision. ↩

6. Calcul de ce chapitre : $1{,}636^3 \approx 4{,}38$; $0{,}46 \times 4{,}38 \approx 2{,}0$. La coïncidence entre ce facteur 2 et la date du PDG vérifie le raisonnement de la note sur la pression. La base ne l'énonce pas. ↩

7. Fiche frise-cosmique, section 9 : « l'expansion accélérée isole peu à peu les amas de galaxies les uns des autres », sans clé de source propre. Que les systèmes liés par leur gravité (galaxies, amas, Système solaire) ne participent pas à l'expansion est la présentation usuelle, non documentée dans la base. ↩

8. Loi classique de l'inverse du carré, non énoncée dans les fiches. En cosmologie, la relation entre éclat apparent et distance fait intervenir une définition particulière de la distance, dite de luminosité ; la fiche temps-cosmique rappelle qu'il existe « de

nombreuses manières » de définir une distance dans un Univers en expansion (Hogg 1999), sans détailler celle-ci. ↩

9. La fiche energie-matiere-noires écrit : « Les supernovas de type Ia ont une luminosité quasi standard : leur éclat apparent donne leur distance », sans clé de source propre pour cette phrase ; elle introduit les résultats de Riess et al. (1998) et de Perlmutter et al. (1999), qui reposent sur cette propriété. La définition de la naine blanche est reprise du chapitre sur la forge, où elle est signalée comme classique et non documentée dans les fiches. ↩

10. Raisonnement de ce chapitre, sur le modèle de celui que le chapitre sur l'âge applique à l'âge de l'Univers (« L'énergie noire allonge l'âge, la matière le raccourcit », fiche energie-matiere-noires, section 8). Les fiches ne l'énoncent pas pour les distances des supernovas. ↩

11. Riess et al. (1998) : « high-redshift SNe Ia are, on average, 10% to 15% farther than expected in a low mass density Universe without a cosmological constant ». La lecture de ce choix comme comparaison « prudente » est de ce chapitre ; l'extrait lu ne donne pas la densité exacte du modèle de comparaison. La source est marquée « non vérifié » dans la fiche energie-matiere-noires, qui l'a reprise de la fiche frise-cosmique. ↩

12. Calcul de ce chapitre, par la loi de l'inverse du carré : $1 / 1{,}10^2 \approx 0{,}83$ et $1 / 1{,}15^2 \approx 0{,}76$, soit un éclat plus faible de 17 à 24 %. La publication exprime son résultat en distance. ↩

13. Perlmutter et al. (1999) : « Omega_M = 0.28{+0.09,-0.08} » pour un Univers plat. Calcul de ce chapitre : $1 - 0{,}28 = 0{,}72$. La valeur de Planck, 0,3153, se situe dans l'intervalle 0,20–0,37. La publication date de 1999 ; sa prépublication est de décembre 1998 (arXiv:astro-ph/9812133). ↩

14. La base nomme Brian Schmidt parmi les lauréats (source wiki-de) mais ne décrit pas son rôle, ni la composition des deux équipes au-delà de leurs premiers auteurs. ↩

15. La fiche energie-matiere-noires dit que les ondes sonores primordiales « ont laissé une distance privilégiée entre galaxies ». La description du mécanisme (la matière déplacée par l'onde autour de chaque surdensité) est la présentation usuelle, non détaillée dans la base. ↩

16. Calcul de ce chapitre : avec $h = 0{,}6736$ (Planck 2018), $100 / 0{,}6736 \approx 148$ Mpc ; $148 \times 3{,}26 \approx 483$ millions d'années-lumière. La correspondance exacte entre ce pic et l'horizon sonore $r^* = 144{,}43$ Mpc n'est pas documentée dans la base ; Eisenstein et al. parlent d'un accord avec la « position prédite ». ↩

17. L'introduction de la constante par Einstein, son abandon et son retour ne sont pas documentés dans la base, qui dit seulement que Λ est « un terme ajouté aux équations d'Einstein » (fiche energie-matiere-noires, source wiki-de). ↩

18. Raisonnement de ce chapitre, qui rapproche deux énoncés des fiches : Λ est « interprétable comme l'énergie du vide » et « ne se dilue pas avec l'expansion » (wiki-de) ; le vide quantique « possède toute une série de propriétés non triviales » (smeenksep, fiche avant-et-rien, citée au chapitre sur le rien). ↩

19. Calcul de ce chapitre : 7×10^{-30} g/cm³ $\times 10^6$ cm³/m³ $= 7 \times 10^{-24}$ g/m³ ; la masse d'un atome d'hydrogène, environ $1{,}67 \times 10^{-24}$ g, est une valeur d'usage courant non documentée dans la base ; $7 / 1{,}67 \approx 4$. ↩

20. La fiche energie-matiere-noires écrit seulement : « Son équation d'état vaut $w = -1$, une pression négative qui accélère l'expansion » (wiki-de). La présentation usuelle, non documentée dans la base, dit que l'effet d'une composante sur l'accélération dépend de sa densité augmentée de trois fois sa pression. Pour la matière, dont la pression est négligeable, cette somme vaut sa densité. Pour la constante cosmologique, elle vaut la densité moins trois fois la densité, soit deux fois la densité, avec le signe opposé. L'accélération commence donc quand la densité de la matière tombe à deux fois celle de l'énergie noire, ce que confirment les chiffres du PDG et de Planck (voir la note sur le facteur 2). ↩

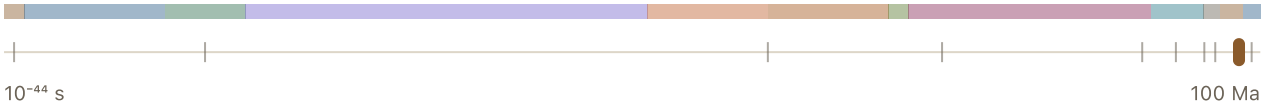
21. Raisonnement de ce chapitre. La fiche energie-matiere-noires qualifie l'écart de « l'un des désaccords les plus massifs de la physique » ; elle ne décrit ni la manière dont le calcul de la théorie quantique des champs est mené, ni les pistes proposées pour le résoudre. ↩

CHAPITRE 23

Deux mesures qui ne s'accordent pas

aujourd'hui (~13,8 Ga)

brouillon · 6888 mots



23.1 Un chiffre, deux chemins

Le chapitre précédent a laissé le modèle standard en position de force. Trois méthodes sans rapport entre elles, les supernovas, les oscillations acoustiques des baryons et le fond diffus, réclament la même composante qui ne se dilue pas, et le modèle ΛCDM rend compte de toutes avec six paramètres seulement planck2018tab(→ chap. 22). Un modèle aussi économe fait des prédictions, et l'une d'elles peut se comparer à une mesure directe : la vitesse à laquelle l'Univers s'étend aujourd'hui.

Cette vitesse s'appelle le taux d'expansion actuel, ou constante de Hubble, et on la note H0. Elle s'exprime dans une unité étrange, le kilomètre par seconde et par mégaparsec. Un mégaparsec vaut environ 3,26 millions d'années-lumière (→ chap. 7). Dire que H0 vaut 70 km/s/Mpc, c'est dire qu'une galaxie située à un mégaparsec s'éloigne de nous, du seul fait de l'expansion, à 70 kilomètres par seconde, et qu'une galaxie dix fois plus lointaine s'éloigne dix fois plus vite. Ce chiffre est le même partout : il ne décrit pas un mouvement des galaxies dans l'espace, il décrit l'étirement de l'espace entre elles, mesuré aujourd'hui.

Il existe deux manières de l'obtenir, et elles ne se ressemblent en rien.

La première est la plus intuitive. Pour une galaxie donnée, il suffit de connaître deux nombres : la vitesse à laquelle elle s'éloigne et sa distance. H0 est leur rapport. La vitesse se lit dans le spectre de la galaxie, sous la forme du décalage vers le rouge, c'est-à-dire de l'étirement de sa lumière (→ chap. 22). La distance est la vraie difficulté. On la construit de proche en proche, comme une échelle dont chaque barreau s'appuie sur le précédent Riess 2022. Le premier barreau est géométrique. Quand la Terre tourne autour du Soleil, une étoile proche semble se déplacer légèrement sur le fond des étoiles lointaines, et l'amplitude de ce va-et-vient, la parallaxe, donne sa distance par simple triangulation[1]. Ces distances géométriques étalonnent des étoiles pulsantes appelées céphéides, dont l'éclat réel se déduit du rythme de leurs pulsations, et qui sont assez brillantes pour être vues dans des galaxies voisines[2]. Dans certaines de ces galaxies ont explosé des supernovas de type Ia, les explosions à l'éclat quasi standard qui ont révélé l'accélération en 1998 (→ chap. 22). Les céphéides étalonnent ces supernovas, et les supernovas, visibles beaucoup plus loin, donnent enfin la distance de galaxies assez éloignées pour que l'expansion domine leur mouvement Riess 2022.

Cette échelle a une propriété essentielle : elle ne suppose presque rien de l'histoire de l'expansion. Les supernovas qui servent à mesurer H0 sont lointaines à l'échelle humaine, proches à l'échelle cosmique : leur lumière n'a voyagé qu'une petite fraction de l'âge de l'Univers. Sur un trajet aussi court, l'expansion n'a pas eu le temps de changer sensiblement de rythme, et le rapport entre vitesse et distance donne directement le taux d'aujourd'hui[3]. L'équipe SH0ES obtient ainsi, en 2022, H0 = 73,04 ± 1,04 km/s/Mpc Riess 2022.

La seconde manière passe par la plus vieille lumière. Le chapitre sur l'âge en a décomposé la chaîne en trois étages (→ chap. 7). On mesure sur la carte du fond diffus l'angle sous lequel on voit les ondes sonores figées vers 380 000 ans. On calcule la taille réelle de ces ondes, l'horizon sonore, avec la physique du plasma primordial. Le rapport des deux donne la distance de la surface d'où la lumière est partie. Il faut enfin, pour passer de cette distance à H0, une histoire complète de l'expansion entre 380 000 ans et aujourd'hui, et cette histoire est celle que suppose le modèle ΛCDM : un espace plat, de la matière ordinaire, de la matière noire froide et une énergie noire constante. Planck en tire H0 = 67,4 ± 0,5 km/s/Mpc Planck 2018. Les auteurs écrivent eux-mêmes que ce paramètre de l'Univers tardif est « inféré » « en supposant la cosmologie ΛCDM de base » Planck 2018. Le fond diffus ne voit pas l'Univers d'aujourd'hui. Le chiffre qu'il donne est une prédiction du modèle pour aujourd'hui, à partir d'une image prise quand l'Univers avait 380 000 ans Planck 2018.

Les deux chemins aboutissent à 73 et à 67. L'écart vaut environ 9 %[4]. Rapporté aux incertitudes, il représente cinq écarts-types Riess 2022. Un écart-type, noté σ, mesure l'incertitude statistique d'un résultat ; un écart de 5σ est le seuil conventionnel à partir duquel les physiciens tiennent une différence pour réelle plutôt que due au hasard des mesures Lbl-desi 2025[5].

La comparaison vaut par ce que la prédiction contient. Le H0 du fond diffus n'est pas le produit d'un seul instrument ni d'une seule hypothèse. Il suppose que le plasma d'avant 380 000 ans contenait exactement la matière ordinaire, la matière noire, les photons et les neutrinos que le modèle y met (→ chap. 4) (→ chap. 6). Il suppose que la recombinaison s'est faite comme la physique atomique le dit. Il suppose que la matière noire est froide et que sa quantité n'a pas changé (→ chap. 21). Il suppose enfin que l'énergie noire a gardé la même densité pendant treize milliards d'années (→ chap. 22). Presque tout ce que ce livre a raconté depuis la première lumière entre dans ce calcul. La mesure locale, elle, ne suppose rien de tout cela. Si les deux bouts de la chaîne s'accordent, la chaîne entière tient. S'ils ne s'accordent pas, un maillon cède quelque part, dans le modèle ou dans l'échelle des distances locales. En 2022, l'équipe SH0ES concluait que « l'origine de ce désaccord désormais ancien reste inconnue » Riess 2022.

23.2 Trois télescopes, une même valeur basse

Le premier suspect est l'instrument. Jusqu'à récemment, la valeur basse reposait pour l'essentiel sur un seul satellite, Planck. Une erreur propre à cet instrument, dans son étalonnage ou dans le traitement des émissions de notre Galaxie qui se superposent au fond diffus, se serait propagée dans tous ses résultats[6]. Pour l'écarter, il fallait refaire la carte avec d'autres instruments.

C'est ce qu'ont fait deux télescopes installés au sol, ACT dans le désert d'Atacama, au Chili, et SPT au pôle Sud (→ chap. 7). En 2025, l'équipe de SPT-3G, la caméra actuelle du télescope du pôle Sud, publie l'analyse de ses observations de 2019 et 2020. Seul, sans Planck, SPT-3G obtient H0 = 66,66 ± 0,60 km/s/Mpc, à 6,2σ des mesures locales de SH0ES Camphuis 2025[7]. La valeur est même un peu plus basse que celle de Planck.

Le même article marque un tournant pour la discipline. Pour la première fois, les données combinées des télescopes au sol, ACT et SPT, atteignent la puissance de Planck sur certains paramètres, « un jalon pour la cosmologie du fond diffus » Camphuis 2025. Ces télescopes utilisent d'autres détecteurs, regardent à travers l'atmosphère plutôt que depuis l'espace, et observent d'autres régions du ciel. Leurs erreurs possibles ne sont pas celles de Planck. Qu'ils retrouvent la même valeur écarte une erreur systématique propre au satellite. Les trois expériences réunies donnent H0 = 67,19 ± 0,38 km/s/Mpc, la contrainte la plus précise jamais tirée du fond diffus Camphuis 2025. Les données du fond diffus seules, précise l'équipe, ne montrent

aucun signe de physique au-delà de ΛCDM Camphuis 2025 : la carte est cohérente avec elle-même et avec le modèle qui la lit.

Cette confirmation a une portée précise, qu'il faut mesurer. Elle porte sur le premier étage de la chaîne, la carte et les angles qu'on y lit. Elle ne porte pas sur les deux autres. Planck, ACT et SPT analysent leurs cartes avec la même physique d'avant la recombinaison et le même modèle ΛCDM ; s'il manque un ingrédient à cette physique, il manque pour les trois[8]. L'accord des instruments dit que, si le fond diffus se trompe, ce n'est pas dans sa carte.

Du côté local, la réponse à la même objection a pris la forme d'un rapport collectif. En 2025, le réseau H0DN, pour *H0 Distance Network*, publie un rapport de consensus signé par plus de cent chercheurs h0dn2025. Il ne repose pas sur une seule échelle. Il combine plusieurs indicateurs de distance indépendants : des parallaxes, des étoiles doubles qui s'éclipsent l'une l'autre, des masers, qui sont des sources d'émission radio intense dans le disque de certaines galaxies, des céphéides, des géantes rouges et d'autres encore h0dn2025[9]. L'intérêt d'un réseau tient à sa redondance. Chaque barreau de l'échelle peut être posé par plusieurs routes ; si l'une d'elles était biaisée, elle se trahirait par son désaccord avec les autres[10]. Le résultat de base est H0 = 73,50 ± 0,81 km/s/Mpc, et ses auteurs jugent la valeur locale « robustement déterminée » h0dn2025.

Le rapport chiffre l'écart de deux manières. Il se trouve à 7,1σ de la combinaison Planck + SPT + ACT h0dn2025. Le calcul se refait à la main : les deux valeurs diffèrent de 6,31 km/s/Mpc, et leurs incertitudes combinées valent environ 0,89, soit un rapport de 7,1[11]. Il se trouve aussi à 5,0σ d'une combinaison qui se passe entièrement des fluctuations du fond diffus : la nucléosynthèse primordiale associée aux oscillations acoustiques des baryons mesurées par le relevé DESI h0dn2025. La nucléosynthèse fixe la quantité de matière ordinaire, indépendamment de Planck (→ chap. 5)Fields 2020 ; les oscillations acoustiques relèvent la même règle sonore dans la répartition des galaxies (→ chap. 22). Cette seconde route vers une valeur basse n'emprunte aucune carte du fond diffus. Elle s'appuie pourtant, elle aussi, sur la physique de l'Univers primordial, et c'est sans doute ce qu'elle a en commun avec la première[12].

L'écart dépasse donc largement le seuil de 5σ, et il ne se réduit ni à un défaut d'instrument ni à une seule combinaison de données.

23.3 Le camp local divisé

Le seuil de 5σ dit qu'un écart est trop grand pour être dû au hasard des mesures. Il ne dit pas d'où vient l'écart. Une erreur systématique, qui décale toutes les mesures d'une méthode dans le même sens, ne diminue pas quand on multiplie les observations. Elle peut donc produire un écart très significatif et entièrement faux. C'est sur ce terrain que le débat reste ouvert, et il l'est à l'intérieur même du camp des mesures locales.

L'équipe de Wendy Freedman, le Chicago Carnegie Hubble Program (CCHP), a construit son échelle sans les céphéides Hoyt 2025. Elle étalonne les supernovas avec un autre indicateur, le sommet de la branche des géantes rouges. Une étoile de faible masse qui a épuisé l'hydrogène de son cœur gonfle en géante rouge et devient de plus en plus lumineuse, jusqu'à un maximum au-delà duquel son évolution change brutalement. Ce maximum d'éclat est à peu près le même pour toutes les étoiles de ce type, et il sert donc d'étalon de distance[13]. L'équipe mesure ce sommet avec le télescope spatial Webb dans les galaxies qui ont abrité des supernovas Hoyt 2025.

Le résultat tombe entre 68,4 et 69,6 km/s/Mpc, selon celui des quatre jeux de mesures de supernovas qu'on utilise Hoyt 2025. Deux choses ressortent de ce chiffre. La première est sa place. Il se situe entre les deux camps, mais plus près du fond diffus que de H0DN : la borne haute, 69,6, dépasse de 2,4 km/s/Mpc la valeur du fond diffus et reste à 3,9 km/s/Mpc sous celle de H0DN[14]. La seconde est sa fourchette. Changer d'échantillon de supernovas, à étalonnage égal, fait bouger H0 de 1,2 km/s/Mpc, davantage que l'incertitude totale annoncée par H0DN[15]. La base de ce livre ne donne pas l'incertitude propre à chacune des quatre valeurs du CCHP ; elle ne permet donc pas de dire si ces valeurs sont compatibles avec le fond diffus, ni à combien d'écarts-types elles se trouvent de H0DN.

L'équipe tire de son résultat une conclusion prudente. Il faudra, écrit-elle, davantage d'observations du sommet des géantes rouges avec Webb, et des analyses indépendantes des supernovas proches, « pour continuer à élucider la vraie nature de la tension de Hubble » Hoyt 2025. La formule laisse ouverte la possibilité que la tension tienne, pour une part, à l'échelle locale elle-même.

Les deux positions se dessinent ainsi. D'un côté, l'équipe SH0ES et le réseau H0DN jugent la valeur locale « robustement déterminée », à 73,50 ± 0,81 km/s/Mpc h0dn2025. De l'autre, le CCHP soupçonne dans l'échelle des distances locales des erreurs systématiques qui la tireraient vers le haut Hoyt 2025. La base de ce livre ne dit pas quelles erreurs le CCHP soupçonne précisément, ni pourquoi les deux camps divergent alors que le réseau H0DN compte lui aussi les géantes rouges parmi ses indicateurs h0dn2025. Elle ne permet pas de trancher, et ce chapitre ne tranche pas. Il retient un fait : même la mesure locale la plus basse publiée reste au-dessus de la valeur du fond diffus, et même la plus haute n'a pas convaincu toute la communauté qui la produit.

23.4 Si l'écart est réel : retoucher la règle

Supposons que la valeur locale soit juste. Le modèle doit alors céder quelque part, et les trois étages du calcul n'offrent pas les mêmes prises.

Le premier étage est mesuré. L'échelle angulaire acoustique θ* est lue sur la carte à 0,03 % près, presque indépendamment du modèle Planck 2018, et trois instruments différents s'accordent sur la carte Camphuis 2025. Il n'y a guère de marge de ce côté.

Le troisième étage est déduit en supposant l'histoire de l'expansion tardive. On pourrait imaginer de la modifier, pour que la même distance au fond diffus corresponde à un H0 plus élevé. Mais cette histoire tardive n'est plus seulement supposée : les oscillations acoustiques des baryons et les supernovas la mesurent, époque par époque, sur les onze derniers milliards d'années Eisenstein 2005Lbl-desi 2025. Toute retouche tardive doit s'accorder avec ces relevés[16].

Reste le deuxième étage, l'horizon sonore. Sa valeur, r* = 144,43 ± 0,26 mégaparsecs planck2018tab, est calculée avec la physique d'avant 380 000 ans, et sa marge ne couvre que les fluctuations statistiques à l'intérieur de cette physique. Elle suppose que la liste des ingrédients du plasma primordial est complète (→ chap. 7). C'est là que Lloyd Knox et Marius Millea situent les solutions les plus plausibles à la tension : elles augmentent le taux d'expansion avant la recombinaison, ce qui réduit l'horizon sonore Knox 2020.

L'enchaînement se suit pas à pas (→ chap. 7). Si l'Univers s'étendait plus vite avant la recombinaison, il atteignait plus tôt la température d'environ 3 000 kelvins à laquelle les atomes se forment. Le son a donc eu moins de temps pour voyager dans le plasma, et la plus grande onde qu'il ait pu porter est plus courte. La règle rétrécit. L'angle sous lequel on la voit, lui, est mesuré et ne bouge pas. Une règle plus courte vue sous le même angle est plus proche : la surface de dernière diffusion se rapproche. Pour que la lumière partie

d'une surface plus proche arrive avec le même étirement, il faut que l'expansion ait été plus rapide sur le trajet. Le H0 déduit augmente, et l'âge de l'Univers diminue Knox 2020[17]. La carte resterait la même ; sa lecture changerait.

Plusieurs mécanismes pourraient accélérer ainsi l'expansion primordiale ou déplacer la recombinaison. Une « énergie noire précoce » serait une composante supplémentaire qui aurait pesé un peu dans le budget de l'Univers peu avant la recombinaison, puis se serait effacée[18]. Une recombinaison modifiée changerait le moment ou le déroulement de la formation des atomes. Une masse de l'électron légèrement différente à cette époque déplacerait les niveaux d'énergie de l'atome d'hydrogène, donc la température à laquelle les électrons se lient aux noyaux, donc la date de la recombinaison[19]. L'analyse de SPT-3G trouve, en combinant le fond diffus et les oscillations acoustiques, de légères préférences pour plusieurs modèles modifiés : une courbure de l'espace, une amplitude du lentillage différente, une autre équation d'état de l'énergie noire, une recombinaison modifiée, une masse de l'électron variable Camphuis 2025. Ces préférences se situent entre 2 et 3σ Camphuis 2025. Aucune n'est établie.

Ces solutions ne sont pas libres. Toucher à la physique d'avant la recombinaison ne raccourcit pas seulement la règle. Cela modifie aussi la manière dont les photons diffusent dans le plasma et la forme des oscillations acoustiques, que la carte enregistre avec la même précision que leur position Knox 2020. Une solution doit donc raccourcir la règle d'environ ce qu'il faut sans abîmer le reste du spectre, que ΛCDM ajuste déjà très bien. C'est ce qui rend l'exercice difficile, et ce qui explique que les candidats n'obtiennent que des préférences modestes.

Un second écart, plus faible, apparaît à la jonction entre le fond diffus et les galaxies. Dans ΛCDM, les paramètres tirés du fond diffus et ceux tirés des oscillations acoustiques de DESI ne s'accordent pas tout à fait : l'écart vaut 2,3σ selon l'équipe de DESI Desi 2025 et 2,8σ selon celle de SPT-3G Camphuis 2025. C'est moins que le seuil d'une découverte, et bien moins que la tension sur H0. Mais cet écart porte sur l'accord entre l'Univers primordial et l'Univers des derniers milliards d'années, c'est-à-dire exactement sur la période où l'énergie noire agit.

23.5 DESI : une énergie noire qui faiblirait

Le relevé DESI, pour *Dark Energy Spectroscopic Instrument*, a construit la plus vaste carte en trois dimensions de l'Univers jamais réalisée, et l'utilise pour suivre l'influence de l'énergie noire sur les onze derniers milliards d'années Lbl-desi 2025. Ses données publiées en 2025 portent sur plus de 14 millions de galaxies et de quasars Desi 2025. La méthode est celle des oscillations acoustiques des baryons, que le chapitre précédent a décrite : la règle sonore figée à 380 000 ans a laissé une légère préférence pour un certain écart entre galaxies, et l'on retrouve cette règle à différentes distances, donc à différentes époques (→ chap. 22)Eisenstein 2005. Là où le fond diffus donne un point de départ et les mesures locales un point d'arrivée, DESI relève le trajet.

Ce qu'on cherche sur le trajet, c'est le comportement de l'énergie noire. Les cosmologistes le résument par son équation d'état w, le rapport entre sa pression et sa densité d'énergie. Pour une constante cosmologique, w vaut exactement -1, en tout temps, et la densité de l'énergie noire ne change jamais wikide(→ chap. 22). Pour tester cette hypothèse, DESI laisse w varier, et le décrit par deux nombres : w0, sa valeur aujourd'hui, et wa, qui mesure de combien il a changé au cours de l'expansion[20]. Une constante cosmologique correspond à $w0 = -1$ et $wa = 0$.

Les données de 2025 préfèrent une énergie noire variable, avec $w0 > -1$ et $wa < 0$ Desi 2025. Combinées au fond diffus, elles la préfèrent à 3,1σ ; ajoutées en plus aux supernovas, la préférence va de 2,8 à 4,2σ selon l'échantillon de supernovas utilisé Desi 2025. En clair, l'énergie noire se comporterait aujourd'hui un peu moins qu'une constante : un w supérieur à -1 correspond à une densité qui diminue lentement quand l'Univers s'étend Desi 2025[21]. Le signe de wa indique que w était plus bas dans le passé. Plusieurs analyses situent vers un décalage vers le rouge de 0,5, il y a environ cinq milliards d'années, un passage de w d'une valeur inférieure à -1 à une valeur supérieure Chaudhary 2025[22]. Une énergie noire dont le w passe sous -1 est dite « fantôme » : sa densité croît quand l'espace grandit wiki-fate[23]. Si l'on prend le signal au pied de la lettre, l'énergie noire aurait donc crû pendant une partie de l'histoire, puis se serait mise à décliner.

La dépendance à l'échantillon de supernovas n'est pas un détail. Les supernovas apportent les distances relatives des époques récentes, et trois grands échantillons coexistent, dont celui du Dark Energy Survey (DES) Chaudhary 2025. Le chiffre de 4,2σ reposait sur les supernovas de DES. En 2026, l'équipe de DES réanalyse son programme avec un étalonnage révisé de ses quelque 1 800 supernovas, l'échantillon DES-Dovekie Popovic 2026. La préférence tombe à 3,2σ, et les auteurs n'y voient plus qu'une « faible préférence » pour une énergie noire variable Popovic 2026. Un écart-type entier a disparu sans qu'une seule nouvelle observation du ciel soit faite, par la seule révision de la manière dont on mesure l'éclat des supernovas. Le signal dépend donc, pour une part mesurable, de l'étalonnage des mêmes objets dont dépend aussi l'échelle locale de H0.

Une autre analyse éclaire d'où vient la préférence. Limitée aux seules données de l'Univers tardif, sans le fond diffus, elle ne trouve pas de préférence robuste pour une énergie noire variable : entre 1,1 et 2,3σ selon les modèles Chaudhary 2025. Le signal se renforce quand on ajoute le fond diffus. Il naît donc en partie de la confrontation entre l'Univers primordial et l'Univers récent, la même jonction où apparaît l'écart modéré de 2,3 à 2,8σ entre fond diffus et oscillations acoustiques dans ΛCDM Desi 2025Camphuis 2025. Les deux constats sont compatibles avec une énergie noire réellement variable, qui expliquerait ce désaccord de raccord. Ils sont aussi compatibles avec un désaccord de raccord dont l'origine serait ailleurs, et qu'une énergie noire variable se contenterait d'absorber dans l'ajustement[24]. La base de ce livre ne départage pas ces deux lectures.

Aucune combinaison n'atteint les 5σ exigés d'une découverte Lbl-desi 2025. En septembre 2026, le signal de DESI est un indice sérieux : il se retrouve dans plusieurs combinaisons de données, il a été assez fort pour qu'une équipe réanalyse ses supernovas, et il a faibli à cette réanalyse. Il n'est ni confirmé ni réfuté.

Les deux doutes de ce chapitre ne portent pas sur la même époque. La tension sur H0 met en cause, selon la piste jugée la plus plausible, la physique d'avant 380 000 ans Knox 2020. Le signal de DESI met en cause l'énergie noire des derniers milliards d'années. La base de ce livre ne dit pas si une énergie noire variable réduirait ou aggraverait la tension sur H0 ; elle ne les relie pas quantitativement.

23.6 Ce qui bougerait, ce qui ne bougerait pas

L'âge de l'Univers est l'intégrale de l'inverse du taux d'expansion : on découpe l'histoire en petites étapes d'étirement, on calcule le temps que chacune a pris compte tenu de la vitesse d'expansion du moment, et on additionne wiki-age(→ chap. 7). Il dépend donc de H0, qui fixe la vitesse actuelle, et de la composition, qui fixe la manière dont cette vitesse a changé wiki-age. La valeur de référence, 13,787 ± 0,020 milliards d'années, est calculée dans ΛCDM avec les données de Planck et les oscillations acoustiques des baryons planck2018tab. Sa marge de 20 millions d'années est une marge statistique à l'intérieur du modèle. Elle dit de

combien l'âge varierait si l'on refaisait les mesures, le modèle étant tenu pour vrai ; elle ne dit rien de l'erreur qu'on ferait si le modèle était faux wiki-age(→ chap. 7).

Pour donner un ordre de grandeur de cette erreur possible, on peut faire une règle de trois. À composition égale, l'âge varie comme l'inverse de H0. Avec H0 = 73,5 km/s/Mpc au lieu de 67,66, il tomberait à environ 12,7 milliards d'années[25]. Ce calcul est fait pour ce livre ; il n'est pas publié tel quel, et il ignore qu'une solution réelle à la tension modifierait aussi les autres paramètres, donc l'âge d'une autre façon qu'en proportion de H0. Il donne seulement la taille de l'enjeu : un peu plus d'un milliard d'années, cinquante fois la marge annoncée[26]. Pour les solutions précoces, l'enchaînement de Knox et Millea dit dans quel sens l'âge bougerait, vers le bas Knox 2020 ; la base ne donne pour aucun modèle précis l'âge qu'il prédit.

Une énergie noire variable ferait beaucoup moins bouger l'âge. Elle agit sur les derniers milliards d'années, quand l'énergie noire pèse dans le bilan ; avant, la matière dominait et l'énergie noire ne comptait presque pas (→ chap. 22). Elle ne modifierait donc qu'une partie de l'intégrale, et d'une quantité que les écarts de w observés laissent modeste[27]. Ce raisonnement n'est pas chiffré sur source ; une fourchette d'âge pour les modèles de DESI, lue dans un résumé sans source identifiée, n'a pas été retenue pour ce livre.

Les dates du livre ne réagiraient pas toutes de la même manière. Celles qui se comptent depuis le début de la phase chaude, les premières minutes de la nucléosynthèse et les 380 000 ans de la première lumière, ne changent presque pas (→ chap. 7). Le temps écoulé jusqu'à ces moments dépend du rythme de l'expansion à ces époques, fixé par les densités de la matière et du rayonnement que la carte mesure. L'énergie noire en représentait alors de l'ordre du milliardième (→ chap. 22), et le H0 d'aujourd'hui n'y entre pas. Une seule famille d'hypothèses y toucherait : celles qui accélèrent l'expansion avant la recombinaison. Un Univers qui s'étend plus vite atteint plus tôt les 3 000 kelvins de la recombinaison, et les 380 000 ans raccourciraient un peu[28]. Les contraintes que la carte impose à ces solutions Knox 2020 limitent justement l'ampleur de ce déplacement.

Les dates comptées depuis aujourd'hui, au contraire, héritent de toute l'incertitude. « Le fond diffus a été émis il y a 13,8 milliards d'années » vaut exactement ce que vaut l'âge de l'Univers. La date du Système solaire illustre bien la différence. Son « il y a », 4 567,30 millions d'années, est lu par une horloge radioactive dans des météorites, sans aucune cosmologie Connelly 2012(→ chap. 15). Son « après le Big Bang », environ 9,2 milliards d'années, s'obtient en le retranchant de l'âge de l'Univers, et deviendrait environ 8,1 milliards d'années avec la règle de trois[29]. Le Soleil ne bougerait pas ; c'est le début de la phase chaude qui se rapprocherait de lui.

Un garde-fou indépendant limite ces révisions. L'Univers ne peut pas être plus jeune que ses étoiles, et l'âge des étoiles se calcule par les modèles d'évolution stellaire, sans passer par l'expansion. Pour l'étoile dite Mathusalem, ces modèles donnent 14,27 ± 0,80 milliards d'années, un âge compatible avec celui que calcule Planck wiki-age. Le garde-fou est lâche, avec une marge quarante fois plus large que celle de Planck (→ chap. 7). Il n'est pourtant pas muet. Un âge de 12,7 milliards d'années se trouverait à deux fois la marge de l'étoile sous sa valeur centrale[30], sans compter les quelques centaines de millions d'années qu'il a fallu pour que naissent les premières étoiles (→ chap. 9). Une solution à la tension qui rajeunirait beaucoup l'Univers rouvrirait la question qu'avait close la découverte de 1998, celle d'un Univers plus jeune que ses étoiles (→ chap. 22).

La période la moins bien comprise de toute l'histoire cosmique est donc celle où nous vivons. Le premier jour est calculé avec une physique testée, et ses dates tiennent quelle que soit l'issue des deux tensions. Le présent dépend d'une composante dont la nature est inconnue, dont la constance vient d'être mise en doute par DESI, et d'un taux d'expansion sur lequel deux méthodes s'opposent. C'est de cette composante que dé-

pend aussi le futur : le sort de l'Univers est fixé par la quantité d'énergie noire et par son équation d'état wiki-fate. Une constante promet une expansion sans fin ; une énergie noire qui varie ouvre d'autres issues wiki-fate(→ chap. 24).

23.7 Ce qu'on ne sait pas

On ne sait pas d'où vient la tension sur H0. Son existence statistique est solide : elle dépasse 5σ dans toutes les combinaisons documentées ici, de 5σ pour SH0ES face à Planck à 7,1σ pour H0DN face aux trois télescopes du fond diffus Riess 2022h0dn2025, et elle survit au changement d'instrument Camphuis 2025. Deux explications s'opposent. Dans la première, le modèle est complet et l'échelle locale contient une erreur systématique ; les valeurs de 68,4 à 69,6 km/s/Mpc obtenues avec les géantes rouges de Webb vont dans ce sens Hoyt 2025. Dans la seconde, l'échelle locale est juste, comme l'affirme le rapport H0DN h0dn2025, et il manque au plasma primordial un ingrédient qui raccourcisse l'horizon sonore Knox 2020. Trois types de résultats les départageront. Du côté local, de nouvelles observations du sommet des géantes rouges avec Webb et des analyses indépendantes des supernovas proches, que réclame le CCHP Hoyt 2025, diront si les méthodes locales convergent vers 73 ou vers 69. Du côté du fond diffus, des mesures plus fines pourront déceler les effets secondaires qu'un ingrédient nouveau laisserait sur la diffusion des photons Knox 2020 ; les futurs instruments comme CMB-S4 visent par exemple à mesurer le nombre effectif d'espèces de neutrinos, qui compte dans le rayonnement d'avant la recombinaison, à 0,03 près Fields 2020. Si l'un des candidats, aujourd'hui préféré à 2 ou 3σ, franchissait le seuil, la seconde lecture l'emporterait. Confiance très élevée dans l'écart ; faible sur sa cause.

On ne sait pas pourquoi le CCHP et le réseau H0DN divergent alors qu'ils utilisent tous deux les géantes rouges, ni quelles erreurs précises le CCHP soupçonne. La base de ce livre ne donne pas non plus l'incertitude des valeurs du CCHP, qui permettrait de dire si elles sont compatibles avec le fond diffus. Ce point est une lacune de la documentation, pas seulement de la science.

On ne sait pas si l'énergie noire varie. La préférence de DESI pour $w0 > -1$ et $wa < 0$ se situe autour de 3σ en 2026, après la recalibration des supernovas de DES Desi 2025Popovic 2026 ; limitée à l'Univers tardif, elle n'est pas robuste Chaudhary 2025. Deux évolutions trancheront : les prochaines données de DESI, et un étalonnage des supernovas qui cesse de bouger d'une analyse à l'autre. Un signal qui franchirait 5σ avec plusieurs échantillons de supernovas écarterait la constante cosmologique ; un signal qui retomberait sous 2σ la laisserait comme l'hypothèse la plus simple. Confiance faible dans une variation, élevée dans le fait que la question est désormais posée par les données et non plus seulement par la théorie.

On ne sait pas de combien l'âge de l'Univers bougerait dans un modèle alternatif précis. La règle de trois donne 12,7 milliards d'années pour $H0 = 73{,}5$, mais elle n'est pas un résultat publié wiki-age ; ni les modèles d'énergie noire précoce, ni ceux de DESI ne sont accompagnés dans la base d'un âge calculé. La base ne dit pas non plus de combien l'horizon sonore devrait rétrécir pour réconcilier les deux H0.

23.8 Ce que ce chapitre démontre

Le taux d'expansion actuel H0 s'obtient par deux chemins. L'échelle des distances locales, qui passe des parallaxes aux céphéides puis aux supernovas de type Ia, le mesure dans l'Univers proche sans supposer d'histoire de l'expansion : 73,04 ± 1,04 km/s/Mpc selon SH0ES en 2022 Riess 2022. Le fond diffus le prédit, en supposant le modèle ΛCDM, à partir d'une image vieille de 380 000 ans : 67,4 ± 0,5 km/s/Mpc selon Planck Planck 2018. L'écart atteignait déjà 5σ en 2022, et « l'origine de ce désaccord désormais ancien reste

inconnue » Riess 2022. Parce que la prédiction suppose tout ce que le modèle dit de l'Univers depuis la première lumière, cet écart est le test le plus direct du modèle entier.

La valeur basse ne vient pas d'un défaut de Planck. SPT-3G, seul, trouve 66,66 ± 0,60 km/s/Mpc ; Planck, ACT et SPT réunis donnent 67,19 ± 0,38 km/s/Mpc, la contrainte la plus précise jamais tirée du fond diffus, et les télescopes au sol égalent désormais Planck sur certains paramètres Camphuis 2025. La valeur haute ne vient pas d'une seule méthode : le rapport de consensus H0DN, signé par plus de cent chercheurs, combine plusieurs indicateurs indépendants et obtient 73,50 ± 0,81 km/s/Mpc, à 7,1σ du fond diffus et à 5,0σ de la combinaison nucléosynthèse et oscillations acoustiques de DESI h0dn2025. Le camp local n'est pourtant pas unanime : avec les géantes rouges mesurées par Webb, l'équipe de Freedman trouve 68,4 à 69,6 km/s/Mpc et juge qu'il faut d'autres observations pour comprendre la vraie nature de la tension Hoyt 2025.

Si l'écart est réel, le calcul céderait le plus probablement au deuxième étage. L'horizon sonore, 144,43 ± 0,26 Mpc, est calculé avec la physique d'avant la recombinaison planck2018tab. Les solutions jugées les plus plausibles accélèrent l'expansion avant la recombinaison et raccourcissent cette règle Knox 2020 ; la même carte donnerait alors un H0 plus élevé et un âge plus court. Énergie noire précoce, recombinaison modifiée et masse de l'électron variable ne sont préférées qu'à 2 ou 3σ Camphuis 2025. Dans ΛCDM, un écart modéré sépare aussi le fond diffus des oscillations acoustiques de DESI, 2,3 à 2,8σ Desi 2025Camphuis 2025.

DESI, sur plus de 14 millions de galaxies et quasars et onze milliards d'années d'histoire, préfère en 2025 une énergie noire variable, un peu moins qu'une constante aujourd'hui, à 3,1σ avec le fond diffus et de 2,8 à 4,2σ avec les supernovas Desi 2025Lbl-desi 2025. La recalibration des supernovas de DES en 2026 ramène 4,2σ à 3,2σ, une « faible préférence » Popovic 2026 ; les seules données tardives n'en montrent pas de trace robuste Chaudhary 2025. Aucune combinaison n'atteint 5σ Lbl-desi 2025.

L'âge de 13,787 ± 0,020 milliards d'années est calculé dans ΛCDM, et sa marge ne couvre pas l'erreur d'un modèle faux planck2018tabwiki-age. Une règle de trois non publiée donne environ 12,7 milliards d'années pour H0 = 73,5 à composition égale ; une énergie noire variable le ferait bien moins bouger. Les dates comptées depuis le début de la phase chaude, les premières minutes et les 380 000 ans, ne changeraient presque pas. L'étoile Mathusalem, à 14,27 ± 0,80 milliards d'années, reste compatible avec l'âge calculé wiki-age. Le modèle standard tient donc sur le premier jour, et il est sous tension sur le présent, l'époque dont dépend le futur.

Notes

1. Principe classique de la triangulation, donné pour le lecteur. Les fiches citent les parallaxes parmi les indicateurs de distance du réseau H0DN (fiche energie-matiere-noires, section 6) sans décrire la méthode. ↩

2. La relation entre la période de pulsation d'une céphéide et son éclat réel est la présentation usuelle ; elle n'est pas décrite dans les fiches, qui mentionnent les céphéides comme étape de l'échelle locale (Riess et al. 2022, repris des fiches frise-cosmique et energie-matiere-noires). L'histoire de sa découverte n'est pas documentée dans la base. ↩

3. Raisonnement de ce chapitre. La fiche fond-diffus-cosmologique oppose la valeur locale, qui « mesure » H0, à celle du fond diffus, qui le « prédit » dans ΛCDM ; elle ne précise pas les décalages vers le rouge des supernovas utilisées par SH0ES, ni la manière dont l'analyse traite les mouvements propres des galaxies proches. ↩

4. Calcul de ce chapitre : 73,04 / 67,4 ≈ 1,084 ; avec les valeurs de 2025, 73,50 / 67,19 ≈ 1,094. L'écart relatif est donc de 8 à 9 %. ↩

5. Présentation reprise du chapitre sur l'âge. Le seuil de 5σ est qualifié de « gold standard » de la physique par le communiqué du Berkeley Lab (2025). Vérification de ce chapitre sur les valeurs de 2022 : (73,04 − 67,4) / √(1,04² + 0,5²) ≈ 5,64 / 1,15 ≈ 4,9, en accord avec les « 5σ » de Riess et al. ↩

6. Exemples donnés pour le lecteur ; la base ne documente pas les sources d'erreur systématique de Planck. La fiche fond-diffus-cosmologique dit seulement que les résultats d'ACT et de SPT, obtenus « avec des instruments et des parties du ciel différents », écartent « une erreur systématique propre à Planck ». ↩

7. Camphuis et al. (2025) : « 6.2 sigma away from local measurements from SH0ES ». Le calcul de ce chapitre avec la valeur SH0ES de 2022 donne un écart plus faible : (73,04 − 66,66) / √(1,04² + 0,60²) ≈ 6,38 / 1,20 ≈ 5,3σ. L'article compare donc sans doute SPT-3G à une valeur SH0ES plus récente ou plus précise, que la base ne documente pas. ↩

8. Raisonnement de ce chapitre, appuyé sur la distinction des trois étages (fiche fond-diffus-cosmologique, section 6). La base ne détaille pas les modèles d'analyse employés par ACT et SPT, mais l'article de SPT-3G raisonne dans ΛCDM et ses extensions. ↩

9. La liste est celle de la fiche energie-matiere-noires (section 6), d'après le rapport H0DN. La brève définition des masers est donnée pour le lecteur ; la base ne décrit ni leur principe ni celui des binaires à éclipses comme indicateurs de distance. ↩

10. Raisonnement de ce chapitre sur l'intérêt d'un réseau d'indicateurs. Le titre du rapport, « The Local Distance Network », et sa qualification de « community consensus report » sont dans la source ; la manière dont les routes sont combinées n'est pas détaillée dans la base. ↩

11. Calcul de ce chapitre : 73,50 − 67,19 = 6,31 ; √(0,81² + 0,38²) = √0,800 ≈ 0,894 ; 6,31 / 0,894 ≈ 7,06. Le calcul néglige les corrélations éventuelles entre mesures, mais retrouve les 7,1σ du rapport. ↩

12. Le rapport H0DN donne le chiffre (« 5.0 sigma with BBN+BAO (DESI2) ») sans que la base décrive comment cette combinaison produit un H0. L'interprétation (la nucléosynthèse fixe la densité de baryons, qui permet de calculer l'horizon sonore, que les BAO relèvent à plusieurs époques) est la présentation usuelle, raisonnée pour ce chapitre à partir des fiches nucléosynthèse (via energie-matiere-noires) et fond-diffus-cosmologique. ↩

13. Le nom de l'indicateur figure dans le titre de Hoyt et al. (2025), « Tip of the Red Giant Branch ». La description physique (un maximum d'éclat commun aux géantes rouges de faible masse, suivi d'un changement brutal d'évolution) est la présentation usuelle, non documentée dans la base. ↩

14. Calcul de ce chapitre : 69,6 − 67,19 = 2,41 ; 73,50 − 69,6 = 3,90 ; 68,4 − 67,19 = 1,21. Le milieu entre les deux camps vaut environ 70,3. ↩

15. Calcul et lecture de ce chapitre : 69,6 − 68,4 = 1,2 km/s/Mpc, contre ± 0,81 pour H0DN. Hoyt et al. attribuent l'écart à « which of four sets of SN magnitudes are used » ; la base ne précise pas quels sont ces quatre jeux. ↩

16. Raisonnement de ce chapitre. Knox et Millea (2020) jugent plus plausibles les solutions précoces ; la base ne reproduit pas leur argument contre les solutions tardives, et le lien avec les contraintes des BAO et des supernovas est proposé ici comme explication probable, non vérifiée sur la source. ↩

17. Knox et Millea (2020, lu dans un résumé paraphrasé) établissent que ces solutions augmentent le taux d'expansion avant la recombinaison et réduisent l'horizon sonore ; la fiche fond-diffus-cosmologique en tire que « la même carte donnerait un H0 plus élevé et un âge plus court ». Le détail de l'enchaînement est repris du chapitre sur l'âge, où il est signalé comme un raisonnement. ↩

18. Définition donnée pour le lecteur. La base nomme l'« énergie noire précoce » parmi les pistes (Camphuis et al. 2025, via la fiche fond-diffus-cosmologique) sans en décrire le mécanisme ; la présentation retenue ici est l'usuelle. ↩

19. Raisonnement de ce chapitre : l'énergie de liaison de l'hydrogène (13,6 eV, fiche fond-diffus-cosmologique) est proportionnelle à la masse de l'électron, d'après la physique atomique classique, non documentée dans la base. La base ne dit pas dans quel sens ni de combien la masse devrait varier. ↩

20. La forme exacte de la paramétrisation utilisée par DESI n'est pas documentée dans la base, qui donne seulement les signes $w0 > -1$ et $wa < 0$ (DESI 2025). La lecture « w0 = valeur aujourd'hui, wa = variation au cours de l'expansion » est la présentation usuelle. ↩

21. La fiche energie-matiere-noires traduit $w0 > -1$ par une « densité en léger déclin ». Le lien général entre w et la dilution (une densité constante pour $w = -1$, décroissante pour $w > -1$) est la présentation usuelle, non détaillée dans la base. ↩

22. Chaudhary et al. (2025, résumé paraphrasé par l'outil de recherche). La conversion de z ≈ 0,5 en « environ cinq milliards d'années » est une approximation de ce chapitre : elle s'appuie sur le début de l'accélération, placé à z = 0,636 et 7,70 milliards d'années après le Big Bang par le Particle Data Group, cité au chapitre précédent, et n'est pas lue sur source. ↩

23. La fiche energie-matiere-noires définit l'énergie noire fantôme par w < −1 dans le contexte du futur (Big Rip, d'après Wikipédia, « Ultimate fate of the universe »). Que sa densité croisse avec l'expansion est la présentation usuelle, non énoncée dans la base. ↩

24. Raisonnement de ce chapitre, qui rapproche trois faits documentés : la préférence est plus forte avec le fond diffus (DESI 2025), faible avec les seules données tardives (Chaudhary et al. 2025), et un écart modéré existe dans ΛCDM entre fond diffus et BAO (DESI 2025 ; Camphuis et al. 2025). Aucune des sources lues ne formule ce rapprochement. ↩

25. Calcul d'ordre de grandeur de l'atelier (fiche energie-matiere-noires, section 8), refait au chapitre sur l'âge : 13,787 × 67,66 / 73,5 ≈ 12,69 milliards d'années, où 67,66 est le H0 de la combinaison Planck + BAO qui donne 13,787. Non publié tel quel. ↩

26. Calcul de ce chapitre : 13,787 − 12,69 ≈ 1,1 milliard d'années ; 1,1 / 0,020 ≈ 55. ↩

27. Raisonnement de la fiche energie-matiere-noires (section 8), « non chiffré sur source ». La fiche signale aussi une fourchette de 12,8 à 13,7 milliards d'années pour les modèles w0wa, vue dans un résumé sans source identifiée, et non retenue. ↩

28. Raisonnement de ce chapitre, dans le prolongement de l'enchaînement de Knox et Millea : la recombinaison a lieu vers 3 000 K (fiche fond-diffus-cosmologique), et une expansion plus rapide fait atteindre cette température plus tôt. La base ne chiffre pas ce déplacement pour aucun modèle. ↩

29. Calcul de ce chapitre : 12,69 − 4,567 ≈ 8,1 milliards d'années, contre 13,787 − 4,567 ≈ 9,2. Comme la règle de trois dont il découle, ce chiffre n'est qu'un ordre de grandeur. La date de la bascule vers l'énergie noire, calculée elle aussi dans le modèle, se déplacerait également. ↩

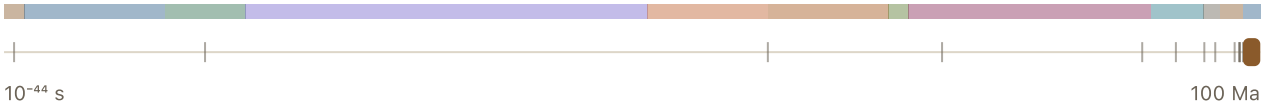
30. Calcul repris du chapitre sur l'âge : (14,27 − 12,7) / 0,80 ≈ 2,0. La méthode de datation de l'étoile et ses hypothèses (composition, distance) ne sont pas documentées dans la base, qui cite l'âge d'après Wikipédia, « Age of the universe ». ↩

CHAPITRE 24

Un ciel qui se vide

futur

brouillon · 6902 mots



24.1 Une seule grandeur décide

Le chapitre précédent s'est arrêté sur un constat : l'époque la moins bien comprise de toute l'histoire cosmique est la nôtre, et c'est d'elle que dépend le futur (→ chap. 23). Le premier jour de l'Univers se calcule avec une physique testée dans les accélérateurs et vérifiée par les abondances d'hélium et par la carte du fond diffus. Le dernier jour, s'il y en a un, se calcule avec une composante dont on ignore la nature. Demander comment l'Univers finira revient donc à demander ce que fera l'énergie noire.

Le sort ultime de l'Univers dépend de trois choses : sa forme d'ensemble, c'est-à-dire sa géométrie, la quantité d'énergie noire qu'il contient, et l'équation d'état de cette énergie noire wiki-fate. Pendant la plus grande partie du XX^{e} siècle, les cosmologistes ne comptaient pas l'énergie noire, et la question du sort se ramenait à celle du freinage : la gravité de la matière suffirait-elle à arrêter l'expansion, puis à la retourner ? (→ chap. 22) Dans un Univers fait de matière seule, la réponse tenait à sa densité, comparée à une valeur seuil appelée densité critique. Au-dessus du seuil, l'espace serait refermé sur lui-même, l'expansion finirait par s'inverser et tout retomberait ; au-dessous, l'expansion ralentirait sans jamais s'arrêter ; au seuil exact, l'espace serait plat et l'expansion ralentirait indéfiniment sans s'inverser[1]. La géométrie et le destin allaient ensemble.

Ce lien a été défait en 1998, quand deux équipes ont trouvé que l'expansion accélère Riess 1998Perlmutter 1999(→ chap. 22). Une composante qui ne se dilue pas peut faire accélérer un Univers plat, ou même en arrêter un qui serait refermé ; la géométrie ne suffit plus à dire la fin. Mais elle reste l'une des trois données du problème, et elle est mesurée. La taille apparente des taches du fond diffus renseigne sur la courbure de l'espace (→ chap. 6). Planck, combiné aux oscillations acoustiques des baryons, trouve une courbure nulle à 0,4 % près, avec 95 % de confiance planck2018inf ; le télescope ACT, en 2025, ne trouve « aucun écart à la platitude » Act 2025. L'espace est plat, aussi loin qu'on puisse le mesurer.

La deuxième donnée, la quantité d'énergie noire, est mesurée elle aussi. L'espace étant plat, la densité totale vaut la densité critique ; la matière, ordinaire et noire, en fournit 31,5 %, et le reste, $\Omega\Lambda = 0{,}6847 \pm 0{,}0073$, revient à l'énergie noire planck2018tab. Les supernovas de 1998 et les oscillations acoustiques des baryons réclament le même manque, par des méthodes qui n'ont rien en commun (→ chap. 22). Deux des trois inconnues du problème sont donc fixées à mieux que quelques pour cent.

Reste la troisième, et c'est elle qui décide. L'équation d'état d'une composante, notée w, est le rapport entre sa pression et sa densité d'énergie wiki-de(→ chap. 22). Elle règle la manière dont cette densité change quand l'espace grandit. Pour la matière, dont la pression est négligeable, w vaut 0, et la densité baisse comme le volume grandit : quand les distances doublent, elle est divisée par huit (→ chap. 22). Pour une constante cosmologique, w vaut exactement -1, et la densité ne change pas du tout : l'énergie noire garde les mêmes 7×10^{-30} gramme par centimètre cube, quelle que soit la taille de l'Univers wiki-de. Entre ces

deux cas et au-delà, la règle se prolonge. Une énergie noire dont le w est un peu supérieur à -1 se dilue lentement ; une énergie noire dont le w est inférieur à -1, dite « fantôme », devient plus dense à mesure que l'espace grandit[2].

Pourquoi cette seule grandeur suffit-elle à décider ? Parce que la matière, elle, n'a qu'un avenir possible : se diluer. Le rapport des forces entre matière et énergie noire, qui a basculé un peu après la naissance du Soleil (→ chap. 22), continuera de pencher du même côté. Aujourd'hui, la densité de la matière vaut environ 46 % de celle de l'énergie noire. Quand l'Univers aura doublé de taille, et si l'énergie noire est une constante, la matière ne pèsera plus qu'environ 5 % du total ; quand il aura décuplé, 0,05 %[3]. Le futur lointain de l'expansion sera gouverné presque uniquement par l'énergie noire, et la manière dont celle-ci évolue, c'est-à-dire son w, fixera la fin. Trois comportements donnent trois fins : une densité constante, une densité qui croît, une densité qui décroît.

Une précision change la portée de tout ce qui suit. Ce qu'on mesure de w porte sur le passé. Le relevé DESI suit l'influence de l'énergie noire sur les onze derniers milliards d'années Lbl-desi 2025, et il décrit son w par deux nombres : sa valeur aujourd'hui, w0, et la manière dont il a changé au cours de l'expansion, wa Desi 2025(→ chap. 23). Le sort de l'Univers, lui, dépend de ce que w fera pendant des dizaines de milliards d'années, ou pour toujours. Passer de l'un à l'autre demande une loi qui dise comment l'énergie noire évolue, et cette loi, personne ne la connaît[4].

24.2 Le froid sans fin

Le modèle standard ΛCDM fait le choix le plus simple : l'énergie noire est une constante cosmologique, et son w vaut -1 pour toujours. Dans ce cas, l'expansion ne s'arrête jamais, et elle accélère wiki-fate. Le mécanisme découle de ce qui précède. La matière se dilue sans fin et cesse de freiner quoi que ce soit ; l'énergie noire garde la même densité, et continue de pousser. Un Univers dont presque toute l'énergie a une densité fixe s'étend à un rythme qui ne faiblit plus, et les distances y grandissent d'autant plus vite qu'elles sont déjà grandes[5].

Cette accélération n'agit pas sur tout. Ce qu'une gravité retient ensemble ne participe pas à l'expansion : la Terre, le Système solaire, la Voie lactée ne grandissent pas (→ chap. 22)[6]. Il en va de même des amas de galaxies, ces rassemblements que leur gravité mutuelle maintient, comme celui de Coma où Zwicky a pesé en 1933 la première masse invisible wiki-dm(→ chap. 21). L'accélération agit sur les distances qui séparent ces îlots liés, et ces distances croissent de plus en plus vite. L'isolement a déjà commencé : l'expansion accélérée éloigne peu à peu les amas de galaxies les uns des autres (→ chap. 22)[7]. Dans le prolongement de ΛCDM, chaque îlot finit seul, entouré d'un espace qui s'étend sans lui.

À l'intérieur de chaque îlot, rien n'empêche l'histoire de continuer un temps. Aujourd'hui encore, des étoiles se forment dans les galaxies esa2013planck[8]. Mais la matière disponible pour en faire de nouvelles ne se renouvelle pas, et la base de ce livre ne dit ni quand s'allumera la dernière étoile, ni combien de temps brilleront les dernières. Elle ne décrit pas non plus le devenir du Soleil. Le chapitre s'en tient donc à l'échelle où elle documente le futur : l'Univers entier et sa température.

Cette température se lit dans la plus vieille lumière. Le fond diffus a été libéré vers 380 000 ans, quand l'Univers avait refroidi jusqu'à environ 3 000 kelvins (→ chap. 6)wiki-cmb. Depuis, l'expansion a étiré cette lumière d'un facteur d'environ 1 100, et sa température a baissé dans la même proportion : on la mesure aujourd'hui à 2,72548 ± 0,00057 kelvins Fixsen 2009[9]. La règle continue de s'appliquer vers le futur. Chaque fois que l'Univers double de taille, la température du rayonnement qui le baigne est divisée par deux ;

quand il aura décuplé, le fond diffus sera à environ 0,27 kelvin, et à environ 0,003 kelvin quand il aura grandi mille fois[10]. Dans ΛCDM, la taille croît sans limite, et la température tend vers le zéro absolu sans jamais l'atteindre : l'Univers se refroidit asymptotiquement wiki-fate.

Ce destin porte deux noms. Les cosmologistes anglophones l'appellent *Big Freeze*, le « grand gel », par symétrie avec le *Big Bang* ; le nom plus ancien de « mort thermique » vient de la thermodynamique wiki-fate. Une mort thermique désigne un état où toutes les différences de température se sont effacées ; or c'est d'une différence de température, entre une étoile et l'espace froid qui l'entoure par exemple, que naît tout processus capable de produire un travail, et donc tout ce qui change[11]. Un Univers mort de chaleur, en ce sens, est un Univers où plus rien n'arrive, et c'est à ce titre que le mot convient à un Univers glacé.

Le scénario a un statut précis, qu'il faut tenir. Il n'est pas une observation du futur. Il est ce que devient le modèle standard quand on le prolonge sans limite dans le temps, en supposant que l'énergie noire restera toujours exactement ce qu'elle semble avoir été pendant les onze derniers milliards d'années. C'est la fin « par défaut », celle qu'on obtient en ne changeant rien au modèle. Or la seule hypothèse sur laquelle elle repose, la constance de l'énergie noire, est justement celle que les données de DESI mettent en doute depuis 2025 Desi 2025(→ chap. 23).

24.3 Les derniers astronomes

En 2007, Lawrence Krauss et Robert Scherrer poussent ce prolongement jusqu'à sa conséquence la plus étrange. Leur article s'intitule « Le retour d'un Univers statique et la fin de la cosmologie ». Sa thèse tient en une phrase : « à mesure que nous extrapolons l'Univers ΛCDM actuel vers le futur, toute trace de l'expansion de Hubble disparaîtra » Krauss 2007. Les indices qui ont permis de reconstituer l'histoire cosmique, les galaxies lointaines, le fond diffus et les abondances des éléments légers, deviendront inobservables, et d'éventuels astronomes du futur lointain croiraient vivre dans un Univers statique, sans expansion ni commencement daté Krauss 2007[12].

Les trois indices ne disparaissent pas de la même manière.

Le premier est le plus direct. L'expansion se mesure en comparant, pour des galaxies qui ne nous sont pas liées, la vitesse à laquelle elles s'éloignent et leur distance ; le rapport des deux est le taux d'expansion H0 (→ chap. 23). Cette mesure suppose qu'il y ait, dans le ciel, des galaxies emportées par l'expansion. Dans le futur de ΛCDM, l'accélération éloigne ces galaxies de plus en plus vite ; leur lumière nous arrive de plus en plus étirée et de plus en plus faible, jusqu'à ne plus nous parvenir du tout[13]. Il ne reste alors dans le ciel que les galaxies de l'îlot auquel appartient l'observateur, et celles-là ne s'éloignent pas, puisque leur gravité mutuelle les retient. Un astronome qui mesurerait leurs vitesses ne trouverait aucun décalage vers le rouge systématique, aucune loi reliant vitesse et distance. L'expansion n'aurait laissé aucune trace dans son ciel.

Le deuxième indice est le fond diffus. C'est lui qui a fixé la composition de l'Univers et son âge calculé (→ chap. 7), et c'est lui qui porte, figée à 380 000 ans, l'empreinte d'un passé chaud et dense (→ chap. 6). L'expansion continue de l'étirer et de le refroidir, on l'a vu. Krauss et Scherrer concluent qu'il deviendra inobservable ; la base de ce livre donne leur conclusion, pas le détail de leur argument[14]. Un astronome futur n'aurait aucune raison de chercher, dans toutes les directions du ciel, un rayonnement uniforme à une fraction infime de degré au-dessus du zéro absolu.

Le troisième indice est le plus discret. Le mélange d'environ 75 % d'hydrogène et 25 % d'hélium, en masse, sorti des premières minutes wiki-chrono(→ chap. 5), est la signature chimique du passé chaud : aucune étoile ne produit cette proportion, et c'est la concordance entre ce mélange et la densité de matière mesurée

par Planck qui a fait de la nucléosynthèse primordiale le premier grand succès quantitatif de la cosmologie Fields 2020. Mais les étoiles transforment l'hydrogène en hélium et en éléments plus lourds, génération après génération (→ chap. 12). Dans un futur assez lointain, le gaz d'une galaxie aura été si souvent recyclé que la proportion d'origine s'y sera effacée sous les produits des étoiles[15]. L'hélium de l'astronome futur ne dirait plus rien des trois premières minutes.

Qu'on relise la liste. Les décalages vers le rouge des galaxies et des supernovas ont montré que l'Univers s'étend, puis qu'il accélère (→ chap. 22). Le fond diffus a donné son âge, sa géométrie et sa composition (→ chap. 7)(→ chap. 6). Les abondances primordiales ont établi qu'il avait traversé, quelques minutes après le début de la phase chaude, une température de fusion nucléaire (→ chap. 5). Ce sont exactement les preuves sur lesquelles ce livre a construit son récit, depuis la soupe primordiale jusqu'à la bascule vers l'énergie noire. Si ΛCDM est juste, le ciel se videra un jour des indices mêmes qui ont permis de l'écrire.

Les astronomes de ce futur ne raisonneraient pas plus mal que nous. Ils appliqueraient les mêmes méthodes à un ciel qui ne contiendrait plus les données nécessaires, et leur conclusion, un Univers statique, serait la plus économique compatible avec ce qu'ils voient Krauss 2007. L'argument dit quelque chose de notre propre situation. Ce qu'on peut savoir de l'Univers ne dépend pas seulement de l'intelligence des observateurs et de la qualité de leurs instruments ; il dépend aussi de l'époque où ils observent. Nous vivons à un moment où les trois traces sont encore visibles : les galaxies lointaines emplissent les images profondes de Webb (→ chap. 10), le fond diffus se mesure à 2,7 kelvins Fixsen 2009, et le gaz primitif garde sa proportion d'hélium Fields 2020. La base de ce livre ne dit pas combien de temps durera cette fenêtre, ni à quelle date chacune des trois traces deviendra inobservable.

Le livre avait déjà rencontré une limite de ce genre, à l'autre bout de l'histoire. Avant 380 000 ans, l'Univers était opaque, et aucune lumière ne nous en parvient : la surface d'où part le fond diffus est un mur que l'observation en lumière ne peut pas franchir (→ chap. 6)[16]. On a pu reconstituer ce qui se passait derrière ce mur parce que le fond diffus en garde l'empreinte, et parce que les éléments légers en portent la trace. Les astronomes du futur de ΛCDM perdraient jusqu'à ces empreintes. Leur limite ne tiendrait ni à la théorie, qu'ils pourraient connaître aussi bien que nous, ni à leurs instruments, qui pourraient être meilleurs : elle tiendrait à l'absence des données elles-mêmes.

Une réserve s'impose. L'argument de Krauss et Scherrer est un prolongement de ΛCDM, avec une énergie noire strictement constante Krauss 2007. Si l'énergie noire varie, le ciel du futur sera autre, et le scénario des derniers astronomes ne vaut plus tel quel. C'est vers ces autres fins qu'il faut maintenant se tourner.

24.4 Si elle n'est pas constante

Si le w de l'énergie noire n'est pas exactement -1, le futur prend une autre forme, et le sens de l'écart décide laquelle. Le tableau qui suit résume les trois cas ; les paragraphes suivants les expliquent.

Équation d'état	Densité de l'énergie noire quand l'espace grandit	Fin possible
$w = -1$ (constante cosmologique)	reste la même	expansion sans fin, refroidissement vers le zéro absolu (*Big Freeze*)
$w < -1$ (énergie noire « fantôme »)	augmente	accélération croissante jusqu'au déchirement des structures (*Big Rip*)
$w > -1$ et énergie noire déclinante	diminue	selon ce vers quoi elle décline : expansion sans fin, ou inversion et contraction (*Big Crunch*)

Sources : fiche energie-matiere-noires, section 9, d'après wiki-fate *; la colonne centrale suit la présentation usuelle du lien entre w et la dilution*[2].

24.4.1 Le déchirement

Une énergie noire fantôme, dont le w est inférieur à -1, devient plus dense à mesure que l'espace grandit[2]. L'expansion accroît donc la cause même qui l'accélère. Dans le cas de la constante, la poussée de l'énergie noire reste d'intensité fixe, et les îlots liés par leur gravité lui résistent indéfiniment. Dans le cas fantôme, cette poussée grandit sans cesse. L'accélération croît jusqu'à surpasser la gravité qui tient ensemble les amas, puis les autres structures, et à les déchirer : c'est le *Big Rip*, le « grand déchirement » wiki-fate. La source parle d'un déchirement « plus soudain » que les autres fins wiki-fate. La base de ce livre ne donne ni la date à laquelle il surviendrait pour un w donné, ni l'ordre dans lequel les structures céderaient.

Ce scénario a pris un relief particulier avec DESI. Plusieurs analyses de ses données situent, vers un décalage vers le rouge de 0,5, c'est-à-dire il y a quelques milliards d'années, un passage de w d'une valeur inférieure à -1 à une valeur supérieure Chaudhary 2025(→ chap. 23). Si ce signal est réel, l'énergie noire aurait eu, dans le passé, un comportement fantôme. Mais c'est le comportement présent et à venir qui compte pour la fin, et celui-ci irait dans l'autre sens : aujourd'hui, w0 serait supérieur à -1 Desi 2025.

24.4.2 Le retournement

Une énergie noire dont le w est supérieur à -1 se dilue, lentement. Sa densité diminue quand l'espace grandit. Si ce déclin se poursuit, l'énergie noire perd peu à peu la prise qu'elle a gagnée sur la matière il y a quatre milliards d'années (→ chap. 22), et l'accélération faiblit. Ce qui arrive ensuite dépend de ce vers quoi elle décline. Si sa densité tendait vers zéro, l'Univers retrouverait le régime d'avant la bascule, gouverné par la matière, et son expansion ralentirait sans s'arrêter, puisque l'espace est plat[17]. Si elle devenait négative, elle agirait comme une attraction supplémentaire, et l'expansion pourrait s'arrêter puis s'inverser : l'Univers se contracterait. Cette contraction, qu'on croyait écartée depuis 1998, redevient alors possible ; c'est le *Big Crunch*, le « grand écrasement » wiki-fate[18].

En 2025, Hoang Nhan Luu, Yu-Cheng Qiu et Henry Tye publient un article intitulé « La durée de vie de notre Univers » Luu 2025. Ils ajustent aux données de DES et de DESI un modèle où l'énergie noire a deux composantes. La première est un axion, une particule hypothétique déjà rencontrée parmi les candidats à la matière noire wiki-dm(→ chap. 21), utilisée ici sous la forme d'un champ dont l'énergie évolue avec le temps. La seconde est une constante cosmologique négative Luu 2025. Dans ce modèle, w diffère de -1, et l'ajustement conduit les auteurs à estimer « la durée de vie de notre Univers à 33 milliards d'années » Luu 2025. L'Univers ayant aujourd'hui environ 13,8 milliards d'années, il lui en resterait à peu près 19, et nous serions un peu avant le milieu de son histoire[19]. La base ne décrit pas le déroulement de ce scénario ; la lecture la plus naturelle en est que l'énergie positive de l'axion décline jusqu'à ce que la constante négative l'emporte, et que l'expansion s'arrête alors pour s'inverser[20].

Le chiffre de 33 milliards d'années appelle trois réserves, et chacune est sérieuse. C'est d'abord le résultat d'un seul groupe, qu'aucune autre équipe n'a reproduit dans les sources lues. C'est ensuite le résultat d'un modèle particulier : l'axion et la constante négative sont un choix d'ingrédients parmi d'autres, et un autre choix, ajusté aux mêmes données, pourrait prédire une autre fin, ou pas de fin Luu 2025[21]. C'est enfin un ajustement à un signal qui se situait lui-même autour de 3σ, sous le seuil de découverte Desi 2025. Une quatrième réserve tient aux dates. L'article est de 2025 ; il s'appuie sur des supernovas de DES que leur

équipe a recalibrées en 2026 Popovic 2026. La base ne dit pas si le calcul a été refait avec l'échantillon recalibré, ni ce qu'il donnerait[22].

24.4.3 Ce que dit le signal de DESI, et ce qu'il ne dit pas

Le signal de DESI a deux composantes, qui ne parlent pas du futur de la même manière. Le premier nombre, $w0 > -1$, dit qu'aujourd'hui l'énergie noire se comporterait un peu moins qu'une constante et que sa densité serait en léger déclin Desi 2025. Un déclin présent va dans le sens opposé à l'énergie noire fantôme, et le signal éloigne donc plutôt le déchirement. Il ne tranche pas pour autant entre l'expansion éternelle et la contraction. Une densité qui baisse aujourd'hui peut baisser vers une valeur positive, vers zéro, ou au-delà, vers une valeur négative, et ces trois trajectoires donnent des fins différentes. Les données de DESI décrivent le passé de w, sur onze milliards d'années Lbl-desi 2025 ; elles ne disent pas où son déclin s'arrêtera. Le modèle de Luu, Qiu et Tye choisit une de ces trajectoires, celle qui finit en contraction ; les données ne l'imposent pas[23].

Le signal lui-même a faibli. En 2025, la préférence pour une énergie noire variable allait de 2,8 à 4,2σ selon l'échantillon de supernovas associé aux données de DESI Desi 2025. Le chiffre le plus élevé reposait sur les supernovas du Dark Energy Survey ; leur recalibration de 2026, l'échantillon DES-Dovekie, le ramène à 3,2σ, ce que ses auteurs qualifient de « faible préférence » Popovic 2026. Limitée aux données de l'Univers tardif, sans le fond diffus, l'analyse ne trouve pas de préférence robuste, entre 1,1 et 2,3σ Chaudhary 2025. Aucune combinaison n'atteint les 5σ qu'on exige d'une découverte Lbl-desi 2025. Le chapitre précédent a détaillé ces chiffres et d'où ils viennent (→ chap. 23). Pour le futur, leur conséquence tient en peu de mots : le seul indice observationnel qui écarte la constante cosmologique, et avec elle le froid sans fin, n'est pas établi, et il s'est affaibli à la dernière révision.

24.5 Un second bord

Aucune de ces fins n'est une prévision au sens fort. Une prévision, au sens où la cosmologie en fait pour le passé, applique une loi connue et testée à des conditions mesurées. Les trois premières minutes se calculent ainsi : la physique nucléaire est éprouvée en laboratoire, la densité de matière est mesurée par Planck, et la prédiction des abondances se confronte aux gaz les plus primitifs Fields 2020(→ chap. 5). Pour le futur, les conditions sont mesurées, la géométrie et la quantité d'énergie noire planck2018infplanck2018-tab, mais la loi manque. On ne sait pas ce qu'est l'énergie noire, et donc pas comment elle évoluera. Le froid sans fin, le déchirement et la contraction sont des conséquences de trois hypothèses sur cette loi, et aucune observation disponible ne peut porter sur le futur lui-même[24].

La théorie ne vient pas combler ce manque. Si l'énergie noire est l'énergie du vide, la physique devrait pouvoir en calculer la valeur. La théorie quantique des champs, qui décrit les particules élémentaires, le fait, et elle obtient une valeur environ 120 ordres de grandeur trop grande, un facteur de 10^{120} wiki-de(→ chap. 22). La théorie la mieux vérifiée de la physique donne, pour la grandeur dont dépend le sort de l'Univers, le résultat le plus faux qu'elle ait jamais produit. Tant que ce désaccord n'est pas compris, rien ne permet de dire si l'énergie noire est une constante, un champ qui évolue, ou autre chose wiki-de.

Le livre s'arrête donc sur une limite, comme il a commencé. Au début, la limite était l'ère de Planck, en deçà d'environ 10^{-43} seconde, où la physique connue cesse de s'appliquer et où la compréhension attend une théorie qui unisse la gravitation et la physique quantique wiki-bigbang(→ chap. 1). À la fin, la limite est une grandeur que l'on mesure, 68 % de la densité de l'Univers, et que la théorie ne sait pas calculer. Les deux bords ont un point commun, qui est une lecture de ce livre et non un résultat des sources : l'un et

l'autre se trouvent à la jonction de la physique quantique et de la gravitation. L'ère de Planck est le régime où la gravitation elle-même devrait devenir quantique ; l'énergie du vide est une prédiction de la physique quantique dont l'effet gravitationnel, mesuré à l'échelle de l'Univers, contredit la valeur calculée[25]. La base ne relie pas les deux problèmes, et rien ne dit qu'une même théorie les résoudra.

Une proposition, parmi celles que documente la base, relie explicitement les deux bords. Pour Roger Penrose, notre Big Bang serait la fin, remise à une autre échelle, d'un « éon » précédent ; chaque éon commencerait là où le précédent, infiniment dilué, s'achève Gurzadyan 2010(→ chap. 3). Dans ce scénario, dit de cosmologie cyclique conforme, le futur glacé et vide qu'annonce ΛCDM ne serait pas une fin : un Univers parvenu à ce stade deviendrait, une fois changée l'échelle à laquelle on le décrit, l'état chaud et dense d'un nouveau commencement. La question de l'avant, que le premier chapitre avait laissée suspendue (→ chap. 1), et celle de l'après recevraient la même réponse[26].

La proposition a un mérite que les autres scénarios du bord n'ont pas encore : elle prédit des traces observables de l'éon précédent dans le fond diffus (→ chap. 3). Ses tests ont été faits, et ils ont été négatifs. En 2010, Vahe Gurzadyan et Penrose annoncent dans les données du satellite WMAP des familles de cercles concentriques où la température varie anormalement peu, à six écarts-types Gurzadyan 2010. Ingunn Wehus et Hans Kristian Eriksen retrouvent ces cercles en 2011, mais montrent sur des simulations que le ciel observé est « entièrement compatible avec le modèle ΛCDM », le modèle standard sans éon antérieur Wehus 2011. Des « points de Hawking », taches interprétées comme la trace de trous noirs de l'éon précédent, sont annoncés ensuite à 99,98 % de confiance ; une fois prise en compte la variation de la taille des anneaux, l'excès tombe à 87 %, « guère plus de 1σ » Jow 2020. La cosmologie cyclique conforme reste une proposition. Elle montre qu'une idée sur le bord peut être mise à l'épreuve ; elle ne dit pas, en l'état, ce qu'il y a au-delà.

Il reste ce que le livre peut affirmer. Entre le seuil de l'ère de Planck et le futur que décidera l'énergie noire, l'histoire du cosmos se raconte avec précision : les trois premières minutes, la première lumière à 380 000 ans, les premières étoiles, la forge des éléments, la naissance du Soleil 9,2 milliards d'années après le début de la phase chaude, dans une matière déjà recyclée par des générations d'étoiles (→ chap. 15). Cette précision repose sur des traces que l'Univers a laissées à notre portée, et dont l'argument de Krauss et Scherrer montre qu'elles ne le resteront pas toujours Krauss 2007. Les deux bords de ce récit sont des limites de la physique ; la fenêtre au milieu est aussi une limite dans le temps.

24.6 Ce qu'on ne sait pas

On ne sait pas quelle sera la fin de l'Univers, et l'incertitude porte sur une seule grandeur. La géométrie est plate à 0,4 % près planck2018inf, la part d'énergie noire est mesurée à environ 1 % près planck2018tab ; l'équation d'état w et son évolution future restent inconnues. Trois hypothèses s'opposent : une constante ($w = -1$, froid sans fin), une énergie noire fantôme ($w < -1$, déchirement), une énergie noire déclinante ($w > -1$, expansion sans fin ou contraction selon la manière dont elle décline) wiki-fate. En 2026, les données préfèrent faiblement une énergie noire qui varie, autour de 3σ après la recalibration des supernovas de DES Desi 2025Popovic 2026, et pas du tout quand on se limite à l'Univers tardif Chaudhary 2025. Deux évolutions départageront la constante et la variation : les prochaines données de DESI, et un étalonnage des supernovas qui cesse de bouger d'une analyse à l'autre (→ chap. 23). Un signal qui franchirait 5σ avec plusieurs échantillons écarterait le froid sans fin comme scénario par défaut ; un signal qui retomberait sous 2σ le laisserait en place. Confiance élevée dans le fait qu'une constante mènerait au froid sans fin ; faible sur la question de savoir si l'énergie noire est une constante.

Même un signal confirmé ne dirait pas la fin. Les mesures portent sur le passé de w ; la fin dépend de son futur. Pour départager l'expansion éternelle et la contraction, il faudrait une théorie de l'énergie noire qui dise vers quoi son déclin mène, et cette théorie n'existe pas : le calcul de référence de l'énergie du vide se trompe de 120 ordres de grandeur wiki-de. Tant que ce désaccord n'est pas résolu, toute date de fin dépend du modèle choisi pour prolonger les données. Confiance élevée dans cette limite.

On ne sait pas si l'estimation de 33 milliards d'années survit à la recalibration des supernovas de DES. Elle repose sur un seul groupe, un seul modèle (axion et constante cosmologique négative) et un signal d'environ 3σ Luu 2025Desi 2025 ; la base ne dit pas si elle a été refaite avec l'échantillon DES-Dovekie Popovic 2026. Une reproduction par d'autres équipes, avec d'autres modèles d'énergie noire déclinante, dirait si la contraction est une propriété des données ou un choix de modèle. Confiance faible.

On ne connaît aucune échéance du futur. La base ne date ni l'extinction des dernières étoiles, ni le moment où les galaxies lointaines, le fond diffus et les abondances primordiales deviendront inobservables selon Krauss et Scherrer, ni la date d'un déchirement pour un w fantôme donné. Elle ne décrit pas non plus le devenir du Soleil. C'est une lacune de la documentation de ce livre, pas seulement de la science : ces échéances existent dans la littérature pour chaque modèle, et elles n'ont pas été lues.

Enfin, tout ce chapitre suppose que l'accélération est réelle. La thèse minoritaire du *timescape*, qui en fait une apparence due aux horloges différentes des régions denses et des grands vides, a reçu en 2025 un appui statistique sur des supernovas Wiltshire 2007Seifert 2025(→ chap. 22). Si elle l'emportait, les trois fins seraient à reconsidérer. Confiance élevée dans l'accélération réelle, puisque trois méthodes indépendantes la soutiennent (→ chap. 22).

24.7 Ce que ce chapitre démontre

Le sort ultime de l'Univers dépend de sa géométrie, de la quantité d'énergie noire qu'il contient et de l'équation d'état de celle-ci wiki-fate. Les deux premières données sont mesurées : l'espace est plat à 0,4 % près planck2018infAct 2025, et l'énergie noire représente $\Omega\Lambda = 0{,}6847 \pm 0{,}0073$ de la densité critique planck2018tab. La troisième, l'équation d'état w, décide. La matière se dilue avec l'expansion, l'énergie noire non ; une constante cosmologique a une équation d'état $w = -1$ et garde toujours la même densité wiki-de. Dans le futur, la matière ne pèsera presque plus rien, et la fin sera celle que fixera l'énergie noire.

Avec une constante cosmologique, c'est-à-dire dans le modèle standard ΛCDM, l'expansion est sans fin et accélère ; l'Univers se refroidit asymptotiquement vers le zéro absolu, c'est la mort thermique ou *Big Freeze* wiki-fate. L'expansion accélérée isole déjà peu à peu les amas de galaxies les uns des autres (→ chap. 22). Ce scénario est le prolongement par défaut du modèle, pas une observation du futur.

En prolongeant ΛCDM, Krauss et Scherrer montrent en 2007 que toute trace de l'expansion, galaxies lointaines, fond diffus et abondances primordiales, deviendra inobservable, et que de futurs observateurs croiraient vivre dans un Univers statique Krauss 2007. Ces traces sont exactement celles sur lesquelles repose l'histoire racontée dans ce livre. Ce qu'on peut savoir de l'Univers dépend de l'époque où on l'observe.

Une énergie noire fantôme, de $w < -1$, ferait croître l'accélération jusqu'à déchirer les structures, le *Big Rip* ; une énergie noire déclinante rend possible une inversion de l'expansion et une contraction, le *Big Crunch* wiki-fate. Un modèle associant un axion et une constante cosmologique négative, ajusté aux données de DES et de DESI, donne à l'Univers une durée de vie totale de 33 milliards d'années Luu 2025 : c'est le résultat d'un seul groupe, dans un modèle particulier, fondé sur un signal d'environ 3σ. Le signal de DESI, $w0 > -1$ aujourd'hui, éloigne plutôt le déchirement, mais ne tranche pas entre expansion éternelle et contraction

Desi 2025. La préférence pour une énergie noire variable, 4,2σ avec les supernovas de DES, est ramenée à 3,2σ par la recalibration DES-Dovekie de 2026 Popovic 2026 ; aucune combinaison n'atteint le seuil de découverte de 5σ Lbl-desi 2025.

Aucune de ces fins n'est une prévision au sens fort : on mesure le passé de l'énergie noire, pas sa loi, et la théorie quantique des champs prédit une énergie du vide environ 120 ordres de grandeur plus grande que la valeur observée wiki-de. Le livre s'achève ainsi sur une limite de la physique, comme il s'est ouvert sur l'ère de Planck. La cosmologie cyclique conforme de Penrose relie les deux bords, en faisant de la fin diluée d'un éon le Big Bang du suivant Gurzadyan 2010 ; ses tests ont été négatifs, les cercles annoncés dans WMAP étant compatibles avec ΛCDM Wehus 2011 et les « points de Hawking » retombant à environ 1σ Jow 2020. Elle reste une proposition. Entre les deux bords, l'histoire du cosmos se raconte avec précision, parce que nous l'observons à une époque où ses traces sont encore visibles.

Notes

1. Présentation usuelle du lien entre densité, géométrie et destin dans un Univers fait de matière seule, non détaillée dans la base. La fiche energie-matiere-noires (section 9, d'après wiki-fate) dit seulement que le sort dépend de la géométrie, de la quantité d'énergie noire et de son équation d'état ; la notion de densité critique est reprise des chapitres précédents (fiche fond-diffus-cosmologique, section 4, d'après Hu et Dodelson 2002 : un Univers « à densité critique »). L'hypothèse d'un Univers de matière seule avant 1998 vient du chapitre « Le tournant », qui s'appuie sur Perlmutter et al. (1999). ↩

2. La fiche energie-matiere-noires donne $w = -1$ pour la constante cosmologique et une densité « en léger déclin » pour $w0 > -1$; elle associe $w < -1$ au Big Rip (wiki-fate). Que la densité soit constante pour $w = -1$, décroissante pour $w > -1$ et croissante pour $w < -1$ est la présentation usuelle, déjà signalée comme telle au chapitre précédent ; la base n'énonce pas la loi générale de dilution en fonction de w. ↩↩↩

3. Calcul de ce chapitre, à partir de $\Omega m = 0{,}3153$ et $\Omega\Lambda = 0{,}6847$ (tables Planck 2018), en supposant une énergie noire constante et une matière qui se dilue comme le cube des distances. Rapport aujourd'hui : $0{,}3153 / 0{,}6847 \approx 0{,}46$. Taille doublée : $0{,}46 / 8 \approx 0{,}058$, soit une part de matière de $0{,}058 / 1{,}058 \approx 5{,}4$ %. Taille décuplée : $0{,}46 / 1\,000 \approx 4{,}6 \times 10^{-4}$, soit environ 0,05 %. Le rayonnement, qui se dilue plus vite encore, est négligé. ↩

4. Raisonnement de ce chapitre. La paramétrisation par w0 et wa est ajustée sur les données du passé (DESI 2025) ; la prolonger vers le futur suppose que la même forme mathématique reste valable, ce qu'aucune source lue n'établit. La forme exacte de cette paramétrisation n'est pas documentée dans la base. ↩

5. Présentation usuelle, non détaillée dans la base : un Univers dominé par une densité constante tend vers une expansion à taux constant, dite exponentielle (espace de de Sitter). La base emploie l'expression « phase de de Sitter en expansion exponentielle » pour l'inflation (fiche seuil-et-inflation, d'après wiki-inflation), pas pour le futur ; et le chapitre « Le tournant » note que la base ne relie pas l'inflation et l'accélération actuelle. ↩

6. Que les systèmes liés par leur gravité ne participent pas à l'expansion est la présentation usuelle, déjà signalée comme non documentée dans la base au chapitre « Le tournant ». ↩

7. Fiche frise-cosmique, section 9 : « l'expansion accélérée isole peu à peu les amas de galaxies les uns des autres », phrase sans clé de source propre dans la fiche. La base ne dit pas à quelle structure liée appartient la Voie lactée, ni quelles galaxies resteraient visibles à un observateur du futur. ↩

8. La fiche frise-cosmique (section 9) écrit qu'aujourd'hui « la formation d'étoiles se poursuit », dans un paragraphe appuyé sur le communiqué ESA 2013 et sur wiki-age ; la phrase elle-même n'a pas de clé propre. ↩

9. La température de $2{,}72548 \pm 0{,}00057$ K est celle de Fixsen (2009), fiche fond-diffus-cosmologique. La fiche y vérifie l'ordre de grandeur : 3 000 K divisés par 1 091 donnent environ 2,7 K. ↩

10. Calcul de ce chapitre, par la règle que la fiche fond-diffus-cosmologique applique au passé (température du rayonnement inversement proportionnelle à la taille de l'Univers) : $2{,}725 / 10 \approx 0{,}27$ K ; $2{,}725 / 1\,000 \approx 0{,}0027$ K. La base ne dit pas à quelle date l'Univers aura décuplé ; dans ΛCDM cette date dépend du taux d'expansion futur, que les fiches ne donnent pas. ↩

11. Le nom de « mort thermique » et l'équivalence avec le *Big Freeze* sont dans la fiche energie-matiere-noires (d'après wiki-fate). La définition thermodynamique (effacement des différences de température, fin de tout travail possible) est la présentation usuelle, non documentée dans la base. ↩

12. La fiche energie-matiere-noires cite de Krauss et Scherrer (2007) la seule phrase « as we extrapolate the current ΛCDM universe forward in time, all evidence of the Hubble expansion will disappear », et résume la liste des trois indices et la conclusion sur les observateurs futurs. Le titre de l'article, « The Return of a Static Universe and the End of Cosmology », est traduit ici. Le détail de leurs arguments et leurs échéances n'ont pas été lus. ↩

13. Mécanisme donné selon la présentation usuelle (étirement croissant de la lumière, puis sortie des galaxies non liées hors de ce qu'on peut observer) ; la base dit seulement que, dans ΛCDM, les galaxies lointaines passent « hors de vue » (fiche energie-matiere-noires, en-tête, niveau « projeté ») et que toute trace de l'expansion disparaît (Krauss et Scherrer 2007). La notion d'horizon cosmologique n'est pas documentée dans la base. ↩

14. La raison la plus probable, non vérifiée sur l'article, tient à l'étirement continu du rayonnement : sa température baisse et ses longueurs d'onde s'allongent sans limite. Krauss et Scherrer (2007) sont cités pour la conclusion seulement. ↩

15. Raisonnement de ce chapitre, qui rapproche la conclusion de Krauss et Scherrer (les abondances primordiales deviennent inobservables) du recyclage stellaire décrit au chapitre « La forge ». La base ne dit pas par quel mécanisme Krauss et Scherrer concluent à la disparition de cet indice. ↩

16. La fiche frise-cosmique (section 5) écrit que 380 000 ans « n'est pas le "début" visible par erreur ; c'est un mur. Nous ne pouvons rien voir en lumière avant, car l'Univers était opaque ». La restriction « en lumière » compte : les neutrinos découplés vers une seconde (fiche frise-cosmique, section 3) ne sont pas arrêtés par ce mur, mais ils ne sont détectés qu'indirectement. ↩

17. Raisonnement de ce chapitre, dans le prolongement de la présentation usuelle rappelée en note sur la géométrie : un Univers plat fait de matière seule ralentit sans s'inverser. La base ne décrit pas ce cas pour le futur. ↩

18. La fiche energie-matiere-noires (section 9, d'après wiki-fate) écrit qu'une énergie noire déclinante rend possible le retour du Big Crunch, « si l'expansion finissait par s'inverser ». Que ce retournement demande une énergie noire devenue effectivement attractive, par exemple négative, est une lecture de ce chapitre, cohérente avec le modèle de Luu, Qiu et Tye (une constante cosmologique négative) mais non énoncée dans la base. ↩

19. Calcul de ce chapitre : $33 - 13{,}8 \approx 19$ milliards d'années ; $13{,}8 / 33 \approx 0{,}42$. L'âge de 13,8 milliards d'années est celui du modèle standard ; dans le modèle de Luu, Qiu et Tye, l'âge actuel n'est pas donné par la base et peut différer un peu. La fiche energie-matiere-noires met en garde contre la formule « l'Univers finira dans 20 milliards d'années », qui ferait d'un modèle unique une prédiction. ↩

20. La fiche ne cite de Luu, Qiu et Tye (2025) que les ingrédients du modèle et la durée de vie estimée. Le déroulement proposé ici (déclin de l'énergie de l'axion, domination de la constante négative, arrêt puis inversion de l'expansion) est une lecture de ce chapitre, non vérifiée sur l'article. Le rôle de l'axion comme candidat à la matière noire vient de la fiche energie-matiere-noires (section 3, d'après wiki-dm) ; l'usage d'un axion comme composante d'énergie noire n'y est pas décrit en détail. ↩

21. Raisonnement de ce chapitre : un ajustement à des données fixe les paramètres d'un modèle, pas le choix du modèle. La base ne documente pas d'autre modèle d'énergie noire déclinante ajusté aux mêmes données, ni sa prédiction pour la fin. ↩

22. Inférence de ce chapitre, fondée sur les dates : Luu, Qiu et Tye (2025, arXiv:2506.24011) ajustent leur modèle à DES et DESI ; la recalibration DES-Dovekie (Popovic et al.) est publiée en 2026. La base ne dit pas quelle version des supernovas de DES l'article utilise. ↩

23. La fiche energie-matiere-noires (section 9) énonce la conclusion : le signal de DESI « éloigne plutôt le Big Rip, mais ne tranche pas entre expansion éternelle et contraction ». L'explication par les trois trajectoires possibles du déclin est de ce chapitre. ↩

24. La fiche energie-matiere-noires conclut : « Aucune de ces échéances n'est une prévision au sens fort. » La distinction entre conditions mesurées et loi inconnue est l'explication que ce chapitre en propose ; elle s'appuie sur le contraste, établi au chapitre précédent, entre le premier jour, calculé avec une physique testée, et le présent, qui dépend d'une composante de nature inconnue. ↩

25. Lecture de ce chapitre. La base établit séparément que l'ère de Planck attend une théorie de la gravitation quantique (wiki-bigbang) et que la théorie quantique des champs prédit une énergie du vide 120 ordres de grandeur trop grande (wiki-de).

Elle ne relie pas les deux problèmes, et le chapitre « Le tournant » note qu'elle ne relie pas non plus l'inflation et l'énergie noire. ↩

26. La fiche seuil-et-inflation écrit que, pour Penrose, « notre Big Bang serait la fin, rééchelonnée, d'un "éon" précédent » ; le chapitre « L'emballement » précise, d'après Gurzadyan et Penrose (2010), que chaque éon commence « là où le précédent, infiniment dilué, s'achève ». La base ne décrit ni le mécanisme du changement d'échelle (la transformation dite conforme), ni ce que le scénario exige de l'énergie noire, en particulier s'il suppose une expansion éternelle. Le rapprochement entre la fin d'un éon et le froid sans fin de ΛCDM est une lecture de ce chapitre. ↩

PARTIE VII

Épilogue

LE SENS

Le livre a raconté l'histoire du cosmos comme si on la regardait du dehors ; il se retourne à la fin sur celui qui la raconte. Cette partie vient en dernier parce qu'elle a besoin de tout le reste : des dates calculées du premier jour et des dates lues dans les pierres, du « nous » apparu avec la Terre, et du ciel vidé de la partie précédente. Elle fait du second bord du livre une limite du point de vue autant que de la physique.

L'ARC

D'une horloge qui retarde parce que nous bougeons à une chronologie cousue de deux sortes de dates, puis à des observateurs futurs qui ne pourraient plus la reconstituer : l'histoire du monde est racontée d'un lieu et d'une époque.

LA QUESTION

Que change le fait que celui qui raconte l'histoire du cosmos en fasse partie ?

1. Qui raconte ? brouillon

CHAPITRE 25

Qui raconte ?

brouillon · 6302 mots

25.1 L'horloge du livre

Toutes les dates de ce livre ont la même unité et la même origine. Les 380 000 ans de la première lumière, les 280 millions d'années de la galaxie MoM-z14, les 9,2 milliards d'années qui précèdent le Soleil sont des durées comptées sur une même horloge, depuis un même point de départ. Cette horloge n'est pas la nôtre. L'écart qui la sépare de nos montres est petit, mais il dit d'où l'histoire a été racontée.

Le chapitre 1 a décrit cette horloge. La relativité n'offre pas de temps universel. Pourtant, parce que l'Univers est homogène à grande échelle, ses modèles (dits FLRW, d'après Friedmann, Lemaître, Robertson et Walker) découpent l'espace-temps en tranches où la matière a partout la même densité. Le temps cosmique numérote ces tranches. C'est le temps propre que mesurent les observateurs « comobiles », au repos par rapport à la matière et emportés par l'expansion sans vitesse propre smeenk-sepwiki-flrwwiki-cosmic-time. Deux de ces observateurs, même très éloignés, qui lisent la même température du fond diffus (aujourd'hui 2,7255 K) se trouvent sur la même tranche pdg2019-astro.

L'âge de l'Univers est une durée lue sur cette horloge : le temps propre total écoulé le long de la trajectoire d'un observateur comobile jusqu'à l'époque présente smeenk-sep. Les tables de Planck le comptent « depuis le début du Big Bang chaud » planck2018tab, et non depuis un instant zéro. Les 13,8 milliards d'années du livre sont donc ce qu'aurait marqué la montre d'un observateur comobile entre le début de la phase chaude et la tranche où nous lisons 2,7255 K. Ce temps privilégié tient à la manière dont la matière est répartie, pas aux équations elles-mêmes : la matière désigne une famille d'observateurs, et leur montre sert d'horloge. Reste à savoir si nous faisons partie de cette famille.

25.2 Nous ne sommes pas à l'heure

Un critère simple permet de répondre : « un observateur comobile est le seul observateur qui percevra l'Univers, y compris le fond diffus cosmologique, comme isotrope » wiki-comoving. Nous ne le percevons pas ainsi. Le ciel micro-onde est un peu plus chaud dans une direction et un peu plus froid dans la direction opposée. Ce dipôle a une amplitude de 3,3621 millièmes de kelvin, soit un écart relatif d'environ $1{,}2 \times 10^{-3}$ sur 2,7255 K pdg2019-astro[1]. Le chapitre 6 a expliqué d'où vient ce dipôle : qui avance dans un bain de rayonnement le voit plus chaud devant et plus froid derrière. Il vient de notre mouvement, et non de l'Univers primordial wiki-cmb. Il dit donc que nous ne sommes pas comobiles.

La mesure du dipôle donne notre vitesse. Le barycentre du Système solaire, c'est-à-dire le centre de gravité du Soleil et de ses planètes, se déplace à 369,82 ± 0,11 km/s par rapport au fond diffus, dans la direction de coordonnées galactiques (l, b) = (264,021°, 48,253°) pdg2019-astro. Le Groupe local de galaxies, pris dans son ensemble, se déplace à 620 ± 15 km/s par rapport au même repère pdg2019-astro. Les deux chiffres diffèrent : le Soleil ne suit pas exactement le Groupe local, et notre mouvement se compose de plusieurs mouvements emboîtés[2].

25.2.1 De combien notre montre retarde

Un observateur en mouvement par rapport au repère comobile n'a pas la même montre qu'un observateur au repos dans ce repère. Deux effets de la relativité font marcher nos horloges un peu moins vite qu'une horloge comobile idéale. Les chiffres qui précèdent suffisent à en estimer l'ordre de grandeur[3].

Le premier effet tient à la vitesse. Comparée à des horloges au repos, une horloge en mouvement prend du retard. Pour une vitesse petite devant celle de la lumière, le retard relatif vaut à peu près la moitié du carré du rapport entre les deux vitesses[4]. À 370 km/s, ce rapport vaut environ $1{,}23 \times 10^{-3}$, et le retard relatif environ $7{,}6 \times 10^{-7}$. Maintenu pendant les 4,57 milliards d'années du Système solaire, ce retard ferait environ 3 500 ans ; pendant 13,8 milliards d'années, environ 10 000 ans pdg2019-astro[3].

Le second effet tient à la gravité. Une horloge placée au fond d'un puits de gravité marche plus lentement qu'une horloge placée loin de toute masse[5]. Nous sommes au fond du puits de la Galaxie. Près du Soleil, la vitesse qu'il faudrait atteindre pour s'en échapper est de l'ordre de 500 km/s. Il en résulte un ralentissement du même ordre que le premier effet, ou un peu plus : environ $1{,}6 \times 10^{-6}$[3]. Les puits du Soleil et de la Terre ajoutent beaucoup moins.

Au total, nos horloges s'écartent du temps cosmique de quelques millionièmes, soit quelques dizaines de milliers d'années au plus sur toute l'histoire cosmique. C'est un majorant grossier. Notre vitesse et notre environnement ont changé au cours du temps : la Galaxie elle-même n'existait pas au début, puisque la formation de son disque ancien n'a commencé que 0,8 milliard d'années après le Big Bang Xiang 2022. Les puits de gravité plus vastes, celui du Groupe local ou ceux des superamas, n'entrent pas dans le compte.

L'ordre de grandeur suffit pourtant, car l'incertitude sur l'âge est bien plus grande. L'âge calculé porte une marge de ± 20 millions d'années planck2018tab, plusieurs centaines de fois plus que quelques dizaines de milliers d'années. Sur l'année cosmique, où 13,8 milliards d'années sont ramenés à 365 jours, une minute vaut environ 26 000 ans et une seconde environ 438 ans wiki-cosmiccal[6]. Les 3 500 ans de retard accumulés depuis la naissance du Soleil y font environ 8 secondes. Le majorant pour toute l'histoire fait une minute ou deux. La marge de l'âge, elle, vaut environ une demi-journée. Pour dater l'Univers, notre montre et la montre cosmique ne se distinguent pas, et aucune date du livre ne bouge.

25.2.2 Ce que révèle un retard sans effet

Le retard ne change pas les dates ; il change la manière de les lire. Aucune date du livre n'est celle qu'aurait marquée une horloge terrestre. Ce sont les dates d'un observateur idéal, au repos dans l'expansion, qui se trouverait à notre place. Chaque mesure est faite depuis un lieu qui bouge, puis corrigée pour donner ce que verrait cet observateur. Les astronomes le disent en toutes lettres : les décalages vers le rouge sont presque toujours rapportés à nous, ou plus exactement « au repère centré sur nous mais stationnaire par rapport au fond micro-onde » Hogg 1999. La formule tient les deux faces de la situation. Le repère est centré sur nous, parce que c'est d'ici qu'on mesure. Il est stationnaire par rapport au fond diffus, parce qu'on retire notre mouvement avant de parler de l'Univers.

Cette correction est possible parce que le ciel fournit lui-même la référence. On retire le dipôle, et l'on obtient le ciel de l'observateur au repos pdg2019-astro. Ce repère ne réintroduit pas un éther, c'est-à-dire un repère absolu inscrit dans les lois de la physique. Comme le temps cosmique, il est désigné par la manière dont la matière et le rayonnement sont répartis.

25.2.3 La seule thèse qui conteste ce calcul

Tout ce qui précède suppose que l'Univers réel se comporte, en moyenne, comme un modèle homogène. Le physicien David Wiltshire conteste ce passage du réel au modèle homogène avec son modèle dit *timescape*, que le chapitre 22 a présenté comme une alternative à l'énergie noire. Son argument porte précisément sur les horloges. Entre des observateurs situés dans des systèmes liés par la gravité, comme les galaxies, et des régions situées dans les grands vides en expansion libre, les écarts d'énergie gravitationnelle seraient assez grands pour que « la dilatation du temps entre les deux affecte significativement les paramètres de tout modèle homogène et isotrope effectif » ajusté à l'Univers Wiltshire 2007. L'âge d'expansion en serait allongé Wiltshire 2007.

En 2025, Antonia Seifert et ses coauteurs, dont Wiltshire, ont analysé les supernovas de l'échantillon Pantheon+. Ils y trouvent une préférence « très forte » pour le timescape sur le modèle standard ΛCDM[7], mesurée par un indicateur statistique noté ln B supérieur à 5 Seifert 2025[8]. Ce résultat est récent et minoritaire. Les analyses de Planck, d'ACT, de SPT et de DESI reposent sur les modèles homogènes et s'y ajustent bien Camphuis 2025Desi 2025. Deux tests départageraient les positions : un ajustement du timescape au fond diffus et aux oscillations acoustiques, qui soutiennent l'accélération indépendamment des supernovas, et une reprise indépendante de l'analyse de 2025.

Si le timescape avait raison, l'horloge d'une galaxie et le temps cosmique moyen pourraient différer bien plus que les quelques millionièmes calculés plus haut. « L'âge de l'Univers » dépendrait alors de l'endroit où l'on pose l'horloge, et la question « d'où racontons-nous ? » deviendrait une partie de la réponse au lieu d'une correction négligeable. En l'état, le calcul d'ordre de grandeur tient : nous ne sommes pas à l'heure, et aucune date n'en est changée.

25.3 Deux sortes de dates

La chronologie de ce livre est cousue de deux sortes de dates, obtenues par des méthodes qui n'ont presque rien en commun. Les unes sont calculées dans un modèle, en partant du début. Les autres sont lues dans des pierres, en partant d'aujourd'hui.

25.3.1 Les dates calculées

Ce que l'on mesure sur un objet lointain n'est pas une date, mais un décalage vers le rouge, noté z. Il dit de combien l'Univers s'est étiré depuis le départ de la lumière : 1 + z est le rapport entre la « taille » de l'Univers quand on reçoit cette lumière et sa taille quand elle a été émise Hogg 1999. Pour faire de z une date, il faut savoir quand l'Univers avait cette taille, donc connaître l'histoire de son taux d'expansion. Cette histoire dépend du taux actuel H0 et des densités de matière, de courbure et d'énergie noire, et l'âge s'obtient en l'intégrant Hogg 1999. La conversion de z en âge est donc un calcul dans un modèle, et chaque date de la frise cosmique est une date du modèle ΛCDM. Pour la surface d'où part le fond diffus, z = 1 089,9 correspond à 372 900 ans ; pour MoM-z14, z = 14,44 correspond à 280 millions d'années pdg2019-astroNaidu 2025. Le z est la mesure ; l'âge en est l'interprétation.

L'âge de l'Univers est lui-même une date de cette sorte. Planck seul donne 13,797 ± 0,023 milliards d'années. Combiné aux oscillations acoustiques des baryons (BAO), une empreinte des ondes sonores primordiales dans la répartition des galaxies, il donne 13,787 ± 0,020 milliards d'années planck2018tab. Cette marge est statistique et intérieure au modèle. Planck précise lui-même que les paramètres de l'Univers tardif sont inférés « en supposant la cosmologie ΛCDM de base » Planck 2018. La marge dit avec quelle préci-

sion on connaît l'âge si le modèle est juste ; elle ne dit rien de l'erreur commise s'il était faux. Le chapitre 7 a déroulé cette chaîne.

25.3.2 Les dates lues

Les plus vieux solides du Système solaire sont de petites inclusions blanches riches en calcium et en aluminium, appelées CAI, qu'on trouve dans certaines météorites. Quatre d'entre elles donnent 4 567,30 ± 0,16 millions d'années Woitke 2024Connelly 2012, et cet âge sert de « t = 0 » au Système solaire. Le chapitre 15 a expliqué comment on l'obtient, à partir de deux désintégrations de l'uranium en plomb, de demi-vies 704 millions et 4,47 milliards d'années Lichtenberg 2023.

Rien, dans ce calcul, ne vient de la cosmologie : ni z, ni H0, ni l'énergie noire n'y entrent. Les demi-vies se mesurent au laboratoire, et l'âge se compte à rebours depuis aujourd'hui : c'est un « il y a ». Ces dates ont leurs propres disputes, mais d'une autre nature. En confrontant le plomb-plomb à une autre horloge, celle de l'aluminium 26, Steven Desch et ses coauteurs situent le t = 0 à 4 568,42 ± 0,24 millions d'années, environ un million d'années plus tôt. Selon eux, le plomb de certaines CAI aurait été perturbé après leur formation Desch 2023. Le désaccord porte sur la conservation d'un échantillon, pas sur un modèle de l'Univers.

Entre les deux sortes de dates se trouve une sorte intermédiaire : l'âge des étoiles. L'étoile surnommée Mathusalem a 14,27 ± 0,80 milliards d'années ; la formation du disque ancien de la Galaxie commence il y a 13 milliards d'années wiki-ageXiang 2022. Ces âges se lisent sur des étoiles, mais à travers des modèles d'évolution stellaire. Ils ne doivent rien à ΛCDM, et beaucoup à la physique des étoiles.

25.3.3 La couture

Les deux sortes de dates se rejoignent au Soleil. Le livre a écrit qu'il naît environ 9,2 milliards d'années après le Big Bang, aux deux tiers de l'histoire cosmique (→ chap. 15). Ce chiffre se calcule ainsi : 13,8 moins 4,57 planck2018tabWoitke 2024[9]. C'est une date calculée moins une date lue. Sur l'année cosmique, le t = 0 du Système solaire tombe le 2 septembre, vers 4 heures du matin[10]. Tout ce que le livre a placé ensuite sur ce calendrier est une date lue, rangée dans un calendrier dont la longueur totale est calculée : la Lune, le zircon australien de 4 404 millions d'années, l'oxygène, *Homo sapiens* à 23 h 48 le 31 décembre, l'écriture à 23 h 59 min 48 s Wilde 2001Richter 2017wiki-writing[11].

La soustraction n'a de sens qu'à un instant : aujourd'hui. Le modèle donne l'âge de l'Univers à l'époque où nous le mesurons ; les pierres donnent le temps écoulé entre leur formation et le moment où nous les analysons. Les deux comptes aboutissent au même point, notre présent, et c'est seulement là qu'on peut retrancher l'un de l'autre. La couture passe aussi par un lieu. Les pierres datées sont celles du Système solaire, tombées sur la Terre ; le fond diffus d'où l'on tire l'âge est celui qu'on voit d'ici. La jointure des deux chronologies est donc l'endroit précis, dans l'espace et dans le temps, d'où l'on regarde[12].

25.3.4 Ce qui peut bouger bouge d'un seul côté

Quand une des deux sortes de dates bouge, l'autre reste en place. Le taux d'expansion mesuré de proche en proche vaut 73,50 ± 0,81 km/s/Mpc selon le rapport de consensus H0DN h0dn2025 ; calculé depuis le fond diffus, il vaut 67,19 ± 0,38 Camphuis 2025. Le chapitre 23 a exposé ce désaccord. L'âge varie à peu près comme l'inverse de H0 : si H0 valait 73,5 au lieu de 67,66, à composition égale, une règle de trois donnerait un âge d'environ 12,7 milliards d'années[13]. Ce calcul d'ordre de grandeur n'est pas publié tel quel, et il ignore qu'une solution réelle à la tension modifierait aussi les autres paramètres.

Suivons-le pourtant jusqu'au bout. Le Soleil garderait ses 4 567 millions d'années, puisque aucune pierre n'aurait changé. Mais il naîtrait environ 8,1 milliards d'années après le Big Bang, et non 9,2 ; aux 64 centièmes de l'histoire, et non aux deux tiers ; vers le 22 août de l'année cosmique, et non le 2 septembre[14]. Le Soleil changerait de place sur le calendrier sans changer d'âge. À l'inverse, si la révision de Desch et ses coauteurs l'emportait du côté des pierres, le t = 0 reculerait d'un million d'années, soit une quarantaine de minutes de l'année cosmique Desch 2023[15], et rien ne changerait du côté du modèle.

Les deux côtés restent pourtant liés par une contrainte : aucun objet ne peut être plus vieux que l'Univers. Mathusalem, à 14,27 ± 0,80 milliards d'années, est compatible avec l'âge de Planck. Avec un Univers de 12,7 milliards d'années, l'écart atteindrait environ deux fois la marge de l'étoile wiki-age(→ chap. 7). Ce contrôle a déjà servi : avant 1998, un Univers sans énergie noire paraissait plus jeune que ses étoiles, et l'accélération, en allongeant l'âge calculé, a levé le paradoxe Perlmutter 1999. Ce contrôle est lâche, quarante fois moins précis que le calcul qu'il vérifie. Mais c'est le seul endroit du livre où une date comptée depuis le début et une date lue sur un objet se confrontent directement, sans passer par notre présent.

25.4 Un seul univers, vu d'un seul point

Tout ce que l'astronome voit est de la lumière qui a voyagé. Regarder loin, c'est regarder dans le passé ; c'est pourquoi il existe en cosmologie « de nombreuses manières » de définir une distance, puisque les distances entre objets emportés par l'expansion changent sans cesse Hogg 1999. Trois grandeurs, souvent confondues, doivent être tenues à part. L'âge à l'émission est le temps cosmique au moment où la lumière part. Le temps de regard en arrière est la différence entre l'âge de l'Univers aujourd'hui et son âge à l'émission Hogg 1999 : pour MoM-z14, environ 13,5 milliards d'années[16]. La distance comobile, enfin, reste constante entre deux objets emportés par l'expansion ; elle est égale par convention à la distance qu'on mesurerait aujourd'hui, « à un instant donné du temps cosmique » wiki-comoving. Le temps de regard en arrière multiplié par la vitesse de la lumière donne la distance parcourue par la lumière. Ce n'est la distance entre la source et nous à aucun instant Hogg 1999[17].

Le fond diffus rend spectaculaire l'écart entre distance parcourue par la lumière et distance réelle. Sa lumière voyage depuis presque tout l'âge de l'Univers. La matière qui l'a émise se trouve aujourd'hui à 13,873 gigaparsecs de nous planck2018tab, soit environ 45 milliards d'années-lumière. Au moment de l'émission, elle n'était qu'à environ 41 millions d'années-lumière de la matière qui allait devenir nous[18]. Le rayon comobile de l'Univers observable, environ 46,5 milliards d'années-lumière, dépasse le produit de la vitesse de la lumière par l'âge, parce que l'espace s'est dilaté pendant le trajet. Les régions lointaines s'éloignent aujourd'hui de nous plus vite que la lumière sans contredire la relativité, qui interdit de dépasser la lumière à travers l'espace mais n'empêche pas l'espace de s'étirer wiki-observablewright-tuto[19].

Cette géométrie a une conséquence pour le point de vue. La matière qui a émis le fond diffus que nous recevons se trouve, dans toutes les directions, à la même distance de nous : elle forme une sphère centrée sur nous. Un observateur comobile situé dans une galaxie lointaine, sur la même tranche de temps cosmique, recevrait un fond diffus de même température, mais émis par une autre sphère de matière, centrée sur lui[20]. La carte dont le livre a tiré l'âge et la composition de l'Univers (→ chap. 7) est donc celle d'une coquille de l'Univers primordial vue d'un seul point. Les galaxies lointaines que photographie Webb sont, de même, des régions vues telles qu'elles étaient, le long des lignes de visée qui aboutissent à nous (→ chap. 10).

25.4.1 Sans rien à quoi comparer

Les philosophes Chris Smeenk et George Ellis ont décrit ce que cette situation a d'unique. La cosmologie n'a qu'un seul univers, et rien de semblable à quoi le comparer. Pour expliquer ses propriétés, on ne peut invoquer ni des lois établies sur de nombreux cas semblables, ni un contexte plus large : « nous n'avons accès qu'à un seul univers, et il n'y a pas de contexte plus large auquel faire appel » smeenk-sep. L'astrophysique des étoiles ne connaît pas cette solitude. Le Soleil peut être comparé à des milliers de semblables : une étude récente analyse 6 594 « jumeaux solaires » pour reconstituer sa migration dans la Galaxie Tsujimoto 2026. L'Univers n'a pas de jumeau, et nous ne l'observons que d'un seul endroit.

Kant avait formulé cette limite autrement : pour lui, le monde pris comme totalité n'est jamais un objet d'expérience, et l'on ne peut donc pas lui attribuer un âge comme à une pierre wiki-antinomy. Le chapitre 1 a lu cette phrase comme une objection à la question du commencement. À la fin du livre, elle prend un sens plus littéral. Le livre a attribué un âge au monde et un âge à des pierres, et ces deux âges ne sont pas de la même sorte. Celui de la pierre se lit sur la pierre, avec des demi-vies mesurées au laboratoire. Celui du monde se calcule pour une famille d'observateurs idéaux dont nous ne faisons pas partie, dans un modèle qu'on suppose valable partout[21]. La physique a trouvé une manière précise de donner un âge au monde, mais cet âge n'est pas celui d'une chose qu'on aurait sous la main.

25.4.2 L'hypothèse qui fait tenir l'ensemble

La cosmologie tient malgré cette solitude parce qu'elle suppose que notre place n'a rien de particulier. Les modèles FLRW découlent de l'hypothèse que la matière a partout la même densité et la même apparence dans toutes les directions wiki-flrw. Nous ne pouvons vérifier cette hypothèse que depuis ici. L'isotropie se constate directement : une fois retiré le dipôle de notre mouvement, le fond diffus est le même dans toutes les directions à une part sur 25 000 près wiki-cmb. L'homogénéité porte sur ce qui se passe ailleurs, et ne se voit pas de la même façon. Il faut supposer que ce que nous voyons autour de nous serait vu de même depuis n'importe quel autre lieu[22]. Cette supposition s'appelle le principe copernicien. Le temps cosmique et l'homogénéité se définissent d'ailleurs l'un par l'autre : l'homogénéité « doit être définie sur une surface de temps propre constant depuis le Big Bang » wright-tuto, et le temps cosmique numérote les surfaces homogènes wiki-cosmic-time. C'est l'observation d'un Univers homogène aux grandes échelles qui rend la construction cohérente, et cette observation est faite d'un seul point.

25.5 Une fenêtre d'un septième de seconde

Le chapitre 24 a présenté l'argument de Lawrence Krauss et Robert Scherrer. Si l'on prolonge ΛCDM vers le futur, « toute trace de l'expansion de Hubble disparaîtra » Krauss 2007. Les galaxies lointaines, le fond diffus et les abondances primordiales d'hydrogène et d'hélium deviendront inobservables, et de futurs observateurs croiraient vivre dans un Univers statique sans commettre aucune faute de méthode Krauss 2007. Ce futur suppose une énergie noire strictement constante. Or les données du relevé DESI préféraient en 2025 une énergie noire variable, et la recalibration de 2026 des supernovas du Dark Energy Survey a ramené la préférence la plus forte pour une énergie noire variable à 3,2 écarts-types, une « faible préférence » selon ses auteurs Desi 2025Popovic 2026. On reste sous le seuil de cinq écarts-types qu'exige une découverte. Le scénario n'est donc pas une prévision. Il met pourtant en évidence une propriété qui vaut, que l'énergie noire soit constante ou non : la lisibilité de l'histoire cosmique dépend de l'époque où l'on observe.

Retourné vers nous, l'argument situe notre propre époque. Sur l'année cosmique, nous arrivons le 31 décembre : *Homo sapiens* apparaît en Afrique vers 23 h 48, d'après les fossiles de Jebel Irhoud datés de 315 000

ans, et l'écriture 12 secondes avant minuit Richter 2017wiki-writing(→ chap. 20). La cosmologie qui a permis d'écrire ce livre occupe un instant plus bref encore. Penzias et Wilson ont fait le 20 mai 1964 la première mesure qui a révélé le fond diffus wiki-cmb, et l'accélération de l'expansion a été découverte en 1998 Riess 1998. Entre la découverte du fond diffus et la rédaction de ce livre, six décennies ont passé : un septième de seconde de l'année cosmique[23]. L'histoire entière a été reconstituée pendant cet instant, à partir de traces que le scénario de Krauss et Scherrer promet d'effacer : les galaxies lointaines des images de Webb, un fond diffus mesuré à 2,72548 K, un gaz primitif qui garde ses proportions d'environ 75 % d'hydrogène et 25 % d'hélium Fixsen 2009Fields 2020wiki-chrono.

Les dates offrent un autre rapprochement, qu'il faut signaler sans l'interpréter. L'énergie noire prend le dessus sur la matière un peu moins de dix milliards d'années après le Big Bang, à peu près au moment où naît le Soleil wiki-chrono(→ chap. 22). Nous observons donc à une époque où l'accélération est déjà en cours et où ses indices sont visibles en même temps que ceux du passé chaud. Ce calendrier est-il une coïncidence, ou une conséquence du temps qu'il faut pour que des observateurs apparaissent ? Pour trancher, il faudrait savoir à quelles époques un univers comme le nôtre peut abriter des observateurs, et comparer la nôtre à cette distribution.

25.6 Le bord du point de vue

Le livre avait commencé à un bord où le temps perd son support. Au-delà de la transition électrofaible, vers 10^{-11} seconde, plus aucun processus physique ne peut servir d'horloge, selon Svend Rugh et Henrik Zinkernagel Rugh 2009. Les durées plus courtes ne sont que des valeurs de la coordonnée d'un modèle prolongé au-delà de son domaine (→ chap. 1). Le chapitre 24 a fermé l'autre bord physique, celui du futur, qui dépend d'une énergie noire dont on mesure la quantité sans en connaître la loi.

Ce dernier chapitre ajoute un bord d'une autre nature, et le premier bord aide à le voir. Au commencement, il n'y avait personne pour lire l'heure, et rien qui puisse la marquer. À la fin, quelqu'un la lit, et le temps qu'il annonce n'est pas celui de sa propre montre. L'observateur qui raconte l'histoire bouge à 370 km/s par rapport au repère qu'il utilise, et doit corriger son mouvement avant de parler de l'Univers. Il date en partie par le calcul, en partie par les pierres, et ses deux chronologies ne se rejoignent qu'à son présent et sur sa planète. Il voit un seul univers, depuis un seul point, et suppose que ce point n'a rien de particulier. Il raconte depuis une époque où les traces du passé sont encore visibles et où le futur ne l'est pas. Aucune de ces limites n'invalide une date du livre. Elles disent sous quelles conditions chaque date a été obtenue.

L'observateur, enfin, est fait de ce qu'il date. Trois atomes sur cinq de son corps sont des atomes d'hydrogène, et cet hydrogène vient des premières minutes, puisque les étoiles n'en fabriquent pas et en consomment wiki-corpsKobayashi 2020(→ chap. 19). Le carbone et l'oxygène qui font l'essentiel de sa masse ont été forgés dans des étoiles antérieures au Soleil Kobayashi 2020(→ chap. 12). Les pierres qui lui donnent ses dates lues sont celles du disque d'où sa planète est sortie (→ chap. 16). Le récit laissait supposer un spectateur extérieur ; le narrateur est l'un des derniers produits de l'histoire qu'il raconte, et il la reconstitue depuis cette place tardive et mobile. Le chapitre n'ajoute aucun événement à la chronologie. Il dit d'où tous les autres ont été vus.

25.7 Ce qu'on ne sait pas

Le chiffrage du retard de nos horloges est un calcul d'ordre de grandeur fait pour ce livre à partir des vitesses publiées par le Particle Data Group pdg2019-astro, et aucun spécialiste ne l'a relu. Il ignore l'histoire de notre mouvement et ne compte pas les puits de gravité plus vastes que la Galaxie. Un calcul complet

pourrait déplacer le résultat d'un facteur de quelques unités ; pour qu'il approche la marge de l'âge, il faudrait un facteur de plusieurs centaines. La conclusion (l'écart est négligeable pour les dates) est sûre ; le chiffre exact l'est beaucoup moins.

On ne sait pas encore si le temps cosmique vaut pour les horloges des galaxies. Le timescape soutient que non, et une analyse de 2025 des supernovas Pantheon+ le préfère fortement au modèle standard Wiltshire 2007Seifert 2025. Les analyses du fond diffus et des oscillations acoustiques, fondées sur des modèles homogènes, s'ajustent bien Camphuis 2025Desi 2025. Deux travaux départageraient les deux positions : un ajustement du timescape au fond diffus et aux BAO, et une reprise indépendante de l'analyse de 2025. Pour l'instant, le timescape reste une hypothèse minoritaire ; s'il l'emportait, la question du lieu de l'horloge deviendrait centrale.

On ne sait pas où la couture des deux chronologies se fera exactement. Du côté calculé, l'âge dépend de la solution de la tension sur H0 : 73,50 ± 0,81 localement h0dn2025, 67,19 ± 0,38 depuis le fond diffus Camphuis 2025, et 68,4 à 69,6 selon l'équipe qui calibre les supernovas avec les géantes rouges mesurées par Webb Hoyt 2025. L'âge de 12,7 milliards d'années qu'on obtiendrait avec la valeur haute est une règle de trois, qu'une solution réelle modifierait. Du côté lu, le t = 0 du Système solaire hésite entre 4 567,3 et 4 568,4 millions d'années Woitke 2024Desch 2023, un écart d'une quarantaine de minutes sur l'année cosmique. La place du Soleil sur ce calendrier dépend donc surtout du côté calculé, et ce constat-là est solide.

On ne sait pas combien de temps la fenêtre de lisibilité restera ouverte. L'argument de Krauss et Scherrer suppose une énergie noire constante Krauss 2007, que les données de 2026 ne confirment ni n'infirment Popovic 2026. Si les données de DESI franchissaient cinq écarts-types avec plusieurs échantillons de supernovas, la constante serait écartée et l'argument serait à refaire ; si le signal retombait sous deux écarts-types, l'argument resterait en place.

25.8 Ce que ce chapitre démontre

Les dates de ce livre sont en temps cosmique : le temps propre des observateurs au repos par rapport à la matière, qui numérote les tranches homogènes des modèles FLRW smeenk-sepwiki-flrw. L'âge de 13,8 milliards d'années est ce temps, compté depuis le début du Big Bang chaud planck2018tab.

Nous ne sommes pas comobiles. Seul un observateur comobile voit le fond diffus isotrope wiki-comoving ; nous y voyons un dipôle de 3,3621 mK, dû au mouvement du Système solaire à 369,82 km/s par rapport au fond diffus pdg2019-astro. La vitesse et le puits de gravité de la Galaxie font retarder nos horloges de quelques millionièmes : environ 3 500 ans sur la vie du Système solaire, quelques dizaines de milliers d'années au plus sur toute l'histoire. Sur l'année cosmique, cela fait quelques secondes à une minute ou deux, plusieurs centaines de fois moins que la marge de ± 20 millions d'années de l'âge. Aucune date ne bouge ; chaque mesure est faite depuis un lieu en mouvement, puis corrigée pour donner ce que verrait un observateur au repos Hogg 1999. Seule la thèse minoritaire du timescape conteste cette conclusion Wiltshire 2007Seifert 2025.

La chronologie du livre coud deux sortes de dates. Les dates calculées convertissent un décalage vers le rouge en âge dans le modèle ΛCDM Hogg 1999, et la marge de 13,787 ± 0,020 milliards d'années est intérieure à ce modèle planck2018tabPlanck 2018. Les dates lues, comme les 4 567,30 millions d'années des CAI, ne doivent rien à la cosmologie Woitke 2024. Elles se rejoignent au Soleil, dont la place depuis le début (9,2 milliards d'années, le 2 septembre de l'année cosmique) est une date calculée moins une date lue, qui n'a de sens qu'à notre présent. Ce qui peut bouger bouge d'un seul côté : avec H0 = 73,5, le Soleil changerait de place sur le calendrier sans changer d'âge.

La cosmologie n'a qu'un objet et qu'un point d'observation. La matière qui a émis le fond diffus, aujourd'hui à environ 45 milliards d'années-lumière, n'était qu'à 41 millions d'années-lumière de la nôtre au moment de l'émission planck2018tabHogg 1999. Il n'y a ni autre univers pour comparer, ni contexte plus large smeenk-sep, et la construction tient parce qu'on suppose que notre place n'a rien de particulier. Si l'énergie noire est constante, de futurs observateurs ne pourraient plus reconstituer cette histoire Krauss 2007 ; nous la reconstituons depuis un septième de seconde de l'année cosmique, à une époque où ses preuves sont encore dans le ciel.

Le livre s'était ouvert sur un bord où plus rien ne peut servir d'horloge Rugh 2009. Il se ferme sur un bord d'une autre nature : celui d'un observateur situé, fait d'hydrogène du premier jour et de cendres d'étoiles, qui bouge par rapport au repère qu'il utilise, date à la fois par le calcul et par les pierres, et raconte depuis une époque. L'histoire du monde est racontée d'un lieu et d'une époque, et elle ne pouvait pas l'être autrement.

Notes

1. Calcul : 3,3621 × 10^{-3} K / 2,7255 K ≈ 1,23 × 10^{-3}. Le rapport de la vitesse du Soleil à celle de la lumière, 369,82 / 299 792 ≈ 1,23 × 10^{-3}, redonne la même valeur par l'effet Doppler. Valeurs : Groom et Scott, « Astrophysical Constants and Parameters », Particle Data Group, révision 2019, table 2.1. ↩

2. Les vitesses du Soleil et du Groupe local ne s'additionnent pas simplement, puisqu'elles n'ont pas la même direction. Le détail de la décomposition (Terre autour du Soleil, Soleil autour du centre galactique, Galaxie dans le Groupe local, Groupe local vers les grandes structures voisines) n'est pas donné ici. ↩

3. Calcul d'ordre de grandeur fait pour ce chapitre, non relu par un spécialiste, à partir des valeurs du Particle Data Group (Groom et Scott 2019). v/c ≈ 1,2336 × 10^{-3} ; $v^2/2c^2$ ≈ 7,61 × 10^{-7} ; × 4,567 × 10^9 ans ≈ 3 480 ans ; × 13,787 × 10^9 ans ≈ 10 500 ans. Pour le potentiel galactique, on a pris une vitesse d'évasion locale de 540 km/s, milieu d'une fourchette de 492 à 587 km/s qui n'a pas été vérifiée sur une source primaire : $\Phi/c^2 \approx (v_év/c)^2/2 \approx 1{,}6 \times 10^{-6}$, soit environ 22 000 ans sur 13,8 milliards d'années. Total : de l'ordre de 2 à 3 × 10^{-6}, soit quelques dizaines de milliers d'années. ↩↩↩

4. Présentation usuelle de la dilatation du temps en relativité restreinte, donnée pour le lecteur sans source primaire citée ici. ↩

5. Présentation usuelle de la dilatation gravitationnelle du temps en relativité générale, donnée pour le lecteur sans source primaire citée ici. ↩

6. 1 seconde ≈ 438 ans : Wikipédia, « Cosmic Calendar ». 1 minute ≈ 26 000 ans : calcul (13,8 milliards d'années / 525 600 minutes). Calculs de ce chapitre : 3 500 / 438 ≈ 8 secondes ; 30 000 / 26 000 ≈ 1,2 minute ; 20 millions d'années / 37,8 millions d'années par jour ≈ 0,53 jour, soit 12 à 13 heures. ↩

7. ΛCDM est le modèle standard de la cosmologie : une constante cosmologique (Λ) et de la matière noire froide (CDM, *cold dark matter*). ↩

8. Seifert et al. (2025), MNRAS Letters 537, L55, citent « very strong evidence (ln B > 5) ». Dans l'usage statistique courant, B est un facteur de Bayes, c'est-à-dire le rapport des probabilités des données sous les deux modèles comparés, et ln B son logarithme naturel ; une valeur supérieure à 5 correspond à un rapport supérieur à environ 150. Cette définition est la définition usuelle et n'est pas tirée de l'article. ↩

9. Calcul : 13,8 − 4,57 ≈ 9,2 milliards d'années. Avec 13,787 (Planck 2018, tables) et 4,5673 (Woitke et al. 2024) : 9,22 milliards d'années, soit 66,9 % de l'âge. ↩

10. Calcul sur 13,8 milliards d'années = 365 jours (1 jour ≈ 37,8 millions d'années). Avec 13,787 milliards d'années, la date reste le 2 septembre. La version Wikipédia du calendrier cosmique (« Cosmic Calendar ») place le Système solaire au 9 septembre, avec d'autres âges. ↩

11. Calculs sur la même échelle. *Homo sapiens* : fossiles de Jebel Irhoud, 315 ± 34 000 ans (Richter et al. 2017, Nature 546), soit 23 h 48. Écriture mésopotamienne vers 3400–3100 av. J.-C. (Wikipédia, « History of writing »), soit 23 h 59 min 48 s. Zircon de 4 404 ± 8 millions d'années (Wilde et al. 2001, Nature 409, lu dans un résumé, non vérifié sur l'article) : 6 septembre. ↩

12. Lecture proposée par ce chapitre. Smeenk et Ellis (Stanford Encyclopedia of Philosophy, « Philosophy of Cosmology ») définissent l'âge comme le temps propre écoulé jusqu'à « l'époque présente » ; les âges radiométriques se comptent depuis aujourd'hui. L'idée que la jointure des deux est le présent et le lieu de l'observateur est une interprétation, non une citation. ↩

13. Calcul d'ordre de grandeur, non publié tel quel : 13,787 × 67,66 / 73,5 ≈ 12,69 milliards d'années, 67,66 km/s/Mpc étant le H0 de la combinaison Planck + BAO qui donne 13,787 (Planck 2018, tables de paramètres, table 2.18). ↩

14. Calculs de ce chapitre, dans l'hypothèse de la règle de trois : 12,7 − 4,567 ≈ 8,13 milliards d'années ; 8,13 / 12,7 ≈ 0,64 ; 0,64 × 365 ≈ 233,7 jours après le 1er janvier, soit le 22 août. Aucune source ne donne ce placement ; il illustre un principe et n'est pas une valeur à retenir. ↩

15. Calcul : 4 568,42 − 4 567,30 = 1,12 million d'années ; 1,12 million / 26 000 ans par minute ≈ 43 minutes. L'écart avec la valeur de 4 568,7 millions d'années (Piralla et al. 2023, cité par Woitke et al. 2024) donnerait une cinquantaine de minutes. ↩

16. Calcul : 13,8 − 0,28 ≈ 13,5 milliards d'années, l'âge à l'émission de MoM-z14 étant pris chez Naidu et al. (2025), arXiv:2505.11263. ↩

17. Hogg (1999), « Distance measures in cosmology », arXiv:astro-ph/9905116. Une galaxie dite « à 13,5 milliards d'années-lumière » est à 13,5 milliards d'années de trajet de lumière ; sa distance actuelle est bien plus grande. ↩

18. Calcul : 13 873 Mpc / (1 + z), avec 1 + z ≈ 1 091, donne environ 12,7 Mpc, soit environ 41 millions d'années-lumière. 13,873 Gpc ≈ 45 milliards d'années-lumière (1 pc ≈ 3,26 années-lumière). Distance de la surface de dernière diffusion : Planck 2018, tables de paramètres. ↩

19. Wikipédia, « Observable universe » (rayon comobile de 46,5 milliards d'années-lumière ; régions lointaines qui s'éloignent plus vite que la lumière) ; E. Wright, *Cosmology Tutorial*. La précision sur ce que la relativité interdit est la présentation usuelle, donnée pour le lecteur. ↩

20. Raisonnement géométrique de ce chapitre, qui découle de ce que la distance comobile de la surface de dernière diffusion est la même dans toutes les directions ; il n'est pas tiré d'une source. ↩

21. La phrase de Kant est prise dans une paraphrase (Wikipédia, « Antinomy ») et reste à vérifier sur la *Critique de la raison pure* (A426-A433/B454-B461). Le rapprochement avec les deux sortes de dates est de ce chapitre, non de Kant. ↩

22. Distinction usuelle, donnée pour le lecteur sans source primaire citée ici : l'isotropie autour de nous se constate ; l'homogénéité ailleurs se suppose, ou se déduit en ajoutant que notre place n'a rien de particulier. ↩

23. Calcul de ce chapitre : de 1964 à 2026, 62 ans ; 62 / 438 ≈ 0,14 seconde de l'année cosmique. Date du 20 mai 1964 : Wikipédia, « Cosmic microwave background ». ↩

Bibliographie

AAAS, « Colorado fossils document life's rebound after last extinction » (2019), sur Lyson, T. R., Miller, I. M., et al. (2019), Science, 25 octobre 2019. doi:10.1126/science.aay2268 aaas2019corralbluffs

LIGO Scientific Collaboration, Virgo Collaboration et al. (Abbott, B. P., et al.) (2017). Multi-messenger Observations of a Binary Neutron Star Merger. The Astrophysical Journal Letters 848, L12. arXiv:1710.05833 doi:10.3847/2041-8213/aa91c9 abbott2017mm

Louis, T., et al. (ACT Collaboration). « The Atacama Cosmology Telescope: DR6 Power Spectra, Likelihoods and ΛCDM Parameters ». *JCAP* 2025(11), 062 (2025). doi:10.1088/1475-7516/2025/11/062 act2025

Calabrese, E., Hill, J. C., et al. (ACT Collaboration) (2025). The Atacama Cosmology Telescope: DR6 Constraints on Extended Cosmological Models. arXiv:2503.14454 DOI 10.48550/arXiv.2503.14454 doi:10.48550/arXiv.2503.14454 act2025ext

Adamo, A., Atek, H., Bagley, M. B., Bañados, E., et al. (2024). The First Billion Years, According to JWST. arXiv:2405.21054 DOI 10.48550/arXiv.2405.21054 doi:10.48550/arXiv.2405.21054 adamo2024

Agullo, I., Wang, A., Wilson-Ewing, E. (2023). Loop quantum cosmology: relation between theory and observations. Chapitre du Handbook of Quantum Gravity (Bambi, Modesto, Shapiro éd., Springer). arXiv:2301.10215 doi:10.48550/arXiv.2301.10215 agullo2023

Albert, D. (25 mars 2012). On the Origin of Everything. The New York Times Book Review (compte rendu de L. Krauss, A Universe from Nothing) ; texte lu sur la reprise de 3 Quarks Daily. albert2012

Allwood, A. C., Rosing, M. T., Flannery, D. T., Hurowitz, J. A., Heirwegh, C. M. (2018). Reassessing evidence of life in 3,700-million-year-old rocks of Greenland. Nature 563, 241–244. doi:10.1038/s41586-018-0610-4 allwood2018

Amelin, Y., et al. (2010). U–Pb systematics of the ca. 4.5672 Ga CAI (cité par Woitke et al. 2024 pour l'âge de 4 567,30 Ma). Référence complète non consultée. amelin2010

Anand, S., Barnes, J., Yang, S., Kasliwal, M. M., Coughlin, M. W., et al. (2024). Collapsars as Sites of r-process Nucleosynthesis: Systematic Near-Infrared Follow-up of Type Ic-BL Supernovae. The Astrophysical Journal 962, 68. arXiv:2302.09226 doi:10.3847/1538-4357/ad11df anand2024

Andrievsky, S. M., Korotin, S. A. (2026). Phosphorus in cool stars of various metallicities: The non-local thermodynamic equilibrium consideration. arXiv:2603.14513 (prépublication). doi:10.48550/arXiv.2603.14513 andrievsky2026

Aoki, H. (1997). Baryogenesis at the Electroweak Scale and Above. KEK-TH-534, actes de la réunion KEK « CP violation and its origin ». arXiv:hep-ph/9708376 aoki1997

Stanford Encyclopedia of Philosophy, « Thomas Aquinas » (version publiée le 7 décembre 2022 ; auteur non relevé), section sur l'éternité du monde. aquinas-sep

Ashtekar, A., Pawlowski, T., Singh, P. (2006). Quantum Nature of the Big Bang. Physical Review Letters 96, 141301. arXiv:gr-qc/0602086 DOI 10.1103/PhysRevLett.96.141301 doi:10.1103/PhysRevLett.96.141301 ashtekar2006

Ashtekar, A., Singh, P. (2011). Loop Quantum Cosmology: A Status Report. Classical and Quantum Gravity 28, 213001. arXiv:1108.0893 DOI 10.1088/0264-9381/28/21/213001 doi:10.1088/0264-9381/28/21/213001 ashtekar2011

Ashtekar, A., Gupt, B., Jeong, D., Sreenath, V. (2020). Alleviating the Tension in the Cosmic Microwave Background using Planck-Scale Physics. Physical Review Letters 125, 051302. arXiv:2001.11689 doi:10.1103/PhysRevLett.125.051302 ashtekar2020

Asplund, M., Amarsi, A. M., Grevesse, N. (2021). The chemical make-up of the Sun: A 2020 vision. Astronomy & Astrophysics 653, A141. arXiv:2105.01661 DOI 10.1051/0004-6361/202140445 doi:10.1051/0004-6361/202140445 asplund2021

Atek, H., Labbé, I., Furtak, L. J., et al. (2024). Most of the photons that reionized the Universe came from dwarf galaxies. Nature 626, 975–978. arXiv:2308.08540 DOI 10.1038/s41586-024-07043-6 doi:10.1038/s41586-024-07043-6 atek2024

Augustin d'Hippone (vers 400). Confessions, livre XI, chap. XII–XIV. Trad. anglaise A. C. Outler, Wikisource. augustin-conf

Bamonti, N., Cinti, E., Sanchioni, M. (2025). Quo Vadis Wheeler–DeWitt Time? Challenging Emergent Time in Quantum Cosmology. Philosophy of Science 92(5). DOI 10.1017/psa.2025.10146 DOI 10.1017/psa.2025.10146 doi:10.1017/psa.2025.10146 bamonti2025

Barbagallo, M., Musumarra, A., Cosentino, L., et al. (n_TOF Collaboration) (2016). ^{7}Be(n,α)^{4}He reaction and the Cosmological Lithium Problem: measurement of the cross section in a wide energy range at n_TOF (CERN). Physical

Review Letters 117, 152701. arXiv:1606.09420 DOI 10.1103/PhysRevLett.117.152701 doi:10.1103/PhysRevLett.117.152701 barbagallo2016

Barboni, M., Boehnke, P., Keller, B., Kohl, I. E., Schoene, B., Young, E. D., McKeegan, K. D. (2017). Early formation of the Moon 4.51 billion years ago. Science Advances 3, e1602365. barboni2017

Baumann, D. (2009). TASI Lectures on Inflation. arXiv:0907.5424 baumann2009

Bekki, K., Tsujimoto, T. (2024). Phosphorus enrichment by ONe novae in the Galaxy. The Astrophysical Journal Letters. arXiv:2405.06325 doi:10.48550/arXiv.2405.06325 bekki2024

Belokurov, V., Kravtsov, A. (2022). From dawn till disc: Milky Way's turbulent youth revealed by the APOGEE+Gaia data. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. arXiv:2203.04980 DOI 10.1093/mnras/stac1267 doi:10.1093/mnras/stac1267 belokurov2022

Bergson, H. (1907). L'Évolution créatrice, chap. IV. Texte consulté sur le corpus Obvie (ObTIC, Sorbonne Université). bergson1907

BGI Genomics, communiqué sur le numéro spécial « primates » de Science 380 (6648), 2 juin 2023. bgi2023primates

Borde, A., Guth, A. H., Vilenkin, A. (2003). Inflationary spacetimes are not past-complete. Physical Review Letters 90, 151301. arXiv:gr-qc/0110012 doi:10.48550/arXiv.gr-qc/0110012 bgv2003

BICEP/Keck Collaboration (2021). BICEP/Keck XIII: Improved constraints on primordial gravitational waves using Planck, WMAP, and BICEP/Keck observations through the 2018 observing season. Physical Review Letters 127, 151301. arXiv:2110.00483 DOI 10.1103/PhysRevLett.127.151301 doi:10.1103/PhysRevLett.127.151301 bk2021

BICEP2/Keck and Planck Collaborations (2015). A Joint Analysis of BICEP2/Keck Array and Planck Data. Physical Review Letters 114, 101301. arXiv:1502.00612 DOI 10.1103/PhysRevLett.114.101301 doi:10.1103/PhysRevLett.114.101301 bkp2015

Bobrovskiy, I., et al. (2018). Ancient steroids establish the Ediacaran fossil Dickinsonia as one of the earliest animals. Science 361, 1246–1249. Lu via le communiqué de l'ANU du 21 septembre 2018. doi:10.1126/science.aat7228 bobrovskiy2018

Bobrovskiy, I., Hope, J. M., Nettersheim, B. J., Volkman, J. K., Hallmann, C., Brocks, J. J. (2021). Algal origin of sponge sterane biomarkers negates the oldest evidence for animals in the rock record. Nature Ecology & Evolution 5, 165–168. doi:10.1038/s41559-020-01334-7 bobrovskiy2021

Bollard, J., Connelly, J. N., Whitehouse, M. J., et al. (2017). Early formation of planetary building blocks inferred from Pb isotopic ages of chondrules. Science Advances 3, e1700407. arXiv:1708.02631 doi:10.48550/arXiv.1708.02631 bollard2017

Bosman, S. E. I., Davies, F. B., Becker, G. D., et al. (2022). Hydrogen reionisation ends by z=5.3: Lyman-α optical depth measured by the XQR-30 sample. MNRAS 514, 55. arXiv:2108.03699 DOI 10.1093/mnras/stac1046 doi:10.1093/mnras/stac1046 bosman2022

Bowman, J. D., Rogers, A. E. E., Monsalve, R. A., Mozdzen, T. J., Mahesh, N. (2018). An absorption profile centred at 78 megahertz in the sky-averaged spectrum. Nature 555, 67–70. arXiv:1810.05912 DOI 10.1038/nature25792 doi:10.1038/nature25792 bowman2018

Boylan-Kolchin, M. (2023). Stress testing ΛCDM with high-redshift galaxy candidates. Nature Astronomy 7, 731–735. arXiv:2208.01611 DOI 10.1038/s41550-023-01937-7 doi:10.1038/s41550-023-01937-7 boylankolchin2023

Brocks, J. J., Jarrett, A. J. M., Sirantoine, E., Hallmann, C., Hoshino, Y., Liyanage, T. (2017). The rise of algae in Cryogenian oceans and the emergence of animals. Nature 548, 578–581. doi:10.1038/nature23457 brocks2017

Camphuis, E., Quan, W., Balkenhol, L., et al. (SPT-3G Collaboration) (2025). SPT-3G D1: CMB temperature and polarization power spectra and cosmology from 2019 and 2020 observations of the SPT-3G Main field. Physical Review D. arXiv:2506.20707 DOI 10.48550/arXiv.2506.20707 doi:10.48550/arXiv.2506.20707 camphuis2025

Canetti, L., Drewes, M., Shaposhnikov, M. (2012). Matter and Antimatter in the Universe. New Journal of Physics 14, 095012. arXiv:1204.4186 doi:10.1088/1367-2630/14/9/095012 canetti2012

Canup, R. M., Righter, K., Dauphas, N., et al. (2021, prépublication). Origin of the Moon. Chapitre de « New Views of the Moon II ». arXiv:2103.02045 doi:10.48550/arXiv.2103.02045 canup2021

Carniani, S., Hainline, K., D'Eugenio, F., Eisenstein, D. J., et al. (2024). Spectroscopic confirmation of two luminous galaxies at a redshift of 14. Nature 633, 318–322. arXiv:2405.18485 DOI 10.1038/s41586-024-07860-9 doi:10.1038/s41586-024-07860-9 carniani2024

Carroll, S. M. (2018). Why is there something, rather than nothing? Contribution à la Routledge Companion to the Philosophy of Physics. arXiv:1802.02231 DOI 10.48550/arXiv.1802.02231 doi:10.48550/arXiv.1802.02231 carroll2018

Casimir, H. B. G. (1948). On the attraction between two perfectly conducting plates. Proceedings of the Koninklijke Nederlandse Akademie van Wetenschappen 51, 793–795 (communiqué le 29 mai 1948). casimir1948

CERN (2025). A new piece in the matter–antimatter puzzle. Communiqué, home.cern (annonce du 25 mars 2025, publication Nature du 16 juillet 2025). cern2025lhcb

Chaudhary, H., Capozziello, S., Sharma, V. K., Gómez-Vargas, I., Mustafa, G. (2025, rév. 2026). Evidence for evolving dark energy from DESI DR2 BAO and Pantheon+, DES-Dovekie, and Union3. European Physical Journal C. arXiv:2508.10514 chaudhary2025

Citron, R. I., Stewart, S. T. (2022). Large Impacts onto the Early Earth: Planetary Sterilization and Iron Delivery. Planetary Science Journal. arXiv:2201.09349 doi:10.48550/arXiv.2201.09349 citron2022

Clowe, D., Bradač, M., Gonzalez, A. H., Markevitch, M., Randall, S. W., Jones, C., Zaritsky, D. (2006). A direct empirical proof of the existence of dark matter. Astrophysical Journal 648, L109–L113. arXiv:astro-ph/0608407 DOI 10.1086/508162 doi:10.1086/508162 clowe2006

Cohen, A. G., De Rújula, A., Glashow, S. L. (1998). A Matter-Antimatter Universe? Astrophysical Journal 495, 539-549. arXiv:astro-ph/9707087 doi:10.1086/305328 cohen1998

Connelly, J. N., Bizzarro, M., Krot, A. N., Nordlund, Å., Wielandt, D., Ivanova, M. A. (2012). The absolute chronology and thermal processing of solids in the solar protoplanetary disk. Science 338, 651–655. connelly2012

Côté, B., Eichler, M., Arcones, A., Hansen, C. J., Simonetti, P., Frebel, A., Fryer, C. L., Pignatari, M., Reichert, M., Belczynski, K., Matteucci, F. (2019). Neutron Star Mergers Might Not Be the Only Source of r-process Elements in the Milky Way. The Astrophysical Journal 875, 106. arXiv:1809.03525 doi:10.3847/1538-4357/ab10db cote2019

Cowan, J. J., Sneden, C., Lawler, J. E., et al. (2021). Origin of the heaviest elements: the rapid neutron-capture process. Reviews of Modern Physics 93, 015002. arXiv:1901.01410 DOI 10.1103/RevModPhys.93.015002 doi:10.1103/RevModPhys.93.015002 cowan2021

Davidson, S., Nardi, E., Nir, Y. (2008). Leptogenesis. Physics Reports 466, 105-177. arXiv:0802.2962 doi:10.1016/j.physrep.2008.06.002 davidson2008

Dekel, A., Sarkar, K. S., Birnboim, Y., Mandelker, N., Li, Z. (2023). Efficient formation of massive galaxies at cosmic dawn by feedback-free starbursts. MNRAS 523, 3201. arXiv:2303.04827 DOI 10.1093/mnras/stad1557 doi:10.1093/mnras/stad1557 dekel2023

Desch, S. J., Dunlap, D. R., Dunham, E. T., Williams, C. D., Mane, P. (2023). Statistical chronometry of meteorites. I. A test of ^{26}Al homogeneity and the Pb-Pb age of the solar system's t=0. Icarus. arXiv:2212.00390 DOI 10.1016/j.icarus.2023.115607 doi:10.1016/j.icarus.2023.115607 desch2023

DESI Collaboration (2025). DESI DR2 Results II: Measurements of Baryon Acoustic Oscillations and Cosmological Constraints. Physical Review D 112, 083515. arXiv:2503.14738 DOI 10.48550/arXiv.2503.14738 doi:10.48550/arXiv.2503.14738 desi2025

Diaz Dorronsoro, J., Halliwell, J. J., Hartle, J. B., Hertog, T., Janssen, O. (2017). The Real No-Boundary Wave Function in Lorentzian Quantum Cosmology. Physical Review D 96, 043505. arXiv:1705.05340 doi:10.1103/PhysRevD.96.043505 dorronsoro2017

dos Reis, M., Thawornwattana, Y., Angelis, K., Telford, M. J., Donoghue, P. C. J., Yang, Z. (2015). Uncertainty in the timing of origin of animals and the limits of precision in molecular timescales. Current Biology. doi:10.1016/j.cub.2015.09.066 dosreis2015

Edwards, G. H., Keller, C. B., Newton, E. R., Stewart, C. W. (2024). An early giant planet instability recorded in asteroidal meteorites. Nature Astronomy. arXiv:2309.10906 doi:10.1038/s41550-024-02340-6 edwards2024

Eisenstein, D. J., Zehavi, I., Hogg, D. W., et al. (2005). Detection of the Baryon Acoustic Peak in the Large-Scale Correlation Function of SDSS Luminous Red Galaxies. Astrophysical Journal 633, 560. arXiv:astro-ph/0501171 DOI 10.48550/arXiv.astro-ph/0501171 doi:10.48550/arXiv.astro-ph/0501171 eisenstein2005

référence introuvable energie-matiere-noires-age

référence introuvable energie-matiere-noires-knox

ESA (2013). Planck reveals an almost perfect Universe. Communiqué, 21 mars 2013. esa2013planck

ESA (2015). Planck reveals first stars were born late. Communiqué, 5 février 2015. esa2015reion

Feldbrugge, J., Lehners, J.-L., Turok, N. (2017). Lorentzian Quantum Cosmology. Physical Review D 95, 103508. arXiv:1703.02076 DOI 10.1103/PhysRevD.95.103508 doi:10.1103/PhysRevD.95.103508 feldbrugge2017

Ferrara, A., Pallottini, A., Dayal, P. (2023). On the stunning abundance of super-early, massive galaxies revealed by JWST. MNRAS. arXiv:2208.00720 DOI 10.1093/mnras/stad1095 doi:10.1093/mnras/stad1095 ferrara2023

Feulner, G. (2012). The faint young Sun problem. Reviews of Geophysics 50, RG2006. arXiv:1204.4449 doi:10.1029/2011RG000375 feulner2012

Fields, B. D., Molaro, P., Sarkar, S. (2014). Big-Bang Nucleosynthesis. Revue du Particle Data Group, in K. A. Olive et al. (PDG), Chinese Physics C 38, 090001 (2014). arXiv:1412.1408 fields2014pdg

Fields, B. D., Olive, K. A., Yeh, T.-H., Young, C. (2020). Big-Bang Nucleosynthesis after Planck. JCAP 03, 010. arXiv:1912.01132 DOI 10.1088/1475-7516/2020/03/010 doi:10.1088/1475-7516/2020/03/010 fields2020

Fixsen, D. J. (2009). The Temperature of the Cosmic Microwave Background. Astrophysical Journal 707, 916–920. arXiv:0911.1955 DOI 10.1088/0004-637X/707/2/916 doi:10.1088/0004-637X/707/2/916 fixsen2009

Feldbrugge, J., Lehners, J.-L., Turok, N. (2017). No smooth beginning for spacetime. Physical Review Letters 119, 171301. arXiv:1705.00192 doi:10.1103/PhysRevLett.119.171301 flt2017b

Fukugita, M., Yanagida, T. (1986). Baryogenesis without grand unification. Physics Letters B 174, 45-47. fukugita1986

Ganguly, S., Jung, T. H., Park, T.-S., Shin, C. S. (2026). Bipartite Solution to the Lithium Problem. Prépublication arXiv:2604.01324. ganguly2026

Gibson, T. M., Shih, P. M., Cumming, V. M., Fischer, W. W., Crockford, P. W., et al., Halverson, G. P. (2018). Precise age of Bangiomorpha pubescens dates the origin of eukaryotic photosynthesis. Geology 46(2), 135–138. doi:10.1130/G39829.1 gibson2018

Godet, V. (2026). Inflation and topology from the no-boundary state. arXiv:2605.05317 (prépublication, révisée juin 2026) godet2026

Goldman, A. D., Becerra, A. (2024). A New View of the Last Universal Common Ancestor. Journal of Molecular Evolution. doi:10.1007/s00239-024-10193-w goldman2024

Grünbaum, A. (1989). The Pseudo-Problem of Creation in Physical Cosmology. Philosophy of Science 56(3), 373–394. grunbaum1989

Gurzadyan, V. G., Penrose, R. (2010). Concentric circles in WMAP data may provide evidence of violent pre-Big-Bang activity. arXiv:1011.3706 DOI 10.48550/arXiv.1011.3706 doi:10.48550/arXiv.1011.3706 gurzadyan2010

Phys.org (mai 2017). Rumors of inflationary theory's demise premature, researchers say (sur la lettre de Guth, Linde, Kaiser, Nomura et al. à Scientific American, 10 mai 2017). guth2017letter

H0DN Collaboration: Casertano, S., Anand, G., Anderson, R. I., et al. (2025). The Local Distance Network: a community consensus report on the measurement of the Hubble constant at 1% precision. arXiv:2510.23823 (Astronomy & Astrophysics, 2026). DOI 10.48550/arXiv.2510.23823 doi:10.48550/arXiv.2510.23823 h0dn2025

Hartle, J. B., Hawking, S. W. (1983). Wave function of the Universe. Physical Review D 28, 2960. DOI 10.1103/PhysRevD.28.2960 doi:10.1103/PhysRevD.28.2960 hartle1983

Hashimoto, T., Laporte, N., Mawatari, K., Ellis, R. S., et al. (2018). The onset of star formation 250 million years after the Big Bang. Nature 557, 392–395. arXiv:1805.05966 hashimoto2018

Helmi, A., Babusiaux, C., Koppelman, H. H., Massari, D., Veljanoski, J., Brown, A. G. A. (2018). The merger that led to the formation of the Milky Way's inner stellar halo and thick disk. Nature 563, 85. arXiv:1806.06038 DOI 10.1038/s41586-018-0625-x doi:10.1038/s41586-018-0625-x helmi2018

Hinshaw, G., Larson, D., Komatsu, E., et al. (2013). Nine-Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Observations: Cosmological Parameter Results. Astrophysical Journal Supplement 208, 19. arXiv:1212.5226 DOI 10.1088/0067-0049/208/2/19 doi:10.1088/0067-0049/208/2/19 hinshaw2013

Hoffman, P. F., Abbot, D. S., Ashkenazy, Y., Benn, D. I., Brocks, J. J., et al. (2017). Snowball Earth climate dynamics and Cryogenian geology-geobiology. Science Advances 3, e1600983. doi:10.1126/sciadv.1600983 hoffman2017

Hogg, D. W. (1999, rév. 2000). Distance measures in cosmology. arXiv:astro-ph/9905116. doi:10.48550/arXiv.astro-ph/9905116 hogg1999

Howk, J. C., Lehner, N., Fields, B. D., Mathews, G. J. (2012). Observation of interstellar lithium in the low-metallicity Small Magellanic Cloud. Nature 489, 121. arXiv:1207.3081 DOI 10.1038/nature11407 doi:10.1038/nature11407 howk2012

Hoyt, T. J., Jang, I. S., Freedman, W. L., Madore, B. F., Owens, K. A., Lee, A. J. (2025). The Chicago Carnegie Hubble Program: Improving the Calibration of SNe Ia with JWST Measurements of the Tip of the Red Giant Branch. arXiv:2503.11769 (Astrophysical Journal). DOI 10.48550/arXiv.2503.11769 doi:10.48550/arXiv.2503.11769 hoyt2025

Hu, W., Dodelson, S. (2002). Cosmic Microwave Background Anisotropies. Annual Review of Astronomy and Astrophysics 40, 171–216. arXiv:astro-ph/0110414 DOI 10.48550/arXiv.astro-ph/0110414 doi:10.48550/arXiv.astro-ph/0110414 hu2002

Ijjas, A., Steinhardt, P. J., Loeb, A. (2013). Inflationary paradigm in trouble after Planck2013. Physics Letters B 723, 261–266. arXiv:1304.2785 ijjas2013

Izidoro, A., Piani, L. (2022). Origin of Water in the Terrestrial Planets: Insights from Meteorite Data and Planet Formation Models. Elements 18 (3), 181–186. arXiv:2302.02674 doi:10.2138/gselements.18.3.181 izidoro2022

Izzo, L., Molaro, P., Cescutti, G., et al. (2022). Detection of ^{7}Be II in the Small Magellanic Cloud. MNRAS. arXiv:2112.11859 DOI 10.1093/mnras/stab3761 doi:10.1093/mnras/stab3761 izzo2022

Jaffe, R. L. (2005). The Casimir Effect and the Quantum Vacuum. Physical Review D 72, 021301. arXiv:hep-th/0503158 doi:10.1103/PhysRevD.72.021301 jaffe2005

Ji, A. P., Frebel, A., Chiti, A., Simon, J. D. (2016). R-process enrichment from a single event in an ancient dwarf galaxy. Nature 531, 610–613. arXiv:1512.01558 doi:10.1038/nature17425 ji2016

Jow, D. L., Scott, D. (2020). Re-evaluating evidence for Hawking points in the CMB. JCAP 03, 021. arXiv:1909.09672 DOI 10.1088/1475-7516/2020/03/021 doi:10.1088/1475-7516/2020/03/021 jow2020

Kasen, D., Metzger, B., Barnes, J., Quataert, E., Ramirez-Ruiz, E. (2017). Origin of the heavy elements in binary neutron-star mergers from a gravitational-wave event. Nature 551, 80. arXiv:1710.05463 DOI 10.1038/nature24453 doi:10.1038/nature24453 kasen2017

Klessen, R. S., Glover, S. C. O. (2023). The first stars: formation, properties, and impact. Annual Review of Astronomy and Astrophysics 61, 65–130. arXiv:2303.12500 DOI 10.48550/arXiv.2303.12500 doi:10.48550/arXiv.2303.12500 klessen2023

Knox, L., Millea, M. (2020). The Hubble Hunter's Guide. Physical Review D 101, 043533. arXiv:1908.03663 DOI 10.1103/PhysRevD.101.043533 doi:10.1103/PhysRevD.101.043533 knox2020

Kobayashi, C., Karakas, A. I., Lugaro, M. « The Origin of Elements from Carbon to Uranium ». *The Astrophysical Journal* 900(2), 179 (2020). doi:10.3847/1538-4357/abae65 kobayashi2020

Koo, B.-C., Lee, Y.-H., Moon, D.-S., Yoon, S.-C., Raymond, J. C. (2013). Phosphorus in the Young Supernova Remnant Cassiopeia A. Science 342, 1346. arXiv:1312.3807 doi:10.1126/science.1243823 koo2013

Korn, A. J. (2024). The ups and downs of inferred cosmological lithium. EPJ Web of Conferences 297, 01007. arXiv:2406.09974 korn2024

Krauss, L. M., Scherrer, R. J. (2007). The Return of a Static Universe and the End of Cosmology. General Relativity and Gravitation. arXiv:0704.0221 DOI 10.48550/arXiv.0704.0221 doi:10.48550/arXiv.0704.0221 krauss2007

Kruijer, T. S., Burkhardt, C., Budde, G., Kleine, T. (2017). Age of Jupiter inferred from the distinct genetics and formation times of meteorites. PNAS 114, 6712–6716. doi:10.1073/pnas.1704461114 kruijer2017

Lamoreaux, S. K. (1997). Demonstration of the Casimir Force in the 0.6 to 6 μm Range. Physical Review Letters 78, 5–8. doi:10.1103/PhysRevLett.78.5 lamoreaux1997

Berkeley Lab News Center (19 mars 2025). New DESI Results Strengthen Hints That Dark Energy May Evolve. lbl-desi2025

Leibniz, G. W. (1714). Principes de la nature et de la grâce fondés en raison, §7–8. Wikisource. leibniz1714

Lesnefsky, J. E., Easson, D. A., Davies, P. C. W. (2023). On the past-completeness of inflationary spacetimes. Physical Review D 107, 044024. arXiv:2207.00955 DOI 10.1103/PhysRevD.107.044024 doi:10.1103/PhysRevD.107.044024 lesnefsky2023

Levan, A., Gompertz, B. P., Salafia, O. S., Bulla, M., Burns, E., Hotokezaka, K., Izzo, L., et al. (2024, en ligne 2023). Heavy-element production in a compact object merger observed by JWST. Nature 626. arXiv:2307.02098 doi:10.1038/s41586-023-06759-1 levan2024

LHCb Collaboration (2025). Observation of charge–parity symmetry breaking in baryon decays. Nature 643, 1223-1228. arXiv:2503.16954 doi:10.1038/s41586-025-09119-3 lhcb2025

Lichtenberg, T., Schaefer, L. K., Nakajima, M., Fischer, R. A. (2023). Geophysical Evolution During Rocky Planet Formation. In Protostars and Planets VII (ASP Conf. Ser. 534). arXiv:2203.10023 lichtenberg2023

Kavli IPMU, page programme LiteBIRD. litebird-ipmu

Kavli IPMU (1er décembre 2025). LiteBIRD Mission Takes One Step Forward. litebird2025

Luminet, J.-P. (2015). Lemaître's Big Bang. Frontiers of Fundamental Physics 14 (Marseille, 2014). arXiv:1503.08304. luminet2015

Luu, H. N., Qiu, Y.-C., Tye, S.-H. H. (2025). The Lifespan of our Universe. JCAP (2025). arXiv:2506.24011 DOI 10.48550/arXiv.2506.24011 doi:10.48550/arXiv.2506.24011 luu2025

Berkeley Lab News Center (8 décembre 2025). LZ Sets a World's Best in the Hunt for Galactic Dark Matter and Gets a New Look at Neutrinos from the Sun's Core. lz2025

Madau, P., Giallongo, E., Grazian, A., Haardt, F. (2024). Cosmic reionization in the JWST era: back to AGNs? The Astrophysical Journal. arXiv:2406.18697 DOI 10.48550/arXiv.2406.18697 doi:10.48550/arXiv.2406.18697 madau2024

Maldacena, J. (2024, révisé octobre 2024). Comments on the no boundary wavefunction and slow roll inflation. arXiv:2403.10510 doi:10.48550/arXiv.2403.10510 maldacena2024

Marchi, S., Bottke, W. F., Elkins-Tanton, L. T., Bierhaus, M., Wuennemann, K., Morbidelli, A., Kring, D. A. (2014). Widespread mixing and burial of Earth's Hadean crust by asteroid impacts. Nature 511, 578–582. doi:10.1038/nature13539 marchi2014

Martin, J. (2012). Everything You Always Wanted To Know About The Cosmological Constant Problem (But Were Afraid To Ask). Comptes Rendus Physique 13, 566–665. arXiv:1205.3365 doi:10.1016/j.crhy.2012.04.008 martin2012

Masseron, T., García-Hernández, D. A., Santoveña, R., Manchado, A., Zamora, O., Manteiga, M., Dafonte, C. (2020). Phosphorus-rich stars with unusual abundances are challenging theoretical predictions. Nature Communications 11, 3759. arXiv:2008.01633 doi:10.1038/s41467-020-17649-9 masseron2020

Miranda, O. D. (2025). The cosmological lithium problem. Astronomy & Astrophysics 701, A164. arXiv:2508.09821 DOI 10.1051/0004-6361/202554482 doi:10.1051/0004-6361/202554482 miranda2025

Mithani, A., Vilenkin, A. (2012). Did the universe have a beginning? arXiv:1204.4658 DOI 10.48550/arXiv.1204.4658 doi:10.48550/arXiv.1204.4658 mithani2012

Mojzsis, S. J., Harrison, T. M., Pidgeon, R. T. (2001). Oxygen-isotope evidence from ancient zircons for liquid water at the Earth's surface 4,300 Myr ago. Nature 409, 178–181. doi:10.1038/35051557 mojzsis2001

Moody, E. R. R., Álvarez-Carretero, S., Mahendrarajah, T. A., et al. (2024). The nature of the last universal common ancestor and its impact on the early Earth system. Nature Ecology & Evolution 8(9), 1654–1666. doi:10.1038/s41559-024-02461-1 moody2024

Muñoz, J. B., Mirocha, J., Chisholm, J., Furlanetto, S. R., Mason, C. (2024). Reionization after JWST: a photon budget crisis? MNRAS Letters. arXiv:2404.07250 DOI 10.1093/mnrasl/slae086 doi:10.1093/mnrasl/slae086 munoz2024

Naidu, R. P., Oesch, P. A., Brammer, G., et al. « A Cosmic Miracle: A Remarkably Luminous Galaxy at z_spec = 14.44 Confirmed with JWST ». *Open Journal of Astrophysics* 9, 156033 (2026). doi:10.33232/001c.156033 (publication finale) ; 10.48550/arXiv.2505.11263 (préversion arXiv) naidu2025

NASA Science, « WMAP Overview » (page de mission). nasa-wmap

NASA Astrobiology (2019). On the Ground in Greenland. Compte rendu de la visite de terrain d'août 2019 au site A d'Isua. nasa2019isua

Natural History Museum (Londres), communiqué (2025) sur Feng, X. et al., « The phylogenetic position of the Yunxian cranium elucidates the origin of Homo longi and the Denisovans », Science. doi:10.1126/science.ado9202 nhm2025yunxian

Nimmo, F., Kleine, T., Morbidelli, A. (2024). Tidally driven remelting around 4.35 billion years ago indicates the Moon is old. Nature 636, 598–602. doi:10.1038/s41586-024-08231-0 nimmo2024

NIST (2023). Why Does Matter Exist? Roundness of Electrons May Hold Clues. Actualité NIST, juillet 2023 (résultat JILA, Roussy et al., Science 2023). nist2023edm

Nutman, A. P., Bennett, V. C., Friend, C. R. L., Van Kranendonk, M. J., Chivas, A. R. (2016). Rapid emergence of life shown by discovery of 3,700-million-year-old microbial structures. Nature 537, 535–538. doi:10.1038/nature19355 nutman2016

Patel, A., Metzger, B. D., Cehula, J., Burns, E., Goldberg, J. A., Thompson, T. A. (2025). Direct evidence for r-process nucleosynthesis in delayed MeV emission from the SGR 1806-20 magnetar giant flare. Astrophysical Journal Letters 984, L29. arXiv:2501.09181 DOI 10.48550/arXiv.2501.09181 doi:10.48550/arXiv.2501.09181 patel2025

Groom, D. E., Scott, D. (révision août 2019). Astrophysical Constants and Parameters, Table 2.1. In Tanabashi, M., et al. (Particle Data Group), Phys. Rev. D 98, 030001 (2018) et mise à jour 2019. pdg2019-astro

Penzias, A. A., Wilson, R. W. (1965). A Measurement of Excess Antenna Temperature at 4080 Mc/s. Astrophysical Journal 142, 419–421. penzias1965

Perlmutter, S., Aldering, G., Goldhaber, G., et al. (Supernova Cosmology Project) (1999). Measurements of Omega and Lambda from 42 High-Redshift Supernovae. Astrophysical Journal 517, 565. arXiv:astro-ph/9812133 DOI 10.48550/arXiv.astro-ph/9812133 doi:10.48550/arXiv.astro-ph/9812133 perlmutter1999

Piani, L., Marrocchi, Y., Rigaudier, T., Vacher, L. G., Thomassin, D., Marty, B. (2020). Earth's water may have been inherited from material similar to enstatite chondrite meteorites. Science 369, 1110–1113. doi:10.1126/science.aba1948 piani2020

Planavsky, N. J., Reinhard, C. T., Wang, X., Thomson, D., McGoldrick, P., Rainbird, R. H., Johnson, T., Fischer, W. W., Lyons, T. W. (2014). Low Mid-Proterozoic atmospheric oxygen levels and the delayed rise of animals. Science 346, 635–638. doi:10.1126/science.1258410 planavsky2014

Planck Collaboration (2020). Planck 2018 results. VI. Cosmological parameters. Astronomy & Astrophysics 641, A6. arXiv:1807.06209 DOI 10.1051/0004-6361/201833910 doi:10.1051/0004-6361/201833910 planck2018

Planck Collaboration. « Planck 2018 results. X. Constraints on inflation ». *Astronomy & Astrophysics* 641, A10 (2020). doi:10.1051/0004-6361/201833887 planck2018inf

Planck Collaboration (14 mai 2019). Planck 2018 Results: Cosmological Parameter Tables (v2). Planck Legacy Archive, ESA. Tables 2.17 et 2.18. planck2018tab

Popovic, B., Shah, P., Kenworthy, W. D., Kessler, R., Davis, T. M., et al. (DES Collaboration) (2026). The Dark Energy Survey supernova program: a reanalysis of cosmology results and evidence for evolving dark energy with an updated Type Ia supernova calibration. MNRAS 548, stag632. DOI 10.1093/mnras/stag632 doi:10.1093/mnras/stag632 popovic2026

Poulton, S. W., Bekker, A., Cumming, V. M., Zerkle, A. L., Canfield, D. E., Johnston, D. T. (2021). A 200-million-year delay in permanent atmospheric oxygenation. Nature 592, 232–236. doi:10.1038/s41586-021-03393-7 poulton2021

Quanta Magazine (20 novembre 2024). All Life on Earth Today Descended From a Single Cell. Meet LUCA. quanta2024luca

Richter, D., Grün, R., Joannes-Boyau, R., et al., Hublin, J.-J., McPherron, S. P. (2017). The age of the hominin fossils from Jebel Irhoud, Morocco, and the origins of the Middle Stone Age. Nature 546, 293–296. doi:10.1038/nature22335 richter2017

Riess, A. G., Filippenko, A. V., Challis, P., et al. (1998). Observational Evidence from Supernovae for an Accelerating Universe and a Cosmological Constant. Astronomical Journal 116, 1009–1038. arXiv:astro-ph/9805201 DOI 10.1086/300499 doi:10.1086/300499 riess1998

Riess, A. G., Yuan, W., Macri, L. M., et al. (2022). A Comprehensive Measurement of the Local Value of the Hubble Constant with 1 km/s/Mpc Uncertainty from HST and the SH0ES Team. Astrophysical Journal Letters. arXiv:2112.04510 DOI 10.48550/arXiv.2112.04510 doi:10.48550/arXiv.2112.04510 riess2022

Ritter, C., Andrassy, R., Côté, B., Herwig, F., Woodward, P. R., Pignatari, M., Jones, S. (2018). Convective-reactive nucleosynthesis of K, Sc, Cl and p-process isotopes in O-C shell mergers. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. arXiv:1704.05985 doi:10.48550/arXiv.1704.05985 ritter2018

Rubin, V. C., Ford, W. K., Thonnard, N. (1980). Rotational properties of 21 Sc galaxies with a large range of luminosities and radii, from NGC 4605 (R = 4 kpc) to UGC 2885 (R = 122 kpc). Astrophysical Journal 238, 471–487. rubin1980

Rugh, S. E., Zinkernagel, H. (2009). On the physical basis of cosmic time. Studies in History and Philosophy of Modern Physics 40, 1–19. arXiv:0805.1947 doi:10.1016/j.shpsb.2008.06.001 rugh2009

Sakharov, A. D. (1967). Violation of CP Invariance, C Asymmetry, and Baryon Asymmetry of the Universe. JETP Letters 5, 24-27. sakharov1967

Schouws, S., Bouwens, R. J., Ormerod, K., et al. (2025). Detection of [OIII]88μm in JADES-GS-z14-0 at z=14.1793. The Astrophysical Journal. arXiv:2409.20549 DOI 10.48550/arXiv.2409.20549 doi:10.48550/arXiv.2409.20549 schouws2025

ScienceDaily, « Ancient global warming drove early primates' dispersal » (juillet 2006), sur Smith, T., Rose, K. D., Gingerich, P. D. (2006), Proceedings of the National Academy of Sciences. sciencedaily2006teilhardina

Seifert, A., Lane, Z. G., Galoppo, M., Ridden-Harper, R., Wiltshire, D. L. (2025). Supernovae evidence for foundational change to cosmological models. MNRAS Letters 537, L55. arXiv:2412.15143 doi:10.48550/arXiv.2412.15143 seifert2025

Siegel, D. M., Barnes, J., Metzger, B. D. (2019). Collapsars as a major source of r-process elements. Nature 569, 241. arXiv:1810.00098 doi:10.1038/s41586-019-1136-0 siegel2019

Singh, S., Nambissan T., J., Subrahmanyan, R., et al. (2022). On the detection of a cosmic dawn signal in the radio background. Nature Astronomy. arXiv:2112.06778 singh2022

Smeenk, C., Ellis, G. (2017). Philosophy of Cosmology. Stanford Encyclopedia of Philosophy (première publication 26 septembre 2017). Auteurs d'après la notice SEP, non affichés dans l'extrait lu. smeenk-sep

Smoot, G. F., et al. (1992). Structure in the COBE Differential Microwave Radiometer First-Year Maps. Astrophysical Journal 396, L1–L5. smoot1992

Sorensen, R. (2003, révision substantielle 2022). Nothingness. Stanford Encyclopedia of Philosophy. sorensen-sep

Starobinsky like inflation and EGB Gravity in the light of ACT (2025). arXiv:2505.05363 (et articles apparentés, 2025-2026) starob-act

Stevens, N. J., Seiffert, E. R., O'Connor, P. M., et al. (2013). Palaeontological evidence for an Oligocene divergence between Old World monkeys and apes. Nature 497, 611–614. doi:10.1038/nature12161 stevens2013

Sun, G., Faucher-Giguère, C.-A., Hayward, C. C., Shen, X., Wetzel, A., Cochrane, R. K. (2023). Bursty star formation naturally explains the abundance of bright galaxies at cosmic dawn. Astrophysical Journal Letters. arXiv:2307.15305 DOI 10.48550/arXiv.2307.15305 doi:10.48550/arXiv.2307.15305 sun2023

T2K and NOvA Collaborations (2025). Joint neutrino oscillation analysis from the T2K and NOvA experiments. Nature 646, 818-824. arXiv:2510.19888 doi:10.1038/s41586-025-09599-3 t2knova2025

Thielemann, F.-K., Cowan, J. J. (2026). The r-Process: History, Required Conditions, Astrophysical Sites, and Observations. The European Physical Journal A (numéro en hommage à Roberto Gallino). arXiv:2601.17246 thielemann2026

Tostevin, R., Mills, B. J. W. (2020). Reconciling proxy records and models of Earth's oxygenation during the Neoproterozoic and Palaeozoic. Interface Focus. doi:10.1098/rsfs.2019.0137 tostevin2020

Tsujimoto, T., Taniguchi, D., Recio-Blanco, A., Palicio, P. A., de Laverny, P. (2026). Solar twins in Gaia DR3 GSP-Spec II. Age distribution and its implications for the Sun's migration. Astronomy & Astrophysics 707, L11. arXiv:2603.11155 DOI 10.1051/0004-6361/202658914 doi:10.1051/0004-6361/202658914 tsujimoto2026

Archives de l'UCLouvain, exposition « Georges Lemaître, Father of the Big Bang theory » : « Pius XII and the discourse Un'Ora ». ucl-unora

University of Washington News, « Earliest primate fossils » (24 février 2021), sur Wilson Mantilla, G. P., Chester, S. G. B., et al. (2021), Earliest Palaeocene purgatoriids and the initial radiation of stem primates, Royal Society Open Science. doi:10.1098/rsos.210050 uw2021purgatorius

Valley, J. W., Cavosie, A. J., Ushikubo, T., et al. (2014). Hadean age for a post-magma-ocean zircon confirmed by atom-probe tomography. Nature Geoscience 7, 219–223. valley2014

Vilenkin, A. (1982). Creation of universes from nothing. Physics Letters B 117, 25–28 (4 novembre 1982). vilenkin1982

Vilenkin, A. (2015). The Beginning of the Universe. Inference: International Review of Science 1(4), octobre 2015. vilenkin2015

Visbal, E., Hazlett, R., Bryan, G. L. (2025). LAP1-B is the first observed system consistent with theoretical predictions for Population III stars. Astrophysical Journal Letters (accepté). arXiv:2508.03842 DOI 10.48550/arXiv.2508.03842 doi:10.48550/arXiv.2508.03842 visbal2025

Wallner, A., Froehlich, M. B., Hotchkis, M. A. C., Kinoshita, N., Paul, M., Martschini, M., Pavetich, S., Tims, S. G., Kivel, N., Schumann, D., Honda, M., Matsuzaki, H., Yamagata, T. (2021). 60Fe and 244Pu deposited on Earth constrain the r-process yields of recent nearby supernovae. Science 372(6543), 742–745 doi:10.1126/science.aax3972 wallner2021

Wehus, I. K., Eriksen, H. K. (2011). A search for concentric circles in the 7-year WMAP temperature sky maps. Astrophysical Journal Letters 733, L29. arXiv:1012.1268 wehus2011

Westall, F. (2025). What the earliest evidence for life tells us about the early evolution of the biosphere. Philosophical Transactions of the Royal Society B. doi:10.1098/rstb.2024.0106 westall2025

Wikipedia (en), « Abiogenesis », consulté le 30 septembre 2026. wiki-abiogenesis

Wikipedia (en), « Age of the universe », consulté le 27 septembre 2026. wiki-age

Wikipedia (en), « Antinomy », section sur Kant, consultée le 27 septembre 2026. wiki-antinomy

Wikipedia (en), « Avalon assemblage », consulté le 10 octobre 2026. wiki-avalon

Wikipedia (en), « Big Bang nucleosynthesis », consulté le 27 septembre 2026. wiki-bbn

Wikipedia (en), « Big Bang », consulté le 26 septembre 2026. wiki-bigbang

Wikipedia (en), « Cambrian explosion », consulté le 30 septembre 2026. wiki-cambrian

Wikipedia (en), « Casimir effect », consulté le 28 septembre 2026. wiki-casimir

Wikipedia (en), « Carbon-burning process », consulté le 10 octobre 2026. wiki-cburn

Wikipedia (en), « Chronology of the universe », consulté le 26 septembre 2026. wiki-chrono

Wikipedia (en), « Cosmic microwave background », consulté le 27 septembre 2026. wiki-cmb

Wikipedia (en), « Comoving and proper distances », consulté le 27 septembre 2026. wiki-comoving

Wikipedia (en), « Composition of the human body », consulté le 30 septembre 2026. wiki-corps

Wikipedia (en), « Cosmic time », consulté le 27 septembre 2026. wiki-cosmic-time

Wikipedia (en), « Cosmic Calendar », consulté le 30 septembre 2026. wiki-cosmiccal

Wikipedia (en), « Dark energy », consulté le 27 septembre 2026. wiki-de

Wikipedia (en), « Dark matter », consulté le 27 septembre 2026. wiki-dm

Wikipedia (en), « Earliest known life forms », consulté le 30 septembre 2026. wiki-earliestlife

Wikipedia (en), « Eocene–Oligocene extinction event », consulté le 10 octobre 2026. wiki-eot

Wikipedia (en), « Eukaryote », consulté le 30 septembre 2026. wiki-eukaryote

Wikipedia (en), « Extinction event », consulté le 30 septembre 2026. wiki-extinction

Wikipedia (en), « Ultimate fate of the universe », consulté le 27 septembre 2026. wiki-fate

Wikipedia (en), « Friedmann–Lemaître–Robertson–Walker metric », consulté le 27 septembre 2026. wiki-flrw

référence introuvable wiki-frise-na

Wikipedia (en), « Great Oxidation Event », consulté le 30 septembre 2026. wiki-goe

Wikipedia (en), « Hominidae », consulté le 10 octobre 2026. wiki-hominidae

Wikipedia (en), « Human evolution », consulté le 30 septembre 2026. wiki-humanevol

Wikipedia (en), « Cosmic inflation », consulté le 27 septembre 2026. wiki-inflation

Wikipedia (en), « Kalam cosmological argument », consultée le 27 septembre 2026. wiki-kalam

Wikipedia (en), « Lamb shift », consulté le 28 septembre 2026. wiki-lamb

Wikipedia (en), « Nuvvuagittuq Greenstone Belt », consulté le 30 septembre 2026. wiki-nuvvuagittuq

Wikipedia (en), « Observable universe », consulté le 27 septembre 2026. wiki-observable

Wikipedia (en), « Oxygen-burning process », consulté le 10 octobre 2026. wiki-oxyburn

Wikipedia (en), « Lead–lead dating », consulté le 27 septembre 2026. wiki-pbpb

Wikipedia (en), « Paleocene–Eocene Thermal Maximum », consulté le 10 octobre 2026. wiki-petm

Wikipedia (en), « Evolution of primates », consulté le 10 octobre 2026. wiki-primevol

Wikipedia (en), « Quantum vacuum state », consulté le 28 septembre 2026. wiki-qvs

Wikipedia (en), « Recombination (cosmology) », consulté le 27 septembre 2026. wiki-recomb

Wikipedia (en), « Silicon-burning process », consulté le 27 septembre 2026. wiki-sib

Wikipedia (en), « Stellar nucleosynthesis », consulté le 27 septembre 2026. wiki-stellarnuc

Wikipedia (en), « A Universe from Nothing », consultée le 27 septembre 2026. wiki-ufn

Wikipedia (en), « History of writing », consulté le 30 septembre 2026. wiki-writing

Wilde, S. A., Valley, J. W., Peck, W. H., Graham, C. M. (2001). Evidence from detrital zircons for the existence of continental crust and oceans on the Earth 4.4 Gyr ago. Nature 409, 175–178. doi:10.1038/35051550 wilde2001

Wiltshire, D. L. (2007). Cosmic clocks, cosmic variance and cosmic averages. New Journal of Physics 9, 377. arXiv:gr-qc/0702082 doi:10.1088/1367-2630/9/10/377 wiltshire2007

Witstok, J., Jakobsen, P., Maiolino, R., et al. (2025). Witnessing the onset of reionization through Lyman-α emission at redshift 13. Nature. arXiv:2408.16608 DOI 10.1038/s41586-025-08779-5 doi:10.1038/s41586-025-08779-5 witstok2025

Woitke, P., Drążkowska, J., Lammer, H., Kadam, K., Marigo, P. (2024). CAI formation in the early Solar System. Astronomy & Astrophysics 687, A65. arXiv:2404.15715 DOI 10.1051/0004-6361/202450289 doi:10.1051/0004-6361/202450289 woitke2024

Wright, E. L. Cosmology Tutorial, Part 2. UCLA. wright-tuto

Xiang, M., Rix, H.-W. (2022). A time-resolved picture of our Milky Way's early formation history. Nature 603, 599–603. arXiv:2203.12110 DOI 10.1038/s41586-022-04496-5 doi:10.1038/s41586-022-04496-5 xiang2022

Yanagisawa, H., Ouchi, M., Matsumoto, A., et al. (2025). EMPRESS. XV. A New Determination of the Primordial Helium Abundance Suggesting a Moderately Low Yp Value. Accepté dans ApJ. arXiv:2506.24050 yanagisawa2025

Zawaski, M., Kelly, N., Orlandini, O. F., Nichols, C., Allwood, A., Mojzsis, S. (2020). Chemical and structural analysis of proposed ca. 3.7 Ga stromatolites from the Isua Supracrustal Belt (West Greenland) – a reappraisal. Résumé EGU2020-6044. zawaski2020egu