

SERGE FANTINO

Un Monde

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

Récit

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 apparaissions 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 · 15 rédigés · 57 382 mots · état au 18/10/2026

Table des matières

I · LE SEUIL

- 1 Que faisait Dieu avant ? avant $\sim 10^{-43}$ s (ère de Planck)
- 2 De quel rien ?
- 3 L'emballement $\sim 10^{-36}$ à 10^{-32} s

brouillon

brouillon

brouillon

II · LE PREMIER JOUR

- 4 La soupe 10^{-12} s à 1 s
- 5 Trois minutes pour faire l'hydrogène et l'hélium 3 à 20 minutes
- 6 La première lumière 47 000 à 380 000 ans
- 7 Un âge calculé

brouillon

brouillon

brouillon

brouillon

III · LA NUIT ET L'AUBE

- 8 Les âges sombres $\sim 0,4$ à ~ 100 Ma
- 9 Les premières étoiles ~ 100 à ~ 270 Ma ($z \approx 30$ à 15)
- 10 Trop tôt, trop brillantes dès ~ 280 Ma
- 11 Le rallumage $\sim 0,3$ à $\sim 1,1$ Ga

brouillon

brouillon

brouillon

brouillon

IV · DES ÉTOILES AU SOLEIL

- 12 La forge
- 13 L'or des catastrophes
- 14 Une Galaxie agitée dès $\sim 0,8$ Ga ; fusion il y a 10 à 11 Ga
- 15 Le Soleil arrive tard $\sim 9,2$ Ga (il y a $\sim 4\,567$ Ma)

brouillon

brouillon

brouillon

brouillon

V · UNE PLANÈTE ET DES VIVANTS

- 16 Le disque et les planètes premiers millions d'années après le $t = 0$
- 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 des premières traces de vie ($\sim 3,5$ Ga, candidats plus anciens contestés) à aujourd'hui

storyboard · 7 plan(s)

storyboard · 8 plan(s)

storyboard · 7 plan(s)

storyboard · 6 plan(s)

storyboard · 8 plan(s)

VI · L'UNIVERS QUI ACCÉLÈRE

- 21 Ce qu'on ne voit pas
- 22 Le tournant $\sim 9,8$ Ga (découverte en 1998)
- 23 Deux mesures qui ne s'accordent pas aujourd'hui ($\sim 13,8$ Ga)
- 24 Un ciel qui se vide futur

storyboard · 7 plan(s)

storyboard · 6 plan(s)

storyboard · 7 plan(s)

synopsis seul

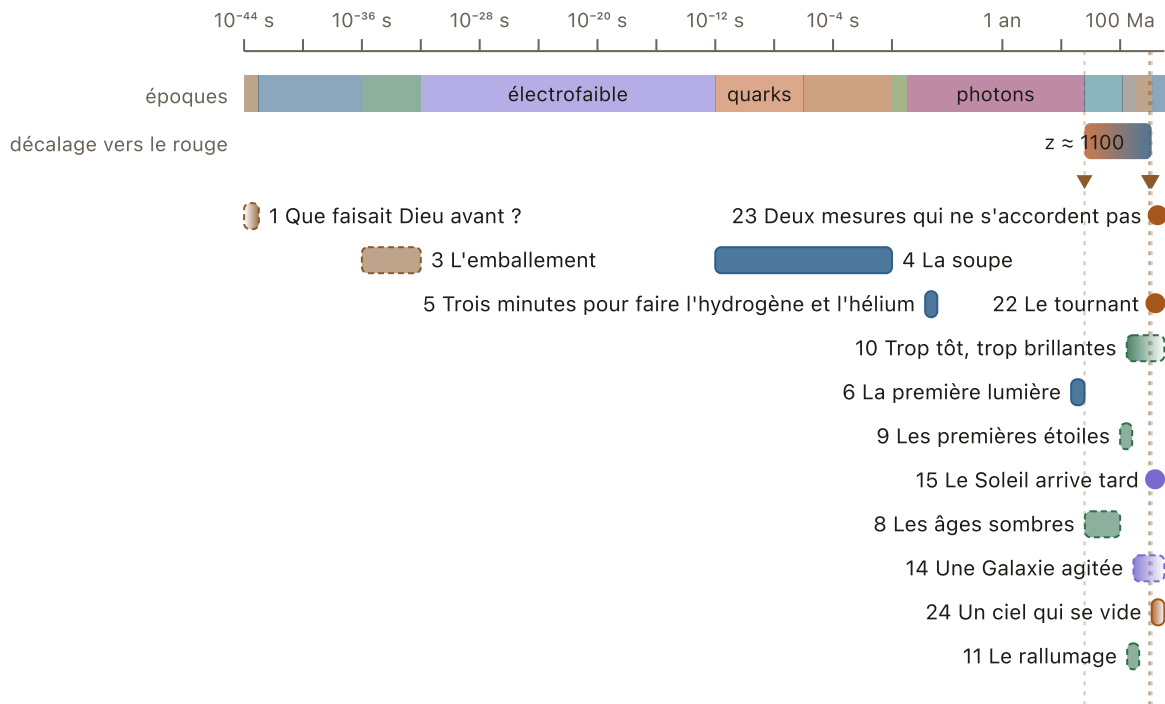
VII · ÉPILOGUE

- 25 Qui raconte ?

synopsis seul

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

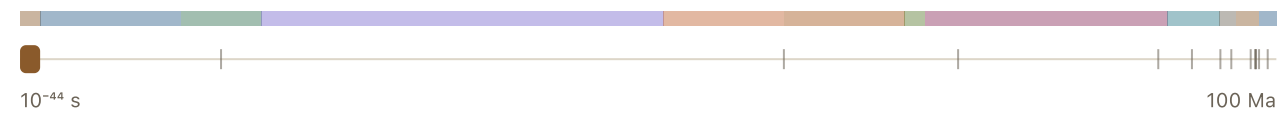
Peut-on dire comment, et même si, l'Univers a commencé ?

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

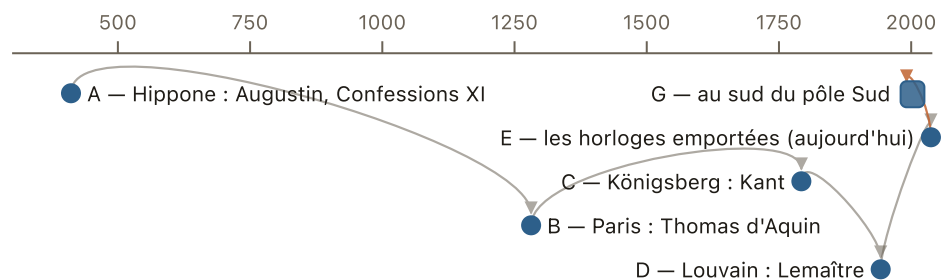
Que faisait Dieu avant ?

avant $\sim 10^{-43}$ s (ère de Planck)

brouillon · 3058 mots



LES SCÈNES DU RÉCIT



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

Hippone, la lampe

Hippone, vers l'an 400. Les navires dorment le long du quai, les cordages pendent, la mer bouge à peine sous les murs. La ville est éteinte. Près du port, une seule fenêtre tient encore sa lueur : un homme y écrit à la lampe à huile, et ce qu'il écrit, il le dit à la première personne, pour lui-même, à voix presque basse. Il est l'évêque de cette ville. Il s'appelle Augustin, et il en est au onzième livre de ses Confessions.

Dans la journée on la lui a rapportée encore, la question qu'on oppose aux siens pour rire : que faisait Dieu avant de créer le monde ? Elle montre un Dieu assis, les mains vides, pendant une durée sans mesure, et qui un jour se lève. Ceux qui la posent n'attendent rien ; ils regardent l'évêque chercher ses mots.

Il écrit d'abord la réponse d'un autre, qui s'en tirait par une plaisanterie : il préparait l'enfer pour ceux qui scrutent de trop près. Augustin la pose sur la page et la laisse là. Celui qui menace n'a pas répondu ; la question est restée entière devant lui. Et la menace, sans le vouloir, accorde ce qu'elle prétendait fermer : un avant, où Dieu avait de quoi s'occuper.

Il retourne la question comme on retourne une pierre, et il regarde ce qu'elle cachait dessous : une horloge. Une horloge qui tournerait hors du monde, avant qu'il y ait quoi que ce soit, et sur le cadran de laquelle Dieu aurait attendu. Il ôte l'horloge. Le temps, écrit-il, est créé avec le ciel et la terre ; il fait partie de l'ouvrage. Aucune place ne précède le monde, et « il n'y avait pas d'"alors" quand il n'y avait pas de temps ».

Quelques pages plus loin, dans le même livre, la main s'arrête et avoue : « Qu'est-ce donc que le temps ? Si personne ne me le demande, je le sais. » La lampe baisse. Il a ôté l'avant ; il ne sait pas de quoi le temps est fait, et il l'écrit. Dehors, les navires n'ont pas bougé.

Paris, les livres d'Aristote

Paris, vers 1270. L'hiver est entré dans les salles de l'université ; les pupitres sont couverts de copies d'Aristote, revenues par les traductions, et dans ces livres le monde n'a jamais commencé : il tourne depuis toujours, sans première page. La querelle gronde d'un collège à l'autre. Un dominicain massif, à sa table, trempe la plume pour un traité court, Sur l'éternité du monde. Il s'appelle Thomas, d'Aquin.

Le mot qu'il va écrire, « commencement », porte trois questions qui ne se ressemblent pas, comme trois voyageurs sous un même manteau. La première : le passé est-il fini, arrive-t-on à un bord quand on remonte ? La deuxième : s'il y a un bord, qu'y a-t-il au-delà ? La troisième : pourquoi y a-t-il quelque chose plutôt que rien ? Et celle-ci ne lâcherait pas davantage un monde qui n'aurait jamais commencé ; on pourrait toujours demander à ce monde sans âge pourquoi il est là, lui, plutôt que rien du tout.

Il écrit sa conclusion, et elle déroute ceux qui attendaient d'un théologien qu'il prouve le commencement : aucun argument démonstratif n'est possible, ni dans un sens ni dans l'autre. Dieu aurait pu créer un monde qui a toujours existé. Que le monde ait commencé, Thomas le tient pour vrai ; il le tient par la foi, et il écrit que cela ne se prouve pas.

Ce qu'il sépare, à la chandelle, dans la salle froide, c'est deux mots que tout le monde confond autour de lui. Être créé, c'est dépendre d'une cause. Avoir commencé, c'est avoir eu un premier instant. Un monde pourrait dépendre d'une cause et n'avoir jamais commencé ; un monde pourrait avoir commencé et ne dépendre de rien. Création n'est le nom d'aucune des trois questions. La chandelle brûle ; dehors, la neige tient sur les toits.

Königsberg, deux preuves égales

Königsberg, 1781. La ville est plate et grise, et dans un cabinet où l'horloge murale ne retarde jamais, un homme réglé comme elle écrit la Critique de la raison pure. Il arrive à la première de ses antinomies : deux démonstrations qu'il fait marcher l'une contre l'autre comme deux horloges mises à la même heure. La thèse d'abord : le temps a un commencement. S'il n'en avait pas, une infinité de moments se serait déjà écoulée jusqu'à ce soir ; or une infinité ne se parcourt pas jusqu'au bout, une étape après l'autre ; le présent ne serait jamais venu, et cette page ne serait pas en train de s'écrire.

Puis l'antithèse, et la main n'appuie ni plus ni moins : le temps n'a pas de commencement. S'il en avait un, il faudrait un temps vide d'où le monde serait sorti ; et dans un temps vide rien ne distingue un moment d'un autre, rien n'y change, rien n'y fait signe ; rien n'en sort. Les deux horloges battent à la même seconde.

Deux preuves aussi bonnes l'une que l'autre, et qui se contredisent. Kant n'en garde aucune. Il écrit que la question des limites du temps est dénuée de sens, et il dit d'où vient le mal : on a pris des concepts qui ne valent que pour l'expérience, et on les a appliqués au monde pris comme un tout. Or le monde comme totalité n'a jamais été posé devant personne. Une pierre, on la tient dans la main, on la compare à d'autres, on lui donne un âge ; le monde entier, nul ne l'a tenu, nul ne l'a comparé à rien.

Dans le temps vide de l'antithèse, on reconnaît l'horloge qu'Augustin avait ôtée à Hippone : la même, tournant hors du monde, attendant que le monde sorte d'elle. Si le temps naît avec le monde, l'antithèse perd son appui. Mais le diagnostic de Kant n'épargne pas l'évêque. Augustin aussi parlait du monde entier, et disait de lui que son temps commence avec lui, chose que l'expérience n'atteint pas plus que son contraire. Quatorze siècles les séparent, et ils sont penchés sur le même objet, que ni l'un ni l'autre n'a jamais eu devant les yeux.

Louvain, un peu avant

Louvain, 1931. Un prêtre en col romain, devant un tableau noir, essuie la craie de ses doigts et rédige une note de quelques lignes pour la revue *Nature*. Il s'appelle Georges Lemaître, et il est physicien. Il y écrit 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 ainsi, les notions d'espace et de temps n'ont au commencement aucun sens ; elles n'en prennent un qu'une fois ce quantum divisé. D'où la phrase, qu'il laisse telle quelle : « le commencement du monde a eu lieu un peu avant le commencement de l'espace et du temps ».

Il a dû écrire « avant » pour dire qu'il n'y a pas d'avant. La langue n'a que des mots de temps, et il lui fallait dire une antériorité qui n'est pas de temps, celle d'une condition sur ce qu'elle conditionne ; il a pris le mot qui s'offrait, en sachant qu'il ne convient pas. Augustin, à Hippone, refusait l'« alors » ; Lemaître, à Louvain, accepte l'« avant » et le laisse boiter dans la phrase. C'est le même seuil, abordé par ses deux faces, et la langue y bute des deux côtés.

L'idée est reçue comme on reçoit une théologie. Arthur Eddington, qui règne sur l'astrophysique de son temps, écrit que la notion d'un commencement du monde lui est « répugnante ». Einstein juge l'atome primitif « inspiré par le dogme chrétien de la création », et sans justification du point de vue de la physique. Les grands froncent le nez devant le col romain. Lemaître, lui, tient le commencement physique du monde pour tout autre chose que la création ; il le dira jusque devant le pape. Le soupçon visait à côté.

Les horloges emportées

Entre Kant et Lemaître, le temps a changé deux fois de nature, et la seconde fois il est entré dans le monde. Einstein a d'abord ôté l'horloge universelle : deux voyageurs en mouvement l'un par rapport à l'autre ne découpent pas le monde dans le même « maintenant » ; ce qui est simultanément pour l'un ne l'est pas pour l'autre, et aucune horloge au-dessus d'eux ne départage. Puis, en 1915, il a fait du temps une dimension du monde, nouée à l'espace, qui se courbe et se dilate avec la matière qu'elle contient. Le temps n'est plus le cadre où les choses se passent ; il fait partie du monde. Sur le point qui l'opposait aux moqueurs, Augustin reçoit ici, quinze siècles plus tard, une forme de confirmation : pas de temps hors du monde.

Pourtant on donne un âge à l'Univers. La solution qui le permet a été trouvée deux fois, chacun de son côté : par Alexandre Friedmann en 1922 et 1924, par Lemaître en 1927 ; Robertson et Walker l'ont précisée dans les années 1930. C'est un univers où la matière a partout la même densité et le même aspect dans toutes les directions : ni plus dense ici que là, ni plus peuplé vers le haut que vers le bas.

Dans cet univers, l'espace-temps se découpe en tranches ; chaque tranche est un espace entier, où la matière est également répandue, et le temps cosmique est le numéro de la tranche. Il a des témoins. Ce sont les observateurs comobiles : au repos dans la matière, sans mouvement propre, emportés par l'expansion comme un grain par la pâte qui lève. Chacun porte une horloge ; chacune marque ce temps ; et elles marquent la même heure sur toute la tranche sans s'être jamais parlé.

Ce temps n'est pas dans les équations. Il est dans la solution, dans la manière dont la matière est répartie. Qu'on la répartisse autrement, en amas et en vides immenses, sans tranche où la densité soit partout la même, et il n'y a plus de numéros à donner : un univers très inhomogène n'aurait pas de temps cosmique. C'est un temps porté par le monde, qui existe parce que la matière est homogène, et dans cette mesure seulement.

Ce que ce temps numérote, quand on remonte, c'est une phase chaude et dense, présente partout à la fois sur la tranche. C'est cela, le Big Bang, au sens le plus sûr : pas une explosion dans un espace qui l'aurait attendue, pas un point d'où la matière serait partie vers des bords. Il n'a pas de centre. Chaque tranche se dilate tout entière, en chacun de ses points.

Même l'âge que l'on imprime à cette retenue. Dans les tables de la mission Planck, treize milliards huit cents millions d'années sont définis comme le temps écoulé « depuis le début du Big Bang chaud », non depuis un instant zéro. Le nombre est posé sur la règle à partir d'un trait, et ce trait n'est pas le bout de la règle.

En remontant : le bord

On remonte le long de la règle, et à chaque trait la même question se pose : qu'est-ce qui, à cette époque, aurait pu battre la mesure ? En 2009, deux philosophes de la physique, Svend Rugh et Henrik Zinkernagel, font ce chemin trait par trait. Une horloge, c'est un système qui change de façon régulière ; encore faut-il qu'il existe. Vers 10^{-5} seconde de la coordonnée, avant que les quarks se lient en protons et en neutrons, il n'y a plus de systèmes liés : plus rien ne tient ensemble assez longtemps pour compter.

Vers 10^{-11} seconde, avant la transition électrofaible, la masse même s'efface presque. Des particules sans masse filent à la vitesse de la lumière, et pour elles le temps propre ne s'écoule pas : leur horloge, si elles en portaient une, resterait sur la même seconde. Les longueurs, les énergies, la température perdent leur base, et le temps avec elles, qui s'appuyait sur elles. C'est une thèse de philosophie de la physique, et elle est discutée ; elle ne change aucun calcul. Elle dit seulement ce que les calculs désignent, quand ils écrivent une date là où rien ne pouvait la lire.

Plus haut, c'est la théorie qui lâche. Dans les années 1960, Stephen Hawking et Roger Penrose démontrent des théorèmes de singularité : dans une large classe de modèles, la relativité générale rend un passé fini, et des densités infinies à son bord. Les physiciens lisent ces infinis. Ils n'y voient pas un événement ; ils y voient l'aveu d'une théorie à l'endroit où elle ne vaut plus, comme une règle dont les derniers traits se resserrent jusqu'à se confondre.

En deçà d'environ 10^{-43} seconde, l'ère de Planck, la physique connue ne s'applique plus. La gravitation et la physique quantique devraient y parler d'une seule voix, et elles n'ont pas encore de langue commune. La singularité initiale vient d'une extrapolation de la relativité générale au-delà de son domaine ; une théorie de la gravitation quantique, qu'on attend, pourrait ne pas la contenir du tout.

Il n'y a donc pas de « premier moment ». Le concept de temps cesse d'être défini quand on approche de $t = 0$; là, rien ne fait plus un instant. La singularité n'est pas un événement de l'histoire de l'Univers. Elle est le bord de la description qu'on en donne.

Les frises de référence le savent. Aucune ne remonte au temps zéro ; certaines comptent à partir de la fin de l'inflation, et le « 0 » imprimé à gauche de la règle est l'origine conventionnelle des horloges, le point où l'on a posé le crayon pour commencer à graduer. Rien ne s'y est passé qu'on puisse dater.

Quant aux « 10^{-36} seconde », « 10^{-43} seconde », ce sont des numéros portés sur l'axe t d'un modèle prolongé au-delà de son domaine, comme une longitude qu'on tracerait sur la carte au-delà du rivage, sur une mer que personne n'a sondée. Aucune horloge ne les a marqués. Aucune ne pouvait le faire.

Au sud du pôle Sud

La question « qu'y avait-il avant ? » n'est ni absurde ni résolue. Rien dans la physique connue n'interdit qu'une théorie plus complète décrive quelque chose au-delà du bord ; et la relativité générale, qui trace ce bord, ne dit rien de ce qu'il y a derrière. Toute description de conditions « avant le big bang » doit reposer sur une théorie qui la dépasse, la gravitation quantique, et cette théorie n'est pas écrite. La question est suspendue à une page qui manque.

L'idée que la singularité n'est pas réelle est presque aussi vieille que l'inflation. Dès 1980, Alexeï Starobinsky soutenait que des corrections quantiques à la gravité remplaceraient la singularité initiale par une phase d'expansion exponentielle : au bout de la règle, non un infini, mais un emballement.

Pour certains, l'« avant » se dissout. Quand on quantifie la gravitation pour l'Univers entier, on obtient l'équation de Wheeler-DeWitt, et dans cette équation le temps n'apparaît pas : la description fondamentale est immobile, et tout le travail est d'en faire sortir un Univers qui change. On espère voir le temps émerger comme une approximation, la taille de l'Univers servant d'horloge interne ; « avant » n'aurait plus de prise au bord, comme la température n'a pas de prise sur une seule molécule : non qu'elle y devienne fausse, elle n'y désigne rien. En 2025, Bamonti, Cinti et Sanchioni contestent que le temps émerge ainsi ; la dynamique de ce cadre, écrivent-ils, demande un examen plus poussé.

L'image la plus célèbre de cette famille est de James Hartle et Stephen Hawking, en 1983 : un état sans bord. Quand on remonte, le temps se met à se comporter comme une direction d'espace, et l'histoire de l'Univers se referme sur elle-même comme la sphère se referme au pôle Sud, sans pointe, sans point de départ. On tourne le globe pôle Sud en haut, et l'on pose la question : qu'y a-t-il au sud du pôle Sud ? Rien n'y manque ; la direction s'arrête. Demander ce qu'il y avait avant serait demander cela — la réponse d'Augustin devenue géométrie. Mais en 2017, Job Feldbrugge, Jean-Luc Lehnert et Neil Turok refont le calcul avec un temps réel, et obtiennent un facteur exactement inverse de celui de Hartle et Hawking ; ce que la proposition prédit n'est plus le même.

Pour d'autres, l'avant revient. En 2006, Abhay Ashtekar, Tomasz Pawłowski et Parampreet Singh appliquent à l'Univers entier la gravité quantique à boucles, dans un modèle simplifié, très symétrique, et ils voient le big bang remplacé par un grand rebond : un univers qui se contracte, passe par le régime de Planck sans se rompre, puis le nôtre qui se dilate. Un temps qui traverse le bord, et de l'autre côté, quelque chose. Aucune observation ne le confirme.

« La question de l'avant n'a pas de sens » est donc une position. Augustin l'a tenue à la lampe, Kant à l'horloge, Hawking à la sphère ; ce n'est pas un consensus, et les modèles à rebond donnent à l'avant un sens. La physique a changé la question de Kant. Il ne s'agit plus de choisir entre un temps fini et un temps infini : il s'agit de savoir si le mot « avant » garde une prise au bord de la description, et cela dépend d'une théorie qui reste à trouver.

On ne peut dire, en l'état, ni qu'il y eut 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 ; ce qu'on tient d'elle, ce sont ses effets, non ce qui l'a précédée. Le rebond et l'état sans bord laissent chacun des traces à chercher — aux plus grandes échelles du rayonnement fossile pour l'un, dans la courbure d'ensemble de l'Univers pour l'autre — et rien, dans ce qu'on a mesuré, ne départage encore les deux.

Reste ce qu'Augustin n'a pas épuisé en ôtant l'« alors ». Même sans avant, même si le temps naît avec le monde ou émerge d'une description où il ne figure pas, on peut encore demander pourquoi il y a un monde.

Cette question ne dépend pas de la forme du temps ; elle traverse le bord sans s'y arrêter, et elle attend, de l'autre côté de la page, qu'on dise de quel rien on parle.

De quel rien ?

brouillon · 3348 mots

La question qui reste sur la table

Sur une table, en 1714, un homme numérote des principes d'une encre serrée, et la première question qu'il s'accorde le droit de poser ne porte pas sur le premier instant du monde. Elle porte sur le monde entier. Les copies d'Aristote qui couvraient les pupitres de Paris décrivaient un monde sans première page, tournant depuis toujours ; à ce monde-là on peut demander exactement ce qu'on demande à un monde né hier : pourquoi lui, pourquoi quelque chose. La question ne vise pas un premier matin ; elle pèse sur l'histoire entière, qu'elle soit courte ou sans bord. L'avant peut tomber, elle ne tombe pas avec lui.

Thomas, vers 1270, à sa table de Paris, l'avait rendue possible en redéfinissant un seul mot. Être créé, écrivait-il, c'est dépendre d'une cause, à chaque instant, aujourd'hui autant qu'au premier jour s'il y en eut un ; ce n'est pas avoir eu un premier instant. Un monde qui n'aurait jamais commencé pourrait donc être créé de bout en bout, au sens où il ne tiendrait pas debout par lui-même, comme une voûte tient par ses piliers et non par son âge. Sur cette page, pour la première fois, la création et le commencement cessent d'être le même mot.

1. Leibniz écrit les Principes de la nature et de la grâce, et il les écrit comme on tient des comptes : chaque ligne doit être justifiée par une autre. La règle qu'il pose en premier, rien ne se fait sans raison suffisante, n'épargne aucune ligne, pas même la première. Dès qu'on l'admet, « 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. »

La seconde phrase porte tout le poids. Le rien y est l'état qui n'aurait rien demandé : pas de raison à fournir, pas de compte à tenir, la page restée blanche. L'existence fait exception. Elle entre dans la colonne des choses à justifier, et le monde entier y figure comme une dépense qu'on n'avait pas prévue.

Sa réponse descend la même pente. La raison suffisante « ne se saurait trouver dans la suite des choses contingentes », celles qui auraient pu ne pas être : on remonterait de ligne en ligne sans jamais trouver celle qui se justifie elle-même. Elle est « dans une substance, qui en soit la cause, et qui soit un être nécessaire », un être qui ne pouvait pas ne pas être. Pour Leibniz, cet être est Dieu. La question, elle, vient de prendre la forme sous laquelle on la cite encore, et le rien reste posé sur la table, comme ce qui aurait été plus simple.

Une chambre qu'on vide

Pour comparer le monde à son absence, il faut que cette absence se laisse penser, et la philosophie commence par l'interdire. Au Ve siècle avant notre ère, Parménide tient qu'on ne peut pas dire « cela n'est pas » sans parler encore de cela : le mot désigne, et ce qu'il désigne est là, dans la phrase. Son disciple Mélissos en tire une physique : « il n'y a pas de vide, car le vide n'est rien, et le rien ne peut pas être. » De cet interdit sort l'adage latin qui pèsera sur toute l'histoire, ex nihilo nihil fit, rien ne vient de rien. Si le rien ne peut pas être, il ne peut pas non plus avoir été, et la question de Leibniz n'a plus rien à quoi comparer le monde.

Des philosophes d'aujourd'hui tentent l'inverse, et leur méthode est un jeu d'enfant. Thomas Baldwin imagine un monde qui contient un nombre fini d'objets, une chambre meublée. Il retire une chaise ; la chambre

reste possible. Il retire la table ; elle reste possible. Aucune étape ne franchit de limite, chaque retrait ressemble au précédent, et au bout d'un nombre fini de gestes il retire le dernier objet. Ce qui reste est le monde vide.

Paris, 1907. Dans *L'Évolution créatrice*, Bergson regarde ce que fait l'esprit au moment où il pense qu'une chose n'existe pas. L'esprit ne voit pas un trou. Il voit autre chose à la place, le mur derrière la chaise retirée, ou bien la chaise elle-même, accompagnée de l'idée qu'elle est exclue. Il y a « plus, et non pas moins », écrit-il, dans l'objet pensé absent que dans l'objet pensé présent : l'objet, et par-dessus le trait qui le raye.

Appliquée au tout, l'opération se détruit elle-même. Qui supprime toutes les choses garde une place où elles manquent, un fond sur lequel elles manquent, ou au moins l'esprit qui est en train de les supprimer. Le néant absolu, « entendu au sens d'une abolition de tout », est une « pseudo-idée », « destructive d'elle-même », un cercle carré. Le présupposé de Leibniz tombe avec lui : on ne demande pas pourquoi une alternative n'a pas été réalisée quand cette alternative n'a aucun contenu. La page blanche n'était pas une page.

Baldwin et Bergson ne se séparent que sur un geste, le dernier. Pour Baldwin, retirer le dernier objet est un retrait comme les autres. Pour Bergson, si l'on étend son analyse à un argument qu'il n'a pas connu, le dernier objet retiré laisse encore la chambre : des murs, un sol, l'espace où il y avait une chaise, un monde qui contient zéro objet, non l'absence de tout monde. Un monde sans aucun objet est-il encore un monde, un cadre avec des propriétés, ou l'absence de tout cadre ? Personne n'a tranché. La physique rencontre cette question chaque fois qu'elle dit « vide », et sa réponse, elle, est nette : un vide est encore un cadre.

Eindhoven, deux plaques

Eindhoven, 29 mai 1948. Au laboratoire Philips, Hendrik Casimir présente une note de trois pages sur deux plaques de métal parallèles, et sur ce qu'il y a entre elles. Un champ se décompose en ondes, et chacune garde, même au repos, une énergie qu'on ne peut pas lui ôter. Entre les plaques, 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 pousse : une force attire les plaques l'une vers l'autre. L'effet est petit, ajoute-t-il, et une confirmation « ne semble pas infaisable ».

Il faut près de cinquante ans. En 1997, Steve Lamoreaux mesure cette force entre une sphère et une plaque dorées ; la mesure et le calcul s'accordent à 5 % près. Dès 1947, Willis Lamb et Robert Retherford avaient trouvé dans l'atome d'hydrogène un petit écart entre deux niveaux d'énergie que la théorie de Dirac donnait égaux : l'électron, secoué par les fluctuations du champ autour de lui, ne se tient pas tout à fait où on l'attendait. Ces mesures confirment une théorie où le vide fluctue. Elles ne photographient pas une fluctuation, et l'on discute encore si la force de Casimir prouve 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.

Ce que le physicien appelle « rien » est donc un état. La matière et la lumière sont décrites par des champs, une grandeur posée en chaque point de l'espace, comme une température en chaque point d'une pièce, et le vide est l'état où ces champs ont la plus basse énergie possible. Plus aucune particule ; mais les champs toujours là, nuls en moyenne et jamais immobiles, tremblant autour de zéro. « Un état de vide n'est évidemment pas rien », écrivent Christopher Smeenk et George Ellis : il existe dans un espace-temps, il a une énergie, il obéit à des lois, il occupe un espace qui a une géométrie. On a vidé la chambre, et la chambre pèse.

David Albert nomme ce qui correspondrait vraiment, dans cette théorie, à l'absence de toute chose physique. Ce ne serait pas un état des champs, fût-il le plus pauvre ; ce serait « la simple absence des champs »

eux-mêmes. Le vide quantique est aux champs ce qu'une salle vide est à la salle : un de ses états, pas sa disparition.

1. Sur une page de calcul, Alexander Vilenkin écrit une amplitude de probabilité pour un univers entier, et le fait naître par effet tunnel « à partir de littéralement rien ». L'effet tunnel est ce passage quantique à travers une barrière que la physique classique interdirait ; ici la barrière n'est pas un obstacle dans l'espace, puisqu'il n'y a pas encore d'espace, mais une région des solutions des équations que les trajectoires classiques ne traversent pas. De l'autre côté, un espace de de Sitter : un espace en expansion exponentielle, la forme mathématique d'un univers en inflation. Pas de singularité, aucune condition initiale à fournir. Au-delà de l'univers ainsi créé, écrira-t-il, « ni espace ni temps ».

Littéralement rien

Ce rien-là est plus pauvre que le vide de Casimir : il ne contient même pas l'espace-temps où des champs pourraient se tenir, pas de salle, pas de murs. Il n'est pas vide de tout. Vilenkin l'écrit dans l'article même, en 1982 : la structure et l'évolution des univers y sont « totalement déterminées par les lois de la physique ». Au fond de la page, quand tout a été retiré, il reste les équations qui décrivent le passage.

Trente-trois ans plus tard, la même main 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 lui, et le mot « avant » est déjà de trop, ce qui « semble suggérer qu'elles ont une existence indépendante ». Vilenkin ajoute : « ce que cela veut dire exactement, nous ne le savons pas. »

On peut alors compter. Le premier rien : le vide quantique, des champs au plus bas, dans un espace-temps, avec des lois. Le deuxième : le rien de Vilenkin, ni espace, ni temps, ni champ, mais des lois. Le troisième : le rien de Leibniz, pas de lois non plus, l'absence de tout. La physique ne travaille qu'avec les deux premiers. Elle ne peut pas faire autrement : un calcul part d'équations, et des équations sont des lois. Le troisième lui est fermé par construction ; une théorie qui le décrirait devrait d'abord effacer ses propres équations.

Reste le verbe. La question qu'on pose dans la rue demande comment le rien est « devenu » quelque chose ; or devenir est un changement, et un changement veut un temps : un état, puis un autre. Le temps cosmique, celui qui date l'histoire de l'Univers, perd sa base physique bien avant tout commencement. Rugh et Zinkernagel, qu'on a vus remonter la règle trait par trait, l'arrêtent vers 10^{-11} seconde, à la transition électrofaible, quand la masse s'efface et qu'aucune horloge n'a plus de quoi être faite. Le rien de Vilenkin, lui, n'a pas de temps du tout : il n'y a pas de « puis » à y loger.

Dire que l'Univers « sort » de ce rien, c'est poser un verbe de mouvement là où aucun mouvement n'est défini ; sortir, c'est être dedans, puis dehors. Le formalisme de Vilenkin donne une amplitude de probabilité, un nombre attaché à un univers entier, pas une succession ; et la langue n'a que des verbes de succession. Le maître s'y était heurté en 1931, quand il écrivait un commencement « un peu avant » l'espace et le temps. Le verbe bute où l'adverbe butait.

1. Lawrence Krauss publie *A Universe from Nothing*, et le titre promet ce qu'il dit : un univers à partir de rien. Tout indique, soutient-il, un univers qui aurait pu surgir, et qui a plausiblement surgi, d'un « rien plus profond », un rien sans espace lui-même. Il n'est pas seul à le dire. Frank Wilczek, Stephen

Hawking, Leonard Mlodinow présentent les mêmes mécanismes comme une réponse à la question de Leibniz, portée jusqu'à la table de 1714.

Le poing et la main

David Albert lui répond, dans la New York Times Book Review, par une main. Dans la théorie quantique des champs, certains arrangements des champs correspondent à des particules, d'autres non. Que des particules apparaissent et disparaissent n'est donc « pas plus mystérieux » que des poings qui apparaissent et disparaissent quand on ferme et qu'on ouvre la main. Le poing n'est pas créé à partir de rien quand la main se ferme : la main change de forme. Aucun de ces surgissements, « si on les regarde correctement », n'approche « même de loin » une création à partir de rien. Et d'où viennent les champs, demande Albert, et d'où viennent les lois ?

Les deux hommes ne se contredisent sur aucun calcul ; Albert ne conteste pas une ligne de la physique de Krauss. Ils s'opposent sur un mot. Krauss dit « rien » et désigne le premier ou le deuxième rien, un vide qui fluctue, un état sans espace mais avec des lois ; Albert rappelle que la question de Leibniz portait sur le troisième. Le poing s'est ouvert ; la main est toujours là.

Le théorème appelé à la barre

Au XI^e siècle, al-Ghazali écrit trois lignes : 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. Là où Thomas, deux siècles plus tard, jugera le commencement indémontrable, al-Ghazali en fait le pivot d'une preuve. En 1979, William Lane Craig recopie l'argument presque mot pour mot, tout ce qui commence d'exister a une cause ; l'Univers a commencé d'exister ; donc l'Univers a une cause, et décrit cette cause : intemporelle, immatérielle, personnelle. La nouveauté est dans la seconde ligne. Craig ne l'appuie plus seulement sur des arguments contre l'infini ; il l'appuie sur la cosmologie, et sur un théorème signé Borde, Guth et Vilenkin.

Le théorème, 2003. Dans un espace-temps dont l'expansion moyenne est positive, les lignes qu'on suit vers le passé ne se prolongent pas indéfiniment ; elles s'arrêtent. L'inflation a un bord passé, et il faut « une autre physique » pour décrire ce bord. Le théorème ne dit pas ce qu'il y a dessus. Ni singularité, ni instant zéro : un bord, et rien d'écrit dessus.

En 2023, Lesnefsky, Easson et Davies refont le calcul de l'expansion moyenne. Il dépend, montrent-ils, de la forme d'ensemble qu'on prête à l'espace, comme une moyenne de longitudes dépend de la carte sur laquelle on les lit, et ils exhibent des solutions où toutes les lignes se prolongent sans fin, malgré une expansion moyenne positive. La pièce qu'on produisait à la barre est elle-même en discussion.

Les objections viennent des deux bords. Adolf Grünbaum, philosophe, rappelle que la causalité ne vaut qu'à l'intérieur d'une succession : une cause précède son effet, et l'origine du temps n'a pas de précédent où loger une cause. C'est Augustin retourné contre l'apologétique : « cause du commencement » emploie un mot de temps là où il n'y a pas encore de temps. Sean Carroll, cosmologiste, objecte à Craig, lors d'un débat en 2014, que le théorème suppose un espace-temps classique ; il ne dit donc rien de l'époque la plus ancienne, celle que dominent les effets quantiques, là même où Craig voulait le faire parler.

L'un des trois auteurs se lève. À la question « l'Univers a-t-il eu un commencement ? », Vilenkin répond « probablement » : il ne connaît pas de modèle viable d'univers éternel. Et il ajoute aussitôt : « le théorème ne nous dit rien de l'existence de Dieu. Un mystère profond demeure. » Celui qui a le plus d'autorité pour lire

un commencement dans le théorème refuse d'y lire une création. Il refait, sans la nommer, la distinction de Thomas : un commencement est une chose, une dépendance en est une autre.

Les deux querelles ont la même forme, en miroir. Krauss passe du vide des physiciens au rien des philosophes, et conclut 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, et conclut qu'elle en a besoin. Dans les deux cas, le résultat de physique est exact ; dans les deux cas, la conclusion l'excède. Le témoin a dit vrai, et on lui fait signer autre chose.

La phrase barrée

Louvain, 1931. Le manuscrit de la note à Nature se termine par une phrase que Lemaître a barrée avant l'envoi. Sous le trait d'encre on lit encore : Dieu est essentiellement caché, et le croyant peut se réjouir de voir la physique fournir « un voile cachant la création ». Il l'a probablement retirée pour qu'on ne lise pas son hypothèse comme un appui à la foi. Or la phrase disait le contraire d'un appui. La physique, chez Lemaître, cache la création au lieu de la montrer : elle ne décrit que des états et leurs transformations, et la création n'est ni un état ni une transformation.

La lecture qu'il craignait vient d'en haut. Le 22 novembre 1951, à Rome, devant l'Académie pontificale des sciences, Pie XII prononce le discours Un'Ora et fait rejoindre à la science le Fiat lux de la Genèse : le « que la lumière soit » et l'atome primitif dans la même phrase, sous les ors. Lemaître est troublé, par « la confusion entre Commencement et Création », et par le risque qu'on l'accuse, lui, de soutenir cette lecture.

Le 7 septembre 1952, devant l'Union astronomique internationale, le pape parle de nouveau. La théorie de l'atome primitif n'est plus mentionnée. On ne sait pas par quel chemin l'inflexion s'est faite, qui a parlé à qui, ni dans quels termes ; on constate le silence.

Eddington trouvait « répugnante » la notion d'un commencement du monde ; Einstein voyait dans l'atome primitif une inspiration du dogme chrétien de la création. Ils refusaient le commencement parce qu'ils y voyaient une création. Pie XII l'accueillait pour la même raison. Même confusion, préférences opposées : les uns reculent devant ce que l'autre embrasse. Lemaître, seul dans cet épisode, tient les deux questions séparées.

Sa position rejoint Thomas par un autre chemin. Un univers éternel pourrait être créé, au sens de Thomas ; un univers qui commence pourrait n'avoir aucune cause, au sens de Sean Carroll, pour qui, en 2018, toute explication de l'existence finit par s'arrêter sur des « faits bruts » : l'Univers est, sans cause ni explication ultime. Chaque chaîne s'arrête quelque part, celle de Leibniz sur un être nécessaire, celle de Carroll sur l'Univers lui-même. Aucune observation du commencement, fût-elle parfaite, ne peut à elle seule trancher la création.

Wittgenstein tient en une ligne ce qui résiste : « Ce qui est mystique, ce n'est pas comment est le monde, mais qu'il soit. » La physique dit comment est le monde. Pour le « qu'il soit », la cosmologie est plus démunie que toute autre science : les autres rangent un phénomène parmi des cas semblables, ou l'insèrent dans un contexte plus large ; elle n'a accès qu'à un seul univers, et à aucun contexte plus large pour en expliquer les propriétés. On ne met pas notre univers à côté d'un autre pour voir ce qui dépend de quoi.

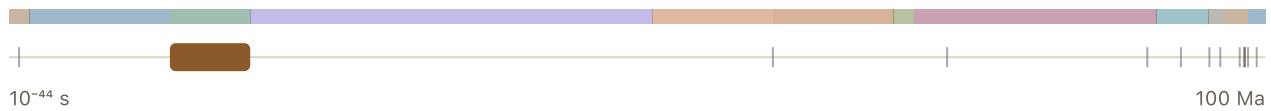
Le partage se fait question par question. L'existence reste à la philosophie : toute explication physique part au moins de ses lois, et la question porte aussi sur elles. L'avant est à cheval : la philosophie a montré qu'il pouvait être mal posé, la physique l'a rendu formulable sans le trancher. Le bord, ce qui limite le passé de l'Univers, peut devenir testable : un rebond, la fin d'un cycle antérieur font des prédictions, et la cosmologie

cyclique de Penrose a déjà été confrontée au rayonnement fossile, sans succès. Un scénario peut échouer ; c'est ce qui en fait de la physique. Par ce bord, la physique reprend : l'espace en inflation, cet espace de de Sitter où Vilenkin faisait déboucher son univers, dont on lit les empreintes dans la plus vieille lumière du ciel.

L'emballlement

$\sim 10^{-36}$ à 10^{-32} s

brouillon · 4294 mots



Le ciel à la même température

La plus vieille lumière du ciel a été libérée quand l'Univers avait environ 380 000 ans, et elle a, d'un bout à l'autre, la même température. On tourne l'antenne vers un point du ciel, on lit un chiffre ; on la tourne vers le point opposé, on lit le même, à quelques parts sur cent mille près. Dans la vie courante, deux objets à la même température l'ont atteinte en échangeant de la chaleur, deux tasses posées côte à côte et laissées assez longtemps. Or, dans le modèle classique, ces deux régions n'ont jamais rien échangé. Elles s'éloignent l'une de l'autre plus vite que la lumière, et depuis le début de l'expansion aucun signal, aucune chaleur n'a eu le temps de passer de l'une à l'autre. Leur égalité doit être posée au départ, région par région, sur tout le ciel.

Deuxième coïncidence. La géométrie de l'espace dépend de ce qu'il contient, et il existe une densité, dite critique, pour laquelle l'espace est plat : celui d'Euclide, où les angles d'un triangle font 180°. L'Univers en est très proche. Or l'expansion ne ramène pas vers cette valeur, elle en écarte ; un petit écart au départ devient un grand écart ensuite. Pour que l'Univers soit aussi plat aujourd'hui, il fallait qu'au départ il s'écarte de la densité critique de moins d'une part sur un nombre qui s'écrit 1 suivi de soixante-deux zéros. Le modèle peut supposer ce réglage. Il ne peut pas dire pourquoi l'Univers est né réglé à ce point.

Troisième. Les théories de grande unification, qui cherchent à réunir trois des forces de la physique à très haute énergie, prévoient dans l'Univers très chaud des monopôles magnétiques : des particules qui porteraient un seul pôle, un nord sans sud, ce qu'aucun aimant coupé en deux n'a jamais donné. Si l'Univers a traversé ces énergies, il devrait en être rempli. On n'en a jamais observé un seul. C'est ce problème qu'Alan Guth a sur sa table quand, en 1980-1981, aux États-Unis, il propose l'inflation : une phase brève d'expansion accélérée, au tout début, avant l'Univers chaud que décrit le modèle classique.

Un an plus tôt, à Moscou, Alexeï Starobinsky écrit autre chose et la même chose. Des corrections quantiques à la gravité, soutient-il, remplaceraient la singularité initiale par une phase de de Sitter : un espace qui se dilate de façon exponentielle, doublant de taille à intervalles réguliers, puis doublant encore, puis encore. L'un part des monopôles, l'autre de la singularité ; par des chemins différents, les deux hommes écrivent la même phase. C'est celle où, deux ans plus tard, Vilenkin fera déboucher son univers né de littéralement rien.

Cette phase règle les trois énigmes d'un seul geste. Avant elle, les deux régions aujourd'hui opposées dans le ciel se touchaient presque ; elles ont eu le temps de s'équilibrer, puis l'inflation les a séparées plus vite que la lumière ne pouvait les relier, et elles ont gardé la même température en s'éloignant. Elle 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, le sol lui paraît plat. Les monopôles, s'ils se sont formés avant ou pendant, ont été dilués au point d'être introuvables, quelques grains perdus dans un volume devenu immense.

Mais résoudre des énigmes connues ne prouve pas qu'une hypothèse est vraie. Cela montre qu'elle est économique : une seule supposition en remplace trois. Une hypothèse inventée pour des faits déjà connus les explique par construction ; elle a été taillée pour eux, et un vêtement sur mesure tombe toujours juste sur celui qui l'a commandé. Ce qui peut la mettre à l'épreuve, ce sont des choses qu'elle annonce et qu'on n'a pas encore vues. L'inflation en a annoncé.

Du noyau à l'orbite de la Terre

Entre environ 10^{-36} et 10^{-32} seconde, l'espace se dilate d'un facteur de l'ordre de 10^{26} . C'est, en ordre de grandeur, le rapport entre la taille d'un noyau atomique et la distance de la Terre au Soleil : d'un côté ce qui tient au cœur d'un atome, de l'autre l'orbite entière de la planète. La durée, elle, s'écrit avec trente et un zéros après la virgule avant le premier chiffre ; aucune paupière n'a battu si vite, aucun éclair n'a été si bref. Une durée qui n'est presque rien, une dilatation qui n'a presque pas de mesure : cet écart, on l'appelle ici l'emballement.

Ces nombres sont des traits sur la règle qu'on a remontée au premier chapitre. « 10^{-36} seconde » est une valeur de la coordonnée de temps d'un modèle, prolongée au-delà de ce qu'une horloge physique aurait pu marquer, et le facteur lui-même dépend du modèle d'inflation qu'on retient. Ils situent l'inflation dans un modèle ; ils ne la datent pas comme on date une roche, en comptant ce qui s'y est déposé couche après couche.

Si l'inflation se bornait à gonfler l'espace et à le lisser, elle produirait un univers trop parfait. Dans un espace parfaitement uniforme, rien ne distingue un endroit d'un autre ; la gravité n'a aucune surdensité à amplifier, aucun pli où tirer, et jamais une galaxie ne s'y forme. Un ciel sans étoile, sans tache, sans adresse. L'apport décisif n'est donc pas le lissage. C'est, selon la formule de Daniel Baumann, ce qui « transforme des fluctuations quantiques microscopiques en germes macroscopiques pour la formation des structures cosmiques ».

Trois temps. 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, et l'inflaton, le champ qui porte l'inflation et dont la nature reste inconnue, tremble comme les autres. Puis l'inflation étire ces tremblements avec l'espace qui les contient : une fluctuation de taille subatomique est portée, en une fraction de seconde, à une taille astronomique, et une fois assez étirée elle cesse de trembler et se fige, comme une ride sur un tissu qu'on tend très vite reste prise dans la trame. Enfin, à la sortie, ces rides figées deviennent de petites différences de densité dans la matière et le rayonnement : ici un peu plus, là un peu moins. Les minuscules fluctuations du fond diffus, celles qu'on lit sur la carte à quelques parts sur cent mille, seraient nées ainsi.

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 de galaxies. Si le scénario est juste, les grandes structures du ciel, et ce qu'elles contiennent — les étoiles, les planètes, jusqu'à ceux qui, dedans, lèvent les yeux vers la plus vieille lumière — sont des tremblements quantiques microscopiques agrandis aux dimensions du cosmos.

Les empreintes

Le mécanisme annonce d'abord une chose simple. Les fluctuations doivent avoir la même amplitude quelle que soit leur taille, parce que chaque taille a été produite de la même manière, à un moment à peine différent d'une phase qui changeait peu ; on appelle ce spectre invariant d'échelle, ou de Harrison-Zel'dovich. En 1992, le satellite COBE détecte les premières variations de température du fond diffus : environ trente mil-

lionièmes de degré, à cinq près, quand on regarde le ciel à travers des taches d'une dizaine de degrés. Elles s'accordent avec ce spectre. L'histoire de cette mesure attend le chapitre de la première lumière.

La deuxième confrontation est plus fine. Dans le plasma primordial couraient des ondes sonores ; elles se sont figées quand l'Univers est devenu transparent, vers 380 000 ans, et leur empreinte dessine dans le fond diffus des pics, les pics acoustiques. Ces pics avaient été prédits. Leur découverte, écrivent Wayne Hu et Scott Dodelson en 2002, « a établi un modèle cosmologique de travail » : un modèle dont les structures sont nées par instabilité gravitationnelle de fluctuations quantiques produites pendant l'inflation.

Les pics ne se dessinent ainsi que si toutes les ondes sonores ont démarré en même temps, en phase, comme les cordes d'un instrument pincées d'un seul coup. Des perturbations créées au fil de l'eau, à des moments différents, donneraient une bouillie sans pics nets, un accord brouillé. L'inflation fournit ce départ commun : toutes les fluctuations sont déjà en place quand l'Univers chaud commence. C'était une conséquence annoncée, et elle aurait pu ne pas être au rendez-vous.

Planck, 2018. La mission européenne mesure la manière dont l'amplitude des fluctuations varie avec leur taille, l'indice spectral n_s . Un spectre exactement invariant d'échelle donnerait 1 ; l'inflation prévoit un peu moins, parce que la phase change un peu pendant qu'elle se déroule et que les fluctuations produites à la fin n'ont pas tout à fait l'amplitude de celles du début. Planck trouve 0,965, à quatre millièmes près, sans dépendance d'échelle détectable. Sous 1 d'environ huit fois son incertitude, dans le sens annoncé.

Planck mesure aussi l'adiabaticité. Des fluctuations sont adiabatiques quand matière noire, matière ordinaire et rayonnement sont plus denses ensemble, aux mêmes endroits, dans les mêmes proportions ; c'est ce qu'on attend si tout provient d'un seul champ qui fluctue. Les données de polarisation « fournissent un test rigoureux de l'adiabaticité des conditions initiales ». Dans le désert d'Atacama, au Chili, le télescope ACT la vérifie à son tour en 2025.

Enfin la platitude. Combinée aux oscillations acoustiques des baryons — l'empreinte des mêmes ondes sonores, lue cette fois dans la répartition des galaxies —, la carte de Planck donne une courbure nulle à 0,4 % près, avec 95 % de confiance ; ACT ne trouve lui non plus « aucun écart à la platitude ». L'inflation prévoyait un Univers plat ; il l'est, à la précision des mesures. Mais ce sont des mesures. Elles s'accordent avec l'inflation dans le détail, sur des propriétés qui auraient pu être autres ; elles montrent qu'elle passe les tests, pas qu'aucun autre mécanisme ne pourrait les passer.

Laquelle des inflations

« L'inflation » n'est pas un modèle, c'est une famille. Une phase brève d'expansion accélérée qui étire des fluctuations quantiques, cela 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, comme un tamis retient les unes et laisse passer les autres.

Le modèle de Starobinsky, celui de Moscou, 1980, prédit un indice d'environ 0,965 — presque la valeur de Planck — et il était jusqu'à récemment l'un des mieux placés. En 2025, depuis l'Atacama, ACT publie ses mesures finales. Combinées à celles de Planck, elles donnent 0,974, à trois millièmes près, et confirment la quasi-invariance d'échelle. Moins d'un centième de déplacement ; mais les incertitudes sont devenues si petites qu'un article de 2025 y lit un éloignement de la prédiction de Starobinsky et de plusieurs modèles bien établis, et qu'une série d'articles cherche déjà à les réconcilier par des corrections.

Deux limites encadrent ce résultat. Il ne met pas en cause l'inflation : n_s reste sous 1, les fluctuations restent quasi invariantes d'échelle et adiabatiques ; il porte sur le choix entre ses versions. Et il est trop récent

pour être tenu pour définitif : l'écart vaut environ trois fois l'incertitude, notable, sans atteindre le seuil que les physiciens exigent pour une découverte. Ce qui le confirmerait ou le dissiperait est connu — d'autres mesures des petites échelles, comme celles du télescope SPT au pôle Sud, et la vérification qu'aucune erreur systématique ne se cache dans la combinaison des deux instruments. Selon que la valeur reste vers 0,974 ou revienne vers 0,965, le modèle de 1980 sortira affaibli ou blanchi. On attend.

Pôle Sud, la poussière

Pôle Sud, mars 2014. L'équipe de l'expérience BICEP2, dont le télescope est tourné vers la plus vieille lumière, annonce avoir détecté des modes B dans la polarisation du fond diffus. L'annonce fait le tour du monde en quelques heures, et le monde entend : la preuve de l'inflation.

Ce qu'ils cherchaient. Tout ce qui précède porte sur des variations de densité ; mais l'inflation secoue aussi l'espace-temps lui-même, et devrait produire des ondes gravitationnelles primordiales, des ondulations de la géométrie étirées comme le reste aux dimensions du cosmos. Elles laisseraient leur marque non dans la température du fond diffus mais dans sa polarisation : cette lumière vibre, en chaque point du ciel, dans une direction privilégiée, et ces directions, portées sur la carte, dessinent des motifs. Les variations de densité ne font que des motifs sans rotation, rayonnants ou concentriques, les modes E. Les ondes gravitationnelles feraient aussi des tourbillons, les modes B. Leur force se mesure par un nombre, r , qui compare les tremblements de l'espace-temps à ceux de la densité. Aucun processus de l'Univers chaud n'en produit de cette sorte à ces échelles ; ce serait la signature la plus directe de l'inflation, et on ne l'a jamais vue.

Mais la polarisation n'a pas qu'une source. Les grains de poussière de notre propre Galaxie, alignés par son champ magnétique comme de la limaille, émettent eux aussi une lumière polarisée, et cette lumière 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 avec l'équipe de Planck, qui observait là où la poussière domine, conclut en 2015 : une grande partie du signal vient d'elle. « Aucune preuve statistiquement significative de modes tensoriels. » Il ne reste qu'une limite : r plus petit que 0,12.

Depuis, la limite descend et rien n'apparaît. 2018 : Planck avec BICEP2 et Keck, son successeur, r sous 0,056. 2021 : BICEP et Keck, avec les données accumulées jusqu'en 2018, r sous 0,036 à 95 % de confiance, la contrainte la plus forte à ce jour. À chaque marche, les modèles qui prédisaient davantage tombent ; le ciel, lui, reste sans tourbillon.

La prochaine étape est un satellite japonais, LiteBIRD, encore au sol. Il est conçu pour mesurer r à 0,001 près, trente fois mieux que la limite actuelle, avec pour objectif affiché « un test direct de la théorie de l'inflation ». 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 ».

Ce que LiteBIRD pourra dire n'est pas symétrique. Certains modèles prédisaient un r au-dessus des limites actuelles : ils sont déjà éliminés. D'autres prédisent un r de quelques millièmes, à sa portée ; d'autres encore un r trop petit pour lui. Une détection verrait l'espace-temps lui-même trembler à l'époque de l'inflation. Une non-détection éliminerait une grande famille de modèles, dont plusieurs des plus simples, sans réfuter l'idée, puisque des versions à r minuscule resteraient permises. Cette asymétrie tient à la famille inflationnaire, pas aux instruments. Et c'est précisément ce que ses critiques lui reprochent.

Trente-trois signatures

La controverse n'oppose pas des marginaux au consensus ; elle oppose des fondateurs entre eux. Paul Steinhardt compte parmi les pionniers de l'inflation. En 2013, au lendemain des premiers résultats de Planck, il publie avec Anna Ijjas et Abraham Loeb un article dont le titre tient lieu de verdict, « Le paradigme inflationnaire en difficulté après Planck 2013 » : les données, écrivent-ils, « défavorisent tous les scénarios inflationnaires les mieux motivés ».

Trois problèmes. 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, et le problème a été repoussé d'un cran, pas supprimé. Dans de nombreux modèles, elle 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 avec ses propres propriétés ; si tout ce qui peut arriver arrive quelque part, le scénario ne prédit plus rien. Et 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 *Scientific American*, les trois vont plus loin : l'inflation ne peut pas être testée. La réponse arrive au même magazine, sous la forme d'une lettre signée par Alan Guth, Andreï Linde, David Kaiser, Yasunori Nomura et vingt-neuf autres, dont Stephen Hawking. Trente-trois noms au bas d'une page : « l'inflation est non seulement testable, mais elle a été soumise à un nombre important de tests et les a tous passés jusqu'ici ».

Ni l'un ni l'autre camp ne conteste n_s , l'adiabaticité ou la platitude ; les deux lisent les mêmes colonnes de chiffres. Ils s'opposent sur ce qu'on teste. Les signataires désignent les prédictions des modèles qu'on écrit et qu'on confronte aux mesures : vérifiées, et certaines versions éliminées. Ijjas, Steinhardt et Loeb visent le paradigme, l'ensemble de tous les modèles possibles, si vaste qu'il s'accommoderait de presque tout résultat — et les tourbillons introuvables du pôle Sud sont leur meilleur exemple, puisqu'une détection confirmerait l'inflation et qu'une absence ne la réfuterait pas. Ce qui les départagerait est connu dans son principe : une alternative qui reproduise les mesures actuelles en annonçant autre chose sur une observable à venir. On ne l'a pas.

Un bord dans le passé

Même en admettant l'inflation, une question reste entière. 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. Dans beaucoup de modèles, elle ne s'arrête pas partout : quelque part, vers le futur, elle continue sans fin ; et ce qui continue sans fin vers l'avant aurait pu, de même, durer depuis toujours vers l'arrière. L'Univers n'aurait alors pas de commencement, seulement une inflation ouverte des deux côtés.

En 2003, Arvind Borde, Alan Guth — le même — et Alexander Vilenkin ferment cette porte, dans le cadre de la relativité générale classique. L'argument est « purement cinématique » : il ne suppose rien des forces ni de la matière et « ne requiert aucune condition d'énergie ». On suit vers le passé la trajectoire d'une particule ou d'un rayon de lumière ; si l'expansion y est positive en moyenne, l'expansion accumulée le long de ce chemin est bornée. Un passé sans fin l'aurait rendue infinie ; donc le chemin ne peut pas être sans fin. Un modèle en inflation, ou « simplement en expansion suffisamment rapide », est incomplet vers le passé, et « requiert une physique autre que l'inflation pour décrire la frontière passée de la région en inflation ». L'inflation ne peut pas être son propre point de départ.

En 2012, Vilenkin et Audrey Mithani étendent l'argument aux 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 un état qui peut s'effondrer ne tient pas une éternité. Aucun des trois ne fournit l'éternité qu'on lui prêtait.

Ce que le théorème ne dit pas pèse autant que ce qu'il dit, depuis qu'on a vu ce que l'apologétique en tire. Il ne démontre ni singularité ni instant zéro : « incomplet vers le passé » veut dire que la description classique s'arrête à une frontière dont elle ne décrit pas l'autre côté, et ses auteurs concluent à « une autre physique », pas à un commencement absolu. Que cette frontière soit un commencement est la lecture que Vilenkin défend ; le théorème ne suffit pas à l'établir. Il ne dit rien hors de ses hypothèses, un espace-temps classique, et rien d'un régime de gravité quantique où la géométrie n'est plus définie. Il suppose une expansion moyenne positive ; un univers qui se serait d'abord contracté, puis aurait rebondi, n'en remplit pas forcément la condition, puisque la contraction fait baisser la moyenne.

Sa borne elle-même est contestée. En 2023, Lesnefsky, Easson et Davies montrent que le calcul de l'expansion moyenne change selon la forme globale qu'on prête à l'espace, et exhibent une famille infinie de solutions dont les trajectoires se prolongent indéfiniment vers le passé malgré une expansion moyenne positive ; l'affirmation habituelle est pour eux « une question ouverte ». Ce qui 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. L'inflation fixe l'état de départ de l'Univers chaud ; rien de ce qu'on sait ne fixe le sien.

Ce qui occupe le bord, et la sortie

Trois programmes se penchent sur cette frontière passée ; aucun n'a d'appui observationnel, et ils n'en sont pas au même stade. Le premier remplace le commencement par un rebond. En 2006, Abhay Ashtekar, Tomasz Pawłowski et Parampreet Singh, dans un modèle simplifié de cosmologie quantique à boucles, voient « le big bang remplacé par un grand rebond » : un univers en contraction avant le nôtre, le cas que le théorème de Borde, Guth et Vilenkin ne couvre pas forcément. Le rebond ne remplace pas l'inflation ; il ne produit pas seul le spectre presque invariant qu'on observe, et il se greffe sur elle.

Ses traces, s'il en laisse, sont là où aboutissent les fluctuations les plus anciennes, celles que l'inflation a le plus étirées : les plus grands motifs du ciel, ceux qui couvrent plusieurs degrés ou davantage, où il modifie la puissance des fluctuations. En 2020, Ashtekar et ses collègues en tirent une prédiction pour la polarisation — une diffusion plus forte de la lumière du fond diffus sur son trajet, et des modes B atténués aux grandes échelles, deux grandeurs que LiteBIRD visera. Mais le signe dépend de l'état initial choisi : certains choix réduisent la puissance aux grandes échelles, d'autres l'augmentent. Et si l'inflation a duré nettement plus que le minimum, les motifs nés au rebond sont aujourd'hui plus grands que l'Univers observable ; une absence de signal dirait seulement qu'elle a été longue.

Le deuxième supprime le bord au lieu de le franchir : l'état sans bord de Hartle et Hawking, 1983, ce globe tourné pôle Sud en haut qu'on a vu au premier chapitre. Rapporté à l'inflation, il veut dire dans quel état l'Univers y entre, et répondre ainsi à l'objection des conditions initiales. Pour les fluctuations plus petites que l'Univers, il donne les mêmes que l'inflation standard, « en bon accord avec l'expérience » ; rien ne l'en distingue sur ce terrain. Sa prédiction propre porte sur la courbure d'ensemble, et sous sa forme simple elle est fautive : 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. Les remèdes — un autre état initial, un espace en forme de tore — ne s'imposent pas.

La dispute sur sa formulation porte sur la cohérence du calcul plus que sur une donnée. En le réécrivant avec un temps réel, dit lorentzien, Job Feldbrugge, Jean-Luc Lehnert et Neil Turok obtiennent en 2017 un facteur « exactement l'inverse du fameux résultat de Hartle-Hawking », et des ondes gravitationnelles primordiales qui n'y sont pas amorties, ce qui rendrait inexplicable un univers aussi lisse que le nôtre. Hartle, Thomas Hertog et leurs collègues répondent qu'une autre formulation lorentzienne retrouve des univers en inflation, à fluctuations presque gaussiennes. 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, il serait la fin, remise à une autre échelle, d'un éon précédent, et l'Univers passerait d'éon en éon. Ce scénario a ce que les deux autres n'ont pas encore : des traces annoncées dans le fond diffus. En 2010, Vahe Gurzadyan et Penrose trouvent dans les données du satellite WMAP des familles de cercles concentriques où la température varie anormalement peu, à six écarts-types. En 2011, Ingunn Wehus et Hans Kristian Eriksen retrouvent les cercles, puis les cherchent dans des ciels simulés sans éon antérieur, et les y trouvent aussi : le ciel observé est « entièrement compatible avec le modèle Λ CDM », de tels cercles apparaissent par hasard dans un ciel sans mémoire. Les « points de Hawking », taches chaudes lues comme la trace de trous noirs de l'éon précédent, sont annoncés à 99,98 % de confiance ; une fois prise en compte la taille des anneaux, l'excès tombe à 87 %, « guère plus de 1σ », selon Daniel Jow et Douglas Scott en 2020. Le scénario est testable, et ses tests sont pour l'instant négatifs.

Rebond et cycle ne sont pas le même modèle. Le rebond fait succéder une expansion à une contraction, par un effet quantique au régime de Planck ; les éons de Penrose s'enchaînent sans contraction, chaque fin dilatée devenant un nouveau commencement. 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 la précède ou la prépare, non à la remplacer.

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, le moment où se serait peut-être formé l'excès de matière sur l'antimatière. L'espace que l'emballement avait vidé se remplit ; l'Univers devient une soupe brûlante de particules, dont la physique se teste dans les accélérateurs. C'est de là que partent les horloges. Planck définit l'âge de l'Univers comme le temps écoulé « depuis le début du Big Bang chaud », non depuis un instant zéro : la première graduation est posée là où l'emballement s'arrête. De cette soupe repart l'histoire, là où le plausible devient le connu.

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

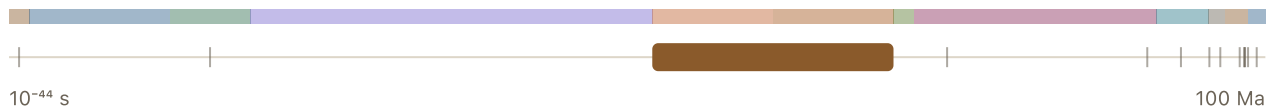
Comment l'Univers a-t-il pris sa matière première, et comment le sait-on ?

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

La soupe

10^{-12} s à 1 s

brouillon · 4180 mots



Un quark va seul. Rien ne l'enferme ; la chaleur défait tout assemblage avant qu'il tienne. Un millionième de millionième de seconde a passé, et l'espace entier est à la même température, un million de milliards de degrés. Chaque espèce de particule y côtoie son contraire, le quark l'antiquark, en nombres à peu près égaux à ceux des photons. Une particule croise son contraire et il n'en reste que de la lumière ; la lumière se heurte à elle-même et redevient paire. Les deux gestes se font à la même cadence, si bien que le milieu, qui change de contenu à chaque instant, ne change pas de composition. Les particules viennent de prendre leur masse ; l'interaction électromagnétique et l'interaction faible, qui n'en faisaient qu'une, sont désormais deux.

L'espace grandit, le milieu refroidit. Vers un cent-millième de seconde, les quarks sont pris : trois par trois, ils se lient en protons et en neutrons, et les antiquarks en antiprotons et en antineutrons. Puis les photons n'ont plus l'énergie de fabriquer des paires aussi lourdes, et celles qui existent continuent de se trouver. Proton contre antiproton, neutron contre antineutron : à chaque rencontre, deux particules de moins, de la lumière de plus. Le compte descend jusqu'au dernier couple. Il reste ce qui n'avait pas de vis-à-vis, à peu près une particule pour un milliard de paires défaites, et, autour de chacune, plus d'un milliard de photons, la lumière que les rencontres ont laissée.

Vers une seconde, dix milliards de degrés. Les neutrinos, que seule l'interaction faible liait au reste, cessent d'y être reliés ; ils traversent tout et ne s'arrêteront plus. Entre protons et neutrons, les échanges qui faisaient de l'un l'autre s'essoufflent eux aussi. Le neutron pèse un peu plus que le proton, et le milieu refroidi fait moins volontiers le plus lourd : quand les échanges s'arrêtent, il y a un neutron pour six protons. Un neutron laissé seul vit environ un quart d'heure, puis devient proton ; le proton, lui, dure. Aucun noyau ne s'est encore fermé sur lui.

Un bain qui oublie

Là où l'emballlement s'arrête, l'espace est plein. L'énergie qui tirait l'expansion s'est changée en particules et en chaleur ; de ce passage on ne sait à peu près rien, ni combien de temps il a pris, ni par quel chemin. De ce qu'il laisse, on sait beaucoup. Vers 10^{-12} seconde, l'Univers est un bain à mille millions de millions de degrés, 10^{15} K, où nagent ensemble toutes les particules du modèle standard — le cadre qui décrit les particules connues et trois des quatre forces —, à la même température, chaque réaction se faisant aussi souvent dans un sens que dans l'autre. Cette soupe obéit à une physique qu'on a mesurée sur Terre.

Deux photons assez énergiques se croisent : il en sort un électron et un positron. Un électron et un positron se croisent : il en sort deux photons. À l'équilibre, les deux flux se compensent, et le nombre de chaque espèce ne dépend plus que de la température. À une température donnée, on sait combien le bain contient d'électrons, de quarks, de photons, sans rien demander de ce qui s'est passé avant ; un bain calculable. Un bain muet, aussi : ce qui oublie son passé à chaque réaction n'en transmet presque rien à la suite.

À cette chaleur, les physiciens ne comptent plus en degrés mais en énergie. L'unité est l'électronvolt, ce que gagne un électron en traversant un volt ; un million d'électronvolts font le MeV, un milliard le GeV. Un MeV, c'est dix milliards de kelvins ; un GeV, dix mille milliards ; les 10^{15} K du départ font une centaine de GeV.

Ce thermomètre est l'horloge du chapitre. Les secondes qu'on y lira sont déduites des températures par le modèle d'expansion ; les températures, elles, sont ce que la physique des particules connaît.

Le bain franchit un premier seuil vers 10^{-12} seconde, autour d'une centaine de GeV. Au-dessus, l'interaction électromagnétique et l'interaction faible n'en font qu'une ; en dessous, elles se séparent, et les particules prennent leur masse. Cette séparation a pu être douce ou brutale ; cela dépend du poids du boson de Higgs, et le point reviendra, parce qu'il décide si l'excès de matière a pu naître à cet instant.

Second seuil vers 10^{-5} seconde. Jusque-là, les quarks, dont sont faits les protons et les neutrons, circulent seuls dans le bain ; ensuite le bain est trop froid pour les tenir séparés, et ils se lient par trois. Les protons et les neutrons naissent là. C'est la première moitié de ce que le chapitre cherche : d'où viennent les protons et les neutrons, et pourquoi si peu de neutrons.

Ces deux seuils sont aussi, pour Svend Rugh et Henrik Zinkernagel, le bord où le temps lui-même devient fragile. Une horloge est un système lié qui bat, un pendule, un atome ; avant 10^{-5} seconde, rien n'est lié, et rien ne peut battre. Avant la brisure électrofaible, la masse disparaît presque, et avec elle toute base physique pour une longueur, une énergie, une température. Leur thèse est discutée ; elle ne change aucun calcul. Mais elle fait de l'ouverture de ce chapitre un seuil : c'est ici, à un ordre de grandeur près, que la coordonnée du modèle redevient un temps que des horloges pourraient marquer.

La physique de ces deux seuils se teste dans les accélérateurs ; son application à l'Univers est une extrapolation raisonnable, non une observation. Le Particle Data Group, la référence des physiciens des particules, le dit plus durement : on pourrait être tenté de repousser la frontière du connu jusqu'à ces deux transitions, mais « aucune relique observable de ces époques n'a été identifiée, ni théoriquement ni observationnellement ». Rien, dans le ciel, ne porte leur marque. Les « 10^{-12} » et « 10^{-5} » sont des repères lus dans une chronologie, et leurs durées ne deviennent robustes qu'au-delà de la seconde. On sait que ces deux passages 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. C'est vers la seconde, solide, que le chapitre descend.

Ce qui n'a pas brûlé

Chaque particule du bain a son contraire : l'électron le positron, le proton l'antiproton, le neutron l'antineutron — même masse, charge inverse. Quand les deux se rencontrent, il ne reste que de la lumière. Et une lumière assez dure refait, d'elle seule, une paire. Tant que le bain est assez chaud, les paires naissent et meurent à la même cadence, et rien ne s'use. Au-dessus d'un GeV, dix mille milliards de kelvins, les baryons — la famille des protons et des neutrons — et les antibaryons sont à peu près aussi nombreux que les photons : trois foules de même taille, et aucune qui gagne.

Puis le bain refroidit. Les photons n'ont plus de quoi faire une paire de baryons, qui pèsent un GeV chacun ; mais les baryons et les antibaryons qui existent continuent de se rencontrer et de s'éteindre l'un dans l'autre. Dans un univers qui aurait contenu exactement autant de l'un que de l'autre, l'extinction aurait suivi l'équilibre jusque vers 20 MeV, deux cents milliards de kelvins, où les rencontres se font trop rares et où elle gèle. Il resterait un baryon pour dix milliards de milliards d'unités d'entropie — l'entropie, que portent les photons, sert de compte parce qu'elle se conserve dans l'expansion —, quand on en observe un pour dix milliards : un milliard de fois trop peu. Un tel univers serait un bain de lumière presque sans atome, sans étoile, sans chimie, sans lecteur.

L'Univers réel ne ressemble pas à ce calcul. Le Système solaire ne contient aucune quantité notable d'antimatière, et là où une région de matière toucherait une région d'antimatière, la frontière brillerait en rayons

gamma ; on ne voit pas cette lueur. En 1998, Andrew Cohen, Alvaro De Rújula et Sheldon Glashow calculent ce qu'un univers en domaines laisserait dans le ciel : un fond gamma au-dessus des limites mesurées, « à moins que le domaine de matière que nous habitons ne soit pratiquement tout l'Univers visible » ; un univers symétrique est « empiriquement exclu ». Il y a donc eu, dans le bain, un léger excès de baryons. L'annihilation a détruit toutes les paires, et l'excès est resté.

La taille de ce reste est mesurée. On l'écrit η , le nombre de baryons rapporté au nombre de photons. Le satellite Planck, qui a cartographié le fond diffus, lit six baryons pour dix milliards de photons, à un centième près — $\eta = (6,104 \pm 0,058) \times 10^{-10}$ —, et le deutérium des nuages de gaz lointains, par une tout autre méthode, donne la même valeur. Aujourd'hui, autour de chaque baryon, il y a environ 1,6 milliard de photons ; et ces photons sont, en grande partie, ce que les annihilations d'autrefois ont laissé derrière elles.

Ramené à l'époque où baryons et antibaryons étaient aussi nombreux que les photons, l'excès est infime — « l'énorme asymétrie d'aujourd'hui était en fait un nombre minuscule dans le passé », écrivent Luca Canetti, Marco Drewes et Mikhail Shaposhnikov. Les sources le chiffrent à un pour cent millions ou à un pour dix milliards, selon ce qu'elles mettent au dénominateur ; le fait est le même : une particule en trop pour quelques centaines de millions à quelques milliards de paires. Tout le reste a brûlé. 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.

Le cahier des charges

En 1967, à Moscou, Andreï Sakharov écrit ce qu'il faut à un univers pour garder une particule en trop. Trois conditions, nécessaires toutes les trois. Des réactions qui changent le nombre de baryons moins celui des antibaryons ; sans elles, un solde parti de zéro reste à zéro. La violation de deux symétries, C, qui échange particules et antiparticules, et CP, qui y ajoute le miroir de l'espace ; si elles tenaient, chaque réaction qui favorise la matière aurait une jumelle de même probabilité qui favorise l'antimatière, et les deux s'annuleraient. Un écart à l'équilibre thermique ; à l'équilibre, chaque réaction est défaite par son inverse, et le solde ne bouge pas. Ces trois lignes ne disent pas comment l'excès s'est formé. Elles disent ce qu'il faut réunir pour qu'il se forme.

Avant de chercher le mécanisme, trois explications faciles passent au dossier et en sortent. Le hasard : dans une foule, les deux camps ne sont jamais exactement à égalité ; mais dans le volume qui deviendra notre galaxie, un nombre de baryons et d'antibaryons à quatre-vingts chiffres donnerait par hasard un écart d'une part sur un nombre à quarante chiffres, bien trop faible. La séparation : matière et antimatière auraient été rangées à part avant de pouvoir s'annihiler ; mais il aurait fallu les ranger avant 38 MeV, quand la région où un signal avait eu le temps de circuler ne contenait qu'un dix-millionième de la masse du Soleil, et rien n'isole alors des masses de galaxies. Un univers né avec l'excès : si l'inflation a eu lieu, elle a dilué toute asymétrie antérieure jusqu'à rien. Il faut donc un processus qui ait produit l'excès après. On l'appelle la baryogenèse.

Le modèle standard remplit les trois conditions, en principe. Des transitions appelées sphalérons y changent le nombre de baryons au-dessus de 100 à 300 GeV ; à froid, elles sont supprimées d'un facteur qui s'écrit avec cent soixante zéros, et le proton, aujourd'hui, ne se désintègre pas. L'interaction faible viole CP. L'expansion fournit l'écart à l'équilibre. Mais deux ingrédients manquent de quantité. La violation CP du modèle standard, mesurée par un nombre sans dimension d'environ 10^{-20} , est dix ordres de grandeur sous les 10^{-10} à expliquer. Et l'écart à l'équilibre aurait exigé une transition électrofaible brutale, où la nouvelle phase apparaît en bulles, comme la vapeur dans l'eau qui bout ; une telle transition demande un Higgs de moins de 72 GeV, et il en pèse environ 126. La transition est douce ; les sphalérons effacent au fur et à me-

sure l'asymétrie qui tenterait de se former. Canetti et ses collègues jugent « extrêmement improbable » que l'asymétrie observée soit née dans ce cadre.

2025, le hall de l'expérience LHCb, au CERN. Pour la première fois, on y observe une violation CP dans des baryons, la sorte de matière dont l'Univers visible est fait : les Λ_b et leurs antiparticules ne se désintègrent pas au même rythme, et l'écart vaut 2,45 %, à 0,47 près. C'est une pièce du puzzle ; elle ne le résout pas. L'effet reste dans le modèle standard, dont le CERN dit la violation CP « trop petite de nombreux ordres de grandeur ».

Il faut donc une physique au-delà du modèle standard, et trois familles d'hypothèses se partagent le dossier. 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 né de neutrinos très lourds est converti en baryons par les sphalérons. Chacune place l'événement à une époque différente, de la fin de l'inflation à la brisure électrofaible. Ce qu'on attend pour trancher : des mesures de violation CP chez les neutrinos, dont T2K et NOvA donnent en 2025 un indice à trois écarts-types, valable seulement si l'ordre des masses des neutrinos est inversé ; et des contraintes toujours plus fines sur les particules nouvelles, comme l'absence de moment dipolaire de l'électron, mesurée à JILA en 2023. Le mécanisme est inconnu, son époque aussi ; on ne peut pas lui donner de date. Sa place dans ce chapitre est logique, pas chronologique : l'excès devait exister avant que l'annihilation ne gèle vers 20 MeV, et il est tout ce qui en reste.

Une seconde, deux gels

Une réaction a un taux : le nombre de fois qu'elle se produit, par particule, en une unité de temps. L'expansion en a un aussi, qui dit à quelle vitesse les distances grandissent. Tant que le premier dépasse largement le second, la réaction se produit de nombreuses fois pendant que l'Univers change à peine, et elle tient l'équilibre. Quand le bain refroidit, les particules se raréfient et perdent de l'énergie ; le taux de la réaction chute, celui de l'expansion aussi, mais moins vite. Vient un moment où la réaction n'a plus le temps de se faire avant que l'Univers ait changé. Elle cesse de fait, et ce qu'elle réglait reste figé à sa dernière valeur : un gel. Les interactions faibles, celles de la radioactivité bêta, les seules que ressentent les neutrinos, perdent ainsi leur course vers 1 MeV, dix milliards de kelvins, vers une seconde d'âge. Deux choses gèlent alors, presque en même temps.

La première concerne les neutrinos. Sans charge, presque sans masse, ils ne sentent que l'interaction faible et la gravitation. Tant que le bain est assez chaud et assez dense, ils échangent de l'énergie avec les électrons et partagent la température commune ; quand les interactions faibles se font trop rares, ils cessent de toucher le reste et voyagent librement depuis. La chronologie usuelle place ce départ vers une seconde ; le PDG le situe vers 3 MeV, un bain trois fois plus chaud, un peu plus tôt. Ces neutrinos existent encore. Ils forment un fond fossile qui baigne tout l'Univers comme le fond diffus de photons, mais libéré 380 000 ans avant lui ; prédit, jamais capté directement, détecté par ses effets sur la nucléosynthèse et sur le fond diffus. La fin de ce chapitre dira lesquels.

La seconde chose qui gèle est le rapport entre neutrons et protons. Le neutron pèse un peu plus lourd que le proton : $Q = 1,293$ MeV d'écart. Tant que l'Univers est plus chaud qu'environ 1 MeV, les interactions faibles changent sans cesse des neutrons en protons et des protons en neutrons, et fabriquer un neutron coûte Q de plus. À l'équilibre, un état plus coûteux est moins peuplé, dans une proportion que fixe le rapport entre ce coût et la température : $n/p = e^{(-Q/T)}$. Tant que la température dépasse de beaucoup Q , le surcoût ne compte pas et il y a presque autant de neutrons que de protons ; quand elle descend vers Q , la courbe plonge, et les neutrons se raréfient.

Si l'équilibre avait duré, 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 d'un neutron pour six protons. D'autres sources placent ce gel vers 2 MeV, avec le même rapport, et les deux ne se contredisent pas : le gel est progressif, les conversions s'essoufflent sur une plage de températures, et chaque auteur choisit l'instant où il les dit arrêtées. La formule d'équilibre donne un pour six vers 0,7 MeV, un pour 3,6 à 1 MeV, un pour deux à 2 MeV. Le « un pour six » est ce que laisse un équilibre qui se défait peu à peu ; aucune température unique ne le décrit.

Il y a donc 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 un sur six, et non un sur mille, parce que l'interaction faible a décroché avant que la température descende beaucoup sous Q . Deux échelles d'énergie qui ne se doivent rien, l'écart de masse et la température où l'interaction faible perd sa course contre l'expansion, tombent toutes deux autour du MeV. Le rapport engage ainsi les quatre interactions à la fois : la forte et l'électromagnétique par Q , qui lie les quarks dans le neutron et le proton ; la faible par le taux des conversions ; la gravitation par le taux d'expansion. Changer l'une d'elles changerait le nombre de neutrons, et la quantité d'hélium de l'Univers.

Quinze minutes

Le gel fige les échanges, pas les neutrons. Un neutron libre vit environ quinze minutes, puis devient un proton ; le proton, lui, ne meurt pas, ou si lentement qu'on ne l'a jamais vu faire. Tant que les interactions faibles tenaient l'équilibre, chaque neutron qui se défaisait était remplacé par un proton qui se changeait en neutron. Après le gel, rien ne remplace plus. Il ne reste qu'un flux à sens unique, des neutrons vers les protons, et dès la première seconde chaque minute emporte une part des neutrons qui restent. Ils ne seront à l'abri qu'enfermés dans un noyau, où le neutron est stable ; et les noyaux ne se forment pas encore.

Quand les réactions nucléaires commencent enfin, le rapport est tombé à un neutron pour sept protons. De un pour six à un pour sept, la part des neutrons parmi tous les nucléons passe de un sur sept à un sur huit : un neutron sur huit a disparu. Avec un quart d'heure de vie, cette perte prend environ deux minutes. C'est l'ordre de grandeur de l'attente avant les noyaux, puisque les abondances des premiers éléments sont fixées pour l'essentiel vers 180 secondes.

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, neutron après neutron. Ce qui attend trois minutes, c'est la fusion.

Le « un pour sept » est le résultat d'une course. D'un côté, la désintégration grignote les neutrons au rythme de leur durée de vie ; de l'autre, le refroidissement rapproche le moment où ils pourront se réfugier dans des noyaux. Un Univers refroidi plus lentement aurait laissé plus de temps aux neutrons pour mourir, un Univers refroidi plus vite en aurait gardé davantage. Deux mécanismes se sont donc ajoutés : un neutron plus lourd, défavorisé jusqu'au gel, puis une érosion pendant l'attente. Ces sept protons pour un neutron vont décider de la composition de toute la matière ordinaire ; si presque tous les neutrons finissent dans l'hélium, le rapport fixe à un quart la part de l'hélium dans la masse. Le rapport final enregistre la vitesse du refroidissement, mesurée avec l'horloge même de ce qui s'érode ; et de toutes les grandeurs mesurées en laboratoire, celle qui pèse le plus sur l'hélium de l'Univers est la durée de vie d'un neutron.

Trois nombres passent la frontière

La soupe n'a laissé aucune relique. Elle a laissé trois nombres, fixés pendant la première seconde et relus des milliards d'années plus tard : l'excès de matière, η ; le rapport des neutrons aux protons ; le nombre d'espèces de neutrinos. Rien du bain n'a marqué le ciel directement ; ce sont ces trois grandeurs qui permettent de vérifier, après coup, ce qui vient d'être raconté.

La première est l'excès. Dans le modèle standard, la fabrication des premiers noyaux, entre la troisième et la vingtième minute, ne dépend que de η : plus il y a de baryons par photon, plus les noyaux se rencontrent, et moins il reste de deutérium, ce noyau fragile d'un proton et d'un neutron. Le deutérium des nuages lointains donne donc η . Le fond diffus, libéré 380 000 ans plus tard, le donne aussi, par la manière dont les baryons pèsent sur les ondes sonores du plasma. Avec la valeur de Planck, on prédit 2,559 atomes de deutérium pour cent mille d'hydrogène ; la moyenne de onze mesures donne 2,55, à 0,03 près. L'excès né d'un mécanisme inconnu, quelque part dans le bain, est mesuré deux fois, à deux époques que tout sépare, et trouvé identique ; la nucléosynthèse est devenue « essentiellement une théorie sans paramètre ».

La deuxième est le rapport des neutrons aux 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, Y_p , se déduit en comptant : environ un quart. Ceux qui la lisent la cherchent dans le gaz ionisé des galaxies les plus pauvres en éléments lourds ; Brian Fields et ses collègues y trouvent 0,2449, à quatre millièmes près. Le rapport qui a gelé vers une seconde, où les quatre interactions se sont croisées, se lit aujourd'hui à quelques millièmes près dans la lumière de nuages de gaz. C'est le banc d'essai de la physique fondamentale telle qu'elle était à une seconde.

La troisième est la plus inattendue : l'hélium compte les neutrinos. Chaque espèce de particule légère ajoute sa part à la densité d'énergie, et dans un Univers dominé par le rayonnement, plus la densité est grande, plus l'expansion est rapide. Une espèce de plus, c'est donc une expansion plus rapide, un gel des conversions qui survient plus tôt et plus chaud, plus de neutrons, plus d'hélium : environ 0,013 de plus sur Y_p par espèce, trois fois l'incertitude de la mesure. Nucléosynthèse et fond diffus combinés donnent $N_\nu = 2,86$, à 0,15 près — trois familles, l'électronique, la muonique, la tauique ; une quatrième serait à près de huit fois l'incertitude. La valeur attendue n'est d'ailleurs pas 3 mais 3,04, parce que les neutrinos partent juste avant que les dernières annihilations d'électrons et de positrons ne chauffent le bain, et qu'ils en recueillent une petite part.

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 gardé. L'observatoire CMB-S4 vise une précision de 0,03 sur ce nombre, assez pour voir la correction de 0,045 — une mesure de la manière exacte dont les neutrinos ont quitté le bain.

Ces trois relectures situent la frontière du connu, et le 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 ». De ce côté-ci, avec une microphysique bien établie, on extrapole jusqu'à une seconde, et l'on prédit des abondances qui s'étendent sur neuf ordres de grandeur, en accord approximatif avec l'observation. La frontière traverse donc ce chapitre lui-même. Le gel des neutrons et le départ des neutrinos sont du côté établi : leurs conséquences sont mesurées. La baryogenèse est du côté spéculatif : sa conséquence est mesurée à un pour cent près, sa cause ne l'est pas. Les deux seuils du début sont entre les deux — physique testée, trace cosmique introuvable.

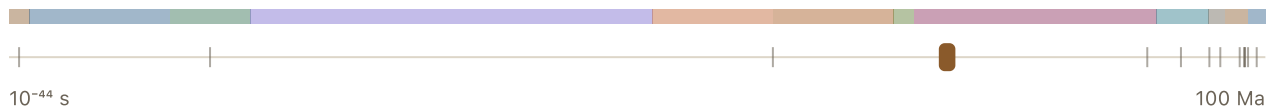
Reste une question que le bain laisse ouverte. Vers une seconde, l'Univers contient des protons et des neutrons, un pour six, et les neutrons commencent à disparaître. Pour survivre, il leur faudrait se lier à des pro-

tons, et le plus simple des noyaux, 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.

Trois minutes pour faire l'hydrogène et l'hélium

3 à 20 minutes

brouillon · 3661 mots



Un gaz pas plus dense que l'air, chaud d'un milliard de degrés, sans bord ni centre : il emplit l'espace et se détend avec lui. Il est fait de protons, de neutrons, d'électrons, et surtout de lumière, un milliard de photons pour un proton ou un neutron. Trois minutes ont passé depuis que protons et neutrons ont cessé de s'échanger. Le proton dure ; le neutron laissé libre se change en proton au bout d'une quinzaine de minutes, et depuis trois minutes c'est le seul changement. Sur huit neutrons de la première seconde, un a déjà disparu ; il en reste un pour sept protons.

Maintenant le gaz est assez froid pour qu'un proton et un neutron qui se rencontrent restent liés en deutérium. Ce noyau à deux en croise un autre, et de rencontre en rencontre, toujours à deux, il monte jusqu'au noyau à quatre, deux protons et deux neutrons : l'hélium. Un neutron pris dans l'hélium ne se change plus en rien. Presque tous ceux qui restent y entrent, chacun emmenant un proton avec lui. Au-dessus de quatre, le chemin cède : un noyau de cinq se défait aussitôt, un noyau de huit aussi ; et pour sauter plus loin, deux noyaux chargés devraient se toucher malgré la répulsion de leurs charges, dans un gaz qui refroidit de minute en minute et où presque plus aucun n'en a la force. Quelques-uns y arrivent pourtant, et laissent du béryllium qui se défera en lithium : un noyau pour dix milliards d'hydrogène.

Vingt minutes. Le gaz est trop froid, trop clairsemé ; les noyaux ne se joignent plus. Il reste trois quarts de la masse en hydrogène, des protons seuls, un quart en hélium, et des traces, deutérium et hélium 3, quelques noyaux pour cent mille. Ni carbone, ni oxygène, ni fer : rien de plus lourd que le lithium n'existe encore. Les électrons circulent libres entre les noyaux, trop chauds pour s'y fixer, et la lumière rebondit sur eux sans cesse ; aucun rayon ne va droit. Sur treize noyaux, douze sont un proton seul.

Un noyau rendu à la lumière

Un proton et un neutron se joignent. C'est le deutérium, l'hydrogène lourd, le plus simple des noyaux et le premier ; et avant qu'ils aient fait quoi que ce soit ensemble, un photon les frappe et les sépare. Il faudra pourtant repasser par là. L'hélium compte quatre nucléons, deux protons et deux neutrons, et dans ce gaz quatre particules ne se trouvent jamais au même point au même instant ; seules les rencontres à deux comptent. La chaîne doit monter marche par marche, et la première marche est celle-ci, un proton, un neutron — et elle ne tient pas.

Un noyau tient parce que ses constituants, réunis, ont moins d'énergie que séparés ; pour les désunir, il faut leur rendre la différence, et celle du deutérium vaut 2,23 MeV. Au gel, le bain est déjà descendu sous ce chiffre, vers 1 MeV, et le deutérium devrait tenir. Il ne tient qu'à 0,1 MeV, vingt fois plus bas, un milliard de degrés. Entre les deux, il y a le milliard de photons. Pour chaque noyau, un milliard de photons, et leurs énergies ne sont pas toutes la même : elles s'étalent autour de la moyenne, la plupart au-dessous, quelques-unes très au-dessus. À 0,5 MeV, ceux qui portent de quoi casser un deutérium sont une infime minorité ; mais une infime minorité d'un milliard est encore une foule, et chaque deutérium qui naît en rencontre un. Il naît, il est cassé ; il renaît, il est cassé. C'est le goulot du deutérium, un passage si étroit que rien n'y entre

tant que la foule des briseurs ne tombe pas sous un par noyau — et pour cela il faut que la queue de la distribution se soit amincie d'un facteur un milliard.

Ce milliard a déjà un nom : c'est l'inverse de η , le rapport des baryons aux photons, ce que l'annihilation a laissé derrière elle dans la soupe. Plus il y a de baryons par photon, moins chaque noyau a de briseurs autour de lui, et plus tôt le goulot s'ouvre — faiblement, par un logarithme : dix fois plus de baryons n'avancent l'heure que d'un peu. L'excès né dans la soupe fixe ainsi le moment où la fusion peut commencer, et donc le temps laissé aux neutrons pour mourir.

Car pendant que la lumière défait chaque deutérium, les neutrons meurent. Un neutron libre vit environ quinze minutes, puis devient un proton. Le seul abri où il cesserait de mourir est un noyau, et c'est précisément ce que la lumière lui refuse : chaque neutron qui trouve un proton est rendu libre avant d'avoir été sauvé, et chaque minute d'attente emporte une part de ceux qui restent.

Au gel, vers une seconde, il y avait un neutron pour six protons. Quand la porte s'ouvre, il y en a un pour sept. De un pour six à un pour sept, un neutron sur huit a disparu ; avec quinze minutes de vie, cette perte prend deux minutes environ. Le « un pour sept » n'est pas une constante de la nature : c'est l'heure qu'il est quand la porte s'ouvre. Un univers qui aurait refroidi plus lentement aurait ouvert plus tard, devant moins de neutrons.

Quand le goulot s'ouvre, l'Univers a changé de nature. Sa densité est celle de l'air. Il refroidit, il se dilate à vue d'œil. Deux noyaux s'y croisent assez souvent pour réagir ; trois au même point, presque jamais. La fabrique des premiers noyaux n'a rien d'un cœur d'étoile comprimé : c'est un gaz ténu, chaud, qui se détend, et cette contrainte-là décidera de l'endroit où la chaîne s'arrête.

Le refuge

Dès que le deutérium tient, il ne reste pas deutérium. Par une courte suite de rencontres à deux, il monte vers le noyau le plus stable de tous ceux qui sont alors à portée, l'hélium 4, deux protons et deux neutrons, et presque tous les neutrons survivants y entrent. C'est leur refuge : dans l'hélium, un neutron ne se désintègre plus, et pour eux le compte s'arrête là. Le travail va vite. Vers 180 secondes, les abondances du deutérium, de l'hélium 3, de l'hélium 4 et du lithium 7 sont pour l'essentiel fixées ; les minutes qui suivent ne font plus que des retouches, dans un gaz qui perd son énergie et sa densité.

Il suffit alors de compter. Seize nucléons. Un neutron pour sept protons : deux neutrons, quatorze protons. Les deux neutrons prennent chacun un proton. Un noyau d'hélium — deux neutrons, deux protons, quatre nucléons sur seize. Le neutron et le proton pèsent presque exactement le même poids ; quatre sur seize, c'est un quart de la masse. Restent douze protons, seuls. Douze noyaux d'hydrogène. Les trois autres quarts. L'Univers est fait d'hydrogène et d'hélium dans la proportion de trois pour un parce qu'un neutron sur huit nucléons avait survécu quand la fusion a commencé, et que chacun a entraîné un proton avec lui.

En nombre d'atomes, le tableau penche davantage. Pour un noyau d'hélium, douze noyaux d'hydrogène : un atome sur treize, à peu près 8 %. L'écart entre le quart de la masse et le treizième des atomes tient à ce qu'un noyau d'hélium pèse quatre fois un noyau d'hydrogène. Plus de neuf atomes sur dix, à la sortie de la fabrique, sont de l'hydrogène.

C'est la fenêtre qu'on donne à la nucléosynthèse primordiale, de la troisième à la vingtième minute, et c'est son produit : en masse, environ 75 % d'hydrogène et 25 % d'hélium 4, avec des traces de deutérium, d'hélium 3 et de lithium. Combien de protons restent seuls, et ce que deviennent les autres — la première moitié de ce que le chapitre cherchait tient dans ces seize nucléons.

Ce résultat tient très peu aux taux des réactions nucléaires. Les taux disent à quelle vitesse les neutrons passent du deutérium à l'hélium ; ils ne disent pas où ils finissent. L'hélium 4 est le cul-de-sac de la chaîne : une réaction deux fois plus rapide ou deux fois plus lente changerait le chemin et presque pas l'arrivée, et l'arrivée ne dépend que des neutrons disponibles à l'ouverture — de la température du gel, et du temps d'attente. De tout ce qu'on mesure en laboratoire, c'est donc la durée de vie du neutron qui tient l'hélium ; η n'y touche que par l'heure d'ouverture, et faiblement. L'hélium de l'Univers ne mesure presque rien des trois minutes qui l'ont fait. Il est un recensement des neutrons qui ont survécu à l'attente, et c'est pour cela qu'il servira, plus loin, à compter des particules que personne n'a jamais captées.

Deux marches manquantes

Une fois l'hélium 4 fait, la suite serait d'y ajouter une particule — un neutron, un proton, un autre hélium — et de monter à la masse 5 ou à la masse 8. Or il n'existe dans la nature aucun noyau stable de masse 5, ni de masse 8. Les trois fusions forment un noyau qui ne tient pas ; elles ne mènent nulle part. Dans l'escalier des masses, deux marches manquent, et elles manquent là où la chaîne en aurait le plus besoin, puisque l'hélium 4 est de loin le noyau le plus abondant. [planche 5.1](#)

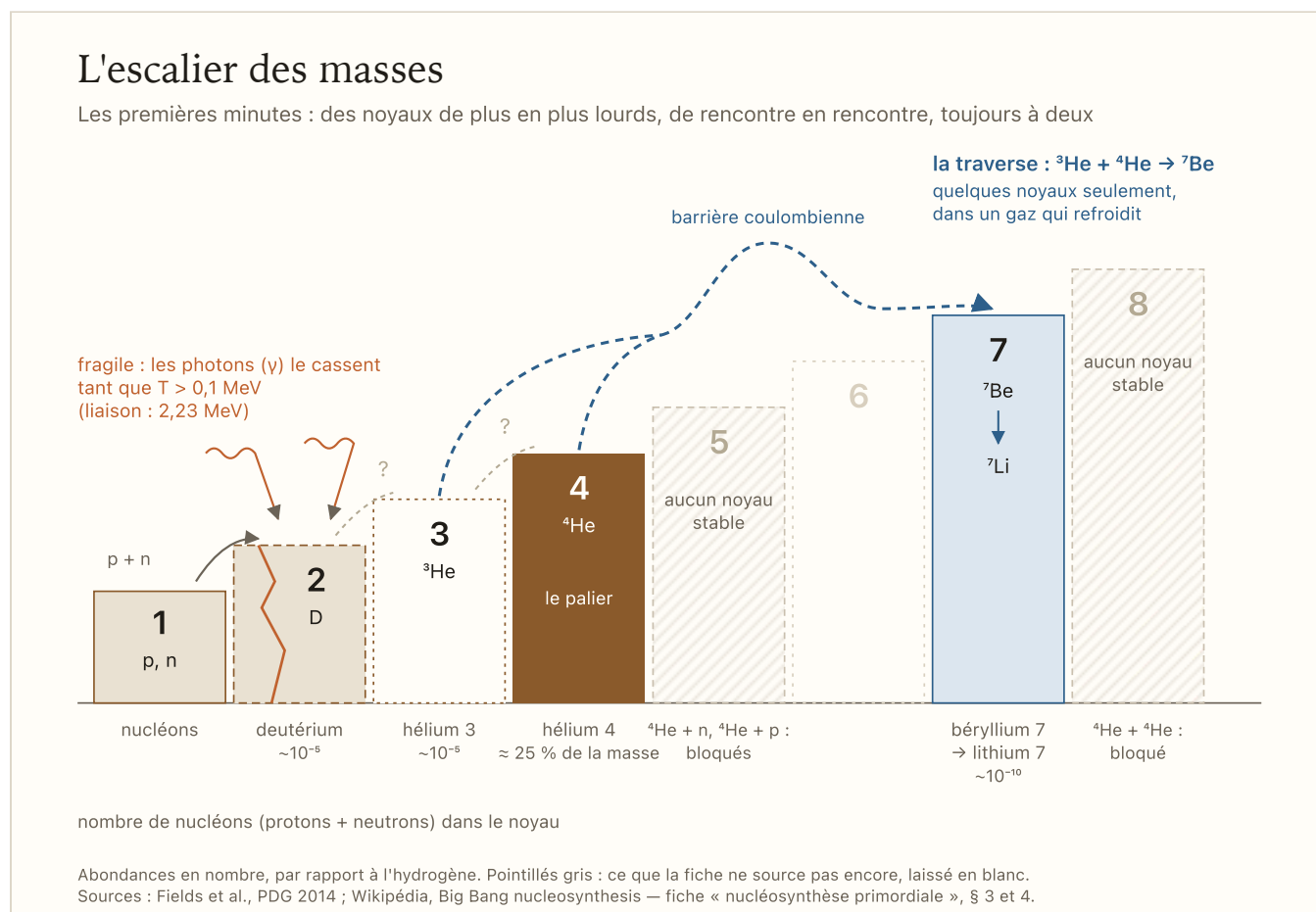


Planche 5.1 — L'escalier des masses. La chaîne monte de deux en deux jusqu'à l'hélium 4, s'arrête faute de noyau stable de masse 5 ou 8, et ne passe au-delà que par une traverse rare.

Restent les chemins de traverse : réunir l'hélium 4 avec l'un des noyaux intermédiaires, plus rares, pour sauter à la masse 6 ou 7. Ces réactions existent. Mais tous les noyaux portent une charge positive, et deux charges de même signe se repoussent ; il faut assez d'élan pour s'approcher jusqu'à la distance, très courte, où la force nucléaire l'emporte. Plus les noyaux sont chargés, plus la barrière est haute, et dans un gaz qui

refroidit de minute en minute, de moins en moins de noyaux la franchissent. Le goulot a retardé la fusion jusqu'à un univers 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, sont les intermédiaires que la fabrique n'a pas fini de convertir : quelques atomes pour cent mille d'hydrogène. Le lithium 7, trois protons et quatre neutrons : un atome pour dix milliards. Du quart de la masse au dix-milliardième, les abondances s'étendent sur neuf ordres de grandeur.

Ce lithium n'est pas fabriqué sous sa propre forme. Il naît surtout béryllium 7, quatre protons et trois neutrons, quand un hélium 3 capture un hélium 4 et que le surplus d'énergie s'en va en un photon — les physiciens l'écrivent ${}^3\text{He}({}^4\text{He},\gamma){}^7\text{Be}$ — ; ce béryllium est instable, et il se désintègre ensuite en lithium 7. La fabrique ne monte donc pas « jusqu'au béryllium » : son béryllium est une forme de passage du lithium, et au-delà de ces traces, l'Univers qui sort de ces minutes ne contient rien de plus lourd en quantité notable.

Vers vingt minutes, la température et la densité sont trop basses pour toute fusion. La fabrique ferme. Le carbone, l'oxygène, le fer attendront. Leur voie est celle-ci : trois hélium réunis en un carbone, en passant par le béryllium 8, qui ne tient pas, le troisième hélium devant arriver pendant sa brève existence — une rencontre à trois. Dans un gaz aussi dilué que l'air, où seules les rencontres à deux comptent, elle n'a aucune chance. Les éléments au-delà du lithium seront forgés dans les premières étoiles et dans leurs explosions, des centaines de millions d'années plus tard. [planche 5.2](#)

La chaîne des rencontres : toujours à deux

Du proton au lithium, chaque marche est une rencontre à deux noyaux, jamais trois.

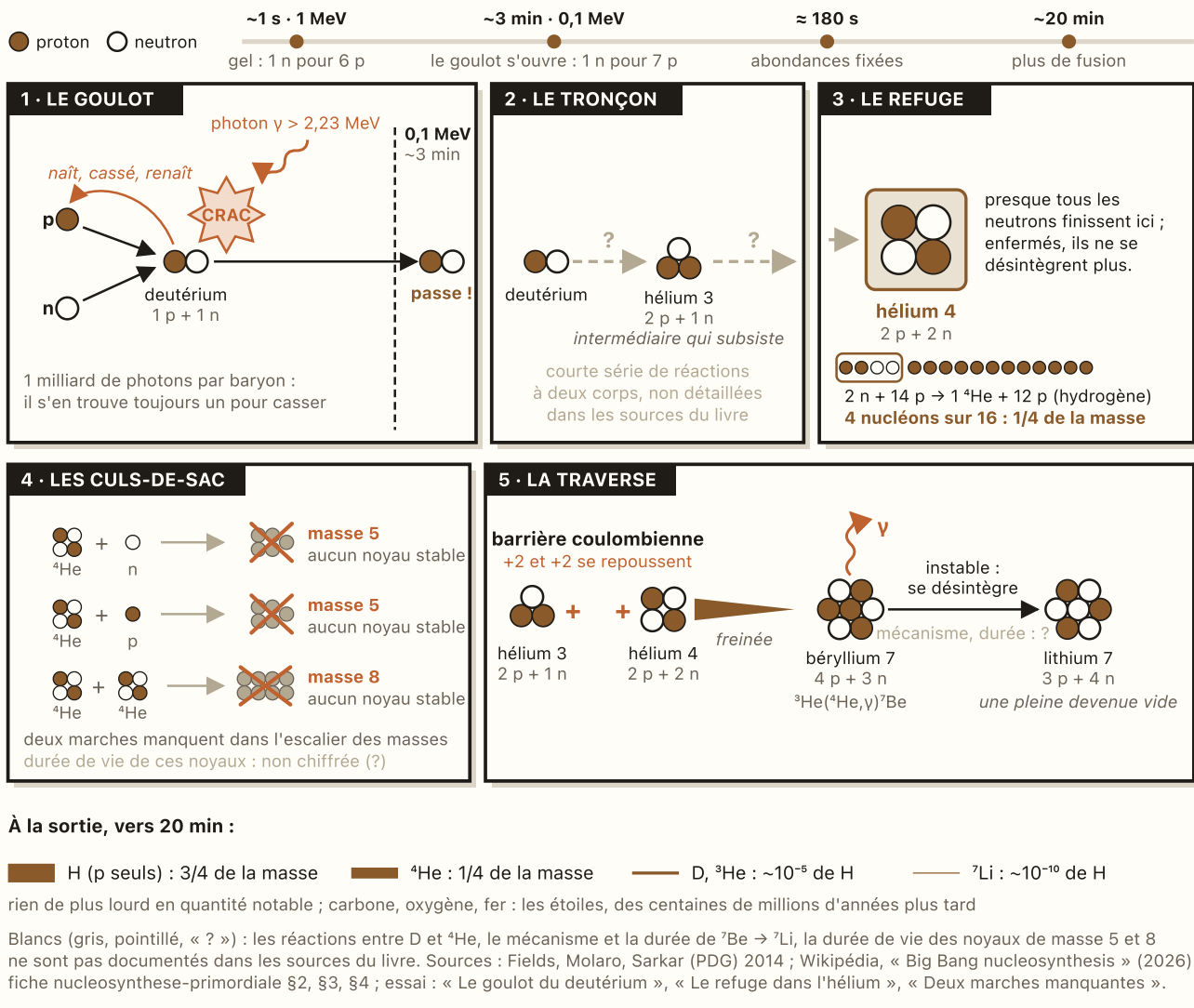


Planche 5.2 — La chaîne des rencontres : toujours à deux. Cinq cases, lues comme une bande dessinée, suivent les noyaux des trois premières minutes, dessinés en billes pleines (protons) et vides (neutrons) : le deutérium qui naît, est cassé par un photon et renaît jusqu'à 0,1 MeV ; le tronçon vers l'hélium 4, laissé en pointillé ; le refuge où presque tous les neutrons finissent (un quart de la masse) ; les trois culs-de-sac des masses 5 et 8 ; et la seule traverse, freinée par la répulsion des charges, qui mène au béryllium 7 puis au lithium 7. Chaque étape est une rencontre à deux, jamais à trois.

Un calcul qui ne peut plus s'ajuster

Dans le calcul entrent des grandeurs de laboratoire : l'écart de masse entre neutron et proton, la durée de vie du neutron, les réactions entre noyaux légers, mesurées dans des accélérateurs. Entre le nombre d'espèces de particules légères, qui fixe la vitesse de l'expansion. Entre enfin un seul nombre venu du ciel, η . Longtemps on l'a tiré des abondances elles-mêmes : on le réglait pour retrouver le deutérium, puis on vérifiait le reste ; la théorie avait un bouton. Le fond diffus, 380 000 ans plus tard, mesure η par ailleurs, par la manière dont les baryons pèsent sur les ondes sonores du plasma, et Planck lit $(6,104 \pm 0,058) \times 10^{-10}$. Avec ce nombre imposé de l'extérieur, la nucléosynthèse est devenue, écrivent Brian Fields et ses collègues, « essentiellement une théorie sans paramètre ». Elle ne peut plus s'ajuster. Elle ne peut que tomber juste ou se tromper.

Le deutérium est un intermédiaire, que la fabrique consomme pour faire l'hélium ; plus il y a de baryons par photon, plus les noyaux se rencontrent, et plus la consommation est complète. Ce qui en reste pèse, en creux, la matière ordinaire. On le lit dans des nuages de gaz lointains, devant des quasars — des noyaux de galaxies si lumineux qu'ils servent de lampe de fond ; le gaz interposé absorbe une part de leur lumière, et la signature du deutérium s'y lit à côté de celle de l'hydrogène, dans des nuages vus tels qu'ils étaient quand peu d'étoiles avaient touché leur gaz. Onze mesures donnent en moyenne $(2,55 \pm 0,03) \times 10^{-5}$. Le calcul dit 2,559. À 1 % près, deux lectures sans rapport — la chimie des trois minutes dans des nuages d'il y a des milliards d'années, les ondes sonores d'un plasma à 380 000 ans — donnent la même quantité de matière ordinaire ; et cette quantité est trop faible pour rendre compte de toute la matière que révèle la gravité.

L'hélium se lit autrement. Les étoiles en fabriquent en brûlant leur hydrogène, et un gaz en contient d'autant plus que ses étoiles ont travaillé longtemps ; on observe donc le gaz ionisé des galaxies les plus pauvres en métaux — le mot des astronomes pour tout ce qui est plus lourd que l'hélium — et on extrapole vers un gaz qui n'en aurait aucun. Là, les incertitudes tiennent à la méthode plus qu'au nombre d'observations. Fields et ses collègues retiennent $0,2449 \pm 0,0040$, contre 0,24696 calculé : la moitié d'une incertitude. Le fond diffus, plus grossièrement, trouve $0,239 \pm 0,013$. Le programme japonais EMPRESS, sur des galaxies extrêmement pauvres, obtient en 2025 une valeur plus basse, $0,2402 \pm 0,0040$, un peu moins de deux incertitudes sous le calcul. Ce qui oppose ces mesures est la troisième décimale ; toutes placent l'hélium entre 24 et 25 % de la masse, et le quart des seize nucléons n'est en cause dans aucune.

Parce qu'il recense les neutrons de la première seconde, l'hélium fait plus que confirmer. Chaque espèce de particule légère présente dans le bain ajoute à la densité ; une densité plus grande fait une expansion plus rapide, un gel plus tôt, plus de neutrons : environ 0,013 d'hélium en plus par espèce, trois fois l'incertitude de la mesure retenue. Nucléosynthèse et fond diffus, mis ensemble, comptent $2,86 \pm 0,15$ espèces de neutrinos — les trois familles connues ; une quatrième, légère, serait à plus de sept incertitudes. Un calcul fait pour des noyaux d'atomes compte ainsi des particules que personne n'a jamais captées. Aucune autre prédiction de la cosmologie ne réunit une physique aussi éprouvée, aussi peu de liberté et autant de vérifications croisées ; le PDG parle d'une concordance « remarquable ». Le lithium, lui, ne tombe pas juste.

La fausse note

Le lithium primordial ne se lit pas dans le gaz lointain mais dans des étoiles, les plus vieilles du halo — le vaste nuage d'étoiles anciennes qui entoure le disque de la Galaxie —, choisies pour leur pauvreté en fer. Les astronomes l'écrivent $[\text{Fe}/\text{H}]$; -2 désigne une étoile cent fois plus pauvre en fer que le Soleil, née d'un gaz presque primordial. Entre $-2,7$ et $-1,5$, sur plus de cent étoiles, le lithium est le même : un plateau, celui de Spite, comme une valeur de départ commune héritée du gaz d'origine. Mais ce plateau vaut $(1,6 \pm 0,3) \times 10^{-10}$, contre 4,70 calculé. Trois fois trop peu ; deux à quatre, selon les estimations. Aucune analyse d'atmosphère stellaire, de 1,7 à 2,2, n'approche la prédiction.

On ne rattrape pas cet écart en touchant à η . Le lithium calculé monte avec lui ; le ramener au plateau demanderait un η presque deux fois plus petit que celui de Planck, à des dizaines d'incertitudes de sa mesure, et contraire au deutérium et à l'hélium. Le lithium ne peut pas être accordé sans désaccorder le reste. Et comme le deutérium se mesure de plus en plus finement, la marge se resserre : le problème « demeure, et est même plus aigu ». Sous $-2,7$, le plateau fond ; le lithium se disperse, deux naines n'en montrent plus trace. Mais aucune étoile ne dépasse le plateau, aucune ne remonte vers la valeur calculée. Trois familles d'explications sont sur la table — la physique nucléaire, les étoiles, une physique nouvelle —, et leur état est très inégal.

Pour faire moins de lithium, il faudrait détruire plus de béryllium 7 pendant la fabrique, et la piste la plus directe serait une réaction de destruction sous-estimée. Au CERN, en 2016, dans le hall de n_TOF, on mesure pour la première fois la réaction où un neutron casse un béryllium 7 en deux hélium, sur une large gamme d'énergies ; on lui trouve un rôle mineur, « laissant le problème du lithium cosmologique non résolu ». Les tables de sensibilité confirment : cette voie, et celle qui passe par le deutérium, ne pèsent presque rien. La physique nucléaire est presque disculpée.

Une étoile vit des milliards d'années, et le lithium est un noyau fragile. La diffusion, le brassage dû à la rotation, la destruction avant que l'étoile s'installe dans sa phase stable peuvent le soustraire à la surface, la seule partie qu'on observe. En 2014, le PDG jugeait ces mécanismes certains, mais plafonnés à un facteur 1,8 : pas assez pour trois. En 2024, Andreas Korn fait un bilan plus favorable : des indices indépendants s'accumulent, et les étoiles « pourraient très bien être entièrement responsables » de l'abaissement de leur lithium, par diffusion atomique. 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 encore.

Un contre-témoin vient d'ailleurs. Le gaz interstellaire ne détruit pas son lithium comme le fait l'intérieur d'une étoile, et dans le Petit Nuage de Magellan, galaxie voisine quatre fois moins riche en métaux que le Soleil, le lithium du gaz est « presque égal aux prédictions ». Pour tout concilier — le plateau, le calcul, ce gaz —, il faudrait une destruction stellaire « extrêmement ajustée » selon la métallicité. Mais ce gaz a déjà reçu du lithium de novae, des explosions à la surface de naines blanches dans des systèmes doubles ; le témoin est brouillé.

Reste à modifier les trois minutes elles-mêmes. Des particules inconnues se désintégreraient pendant la fabrique et libéreraient des neutrons ; ces neutrons convertiraient le béryllium 7 en lithium 7, plus facile à détruire. Mais les mêmes neutrons font aussi du deutérium, et la précision du deutérium mesuré « contraint désormais fortement ces tentatives ». En 2026, Sandip Ganguly et ses collègues doivent recourir à deux particules, qui se désintègrent à deux époques successives, la seconde effaçant le deutérium laissé par la première. Ce degré de construction est en lui-même une information. Le lithium ne réfute pas les trois minutes : le deutérium et l'hélium, lus dans des objets sans rapport, concordent avec une précision qu'il ne peut pas entamer. Mais le problème n'est pas résolu. La piste des étoiles n'a pas encore son calcul, et toute physique nouvelle doit passer entre le lithium et le deutérium, où aucune solution simple ne passe.

La frontière, et l'eau

Le Particle Data Group donne à ces vingt minutes leur place. Il n'y a pas de « modèle standard » de la baryogenèse, pas de « modèle standard » de l'inflation, et la nucléosynthèse primordiale « marque toujours la frontière entre l'établi et le spéculatif dans la cosmologie du Big Bang ». En deçà, la soupe, la brisure électrofaible, la liaison des quarks : une physique testée en accélérateur, qui n'a laissé aucune relique. Avec la nucléosynthèse, une microphysique établie, extrapolée jusqu'à une seconde, prédit des abondances sur neuf ordres de grandeur, et l'observation les retrouve, le lithium en moins. Tout ce qui précède se reconstruit par la théorie. Les abondances, 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, les douze sur seize que le comptage laissait de côté, sont les noyaux d'hydrogène du gaz d'où naîtront toutes les étoiles ; et, bien plus tard, dans un verre posé sur une table, ceux de l'eau.

Ramenés à une année, les 13,8 milliards d'années de l'histoire cosmique placent la fin de la fabrique moins d'une milliseconde après minuit, le 1er janvier. En ce rien de temps, la matière ordinaire 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.

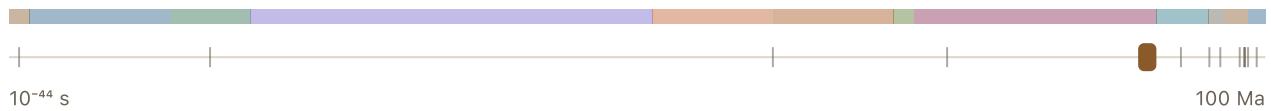
Les étoiles ne changeront ce mélange que lentement, par petites touches, en y ajoutant les éléments lourds dont nous sommes faits. Tout ce qui est au-delà du lithium attend les premières d'entre elles, et leurs explosions.

Les noyaux sont faits ; les atomes, pas encore. Le gaz de la vingtième minute est trop chaud pour qu'un électron reste attaché à un noyau. Les électrons circulent libres, et la lumière rebondit sur eux, d'électron en électron, sans parcourir aucune distance en ligne droite. Il faudra 380 000 ans, et 3 000 degrés, pour que les électrons se posent sur les noyaux et que la lumière parte. C'est cette lumière qui, captée aujourd'hui, a donné le nombre avec lequel on vient de vérifier les trois minutes.

La première lumière

47 000 à 380 000 ans

brouillon · 3961 mots



Une lueur blanche emplit l'espace, sans source. Le gaz qui la porte est fait de noyaux d'hydrogène et d'hélium, d'électrons libres, et, pour chaque noyau, d'un milliard et demi de photons. Cinquante mille ans ont passé, et depuis peu la matière pèse plus que la lumière qui la baigne : l'étirement de l'espace affaiblit les photons plus vite qu'il ne dilue les noyaux. La matière noire est là aussi, cinq fois et demie plus abondante que la matière ordinaire ; la lumière la traverse sans la toucher, elle n'agit que par son poids. Dans cette lueur rien ne se dessine : la lumière ne fait que passer d'un électron au suivant, renvoyée ailleurs.

Là où la matière noire s'est amassée un peu plus, elle attire. Le gaz y tombe, la lumière y tombe avec lui, et plus la lumière se resserre, plus elle pousse : le gaz est refoulé, s'étale, dépasse l'équilibre, et retombe. Une compression, une détente, encore : c'est un son. Les petites régions battent vite, les grandes lentement, et toutes ont commencé en même temps ; à chaque instant, certaines sont au plus serré, d'autres au plus lâche. La matière noire, que la lumière ne pousse pas, reste au fond des creux qu'elle approfondit, pendant que le gaz bat au-dessus.

La lueur jaunit à mesure que l'espace s'étire. Vers dix mille degrés, un noyau d'hydrogène retient parfois un électron ; mais sur le milliard et demi de photons qui l'entourent, quelques-uns ont encore de quoi le lui arracher, et quelques-uns suffisent. Vers trois mille degrés, ils ne suffisent plus. Les atomes tiennent ; les électrons libres se raréfient, et un photon en croise de moins en moins. Vient pour chacun un dernier choc, puis plus aucun : il file droit, dans la direction où ce dernier électron l'a renvoyé, plus chaud s'il part d'une région serrée, plus froid d'une région lâche. Sans la poussée de la lumière, le gaz cesse de battre, chaque onde arrêtée là où elle en était. Trois cent quatre-vingt mille ans après le début, l'espace est transparent, et la lumière qui s'en va s'enfuit avec lui.

Le brouillard

Dans le gaz de la vingtième minute, un photon parcourt une courte distance, heurte un électron, repart dans une direction quelconque, en heurte un autre. Autour de lui, des noyaux nus d'hydrogène et d'hélium, des électrons que rien ne retient, et pour chaque noyau un milliard et demi de photons qui font le même trajet brisé que lui. Les neutrinos traversent ce gaz sans y toucher, comme ils le font depuis la première seconde ; la matière noire le double sans s'y mêler, elle ne lui parle que par la gravité. C'est un plasma. Aucun photon n'y garde sa direction assez longtemps pour porter une image : la lumière est partout, et l'on n'y voit rien, parce que chaque rayon a été dévié mille fois avant d'arriver où que ce soit. L'Univers est un brouillard très dense, éclairé de l'intérieur.

L'énergie de ce brouillard est d'abord dans sa lumière ; la matière, présente, pèse moins que les photons qui la baignent. Puis l'espace s'étire. Le même nombre de noyaux occupe un volume plus grand, et la matière se dilue. Le même nombre de photons occupe le même volume plus grand, et la lumière se dilue autant ; mais chaque photon, en plus, voit sa longueur d'onde s'allonger avec l'espace qu'il traverse, et un photon plus long porte moins d'énergie. La lumière perd sur deux tableaux quand la matière ne perd que sur un. Quel que soit l'écart de départ, la matière finira par l'emporter ; reste à savoir la date.

Vers 47 000 ans, la densité d'énergie de la matière dépasse celle du rayonnement. Dans une année où toute l'histoire de l'Univers tiendrait en douze mois, il est alors le 1er janvier, moins de deux minutes après minuit. Les petites inégalités que l'inflation a laissées partout — ici un peu plus de matière, là un peu moins — attendaient depuis le début ; tant que la lumière dominait, elles restaient au niveau où elles étaient nées. Maintenant la région un peu plus dense attire un peu plus fort, la matière voisine y tombe, l'écart se creuse. Des centaines de millions d'années plus tard, de ces creux sortiront les premières galaxies. Un observateur placé là, s'il avait existé, n'aurait rien vu de ce changement de garde : autour de lui, le brouillard.

Un brouillard qui vibre

Ce brouillard n'est pas immobile. La gravité tire sa matière vers les régions un peu plus denses, et l'essentiel de cette matière n'est pas celle des noyaux : Planck en pèse cinq fois et demie plus sous forme de matière noire que sous forme de matière ordinaire. La matière noire creuse donc les puits, et le reste y tombe — noyaux, électrons, et la lumière accrochée à eux.

La lumière s'y oppose. Les photons heurtent les électrons sans relâche et sont liés à eux par ces chocs ; les électrons tiennent aux noyaux par l'attraction électrique ; noyaux, électrons et photons ne font qu'un seul fluide. Quand la gravité pousse ce fluide dans un puits, les photons s'y entassent, et leur pression, qui monte avec l'entassement, le repousse. Le fluide se détend, dépasse l'équilibre, retombe, est repoussé encore. Une compression, une détente, répétées : c'est une onde sonore, et le plasma est parcouru d'ondes de pression comme l'air l'est par le son. La matière noire reste hors de cette danse. La lumière n'a aucune prise sur elle ; elle demeure au fond des puits qu'elle continue de creuser, pendant que le fluide oscille au-dessus. La gravité fournit le ressort, la lumière la raideur, et le fluide va de l'un à l'autre.

Toutes ces ondes sont parties au même moment, quand les fluctuations de l'inflation se sont trouvées en place au début de l'Univers chaud. Chacune met un temps qui dépend de sa taille à faire une compression et une détente : une petite région oscille vite, une grande lentement. À un instant donné, certaines sont au plus fort de leur compression, d'autres au creux de leur détente, d'autres entre les deux. Et il existe une distance que le son n'a pas pu dépasser depuis que l'Univers est chaud : 144 mégaparsecs à l'échelle d'aujourd'hui, 470 millions d'années-lumière — l'horizon sonore, la règle graduée que le chapitre suivant posera sur le ciel. En deçà de cette longueur, le brouillard vibre sur toute la gamme, et l'état de sa vibration change d'instant en instant, en attendant celui qui la figera.

Pourquoi si tard

Pour que le brouillard se lève, il faut que les électrons cessent d'être libres. Un atome neutre n'arrête presque pas la lumière ; un photon le croise sans être dévié. Tout dépend du moment où l'hydrogène peut garder son électron. Il faut 13,6 électronvolts pour le lui arracher, l'énergie typique des photons d'un rayonnement de 150 000 degrés, et les atomes devraient tenir dès que l'Univers passe sous cette température. Ils ne tiennent qu'à 3 000 K, cinquante fois plus bas, pour la raison même qui a retardé le deutérium : la température ne dit que l'énergie typique des photons, une petite fraction en porte beaucoup plus, et avec un milliard de photons par baryon cette fraction suffit. Un électron se pose sur un noyau ; un photon de la queue l'arrache. Il se pose ; il est arraché. Cela dure jusqu'à ce que la queue de haute énergie se soit assez amincie, vers 3 000 à 4 000 K.

Ce milliard est l'inverse de η , le rapport des baryons aux photons. Planck le lit à $(6,104 \pm 0,058) \times 10^{-10}$, soit 1,6 milliard de photons pour un baryon, ce qu'a laissé le léger excès de la matière sur l'antimatière dans la soupe. Le même nombre décide deux fois du calendrier. Il a retenu le deutérium jusqu'à ce que le bain

descende vingt fois sous l'énergie qui lie ce noyau ; il retient l'hydrogène jusqu'à cinquante fois sous l'énergie qui lie cet atome. Entre les deux énergies, un facteur cent mille — l'une se compte en millions d'électronvolts, l'autre en électronvolts — et la même logique. La recombinaison est tardive parce que la lumière est innombrable, pas parce que l'atome serait fragile.

Elle a lieu vers 3 000 K, quand l'Univers a environ 380 000 ans, à un décalage vers le rouge $z \approx 1\,100$. Ce nombre dit de combien l'Univers s'est étiré depuis que cette lumière est partie : les distances entre les amas de matière étaient alors 1 100 fois plus petites qu'aujourd'hui.

Le mot est mal choisi, et il faut le prendre pour un nom propre. Électrons et noyaux n'avaient jamais été combinés. C'est la première fois, dans l'histoire de l'Univers, que des atomes neutres existent en quantité.

Le brouillard se lève

La recombinaison n'a pas lieu en un instant. À mesure que la température baisse, les atomes neutres se multiplient, et la lumière trouve de moins en moins d'électrons libres sur son chemin. Planck place la surface de dernière diffusion à $z^* = 1089,92 \pm 0,25$: le seuil où un photon n'a plus, en moyenne, qu'un seul choc devant lui, après quoi il file droit. À ce seuil l'Univers n'est pas encore neutre ; il ne l'est à 90 % que vers $z \approx 1\,070$, après s'être encore étiré de près de 2 %, et le processus déborde des deux côtés. Les dates le disent : 372 900 ans dans le tableau du Particle Data Group, 378 000 ou 379 000 dans les synthèses usuelles, 380 000 à l'Agence spatiale européenne — des moments différents d'une même transition. Le chiffre rond résume une fenêtre, pas un instant.

Deux choses se superposent ici, très proches dans le temps, et distinctes. La recombinaison est un événement de la matière : des électrons se lient à des noyaux, des atomes se forment. Le découplage est un événement de la lumière : des photons cessent d'être diffusés et voyagent. Le second vient du premier, puisque ce sont les électrons libres qui arrêtent la lumière ; mais il suffit qu'il en reste trop peu pour qu'un photon en rencontre un avant que l'expansion ne les ait écartés, et la lumière part alors que les atomes ne sont pas tous faits.

Quand le brouillard se lève, chaque photon part dans la direction de son dernier choc et ne la quitte plus. Il ne tourne plus. Il emporte l'état du plasma à l'endroit et à l'instant où il l'a quitté : un peu plus chaud là où le fluide était comprimé, un peu plus froid là où il était détendu, et la marque du puits de gravité dont il a dû sortir. Les ondes cessent au même moment. Privé de la pression des photons, le fluide de matière ordinaire n'a plus de raideur ; elles s'arrêtent là où elles en étaient, chacune au point de son cycle où la libération l'a surprise — celle-ci au plus fort de sa compression, celle-là au creux de sa détente, d'autres à mi-chemin. La lumière garde la photographie de cet arrêt, et elle la porte en ligne droite, depuis.

Cette surface nous entoure comme une sphère. Nous recevons aujourd'hui les photons partis de tous ses points à la même époque, qui ont voyagé exactement le temps qu'il fallait pour nous atteindre maintenant. La matière qui les a émis se trouve aujourd'hui, l'expansion comptée, à 45 milliards d'années-lumière ; au moment où la lumière la quittait, elle n'était qu'à une quarantaine de millions d'années-lumière de celle qui allait devenir notre Galaxie.

Aucune lumière ne peut nous venir d'avant 380 000 ans. Tout photon émis plus tôt a été diffusé, redirigé, brassé jusqu'à son dernier choc ; regarder plus loin que cette surface, c'est regarder dans un nuage. 380 000 ans est une limite de ce qu'on voit, pas une limite de ce qui a eu lieu : un mur, pas un début. Tout ce que les chapitres précédents ont raconté s'est passé derrière, et n'en est connu que par des traces — les abondances des noyaux légers, et l'empreinte que les fluctuations primordiales ont laissée dans cette lumière même.

Il n'est opaque que pour la lumière. Les neutrinos, partis dès la première seconde, l'ont traversé ; ils forment un fond fossile qu'on ne lit qu'indirectement, par ce qu'il a fait à la nucléosynthèse et au fond diffus. Les ondes gravitationnelles que l'inflation devrait avoir produites le traverseraient aussi, et elles n'ont pas été détectées. Voir derrière est possible en principe, avec d'autres messagers que la lumière ; à ce jour, on ne le fait pas.

De 3 000 K à 2,7 K

Les photons libérés 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 a grandi d'un facteur 1 100 — c'est le sens même de $z \approx 1\,100$ — et la température d'un tel rayonnement baisse dans la même proportion. 3 000 K divisés par 1 091 : 2,7 K. La lumière émise à la température d'un corps incandescent nous arrive à moins de trois degrés au-dessus du zéro absolu, dans le domaine des micro-ondes, 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 ».

Sa température vaut $2,72548 \pm 0,00057$ K d'après la synthèse de Dale Fixsen en 2009, deux dix-millièmes d'incertitude. Plus que la température, c'est la forme du spectre qui compte, la manière dont l'énergie se répartit entre les longueurs d'onde : celle d'un corps noir, le rayonnement d'un corps en équilibre thermique parfait — « le spectre de corps noir le plus parfait jamais mesuré ». Un corps noir naît d'un milieu opaque où matière et lumière ont longtemps échangé jusqu'à l'équilibre ; le plasma était cela. L'expansion a ensuite étiré toutes les longueurs d'onde dans la même proportion, sans déformer la courbe, en abaissant seulement sa température. Aucune étoile, aucune galaxie, aucune poussière — mélanges de corps à des températures différentes — ne ferait un corps noir aussi pur sur tout le ciel.

Ce rayonnement fait aussi office d'horloge. 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 son propre thermomètre, et il donne l'heure partout à la fois.

Sur l'année cosmique, cette lumière part un quart d'heure après minuit, le 1er janvier. La matière a pris le dessus deux minutes plus tôt à peine. 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.

Un bruit dans l'antenne

En 1948, Ralph Alpher et Robert Herman, qui travaillent 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. L'ordre de grandeur est juste, à un facteur deux près. La découverte vient d'ailleurs.

À Crawford Hill, près de Holmdel, dans le New Jersey, les laboratoires Bell disposent d'une grande antenne cornet, un pavillon évasé fait pour recevoir des signaux très faibles. Arno Penzias et Robert Wilson y mesurent, à 4 080 mégahertz, la température de bruit de l'antenne : la puissance qu'elle reçoit quand on ne vise rien, dite comme la température d'un corps qui produirait le même signal. Ils connaissent la part de l'atmosphère, celle de l'antenne elle-même, celle de l'électronique. La mesure dépasse la somme d'environ 3,5 K. La première date du 20 mai 1964.

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. Il ne varie pas d'une saison à l'autre, de juillet 1964 à avril 1965. Une

source terrestre ou atmosphérique dépendrait de la hauteur au-dessus de l'horizon ; une source du Système solaire suivrait l'orbite de la Terre ; une source de la Galaxie serait plus forte vers 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 n'a pas changé à l'échelle de l'année : l'Univers lui-même.

L'article de 1965 porte un titre d'ingénieur : « Une mesure de l'excès de température d'antenne à 4 080 Mc/s ». 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 ; Penzias et Wilson reçoivent le prix Nobel de physique en 1978. La plus vieille lumière de l'Univers est entrée dans la science comme un défaut, un bruit en trop qu'on cherchait à ôter d'une antenne de télécommunications. Ce qui la distingue d'un parasite n'est pas sa force mais sa régularité : la même partout, tout le temps. Et si elle porte l'état du plasma d'où sortiront les galaxies, elle ne peut pas être parfaitement uniforme ; elle doit porter, quelque part, la trace des inégalités.

Les premières inégalités

Les inégalités sont minuscules. Le fond diffus est le même dans toutes les directions à une part sur 25 000 près ; ses variations de température d'un point du ciel à l'autre font un peu plus de 100 millièmes de degré en moyenne quadratique — 2,725 K divisés par 25 000. Pour les voir, il faut mesurer des écarts d'un dix-millième de degré sur un rayonnement qui n'en fait pas trois.

Avant de les chercher, il faut retirer du ciel une variation trente fois plus grande, qui ne doit rien à l'Univers primordial. Le ciel micro-onde est plus chaud d'un côté et plus froid du côté opposé, de 3,36 millièmes de degré, parce que nous avançons dans ce bain : le Soleil s'y déplace à 370 kilomètres chaque seconde. Le rayonnement qui vient de l'avant est comprimé et paraît plus chaud, celui qui vient de l'arrière étiré et plus froid, d'une part sur mille — le rapport de notre vitesse à celle de la lumière. Ce dipôle retiré, on obtient le ciel que verrait un observateur immobile par rapport à l'expansion, et c'est dans ce ciel-là qu'il faut chercher.

COBE, satellite de la NASA, établit d'abord que le fond diffus a le spectre d'un corps noir ; puis il trouve les premières anisotropies. Les cartes de sa première année, publiées en 1992 par l'équipe de George Smoot, donnent trente millièmes de degré de variation, à cinq près, quand le ciel est lissé à 10° — compatibles avec le spectre que prévoient les modèles d'inflation, la même amplitude à toutes les échelles. L'équipe reçoit le prix Nobel de physique en 2006.

COBE voyait les inégalités, pas encore les ondes. L'échelle angulaire des ondes figées, telle que Planck la mesure, est de 0,6° ; 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. Ce qu'il mesure, ce sont les très grandes échelles, plus grandes que l'horizon sonore, celles que le son n'avait pas eu le temps de parcourir avant que la lumière parte : les inégalités telles que l'inflation les a laissées, sans la vibration du plasma. Pour entendre ce que le brouillard vibrait, il fallait une vue plus fine.

Les notes

La vue plus fine arrive avec WMAP, que la NASA lance le 30 juin 2001 ; il cartographie les anisotropies sur tout le ciel, bien plus serré, et collecte ses données jusqu'au 19 août 2010. Planck lui succède et publie ses résultats définitifs en 2018. Depuis, ACT au Chili et SPT au pôle Sud ont atteint ensemble la puissance de Planck sur certains paramètres, avec d'autres instruments, sur d'autres portions du ciel.

On ne lit pas une telle carte tache par tache. Chaque tache prise seule est un hasard, comme une vague sur la mer ; ce qui porte l'information est la statistique de l'ensemble, combien de taches de telle taille, avec quelle amplitude. On calcule le spectre de puissance de la carte, l'amplitude moyenne des fluctuations selon leur taille angulaire, et l'opération est 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 montre une série de pics, et ce sont les ondes figées. Le premier pic : les ondes qui avaient eu tout juste le temps de se comprimer une fois. Le deuxième : celles qui s'étaient comprimées, puis détendues. Le troisième : celles qui en étaient à leur deuxième compression. Et ainsi de suite, pic après pic ; entre eux, les ondes surprises à mi-chemin, qui laissent peu de contraste. L'instrument avait des harmoniques, et la carte les a gardées. Ces pics avaient été prédits avant d'être vus. Wayne Hu et Scott Dodelson écrivent en 2002 que leur 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.

Chaque pic répond à une question. La taille angulaire du premier dit la courbure : la physique du plasma fixe la taille réelle des ondes, la géométrie de l'espace traversé fixe leur taille apparente, et dans un espace courbe les rayons convergent ou divergent en chemin, le même objet paraît plus grand ou plus petit que dans un espace plat ; les données disent un univers plat. Le rapport du premier au deuxième pèse les baryons : ils alourdissent le fluide, et plus il y en a, plus les compressions, que la gravité aide, l'emportent sur les détentes, qui la combattent — or le premier pic est une compression, le deuxième une détente. Le troisième dit la matière noire, qui creuse les puits où le fluide oscille sans osciller elle-même.

Le modèle de base qui décrit la carte ne compte que six paramètres ajustés : la densité de matière ordinaire, celle de matière noire froide, l'échelle angulaire des ondes sonores, la part de cette lumière rediffusée plus tard quand les premières étoiles ont réionisé le gaz, et l'amplitude des fluctuations primordiales avec la manière dont elle varie selon l'échelle. 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. Planck connaît les deux densités à moins d'un pour cent, et l'échelle angulaire, la grandeur la plus directement lue sur la carte, à 0,03 % près.

De la densité de matière ordinaire de Planck on tire $\eta = (6,104 \pm 0,058) \times 10^{-10}$. Ici le chapitre rejoint le précédent. Injecté dans le calcul des trois minutes, ce nombre prédit un rapport du deutérium à l'hydrogène de $2,559 \times 10^{-5}$; dans les nuages de gaz lointains éclairés par des quasars, on lit $(2,55 \pm 0,03) \times 10^{-5}$. 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, sans qu'aucune ait été ajustée sur l'autre.

Ce que l'Univers vibrait vers 380 000 ans est enregistré là, retrouvé par trois familles d'instruments, dans l'espace et au sol, et ne changera plus. Mais les dates qui scandent ce livre ne se lisent pas sur la carte. La carte est une mesure ; l'âge qu'on en tire est un calcul, qui suppose ce que l'Univers a fait entre cette lumière et nous. C'est ce calcul que le chapitre suivant démonte, étage par étage.

Un âge calculé

brouillon · 3456 mots

Une horloge qui n'a pas tourné

Dans un grain de minéral enfermé dans une météorite depuis la naissance du Système solaire, des atomes radioactifs se désintègrent à un rythme connu. Chaque atome qui se brise laisse un descendant, et le descendant reste là, dans le cristal, à côté de ceux qui ne se sont pas encore brisés. La méthode plomb-plomb lit la proportion des uns aux autres, et cette proportion dit combien de temps a passé : 4 567,30 millions d'années, à 0,16 près. L'horloge était dans l'échantillon depuis le début, et elle n'a jamais cessé de tourner.

Pour l'Univers, aucun grain. Aucun échantillon ne date du début de la phase chaude ; ce début lui-même, personne ne l'a observé. La plus vieille lumière qui nous parvienne est partie vers 380 000 ans, et avant elle tout était opaque. L'âge de l'Univers ne se lit pas dans une roche. Il se calcule, dans un modèle, par les trois étages que le chapitre précédent a posés : une carte qu'on mesure, une taille qu'on calcule avec la physique d'avant la recombinaison, un âge qu'on déduit en supposant une histoire de l'expansion.

Le chiffre, d'abord, est stable. WMAP, dont les données vont de 2001 à 2010, donnait 13,77 milliards d'années, « à un demi-pour-cent près ». La première carte de Planck, en 2013, donnait 13,82.

L'analyse finale de Planck, en 2018, écrit $13,797 \pm 0,023$ milliards d'années avec le fond diffus seul, et $13,787 \pm 0,020$ quand on y ajoute les oscillations acoustiques des baryons — l'empreinte des mêmes ondes sonores, retrouvée non plus dans la lumière mais dans la répartition des galaxies, une distance privilégiée entre elles, détectée pour la première fois en 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. La marge finale fait 0,15 % du total : sur une vie de quatre-vingts ans, six semaines. Aucune autre date du livre n'est connue avec cette précision relative, et ces vingt millions d'années appartiennent au dernier des trois étages, celui où l'on suppose.

Premier étage : un angle

Ce que Planck mesure est une carte : la température de la plus vieille lumière dans chaque direction du ciel, et la polarisation de cette lumière. De la carte on tire le spectre de puissance, l'amplitude moyenne des fluctuations selon leur taille angulaire, et le spectre montre une série de pics régulièrement espacés : les ondes sonores du plasma, figées au moment où la lumière s'est libérée.

Le chiffre le plus directement lu sur ce spectre est l'échelle angulaire acoustique, θ : *la taille apparente, dans le ciel, de la plus grande onde que le plasma ait pu porter à la recombinaison*. Planck l'écrit $100 \theta = 1,0411 \pm 0,0003$. Converti en degrés, l'angle fait environ 0,6°, un peu plus que la pleine Lune, et il est connu à 0,03 % près.

Cette précision tient à la manière dont l'angle est lu. On ne mesure pas une tache ; on mesure la position de toute la série des pics, dont l'espacement est fixé par θ^* , comme on lit l'écartement d'un peigne sur toutes ses dents et non sur une seule. Chaque pic apporte sa propre estimation du même angle, et chacun est lui-même la moyenne de millions de fluctuations réparties sur le ciel. 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 l'écrit : ce résultat « ne dépend que faiblement du modèle cosmologique ».

Deux autres grandeurs sont presque aussi directes, parce qu'elles fixent la forme des pics plutôt que leur position : la densité de matière ordinaire, $\Omega_b h^2 = 0,02237 \pm 0,00015$, et celle de matière noire froide, $\Omega_c h^2 = 0,1200 \pm 0,0012$. Ce sont des densités dites physiques, une masse par unité de volume — ce que le plasma sentait réellement, la quantité de matière qui s'y trouvait, et non la fraction qu'elle représenterait treize milliards d'années plus tard. S'y ajoute une température, mesurée par d'autres instruments : celle du fond diffus aujourd'hui, $2,72548 \pm 0,00057$ K d'après Dale Fixsen en 2009, qui fixe la quantité de lumière que contient l'Univers et, en remontant, 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 un pour cent. Une température connue à deux dix-millièmes près. Aucun de ces nombres n'est encore une distance, une vitesse d'expansion ni un âge.

Deuxième étage : la règle

Un arpenteur qui voit un poteau sous un certain angle en déduit sa distance, s'il sait que le poteau mesure deux mètres. Pour la plus vieille lumière, le poteau est l'horizon sonore : la plus longue distance qu'une onde de pression ait pu parcourir dans le plasma, du début de la phase chaude jusqu'à la recombinaison. Personne ne peut aller la mesurer. On la calcule.

Le calcul donne $r^* = 144,43 \pm 0,26$ mégaparsecs, environ 470 millions d'années-lumière. La longueur est ramenée à l'échelle d'aujourd'hui : c'est la distance qui sépare maintenant deux amas de matière qui, à la recombinaison, étaient séparés d'un horizon sonore. À l'époque, l'Univers étant 1 100 fois moins étiré, elle était 1 100 fois plus courte.

Le calcul a trois ingrédients. La vitesse du son dans le plasma, plus lente quand les baryons alourdissent le fluide. La durée pendant laquelle le son a voyagé, fixée par le rythme de l'expansion ancienne, et ce rythme par ce que contenait l'Univers : rayonnement, matière ordinaire, matière noire. Le moment de la recombinaison, fixé par la physique atomique vers 3 000 K, soit $z^* = 1\,089,92 \pm 0,25$. Chacun est nourri par l'étage d'en dessous — la densité de baryons règle la vitesse du son ; les deux densités et la température règlent le rythme de l'expansion. Le calcul suppose aussi que la liste 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 les $\pm 0,26$ mégaparsecs.

Le rapport des deux étages donne une distance. 144,43 mégaparsecs divisés par 0,010411 radian font 13 873 mégaparsecs ; Planck écrit $13,873 \pm 0,025$ gigaparsecs pour la distance comobile de la surface de dernière diffusion, environ 45 milliards d'années-lumière.

La marge de cette distance vaut 0,18 %, six fois celle de l'angle, et elle est presque entièrement héritée de celle de r^* . Le maillon mesuré est le plus solide ; le maillon calculé fixe la précision. La distance de la plus vieille lumière est 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.

Troisième étage : le pont

On tient une distance, 13,873 gigaparsecs, et un étirement : $z^* \approx 1\,090$, l'Univers a grandi d'un facteur 1 091 pendant le trajet de la lumière. Une distance et un étirement ne font pas encore un âge. Il faut savoir à quelle vitesse l'Univers s'est étiré à chaque étape du trajet — connaître l'histoire de l'expansion entre $z \approx 1\,090$ et aujourd'hui, le pont entre la surface de dernière diffusion et nous — et cette histoire, personne ne l'observe d'un bout à l'autre sur le fond diffus. On la suppose. La supposition s'appelle Λ CDM, le modèle

standard de la cosmologie, et elle dit trois choses de l'Univers tardif : l'espace est plat, ce que la position du premier pic confirme ; la matière est faite de baryons et de matière noire froide, dont le premier étage a donné les densités absolues ; le reste est une constante cosmologique, Λ , une énergie noire dont la densité ne change pas avec l'expansion.

Dans ce cadre, il ne reste presque plus d'inconnue. La densité absolue de matière étant connue, sa fraction Ω_m ne dépend que du taux d'expansion actuel ; l'espace étant plat, l'énergie noire vaut ce qui manque pour atteindre 1. Tout se ramène à un seul nombre, H_0 , un seul bouton qu'on tourne jusqu'à ce que la lumière partie de $z \approx 1\,090$ ait parcouru exactement les 13,873 gigaparsecs du deuxième étage. Le bouton s'arrête sur $H_0 = 67,36 \pm 0,54$ km/s/Mpc — une galaxie à un mégaparsec s'éloigne à 67 kilomètres par seconde, une galaxie deux fois plus loin deux fois plus vite —, avec $\Omega_m = 0,3153$ et $\Omega_\Lambda = 0,6847$. Planck écrit lui-même que ces paramètres de l'Univers tardif sont « inférés » « en supposant la cosmologie Λ CDM de base » : 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 ; il dépend de H_0 et des densités de matière et d'énergie noire. Concrètement, 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 à la vitesse d'expansion de ce moment, et on additionne.

Si les distances entre galaxies avaient toujours grandi à la vitesse d'aujourd'hui, il aurait fallu un temps égal à $1/H_0$ pour les amener de zéro à leur valeur actuelle. Ce temps de Hubble vaut environ 14,5 milliards d'années ; l'âge réel en est à peu près 95 %. Pendant la plus grande partie de l'histoire, la gravité de la matière a freiné l'expansion : les distances grandissaient plus vite qu'aujourd'hui, et ces étapes ont pris moins de temps. Depuis quelques milliards d'années, l'énergie noire accélère : les distances grandissaient moins vite qu'aujourd'hui, et ces étapes ont pris plus de temps. L'énergie noire allonge l'âge, la matière le raccourcit, et dans l'Univers de Planck le freinage l'emporte de peu.

Toutes les grandeurs ne sont pas tenues aussi bien par la carte. Le fond diffus contraint bien la densité de matière et la courbure, et moins directement l'énergie noire, qui ne domine l'Univers que depuis un peu moins de dix milliards d'années et dont l'effet sur le trajet de la lumière se mêle à ceux de la courbure et de H_0 ; dans le modèle plat, on l'obtient par soustraction, autant par l'hypothèse de platitude que par la mesure. Les oscillations des baryons ajoutent des règles de même longueur, mesurées à des époques plus récentes, qui retracent l'expansion tardive sans passer par le fond diffus ; c'est ce qui fait passer la marge sur l'âge de ± 23 à ± 20 millions d'années.

Ces vingt millions d'années sont une marge statistique, donnée à 68 % de confiance. Elle 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 ». Un navigateur qui annonce son 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.

Les plus vieilles étoiles

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, et aucune de ces étapes ne passe par le fond diffus, par H_0 ni par l'énergie noire. L'Univers ne peut pas être plus jeune que les étoiles qu'il contient.

Pour l'étoile surnommée Mathusalem, ces modèles donnent $14,27 \pm 0,80$ milliards d'années. La valeur centrale dépasse l'âge de Planck d'un demi-milliard d'années ; la fourchette de l'étoile descend jusqu'à 13,47 milliards, et la valeur de Planck s'y trouve. Les deux âges sont compatibles.

Ce contrôle n'a pas toujours été un succès. Avant 1998, les cosmologistes supposaient un Univers fait de matière seule, dont l'expansion n'avait jamais cessé de ralentir ; les distances y avaient toujours grandi plus vite qu'aujourd'hui, l'âge y était nettement plus court que le temps de Hubble — et plus court, avec les taux d'expansion mesurés alors, que celui des plus vieilles étoiles. En 1998 et 1999, deux équipes découvrent, grâce à des supernovas lointaines, que l'expansion accélère. 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 $h = 0,63$, soit $H_0 = 63$ km/s/Mpc. L'accélération allongeait l'âge ; le paradoxe d'un Univers plus jeune que ses étoiles tombait. Ramené au H_0 de Planck, le chiffre de 1999 donne environ 13,9 milliards d'années, à moins de 1 % de la valeur actuelle.

Le contrôle est réel, mais lâche. La marge de l'étoile, $\pm 0,8$ milliard d'années, est quarante fois celle de Planck, et il ne fonctionne que dans un sens : une étoile plus vieille que l'Univers réfuterait le modèle ; une étoile plus jeune ne prouve rien, les étoiles n'étant pas nées au début mais quelques dizaines à quelques centaines de millions d'années après. Que deux physiques étrangères l'une à l'autre se rejoignent dit que le calcul de Planck n'est pas faux de plusieurs milliards d'années. Cela ne dit rien des vingt millions.

Où le calcul céderait

Le fond diffus ne voit pas l'Univers d'aujourd'hui. Le H_0 qu'on en tire, $67,4 \pm 0,5$ km/s/Mpc, est une prédiction du modèle pour maintenant, faite depuis une image vieille de 380 000 ans. Le télescope SPT-3G, seul, obtient $66,66 \pm 0,60$; la combinaison de Planck avec ACT, au Chili, et SPT, au pôle Sud, donne $67,19 \pm 0,38$ km/s/Mpc, la contrainte la plus précise jamais tirée du fond diffus. D'autres instruments, depuis le sol, sur d'autres portions du ciel, retrouvent la valeur de Planck.

On peut aussi mesurer H_0 directement, dans l'Univers proche, en construisant les distances de proche en proche : des distances géométriques étalonnent des étoiles pulsantes, les céphéides ; les céphéides étalonnent à leur tour les supernovas, visibles beaucoup plus loin. L'équipe SH0ES obtient ainsi $73,04 \pm 1,04$ km/s/Mpc. Un rapport de consensus signé en 2025 par plus de cent chercheurs donne $73,50 \pm 0,81$. Une autre équipe, qui étalonne les supernovas avec des géantes rouges observées par Webb, trouve entre 68,4 et 69,6. L'écart avec le fond diffus va de 6,2 à 7,1 écarts-types. Si le fond diffus se trompe, ce n'est pas dans sa carte.

Si H_0 valait 73,5 km/s/Mpc et que la composition restait la même, l'âge, qui varie alors comme l'inverse de H_0 , tomberait à environ 12,7 milliards d'années. C'est une règle de trois faite pour ce livre, pas un résultat publié ; elle ignore qu'une solution réelle changerait aussi les autres paramètres. Elle donne l'ordre de grandeur de l'enjeu : un milliard d'années, cinquante fois la marge annoncée — et un âge qui se trouverait à deux fois la marge de Mathusalem sous sa valeur centrale.

Pour Lloyd Knox et Marius Millea, les solutions les plus plausibles augmentent le taux d'expansion avant la recombinaison, et l'enchaînement se suit pas à pas. Une expansion plus rapide laisse moins de temps au son pour voyager : l'horizon sonore est plus petit. 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 de plus près arrive avec le même étirement de 1 091, il faut que l'expansion ait été plus rapide sur le trajet : le H_0 déduit monte, l'âge descend. La carte resterait la même ; sa lecture changerait.

Ces solutions ne sont pas libres. La carte enregistre aussi leurs effets sur la diffusion des photons et sur les oscillations acoustiques, et les candidates précises — énergie noire précoce, recombinaison modifiée, masse de l'électron variable — n'obtiennent dans les données actuelles que de légères préférences, deux à trois écarts-types, sous le seuil d'une découverte. Le fond diffus seul ne montre aucun signe de physique au-delà du modèle standard.

Une seconde fragilité touche le troisième étage. Les mesures de DESI, combinées au fond diffus et aux supernovas, préfèrent une énergie noire dont la densité varierait, à 2,8 à 4,2 écarts-types selon l'échantillon de supernovas ; la recalibration de l'un d'eux, en 2026, ramène le chiffre le plus haut à 3,2, « faible préférence » selon ses auteurs. Une énergie noire variable toucherait surtout les derniers milliards d'années, et ferait bouger l'âge bien moins que la tension sur H_0 . Les deux fragilités n'ont pas le même poids : l'une raccourcirait la règle, l'autre ne toucherait que la fin du trajet.

Depuis quand

Les tables de Planck définissent l'âge comme le « temps écoulé depuis le début du Big Bang chaud ». Ce n'est pas un temps écoulé depuis un instant zéro : cet instant n'est que l'extrapolation de la relativité générale au-delà de son domaine, et aucune horloge ne l'a marqué.

Le zéro de la frise est une origine d'horloges, posée par convention, pas un événement daté ; certaines chronologies comptent d'ailleurs les temps à partir de la fin de l'inflation. 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.

L'horloge qui compte ce temps est le temps cosmique : celui qu'indiquerait une montre emportée par un observateur qui suit le flot de l'expansion sans mouvement propre, une montre qu'on aurait laissée dériver avec l'espace lui-même. Nous ne sommes pas tout à fait cet observateur. Le Soleil file à 369,82 kilomètres par seconde par rapport au fond diffus, et nous sommes au fond du puits de gravité de la Galaxie ; les deux effets retardent nos horloges de quelques millièmes — quelques dizaines de milliers d'années au plus sur toute l'histoire cosmique, plusieurs centaines de fois moins que la marge de Planck. Pour dater l'Univers, notre montre et la montre cosmique marquent la même heure.

Les dates comptées depuis le début de la phase chaude sont robustes : les trois minutes de la nucléosynthèse, les 47 000 ans de l'égalité entre matière et rayonnement, les 380 000 ans de la recombinaison. Le temps écoulé jusqu'à ces moments dépend du rythme de l'expansion à ces époques, et ce rythme est fixé par les densités du rayonnement et de la matière, que le premier étage mesure ; l'énergie noire pesait alors un poids négligeable devant une matière et un rayonnement incomparablement plus denses. Un H_0 différent, une énergie noire variable n'y changeraient presque rien. Seules les solutions qui accélèrent l'expansion avant la recombinaison y toucheraient, dans la mesure où elles l'accélèrent, et la carte limite justement cette mesure.

Les dates comptées depuis aujourd'hui, les « il y a », héritent 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 : une date aussi robuste que le modèle, pas davantage. Le grain de la météorite, lui, reprend ici sa place : 4 567,30 millions d'années avant aujourd'hui, un « il y a » mesuré sans aucune cosmologie — et c'est son « après le Big Bang »,

environ 9,2 milliards d'années, qui dépend du modèle. Les événements anciens sont ancrés au début, les événements récents à aujourd'hui, et c'est le modèle qui relie 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. Pour en faire une date, il faut savoir quand l'Univers avait cette taille, donc intégrer l'histoire du taux d'expansion dans le modèle standard. Le tableau du Particle Data Group, calculé avec les paramètres de Planck, se lit lentement, une ligne par époque. $z = 3\,402$: l'égalité entre matière et rayonnement, 51 100 ans. $z = 1\,089,9$: le fond diffus, 372 900 ans. $z = 7,7$: la réionisation à moitié faite, 690 millions d'années. $z = 0,636$: le début de l'accélération, 7,70 milliards d'années. $z = 0$: aujourd'hui, $13,797 \pm 0,023$ 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 ». Le z est la mesure ; les 280 millions d'années sont son interprétation dans le modèle — un « après » qui dépend surtout de l'expansion ancienne et tient à la première famille, un « il y a » qui tient à la seconde. Chaque date de la nuit qui commence, où l'hydrogène neutre remplit tout sans qu'aucune source brille encore, sera un z converti de cette manière.

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

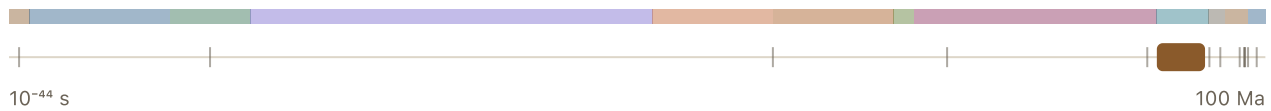
Comment un Univers sombre s'est-il allumé, et pourquoi la chronologie de cet allumage change-t-elle sans cesse ?

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

Les âges sombres

~0,4 à ~100 Ma

brouillon · 4018 mots



Un gaz d'atomes remplit tout. Trois quarts d'hydrogène, un quart d'hélium, des traces de deutérium, d'hélium 3 et de lithium ; et rien d'autre — pas un atome de carbone, pas un d'oxygène, pas un de fer. Il est le même ici et là, à une part infime près : un peu plus serré ici, un peu moins là. Il est chaud comme le filament d'une ampoule, et la lumière qui vient de le quitter le traverse en ligne droite, de partout vers partout, sans qu'un seul atome la dévie. Elle est encore la lueur d'un filament ; déjà elle tire au rouge.

L'espace s'étire, et cette lumière avec lui. Son rouge s'assombrit, descend sous le rouge, dans l'infrarouge, puis plus bas encore. Quand l'Univers a dix fois grandi, le rayonnement n'a plus que la chaleur d'un jour d'hiver sur Terre ; il tiédit encore, et rien ne vient le remplacer. Dans le gaz, aucun endroit n'est assez chaud, aucun assez dense, pour faire une lumière nouvelle. Il baigne dans une lueur de plus en plus froide, qui le traverse et n'éclaire rien.

Sous ce gaz, la matière noire, cinq fois et demie plus lourde, creuse depuis longtemps ses puits. Le gaz, que la lumière repoussait chaque fois qu'il y tombait, n'a plus de ressort : il glisse, lentement, vers les endroits où il y a déjà un peu plus de lui. Des dizaines de millions d'années passent ainsi, sans qu'une lumière change autrement qu'en se refroidissant. Et de loin en loin, dans le noir, un atome d'hydrogène émet ou avale une onde longue comme une main ouverte.

Transparent et obscur

L'hydrogène neutre qui remplit tout n'est pas seul, et il n'est pas neuf : le gaz est fait de ce que les premières minutes ont laissé. En masse, trois quarts d'hydrogène, un quart d'hélium ; des traces de deutérium, d'hélium 3 et de lithium ; la liste s'arrête là. Pas un atome de carbone, d'oxygène ou de fer : tous les éléments plus lourds viendront plus tard, des étoiles. À côté de ce gaz se tient la matière noire, environ cinq fois et demie plus abondante que la matière ordinaire, qui ne se mêle au reste que par la gravité.

Ce gaz est neutre depuis peu. Vers 380 000 ans et 3 000 K, à un décalage vers le rouge $z \approx 1\,100$ — l'Univers environ 1 100 fois moins étiré qu'aujourd'hui —, les électrons ont fini par se lier aux noyaux, et rien n'a claqué : 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 $z \approx 1\,070$, après s'être encore étiré de près de 2 %. Une fois la transition faite, le résultat tient en une phrase : le plasma opaque où la lumière rebondissait sans cesse est devenu un gaz d'atomes que la lumière traverse sans être déviée.

La seule lumière qui existe est celle qui vient d'être libérée, le fond diffus, et elle part en ligne droite dans un espace qui continue de s'étirer ; sa longueur d'onde s'allonge avec lui, et sa température baisse dans la proportion même où l'Univers grandit. À l'émission, la température d'un filament d'ampoule, environ 3 000 K. Quand l'Univers s'est étiré de dix fois plus, vers $z \approx 100$, environ 275 K, un jour d'hiver sur Terre. À $z = 30$, environ 84 K ; à $z = 20$, environ 57. Aujourd'hui, après un étirement d'environ 1 100, $2,72548 \pm 0,00057$ K. Pendant tout ce trajet, la lueur quitte le visible pour l'infrarouge, puis pour les micro-ondes, et un œil humain placé dans l'Univers de cette époque ne verrait bientôt plus rien.

C'est cela, les âges sombres : après la recombinaison, l'Univers est rempli d'un gaz neutre d'hydrogène et d'hélium, et aucune source de lumière n'existe jusqu'à ce que se forme la première génération d'étoiles. Le fond diffus n'est pas une source ; il a été émis une fois, et 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 — un espace où tout rayon va droit, et d'où aucun rayon ne part.

La frise du livre date cette époque de $\sim 0,4$ à ~ 100 millions d'années. Sur l'année cosmique, où toute l'histoire tient en douze mois, la nuit court du premier quart d'heure du 1er janvier jusque vers le milieu du 3 — deux jours et demi sur un an —, et la frise l'accompagne d'une mention entre parenthèses : « établi (pas observé directement) ».

Ce qui travaille dans le noir

Depuis environ 47 000 ans, bien avant que la lumière ne parte, la densité d'énergie de la matière dépasse celle du rayonnement, et depuis ce moment la gravité peut amplifier les petites inégalités de densité qui deviendront les galaxies. Ces inégalités, l'inflation les a laissées : des tremblements quantiques étirés aux dimensions du cosmos, ici un peu plus de matière, là un peu moins. Le fond diffus en porte la trace, des variations de température d'environ une part sur 25 000 d'une direction à l'autre.

Le mécanisme s'appelle l'instabilité gravitationnelle, et il tient en une suite d'actions. Une région un peu plus dense que la moyenne tire à elle la matière voisine. Cette matière tombe. Ce qui est tombé pèse à son tour, et tire davantage. L'écart grandit de lui-même. C'est le modèle de travail que la découverte des pics acoustiques a établi — Wayne Hu et Scott Dodelson l'écrivent en 2002 : un Univers fait surtout de matière noire et d'énergie noire, dont les structures naissent par instabilité gravitationnelle à partir des fluctuations quantiques de l'inflation. La gravité qui comprime les surdensités est dominée par la matière noire, qui pèse plus de cinq fois plus que la matière ordinaire.

La recombinaison change une chose dans ce mécanisme. Avant elle, la matière ordinaire, liée aux photons par ses électrons libres, était repoussée par la pression de la lumière chaque fois que la gravité la comprimait : elle oscillait au lieu de tomber. La matière noire, qui ne sentait pas cette pression, continuait de creuser ses puits. Une fois les électrons attachés aux noyaux, la lumière n'a plus de prise sur le gaz ; il cesse d'osciller et tombe dans les puits creusés pendant ce temps. Les âges sombres sont l'époque où la matière ordinaire rattrape son retard.

Ce qui s'est passé alors a laissé une trace qu'on observe aujourd'hui, l'une des rares traces directes de la nuit. Les ondes sonores figées à la recombinaison ne sont pas restées seulement dans 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 une distance privilégiée, à 100 h^{-1} mégaparsecs, qui correspond « excellentement » à l'empreinte prévue des oscillations acoustiques. Avec le h 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. La règle graduée du chapitre précédent a traversé les âges sombres sans se perdre : ce que le gaz a fait dans le noir, les galaxies d'aujourd'hui le montrent encore.

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. C'est dans ces réservoirs, faits d'un gaz primordial sans métaux, que naissent les premières étoiles, dites de population III, à des déca-

lages vers le rouge de 30 et moins, selon la revue de Ralf Klessen et Simon Glover en 2023. Les astronomes appellent « métaux » tout ce qui est plus lourd que l'hélium : un gaz sans métaux est le gaz tel que les premières minutes l'ont laissé.

Entre ces deux bouts, le modèle affirme la croissance des surdensités, et ne dit pas, dans les sources de ce livre, comment elle se déroule. De combien une inégalité d'une part sur 25 000 grandit-elle entre 380 000 ans et 100 millions d'années, et quand les premières régions cessent-elles de s'étendre avec l'Univers pour s'effondrer sur elles-mêmes. Comment un gaz qui n'a que de l'hydrogène et de l'hélium, sans les métaux qui refroidissent le gaz des galaxies actuelles, se défait-il de la chaleur de sa chute pour aller jusqu'à la densité d'une étoile. À partir de quelle masse un halo retient-il assez de gaz, assez froid, pour en former une. Trois questions ouvertes ; leurs réponses fixent l'heure de l'allumage.

Dater sans rien voir

Aucune date de cette époque n'a été lue sur une horloge, et aucune 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 , $1 + z$ étant le rapport entre la taille de l'Univers aujourd'hui et sa taille au moment considéré. Dire que les premières étoiles s'allument « à $z = 30$ », c'est dire qu'elles s'allument quand l'Univers est 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 — le calcul que le chapitre précédent a démonté. Chaque date de la nuit et de l'aube est un z converti de cette manière.

Aux époques de la nuit, la conversion devient 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 règle à une ligne : $t \approx 17,2$ milliards d'années $\times (1 + z)^{-3/2}$. Ce n'est pas une formule lue dans une publication, mais un calcul fait pour ce livre avec les paramètres de Planck, $H_0 \approx 67,4$ km/s/Mpc et $\Omega_m \approx 0,315$. L'exposant dit comment l'âge croît avec l'étirement : quand l'Univers est quatre fois moins étiré, il est huit fois plus jeune. Le préfacteur n'est pas un âge ; c'est la constante qu'imposent le taux d'expansion et la densité de matière.

Posée en face des dates publiées, la règle tient. À $z = 30$, elle dit environ 100 millions d'années, et personne n'a de contrôle à y opposer. À $z = 20$, environ 180 millions ; l'équipe d'EDGES a écrit « 180 millions d'années ». À $z = 15$, environ 270 millions ; Hashimoto a écrit « environ 250 millions d'années », avec un modèle légèrement différent. À $z = 14,44$, environ 285 millions ; MoM-z14 est donnée à 280. À $z = 13$, environ 330 millions ; JADES-GS-z13-1-LA à 330. Tous les contrôles tombent à moins de 10 % près, et la conversion $z \approx 30 \rightarrow$ environ 100 millions d'années, que la frise signalait comme non vérifiée, est confirmée par le calcul.

La règle a deux bords. À la recombinaison, $z \approx 1\,090$, elle donnerait environ 480 000 ans là où le tableau du Particle Data Group, calculé avec les mêmes paramètres, donne 372 900 : un écart de 30 %, qui vient de ce que le rayonnement y pèse encore, l'égalité entre matière et rayonnement, à $z \approx 3\,400$, n'étant pas si loin. Vers la fin de la réionisation, à $z = 7,7$, elle donne 670 millions d'années et le Particle Data Group 690, parce que l'énergie noire commence à se faire sentir. Entre ces bords, son préfacteur ne dépend que d'une seule combinaison, la densité absolue de matière $\Omega_m h^2$, que Planck lit presque directement sur la forme des pics — le premier des trois étages du chapitre précédent. Si la tension sur le taux d'expansion actuel se résolvait par un H_0 plus élevé, l'âge de l'Univers baisserait, mais les 100 millions d'années de $z = 30$ bougeraient beaucoup moins — tant qu'on suppose 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.

La conversion est solide. Ce qui ne l'est pas, pour la nuit, c'est le z lui-même, et les deux bornes de la frise, $\sim 0,4$ et ~ 100 millions d'années, ne sont pas accrochées à la même chose. La première tient à un objet observé, la surface de dernière diffusion, dont Planck mesure le décalage vers le rouge au quart d'unité près. La seconde tient à une phrase de Klessen et Glover : les premières étoiles se forment « à des décalages vers le rouge de 30 et moins ». Personne n'a vu d'étoile à $z = 30$. La fin de la nuit est un z théorique converti par une règle solide, et la précision de la règle ne transfère aucune précision à l'événement.

La parenthèse de la frise prend ici son sens exact. 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, accrochée à la date d'un événement que personne n'a observé. On sait très bien quel âge avait l'Univers à $z = 30$; on ne sait pas si les premières étoiles s'y trouvaient.

Une onde longue comme une main

Dans un Univers sans source de lumière, un seul acteur pourrait se signaler lui-même : le gaz d'hydrogène neutre, qui remplit tout. Il absorbe ou émet un rayonnement d'une longueur d'onde de 21 centimètres — l'onde longue comme une main ouverte, environ 1,4 gigahertz au repos. Cette onde, étirée en chemin d'un facteur $1 + z$ comme toute lumière, arrive de $z = 20$ à environ 68 mégahertz, quatre mètres et demi d'une crête à l'autre ; de $z = 30$, à environ 46 mégahertz, six mètres et demi. La raie à 21 cm de la nuit cosmique est devenue une onde radio de quelques dizaines de mégahertz.

Ce témoin a deux vertus. Il ne demande pas d'étoile : c'est l'hydrogène de la nuit lui-même qui laisse sa marque, le seul moyen, en principe, d'observer les âges sombres autrement que par le calcul. Et chaque fréquence reçue correspond à un décalage vers le rouge, donc à une époque : en balayant les fréquences, on balaie le temps, et 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 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, de photons dits Lyman- α ; ce bain modifie la manière dont l'hydrogène absorbe à 21 cm, et l'allumage doit se lire comme un creux dans le spectre.

En 2018, l'expérience EDGES annonce ce creux. L'équipe de Judd Bowman publie dans *Nature* un « profil d'absorption centré à 78 mégahertz dans le spectre moyenné sur le ciel ». Ce spectre n'est pas une image : l'antenne, posée au sol, ne vise aucun 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. Le bord basse fréquence du profil indique, selon les auteurs, que des étoiles existaient et avaient produit un fond de photons Lyman- α « 180 millions d'années après le Big Bang » ; le centre, à 78 mégahertz, correspond à $z \approx 17$, environ 220 millions d'années, le bord à $z \approx 20$ et 180 millions. Si le résultat tenait, ce serait la première observation de l'aube, et la fin de la nuit serait datée par une mesure plutôt que par une théorie.

Le résultat porte en lui-même son premier problème : la profondeur du creux est « plus de deux fois supérieure aux plus grandes prédictions ». Un tel écart laisse deux lectures — un signal réel, qui oblige à ajouter à la physique de la nuit quelque chose que le modèle standard n'y met pas ; ou un creux qui ne vient pas du ciel mais de l'instrument ou de son traitement —, et la mesure est de celles qui laissent le plus de place à la seconde. À Holmdel, en 1964-1965, Penzias et Wilson avaient trouvé le fond diffus comme un excès de bruit qui résistait à toutes les explications locales. EDGES cherche l'inverse : un léger déficit dans le bruit

d'une antenne, à des fréquences où le ciel émet bien davantage par ailleurs. Pour trancher, il faut une seconde antenne, conçue autrement, qui regarde le même ciel.

Elle vient en 2022. Le radiomètre SARAS 3, d'une équipe menée 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 est rejeté avec 95,3 % de confiance. Ce chiffre vaut un peu moins de deux écarts-types, loin des cinq qu'on exige en physique pour annoncer une découverte. SARAS 3 ne démontre donc pas au seuil habituel que le creux 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.

Une aube vers 180 millions d'années reste plausible, compatible avec la prédiction 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, entre 180 et 270 millions d'années environ. 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 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. Tant que ces mesures n'existent pas, le seul témoin possible de la nuit a déposé une fois, et sa déposition est contestée.

Ce que Webb borne

La fin de la nuit dépend de ce qu'on appelle la fin. Deux définitions coexistent, et elles ne désignent pas le même événement. La première est la plus simple : la nuit finit quand quelque chose brille. C'est celle de la frise, qui arrête les âges sombres vers 100 millions d'années ; selon Klessen et Glover, les étoiles de population III se forment à $z \leq 30$, soit à partir d'environ 100 millions d'années. Cette date est une hypothèse. Aucune étoile de population III n'a été observée directement, et le signal radio qui aurait pu dater leur allumage est contesté.

Cette première fin est 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. 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 ». Or l'oxygène n'existait pas à la sortie de la nuit ; il est forgé dans les étoiles et dispersé par leur mort. Une galaxie qui en contient à 300 millions d'années suppose 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 par l'équipe de Hashimoto d'une formation vers 250 millions d'années. 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 qu'elles disent de la rapidité de l'aube appartient à un autre chapitre.

Cinq photons sur cent

La seconde fin est la réionisation. Quand les premières sources brillent, leur lumière ultraviolette arrache de nouveau les électrons à l'hydrogène intergalactique, et le gaz neutre de la nuit redevient un gaz ionisé — par bulles, qui grossissent autour des sources et finissent par se rejoindre. C'est ce basculement que la frise appelle « la fin des âges sombres », et cette fin-là se mesure.

Elle se mesure dans le fond diffus lui-même, par le mécanisme 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 diffusée à nouveau en

chemin. La grandeur qui compte ces diffusions est la profondeur optique τ , la même qui définit la surface de dernière diffusion ; Planck mesure $\tau = 0,054 \pm 0,007$ — environ cinq photons sur cent, diffusés une seconde fois après la nuit —, et ce nombre est l'un des six paramètres du modèle de base. La carte de la première lumière, rouverte une dernière fois, 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, et une réionisation précoce et lente peut donner le même total qu'une réionisation tardive et rapide. Pour en tirer une date, Planck suppose une bascule régulière de l'état neutre à l'état ionisé autour d'un décalage central — le mi-parcours « suppose un modèle tanh simple », écrivent ses tables — et l'ajuste à $z = 7,68 \pm 0,79$. Par la règle, environ 670 millions d'années, entre 590 et 780 pour la marge ; 690 dans le tableau du Particle Data Group.

Cette date a bougé ; par elle, 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. 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 $z = 5,3$, environ 1,1 milliard d'années — les dernières poches de gaz neutre, que la lumière des sources n'a pas encore atteintes.

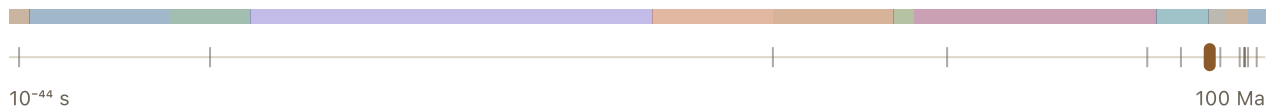
Les deux définitions donnent des nuits de durées très différentes. Avec la première, la nuit dure environ cent millions d'années et s'achève dans une hypothèse. Avec la seconde, elle dure un demi-milliard d'années et s'achève dans une mesure, qui dépend elle-même d'un modèle de transition. L'intervalle qui les sépare, de 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 où des sources déjà allumées n'ont pas encore rendu le gaz transparent à l'ultraviolet.

Chacune des bornes repose sur un observable différent. La première sur une théorie de la formation des étoiles, contrainte par le bas par un signal radio contesté et par le haut par les galaxies que Webb découvre à des décalages toujours plus grands ; la seconde sur un total de diffusions converti en date par un modèle de transition, et sur les quasars. Quand l'un de ces observables change, la frise change. Les conversions ne bougent presque pas ; ce qui bouge, ce sont les z auxquels on attache les événements. 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. La nuit s'achève sur des étoiles que la logique impose et que personne n'a vues.

Les premières étoiles

~100 à ~270 Ma ($z \approx 30$ à 15)

brouillon · 3017 mots



Un nuage de gaz tombe dans un puits de matière noire. Trois quarts d'hydrogène, un quart d'hélium, des traces de deutérium, d'hélium 3 et de lithium ; rien de plus lourd. En tombant il se comprime, en se comprimant il s'échauffe, et il rayonne cette chaleur dans le noir pendant qu'il continue de tomber. Il ne donne pas une étoile. Il se brise en plusieurs morceaux, chacun plus serré que le nuage entier, chacun tombant à son tour sur lui-même, et au centre de chacun la densité et la température montent jusqu'à ce que l'hydrogène fusionne.

Pour la première fois depuis que la lumière est partie, quelque chose brille. Non pas une étoile : une poignée, quelques milliers de masses solaires serrées en un petit amas, des légères et des lourdes en nombre égal par tranche de masse, si bien que presque tout le poids de l'amas tient dans ses quelques étoiles les plus lourdes, qui pèsent des dizaines de fois le Soleil. Leur lumière est ultraviolette. Elle part dans un gaz d'hydrogène qu'aucune lumière nouvelle n'a frappé depuis que la première l'a quitté ; les atomes qu'elle atteint n'ont connu, pendant toute la nuit, qu'une lueur qui refroidissait, et la voici qui les touche.

Les plus lourdes brûlent leur hydrogène en quelques millions d'années. Puis leur cœur se contracte et s'échauffe ; trois noyaux d'hélium s'y rencontrent à la fois et font du carbone ; le carbone brûle, puis l'oxygène, puis le silicium, et au centre s'accumule du fer, qui ne brûle plus. Le cœur s'effondre en quelques secondes. L'étoile éclate. Une part de ce qu'elle a fabriqué — de l'oxygène, du magnésium, du silicium — se jette dans un gaz qui n'avait jamais contenu que de l'hydrogène et de l'hélium, et s'y mêle. Plus loin, hors de portée de toute explosion, un autre nuage reste tel que les premières minutes l'ont laissé.

Deux noyaux qui n'existent pas

Le gaz dont ces étoiles naissent a été fabriqué en une vingtaine de minutes, et pendant les cent millions d'années qui ont suivi rien n'y a été ajouté, parce que rien n'y brûlait. Son inventaire est celui des premières minutes, et il tient en une ligne : en masse, trois quarts d'hydrogène, un quart d'hélium 4 ; du deutérium et de l'hélium 3 à quelques cent-millièmes de l'hydrogène ; du lithium 7 à un dix-milliardième. La liste s'arrête là.

Elle s'arrête faute de noyau, pas faute de temps. La chaîne des premières minutes avance en ajoutant à un noyau un proton, un neutron ou un noyau léger, et deux cases manquent sur son chemin : il n'existe aucun noyau stable de masse 5, aucun de masse 8. L'hélium 4 qui capte un neutron ou un proton donne un noyau qui se défait aussitôt ; deux hélium 4 qui fusionnent, de même. Les noyaux chargés se repoussent ; le gaz est dilué comme l'air, et dans un gaz si lâche seules comptent les rencontres à deux. Au bout de vingt minutes il est trop froid et trop clairsemé pour fusionner quoi que ce soit, et l'inventaire est clos.

La masse 8 se franchit ailleurs. Au cœur d'une étoile, trois noyaux d'hélium se rencontrent ; ils passent par le béryllium 8 — le noyau même qui manquait aux premières minutes — et font un carbone 12. Chiaki Kobayashi, Amanda Karakas et Maria Lugaro, qui reconstruisent l'origine de tous les éléments stables du carbone à l'uranium, l'écrivent sans détour : les éléments de masse 12 ou plus « ne sont pas produits pendant le Big Bang mais formés à l'intérieur des étoiles ». Le carbone, l'azote, l'oxygène, le fer — tout ce qui pèse au moins douze nucléons sort d'une étoile ou de sa mort.

De là, un raisonnement court. Les astronomes appellent métaux tout ce qui est plus lourd que l'hélium. Le Soleil en porte 1,39 % de sa masse à sa surface. Les plus vieilles étoiles du halo de la Galaxie ont cinq cents fois moins de fer que lui — cinq cents fois moins, pas zéro. Ces métaux viennent d'étoiles plus anciennes, qui les ont fabriqués et rejetés ; en remontant étoile après étoile, chaque génération née d'un gaz un peu moins riche que la suivante, on arrive à une génération qui n'a hérité d'aucun métal, parce qu'il n'y en avait encore aucun : née du gaz des premières minutes, tel quel. Les astronomes l'appellent population III.

Le raisonnement dit que ces étoiles ont existé, et il ne dit rien d'autre. Ni quand. Ni combien elles pesaient, ni combien elles étaient, ni combien de temps elles ont brûlé. Aucune observation n'y entre : seulement la physique nucléaire des premières minutes, que le deutérium mesuré confirme à 1 % près, et celle des étoiles. Leur existence est une nécessité, leurs propriétés une théorie.

Une date qui est un calcul

La date vient d'une théorie, celle de la formation des étoiles, et d'une phrase. Ralf Klessen et Simon Glover, en 2023, font naître les étoiles de population III d'un gaz primordial sans métaux « à des décalages vers le rouge de 30 et moins », et ils les font dominer la formation stellaire jusqu'à $z \approx 15$ à 20 ; après quoi les étoiles de population II, nées d'un gaz déjà enrichi, prennent le relais.

La règle du chapitre précédent — $t \approx 17,2$ milliards d'années $\times (1 + z)^{-3/2}$, un calcul de ce livre avec les paramètres de Planck, qui retrouve à moins de 10 % près cinq couples publiés — transforme ces z en années. $z = 30$ donne environ 100 millions d'années ; $z = 20$, environ 180 ; $z = 15$, environ 270. Sur l'année cosmique, les premières étoiles apparaissent vers le 3 janvier, et la population II prend le relais entre le 5 et le 8 : un règne de 80 à 170 millions d'années, selon la borne qu'on retient.

Deux incertitudes se superposent dans ces chiffres, et elles n'ont pas la même taille. La conversion tient : son préfacteur ne dépend que de la densité de matière, que Planck lit presque directement sur le fond diffus. Les z , eux, sont des résultats de calcul — un gaz qui s'effondre dans des halos, se refroidit, forme des étoiles — et le ciel n'a montré aucune étoile à $z = 30$. La date est précise ; l'événement ne l'est pas.

Le relais lui-même, « 15 à 20 », est une fourchette, et une moyenne sur tout l'Univers : une proportion qui bascule d'une population à l'autre dans la formation d'étoiles de l'ensemble. Un gaz s'enrichit quand des étoiles voisines y rejettent leurs métaux, de proche en proche ; rien n'oblige chaque nuage à franchir la ligne à la même heure. Un nuage resté à l'écart des explosions garde le gaz des premières minutes aussi longtemps que rien ne vient l'y mêler.

Un portrait tiré des simulations

Tout ce qui suit est calculé, pas observé. Dans les simulations que Klessen et Glover rassemblent, le gaz primordial « se fragmente facilement » : un nuage qui s'effondre ne fait pas une étoile mais plusieurs, et les premières étoiles naissent en petits amas. Comment un gaz qui n'a que de l'hydrogène et de l'hélium se défait de la chaleur de sa chute pour aller jusqu'à la densité d'une étoile — dans les galaxies d'aujourd'hui, ce sont les métaux qui aident le gaz à rayonner, et celui-ci n'en a aucun —, les sources de ce livre ne le disent pas ; c'est pourtant ce qui fixe à la fois la date de ces étoiles et leur masse.

Les modèles leur donnent une fonction de masse « logarithmiquement plate » : 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. À nombre égal, chaque tranche pèse à peu près dix fois plus que la précédente, et presque toute la masse de la population est dans ses étoiles les plus lourdes. C'est ce que veut dire « riche en étoiles massives ».

Dans les scénarios les plus poussés, certaines atteindraient plusieurs centaines de milliers de masses solaires. Leurs restes seraient alors les germes des trous noirs supermassifs qu'on observe dans les quasars les plus lointains — ces noyaux de galaxies très lumineux qui servaient, au chapitre précédent, de sondes de la réionisation. Comment des trous noirs géants ont pu exister si tôt, les sources de ce livre ne le détaillent pas ; l'idée fournit un candidat pour la graine, pas une origine établie.

D'un côté, un amas de quelques milliers de masses solaires en tout. De l'autre, une étoile seule qui pèserait cent fois cet amas entier. La même théorie couvre les deux, parce que la masse d'une étoile sans métaux tient à des détails de l'effondrement — refroidissement, fragmentation, lumière de l'étoile naissante sur son propre nuage — que les simulations traitent chacune à leur façon, et que rien n'a vérifié.

Un trait découle de la masse ; il interdit de les voir. Une étoile de 25 masses solaires brûle son hydrogène en dix millions d'années, son silicium en cinq jours, et son cœur s'effondre en quelques secondes. Ces durées sont celles d'une étoile d'aujourd'hui ; elles donnent l'ordre de grandeur, un dixième de l'ère entière pour les plus brillantes. Si la fonction de masse est bien celle des modèles, l'essentiel de la lumière de ces étoiles s'éteint quelques millions d'années après s'être allumée, et la population ne brille que tant qu'elle naît.

La première forge

Les premières étoiles agissent de deux façons, que Klessen et Glover tiennent en une phrase : leur rayonnement et leurs supernovas règlent la formation des étoiles qui suivent. Ce que recouvre ce réglage — freiner la naissance des voisines ou la déclencher —, les sources de ce livre ne le disent pas. Deux effets sont sûrs. Leur ultraviolet est la première lumière à toucher l'hydrogène neutre de la nuit, celle dont EDGES a cherché le creux ; et c'est la même lumière qui commencera à arracher au gaz ses électrons.

Le second effet est chimique. L'hélium fusionne en carbone ; chez les massives, le cœur se contracte, s'échauffe, brûle le carbone, puis l'oxygène, puis le silicium, jusqu'au nickel 56 qui donnera le fer. Quand le cœur s'effondre, l'étoile explose en supernova, et une part de ce qu'elle a fabriqué part 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 de là : d'étoiles massives, et de leurs explosions.

Ce que rejette exactement une étoile sans métaux, les sources de ce livre ne le disent pas ; l'ordre se devine du partage actuel. La moitié du fer vient de naines blanches qui explosent avec retard, puisqu'une naine blanche doit d'abord se former ; la moitié du carbone et de l'azote, de vents d'étoiles moyennes qui meurent lentement. Pendant les premières dizaines de millions d'années de l'aube, seules les massives ont eu le temps de mourir. Les premiers métaux du gaz sont donc vraisemblablement ceux de leurs supernovas, l'oxygène en grande place — un raisonnement de ce livre, appliqué à une population dont on ignore les masses, et qui reste à confronter aux calculs de la revue.

Le gaz enrichi fait la génération suivante, la population II, qui prend le relais vers $z \approx 15$ à 20, entre 180 et 270 millions d'années. Et la boucle que Kobayashi et ses coauteurs décrivent pour toute l'histoire de la Galaxie tourne depuis : fabriquer, rejeter, renaître. Chaque tour ajoute des métaux au gaz. Chaque étoile garde dans son atmosphère la chimie du nuage dont elle est née, ce qui en fait un fossile ; là-dessus repose ce que les astronomes appellent l'archéologie galactique.

Le Soleil naît 9,2 milliards d'années après le début, d'un gaz qui a fait tant de tours qu'on ne peut plus les compter — un recyclage, pas une lignée. Son 1,39 % est la somme de tous ces tours, et la part des pre-

mières étoiles y est infime. Ce qu'elles ont changé est ailleurs : après elles, le gaz des premières minutes n'existe plus que par poches.

Des traces sans témoin

Personne n'a observé d'étoile de population III, pour deux raisons. Elles sont trop loin : une étoile vue à 100 ou 200 millions d'années est vue à travers presque toute l'histoire de l'Univers. Et elles vivent trop peu : quelques millions d'années pour les massives, regroupées en amas de quelques milliers de masses solaires, bien moins lumineux qu'une galaxie. Ce qu'on a, ce sont des traces de ce qu'elles ont fait. Chacune dit qu'il y avait des étoiles avant tel moment ; aucune ne dit ce qu'elles étaient.

En 2018, avant Webb, l'équipe de Takuya Hashimoto trouve dans une galaxie vue à $z = 9,1$ une raie d'oxygène deux fois ionisé, et lit dans sa lumière une population d'étoiles dominante formée « environ 250 millions d'années après le Big Bang, ce qui correspond à un redshift d'environ 15 ». La galaxie est vue vers 540 millions d'années ; ses étoiles avaient déjà près de trois cents millions d'années quand sa lumière est partie, et leur naissance tombe à l'époque où, selon la théorie, la population II prend le relais. La mesure ne dit pas de quelle population elles sont. Elle dit qu'une galaxie formait des étoiles en nombre quand les premières achevaient leur règne.

En 2025, l'équipe de Sander Schouws détecte avec le réseau de radiotélescopes ALMA une raie de l'oxygène dans JADES-GS-z14-0, vue à $z = 14,18$, à peine 300 millions d'années après le début. La galaxie est « étonnamment enrichie en métaux » : 5 à 20 % de la métallicité du Soleil, soit 0,07 à 0,3 % de la masse de son gaz. Cet oxygène a été fabriqué dans des étoiles, libéré par leurs explosions, mêlé au gaz d'une galaxie qui en forme encore — le tout en moins de deux cents millions d'années, si les premières se sont allumées vers 100. Ses propres étoiles, nées d'un gaz enrichi, ne sont pas de population III : la galaxie témoigne de ce qui l'a précédée, elle n'en est pas un exemple.

La trace la plus attendue manque. Le creux radio centré à 78 mégahertz qu'EDGES annonce en 2018, et dont le bord daterait des étoiles de 180 millions d'années, est deux fois plus profond que les plus grandes prédictions ; SARAS 3 le rejette en 2022. Un allumage vers 180 millions d'années reste plausible, compatible avec la théorie, et n'est pas mesuré.

Mises ensemble, ces traces encadrent plus qu'elles ne portraiturent. Par le haut, de l'oxygène avant 300 millions d'années et des étoiles en nombre vers 250. Par le bas, rien. Et sur ce qu'étaient les premières étoiles — sans métaux, lourdes, en amas —, aucune ne dit quoi que ce soit. Pour savoir ce qu'elles étaient, il faudrait en voir un système lui-même.

Trouvé tard, derrière une loupe

Le meilleur candidat n'est pas à l'aube. Il se trouve à $z = 6,6$, environ 830 millions d'années après le début — plus de cinq cents millions d'années après la fin théorique de l'ère des premières étoiles. Sur l'année cosmique, elles règnent du 3 au 8 janvier ; LAP1-B brille vers le 22.

On le voit grâce à une loupe. La masse courbe la trajectoire de la lumière qui passe près d'elle ; un amas de galaxies massif, posé par hasard entre nous et une source bien plus lointaine, dévie sa lumière et la concentre, et la source paraît plus brillante qu'elle n'est. L'amas MACS J0416 amplifie ainsi LAP1-B, qui sans lui serait sans doute trop faible pour être étudié.

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. Un halo de très faible métallicité : un gaz presque vierge. Une fonction de masse riche en étoiles massives : la « logarithmiquement plate » des simulations. Un regroupement en petits amas de quelques milliers de masses solaires. Une galaxie pauvre en métaux n'est pas forcément faite d'étoiles sans métaux ; un amas riche en massives peut naître d'un gaz enrichi ; aucun critère ne suffirait seul, et leur conjonction fait le candidat.

Pourquoi si tard : deux mouvements se croisent. Le nombre de systèmes de population III décroît avec le temps, à mesure que le gaz vierge disparaît ; la peine à les voir décroît aussi, puisque la lumière d'un système plus proche de nous dans l'histoire s'est moins affaiblie en chemin. Les systèmes de l'aube sont nombreux et trop faibles pour les instruments d'aujourd'hui ; les tardifs sont rares, et un seul d'entre eux, placé derrière une loupe assez forte, franchit le seuil. Le premier observable n'est pas le plus représentatif : c'est le mieux placé.

Il faut pour cela qu'une poche de gaz vierge ait tenu jusqu'à 830 millions d'années, et le relais « vers $z \approx 15$ à 20 » le permet, puisqu'il décrit une moyenne et non une frontière que chaque nuage franchit en même temps. LAP1-B serait l'un de ces nuages restés à l'écart des explosions — tardif, fortement amplifié —, exactement l'objet que Visbal et ses coauteurs estiment possible de trouver avec les moyens actuels.

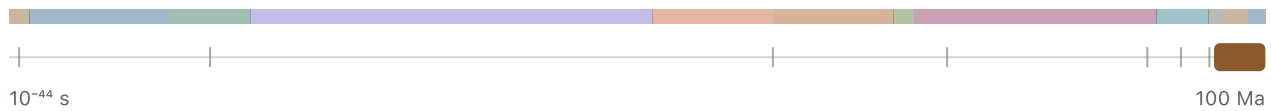
Ce n'est pas une détection confirmée. C'est l'interprétation, par Visbal et ses coauteurs, des observations publiées par l'équipe de Kimihiko Nakajima en 2025, dont les mesures — la limite sur la métallicité, la forme de la fonction de masse, la masse des amas — ne sont connues ici qu'à travers elle. Une mesure plus profonde qui trouverait des métaux dans son gaz ferait tomber le premier critère ; d'autres objets du même type, derrière d'autres amas, feraient de LAP1-B le premier d'une classe plutôt qu'une exception. En l'état, la population III a un candidat, pas un spécimen.

Le même télescope voit, bien plus tôt, tout autre chose. À 280 millions d'années, Webb confirme MoM-z14, compacte et très lumineuse ; vers 300, JADES-GS-z14-0 contient déjà de l'oxygène. À l'époque où la théorie place encore les dernières étoiles de population III, ce que l'on voit, ce sont des galaxies déjà enrichies, plus brillantes et plus nombreuses qu'on ne les attendait.

Trop tôt, trop brillantes

dès ~280 Ma

brouillon · 3941 mots



Dans une boule de gaz de deux cent quarante années-lumière de rayon, des étoiles naissent en nombre, jeunes et lourdes, et leur lumière ultraviolette sort de la boule et part dans un hydrogène que rien d'autre n'éclaire. Avant elles, dans la même boule, d'autres étoiles ont brûlé, ont éclaté, et ce qu'elles avaient fabriqué s'est mêlé au gaz : de l'oxygène surtout, et de l'azote en plus grande part que cet oxygène n'en laisserait attendre. Les étoiles qui naissent à présent sont faites de ce gaz-là. Ce n'est plus celui des premières minutes.

Plus loin, une autre boule, plus de trois fois plus large — huit cent cinquante années-lumière de rayon —, forme ses étoiles dans un gaz où les éléments plus lourds que l'hélium pèsent de l'ordre du millième de sa masse, trois millièmes au plus ; de l'oxygène, surtout. Cet oxygène a le même passé. Des étoiles sont nées, sont mortes et se sont dispersées dans une galaxie qui n'avait pas encore cette taille, et ce qu'elles ont laissé entre maintenant dans les suivantes.

L'ultraviolet qui sort de ces boules frappe l'hydrogène neutre alentour et lui arrache ses électrons, atome après atome. Autour de chaque galaxie grandit ainsi une bulle de gaz ionisé, où plus aucun atome ne retient cette lumière, et qu'elle traverse jusqu'à son bord. De ces lumières il y en a beaucoup, dispersées à des distances les unes des autres que leur lumière ne franchit pas encore. Chaque bulle s'arrête où sa lumière s'épuise, et entre les bulles l'hydrogène reste neutre.

« Un miracle cosmique »

Ces galaxies ont des noms. En 2024, l'équipe du relevé JADES — un grand programme d'observation profonde du télescope spatial James Webb — publie dans *Nature* deux galaxies confirmées, l'une à $z = 14,32$, l'autre à $z = 13,90$. La plus lointaine s'appelle JADES-GS-z14-0 ; elle est « étonnamment lumineuse », et elle n'est pas un point : son image s'étale, on peut lui mesurer un rayon, 260 parsecs, environ 850 années-lumière.

Un an plus tard, l'équipe de R. P. Naidu et P. A. Oesch confirme MoM-z14 à $z = 14,44$, vue telle qu'elle était 280 millions d'années après le début. Celle-ci est au contraire « extrêmement compacte » : le rayon qui contient la moitié de sa lumière vaut 74 parsecs, 240 années-lumière, trois fois et demie moins que l'autre. L'article porte un titre qu'on ne lit pas d'ordinaire en tête d'une publication d'astrophysique : « Un miracle cosmique ».

Dans les deux annonces, le mot qui compte est « confirmé ». Une galaxie aussi faible se date de deux façons. La première mesure son éclat à travers une série de filtres colorés et devine, d'après la forme de ses couleurs, un z approximatif ; elle trie des milliers de candidats. La seconde décompose sa lumière longueur d'onde par longueur d'onde, y repère une raie ou une coupure dont on connaît la place au repos, et lit de combien ce trait a glissé ; elle seule établit une distance. Les candidats à très grand z se comptaient par dizaines dès les premières images de Webb. Les galaxies de $z \approx 14$ sont les premières dont la distance ne dépend plus de leurs couleurs.

En septembre 2026, MoM-z14 est encore, à notre connaissance, la galaxie la plus lointaine confirmée par spectroscopie. Le record a changé en 2024, puis en 2025 ; la fiche qui sert de base à ce chapitre demande de ne pas le figer, et rien ne garantit qu'il tienne jusqu'à la parution de ce livre. Ce que Webb a changé n'est pas une date.

La même semaine que les premières étoiles

Aucun de ces âges n'a été mesuré. Ce sont des z passés par la règle du chapitre des âges sombres, $t \approx 17,2$ milliards d'années $\times (1 + z)^{-3/2}$: elle donne environ 270 millions d'années pour $z = 15$, 285 pour $z = 14,44$ — à 2 % des 280 que publie l'équipe de Naidu —, 287 et 299 pour les deux galaxies JADES. Les records successifs ne sont séparés que de quelques millions d'années. Le préfacteur de la règle ne tient qu'à la densité de matière, que Planck lit presque directement sur le fond diffus ; ce qui la rend fragile ici n'est pas elle, c'est le modèle qu'elle suppose — la question même de ce chapitre.

Sur l'année cosmique — 13,8 milliards d'années ramenés à douze mois, la première lumière émise un quart d'heure après minuit le 1er janvier —, MoM-z14 brille vers le 8 janvier, dans la même semaine que les premières étoiles, que la théorie fait naître vers le 3. L'Univers a alors deux centièmes de son âge.

Le même calendrier dit de combien la frontière a bougé. En 2015, les premières galaxies étaient placées vers 300 à 400 millions d'années : entre le 8 et le 11 janvier. MoM-z14 avance la borne basse de cette fourchette de quelques dizaines de millions d'années — moins d'un jour.

Et dès 2018, avant Webb, l'équipe de Takuya Hashimoto avait lu dans une galaxie vue à $z = 9,1$ une population d'étoiles formée « environ 250 millions d'années après le Big Bang, ce qui correspond à un redshift d'environ 15 » — la mesure que le chapitre précédent a racontée. On savait, avant les records, que des étoiles naissaient en nombre à cette époque. Sur la seule date, les records de 2024 et 2025 prolongent une pente plus qu'ils ne la renversent ; la surprise tient dans un comptage.

Cent fois trop

Une galaxie seule, si lointaine et si brillante soit-elle, ne dit rien des lois qui ont fait les galaxies. Elle peut être une exception : née dans une région exceptionnellement dense, ou saisie à un moment exceptionnellement favorable. Le titre de l'article de Naidu joue sur ce hasard. Son résultat principal va 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 $z \approx 15$, posent ce nombre en face de celui que prévoyaient les modèles de consensus d'avant Webb, et trouvent « plus de 100 fois » la prévision — 182 fois, selon leur estimation centrale.

La marge est large : +329 et -105, soit un rapport compris entre environ 77 et environ 511. À ces distances, chaque galaxie confirmée pèse lourd dans la statistique ; une de plus ou de moins déplace le résultat, et la fiche ne dit pas sur combien d'objets repose le comptage. Mais même la borne basse, près de 80, laisse 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 considérable, ne ferait pas disparaître l'excès.

« Brillant » a ici un sens précis. Ce que Webb reçoit est la lumière ultraviolette de ces galaxies, que l'expansion a étirée d'un facteur quinze environ avant qu'elle n'arrive ; et l'ultraviolet est surtout la lumière des étoiles jeunes et lourdes. Une galaxie brillante, au sens de ce comptage, est une galaxie qui forme beaucoup d'étoiles au moment où on la voit, ou qui vient d'en former beaucoup. C'est cette population-là qui est cent fois plus nombreuse que la prévision.

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

Pour voir ce que cet écart met en jeu, il faut défaire la prévision qu'il contredit. Elle met bout à bout deux calculs. Le premier compte les halos de matière noire — combien de chaque masse, à chaque époque — et découle du modèle cosmologique : de la quantité de matière noire, et des petites inégalités que le fond diffus a photographiées. Le second donne à chaque halo une galaxie, avec une masse d'étoiles, une luminosité, une poussière ; il ne découle que de l'astrophysique du gaz qui se refroidit, s'effondre, forme des étoiles et réagit à leur présence. Un excès de cent peut sortir 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 a faux ; si les halos sont ceux qu'on attend et qu'ils brillent davantage, c'est la formation des galaxies.

Un passé avant 300 millions d'années

Ces galaxies ne sont pas seulement nombreuses et brillantes : leur chimie dit qu'elles ont 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. La galaxie est « étonnamment enrichie en métaux » — de 5 à 20 % de la métallicité du Soleil, « à peine 300 millions d'années après le Big Bang ». L'oxygène ne sort pas des premières minutes, dont la chaîne s'arrête au lithium ; il est fait dans les étoiles massives et libéré quand elles explosent. Avant celles qu'on voit briller, des étoiles sont donc nées, ont vécu, sont mortes, et leur oxygène s'est mêlé au gaz.

Ce que cela change au comptage tient en deux points. JADES-GS-z14-0 n'est pas une galaxie qui s'allume ; c'est une galaxie qui a recyclé son gaz au moins une fois — fabriquer, rejeter, renaître, la boucle du chapitre précédent. Ses étoiles, nées d'un gaz enrichi, ne sont pas de population III, et son excès de lumière ne vient pas d'une population primitive brillant dans un gaz vierge. Et puisqu'il y a des générations derrière elle, la formation d'étoiles qui l'a bâtie a commencé avant la date où on la voit. L'aube a commencé avant ce qu'on voit ; ce qu'on voit est un deuxième ou un troisième acte. Les auteurs y lisent des galaxies qui « évoluent rapidement ».

MoM-z14 apporte un indice d'une autre nature. Son spectre montre un excès d'azote qui, selon l'équipe de Naidu, rappelle les amas globulaires — ces amas d'étoiles très denses et très vieux qui gravitent autour de la Voie lactée et de ses voisines. Or l'azote n'est pas un produit rapide : la moitié de celui de l'Univers vient aujourd'hui des vents d'étoiles légères ou moyennes en fin de vie, qui vivent bien plus longtemps que les massives d'où sort l'oxygène. Un tel excès, 280 millions d'années après le début, demande soit une source rapide, soit un mode de formation particulier ; la fiche ne dit ni l'un ni l'autre. Le fait reste : la plus lointaine galaxie confirmée porte une signature qu'on connaît dans des objets voisins, et que les modèles ordinaires d'enrichissement ne produisent pas à cette vitesse.

Ces deux mesures bornent l'allumage par l'amont : il y avait des étoiles mortes avant 300 millions d'années — la contrainte la plus solide qu'on ait aujourd'hui sur la fin de la nuit. Elles ouvrent par l'aval la partie suivante du livre, celle de la fabrication des éléments dans les étoiles. L'oxygène de JADES-GS-z14-0 est le plus ancien dont parlent les sources de ce livre, et il a été fabriqué comme celui que nous respirons.

Le plafond

Quand les premières images de Webb montrent, en 2022, des candidats très lointains et apparemment très massifs, la première inquiétude ne porte pas sur les galaxies. Elle porte sur le modèle cosmologique lui-même, et Michael Boylan-Kolchin la met en titre en 2023 : « Mettre Λ CDM à l'épreuve avec les candidats galaxies à grand décalage vers le rouge ».

Son argument est un plafond. « La masse d'étoiles d'une galaxie est limitée par le réservoir de matière ordinaire disponible dans son halo de matière noire. » Le gaz qui fait les étoiles est tombé dans le halo avec la matière noire, et Planck fixe la part : 4,9 % de matière ordinaire pour 26,4 % de matière noire, à peu près une masse de gaz pour cinq de matière noire, 16 % au plus de la masse d'un halo. Encore faudrait-il que tout ce gaz devienne étoile, ce qu'aucune galaxie connue ne fait. Et comme le modèle dit combien de halos de chaque masse existent à chaque époque, la combinaison donne une limite stricte : dans un volume donné, à une date donnée, pas plus de masse en étoiles que n'en contiendraient les halos s'ils avaient tout converti.

Les premiers candidats de Webb se tenaient « à la limite même » de ce plafond. Boylan-Kolchin en tire la suite sans choisir : « un problème important non résolu », à l'un de trois niveaux — les propriétés déduites des observations, distance et masse ; la façon dont les galaxies se forment tôt dans le modèle standard ; le modèle lui-même. Les trois n'ont pas le même coût. Le premier n'engage que des mesures : un z photométrique surestimé, une masse mal déduite de la lumière. Le deuxième engage l'astrophysique : un gaz converti plus vite, ou plus complètement, qu'on ne le pensait. Le troisième engage tout le reste du livre — le fond diffus, les abondances des premières minutes, les oscillations dans la répartition des galaxies — et jusqu'aux dates de ces galaxies, calculées dans ce même modèle.

Le premier niveau a absorbé une bonne part du problème. Depuis 2023, la spectroscopie a écarté beaucoup des candidats photométriques trop massifs pour le plafond : leur lumière décomposée, plusieurs se sont trouvés moins lointains, ou moins massifs, que leurs couleurs ne le laissaient croire. La menace la plus directe contre le modèle venait d'objets qui n'étaient pas ce qu'on croyait.

Il n'a pas tout absorbé. Les galaxies de $z \approx 14$ sont confirmées ; leur distance ne se discute plus. Et l'excès que mesure l'équipe de Naidu ne porte pas sur une masse d'étoiles mais sur une luminosité, quand le plafond porte sur une masse. Pour passer de l'une à l'autre, il faut supposer combien de lumière donne chaque masse solaire d'étoiles, et cela dépend de leur âge, de leur répartition en masse, de la poussière qui en absorbe une part. Une galaxie peut briller beaucoup sans avoir beaucoup d'étoiles : si elles sont très jeunes, si elles sont plus lourdes en moyenne, si rien n'absorbe leur lumière. C'est dans cet écart, entre la lumière vue et la masse déduite, que se logent presque toutes les explications ; là, le plafond n'est pas touché.

Quatre explications, aucune gagnante

Dans une galaxie ordinaire, la formation des étoiles se freine elle-même. Dès qu'elles existent, les étoiles massives soufflent des vents, puis explosent en supernovas ; elles chauffent et dispersent le gaz dont d'autres étoiles seraient nées, et une galaxie ne convertit jamais d'un coup tout son gaz — les astronomes appellent cet effet en retour la rétroaction. Mais ce frein a un délai. Il faut à une étoile de 25 masses solaires environ dix millions d'années pour brûler son hydrogène avant ses étapes finales ; un nuage qui tombe sous son propre poids met d'autant moins de temps à le faire qu'il est dense. En 2023, Avishai Dekel et ses coauteurs posent les deux durées côte à côte. Quand le temps de chute passe sous un million d'années environ — vers 3 000 atomes par centimètre cube —, le gaz s'effondre et fait ses étoiles avant que les freins ne se déclenchent : des « sursauts sans rétroaction ».

Dans ce scénario, les galaxies de l'aube convertissent le gaz qu'elles accrètent en étoiles avec une grande efficacité, et le modèle prédit un excès de galaxies lumineuses à $z \approx 10$, avant environ 470 millions d'années ; Dekel lit les observations de Webb comme « cohérentes » avec cette conversion. Il ne demande aucun halo de plus. Il demande que les halos de l'aube, plus denses, fassent davantage d'étoiles avec le même gaz — sous le plafond de Boylan-Kolchin, mais plus près de lui.

La deuxième explication ne change pas la quantité d'étoiles, mais sa répartition dans le temps. Dans les simulations de la série FIRE, qui suivent le gaz, les étoiles et leur rétroaction dans des galaxies une à une, la formation d'étoiles de l'aube va par à-coups : des sursauts brefs et intenses, entre des périodes 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 $z \approx 10$. Le mécanisme tient à la manière dont on compte. Un relevé retient les galaxies au-dessus d'un seuil d'éclat, donc surtout celles qui étaient en plein sursaut au moment où leur lumière est partie ; et comme les petits halos sont bien plus nombreux que les gros, il suffit qu'une fraction d'entre eux franchisse le seuil pendant un sursaut pour que le nombre de galaxies brillantes monte sans qu'un seul halo change. Webb verrait des galaxies ordinaires saisies à leur pic. Les deux premières explications sont voisines, puisqu'un sursaut sans rétroaction est un sursaut, et elles ne disent pas la même chose : plus d'étoiles au total, ou les mêmes, par à-coups, dont on voit les pics.

La troisième porte sur la lumière perdue en chemin. La poussière interstellaire — des grains solides d'éléments lourds — absorbe l'ultraviolet, et une galaxie poussiéreuse paraît moins brillante qu'elle n'est. Andrea Ferrara, Andrea Pallottini et Pratika Dayal partent d'un constat : l'extrémité brillante de la répartition des galaxies selon leur éclat change peu entre $z = 7$ et $z \approx 14$, de 760 à 290 millions d'années, alors qu'en remontant le temps les halos assez massifs pour de grosses galaxies se raréfient. Ils y voient une « conspiration » : la poussière atténuée de moins en moins, et ce gain compense « presque exactement » la perte de halos. Les galaxies au-delà de $z = 11$, avant environ 410 millions d'années, contiendraient une quantité négligeable de poussière, peut-être expulsée. Elles ne produisent pas plus de lumière ; elles en perdent moins. Cela croise l'oxygène de JADES-GS-z14-0 : la poussière est faite des mêmes éléments lourds que cette galaxie contient — il faudrait qu'ils soient restés gaz, ou que la poussière ait été chassée —, et les sources de ce livre ne disent pas si la poussière de ces galaxies a été mesurée.

La quatrième change l'origine de la lumière. Si les étoiles de l'aube étaient plus lourdes en moyenne que celles d'aujourd'hui — un trait de la population III qui aurait persisté dans des générations nées d'un gaz pauvre en métaux —, une même masse d'étoiles brillerait davantage en ultraviolet, et les galaxies paraîtraient plus massives qu'elles ne sont, sans halo ni gaz de plus ; les sources de ce livre ne donnent ni argument ni test. L'autre variante est un trou noir qui avale du gaz et le chauffe au point de le faire briller, un noyau actif dont la lumière se mêlerait à celle des étoiles. Pour les deux galaxies JADES à $z \approx 14$, elle est écartée comme explication complète : leur lumière est dominée par les étoiles, et l'excès « ne peut pas être entièrement expliqué par l'accrétion sur des trous noirs ». L'étendue de JADES-GS-z14-0 sur 260 parsecs va dans le même sens, là où un noyau actif serait un point. La fiche ne dit pas si le même examen a été fait pour MoM-z14, bien plus compacte.

Aucune n'a gagné, et elles ne s'opposent pas terme à terme : une galaxie de l'aube peut être à la fois dense, en plein sursaut, sans poussière et riche en étoiles lourdes, chaque effet multipliant les autres. Ce qui les distingue, ce sont les signatures qu'elles laissent. Un gaz très dense, donc des galaxies compactes, pour les sursauts sans rétroaction — MoM-z14 et ses 74 parsecs sont de ce type, JADES-GS-z14-0 et ses 260 le sont moins. Des galaxies de même masse à des éclats très différents pour les dents de scie, ce qui demande des masses mesurées indépendamment de la lumière. De la poussière mesurée, pour la poussière. Une empreinte dans le spectre, pour la répartition en masse. La fiche attend, pour trancher, des relevés plus pro-

fonds avec Webb et la raie à 21 centimètres, d'abord en mesure globale puis en cartes. Aucune de ces mesures n'est faite à la date où ce livre s'écrit.

Ce qui cède

Les quatre explications ont un point commun : aucune ne touche au nombre de halos de matière noire, et aucune ne demande de changer le modèle cosmologique. Elles changent la façon dont le gaz d'un halo devient des étoiles, la façon dont ces étoiles brillent, ou la part de lumière que la poussière en retire. Le troisième niveau de Boylan-Kolchin, le modèle lui-même, n'est pas exclu par un argument de principe ; 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.

Ce qui cède est donc situé. Sur l'axe qui va du modèle cosmologique à l'astrophysique des galaxies, la cassure est du côté de l'astrophysique : ce n'est pas le Big Bang qui est en cause, c'est le scénario de formation des galaxies. L'âge de l'Univers — $13,787 \pm 0,020$ milliards d'années dans l'analyse finale de Planck — n'en dépend pas ; ni les abondances des premières minutes, ni le fond diffus ; et les dates de ces galaxies, calculées dans le modèle, restent valables. Les modèles qui prévoyaient cent fois moins de galaxies brillantes, eux, ont faux dans leur second calcul, la galaxie donnée à chaque halo, qui est à refaire pour l'aube. Écrire que Webb « contredit le Big Bang » est un contresens, que la fiche de ce chapitre signale expressément.

La portée n'en est pas moins considérable pour le premier milliard d'années. Une synthèse collective de 2024, signée par Adamo et ses cosignataires — une large part des équipes qui exploitent Webb —, écrit que la communauté est « en train de réécrire les manuels d'astronomie ». Le mouvement se lit dans les dates de ce chapitre. En 2015, les premières galaxies vers 300 à 400 millions d'années. En 2018, une galaxie vue vers 540 millions, avec des étoiles nées vers 250. En 2024, deux galaxies confirmées à $z \approx 14$, lumineuses et communes, dont l'une contenait de l'oxygène. En 2025, MoM-z14 à 280 millions, son azote, et les galaxies brillantes de son époque cent fois plus nombreuses que la prévision. Chacune de ces étapes a déplacé une ligne des manuels ; aucune n'a déplacé le cadre.

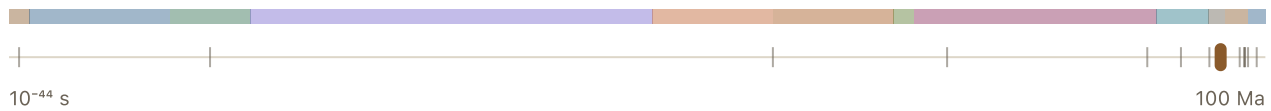
Cette abondance de lumière a une conséquence immédiate. L'ultraviolet de ces galaxies arrache de nouveau à l'hydrogène intergalactique ses électrons — la réionisation, qui met fin à la nuit au sens de la seconde définition du chapitre des âges sombres. On en voit un signe précoce : une galaxie vue à $z = 13,0$, 330 millions d'années après le début, montre une raie de l'hydrogène, la Lyman- α , qui suppose, selon Witstok et ses coauteurs, qu'elle a creusé autour d'elle une bulle de gaz ionisé. Une bulle ; et entre les bulles, l'hydrogène neutre.

Si les galaxies de l'aube sont cent fois plus nombreuses et plus brillantes qu'on ne le pensait, elles devraient rallumer l'Univers vite. Or la réionisation mesurée est lente et tardive : son mi-parcours tombe vers 670 millions d'années selon le fond diffus, et des poches de gaz neutre tiennent jusqu'à 1,1 milliard d'années selon les quasars. En 2024, Julian Muñoz et ses coauteurs font le bilan, parlent d'une « crise du budget de photons », d'une erreur quelque part, dans la théorie ou dans les observations. Le même excès qui a bousculé la formation des galaxies bouscule maintenant le rallumage. Additionnées, les galaxies observées à ce jour ne suffisent pas seulement à rallumer l'Univers : elles le rallumeraient « trop tôt ».

Le rallumage

~0,3 à ~1,1 Ga

brouillon · 4288 mots



À la frontière d'une bulle de gaz ionisé, un atome d'hydrogène reçoit un photon ultraviolet. Le photon vient d'une galaxie qui brille loin derrière ; il a traversé jusqu'ici sans rien toucher. Il frappe l'atome, l'électron se détache, et le photon n'est plus nulle part : il s'est dépensé entier à séparer les deux. Derrière lui, vers la source, il n'y a plus que des noyaux et des électrons qui vont chacun de leur côté, et l'ultraviolet suivant traverse cette étendue sans rien rencontrer, jusqu'au prochain atome entier, un peu plus loin. La frontière a avancé d'un atome. Elle avance d'un autre, puis d'un autre, et elle avance ainsi tant que la galaxie brille.

Le gaz où cela se passe est lâche. Depuis que les atomes se sont formés, l'espace s'est étiré plus de cent fois dans chaque direction, et ce gaz est plus d'un million de fois moins dense que le plasma d'avant la première lumière. Les électrons que les bulles libèrent sont clairsemés à proportion, séparés par des étendues qu'une lumière franchit sans en toucher un seul ; et la lumière la plus ancienne, qui file tout droit à travers tout cela depuis des centaines de millions d'années, n'en rencontre presque aucun sur son chemin. Un photon sur vingt heurte un électron et part de côté. Les autres passent.

Les bulles sont nombreuses, une autour de chaque galaxie. Elles grossissent, se touchent, se rejoignent, et le gaz ionisé devient d'un seul tenant, une étendue continue que l'ultraviolet traverse d'une galaxie à la suivante. Le gaz neutre, lui, se retrouve en îlots, loin des sources, là où aucune lumière ultraviolette n'est encore parvenue. Dans ces îlots, l'hydrogène a encore ses électrons, et l'ultraviolet qui y entre ne va pas loin.

Ionisé une seconde fois

Rallumer est le mot juste, et le mot savant dit la même chose par son préfixe : réionisation. 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 d'un électron à l'autre ; vers 3 000 K, les électrons se sont liés aux noyaux, la lumière est partie droit devant elle, et le gaz est resté neutre pendant des centaines de millions d'années. Ce que les étoiles et les galaxies font maintenant, c'est lui arracher ses électrons de nouveau — un retour à l'état d'avant la première lumière, dans un Univers qui n'a plus rien de celui-là.

Un gaz neutre ne traite pas toute lumière de la même façon. Un photon du fond diffus le traverse sans être gêné : il n'y a plus d'électron libre pour le dévier, et il n'a pas de quoi arracher son électron à un atome. Un photon ultraviolet sorti d'une étoile jeune a ce qu'il faut. Il rencontre un atome d'hydrogène neutre, lui prend son électron, et il n'existe plus. Les deux lumières traversent le même gaz et n'y connaissent pas le même sort : transparent au fond diffus, opaque à l'ultraviolet ionisant, le gaz consomme les premiers photons ultraviolets qu'une galaxie émet avant qu'ils aient quitté ses abords.

C'est par là que la frise du livre définit la réionisation : l'Univers redevient transparent aux ultraviolets, entre environ 0,3 et environ 1,1 milliard d'années après le début. Un hydrogène déjà ionisé n'a plus d'électron à perdre ; le photon qui le traverse passe. L'objection vient d'elle-même, puisqu'un gaz ionisé est justement ce qui rendait l'Univers opaque avant 380 000 ans, et la réponse est une dilution. Entre la recombinaison

son et la réionisation, l'espace s'est étiré plus de cent fois dans chaque direction ; le gaz est devenu plus d'un million de fois moins dense ; les électrons libérés sont clairsemés au point de ne rendre à la lumière rien de son ancienne opacité. Ils n'en dévient qu'une petite part, et cette petite part est ce qui permettra de dater.

Le rallumage n'est donc pas l'allumage que les chapitres précédents ont raconté. Les premières étoiles, selon la théorie, à partir d'environ 100 millions d'années ; les premières galaxies confirmées vers 280 millions, cent fois plus nombreuses que prévu : cela concerne les sources, chacune au cœur de son halo. Le rallumage concerne l'espace entre elles — le gaz intergalactique, transformé par la lumière qu'elles y envoient, un changement d'état du milieu qui remplit le cosmos —, et c'est lui qui met fin à la nuit au sens de la seconde définition du chapitre des âges sombres, celle qui se mesure. Sur l'année cosmique, il commence vers le 9 janvier, passe son mi-parcours vers le 18 et s'achève vers le 29. La nuit avait duré deux jours et demi ; la reconquête de la transparence prend trois semaines.

Une raie qui aurait dû s'éteindre

Le début ne se voit pas à l'échelle du cosmos ; il se voit galaxie par galaxie, et pour l'instant dans une seule. 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 : JADES-GS-z13-1-LA, celle qui servait de point de contrôle à la règle du chapitre des âges sombres. Son spectre montre une raie Lyman- α intense — la lumière ultraviolette qu'émet un atome d'hydrogène quand son électron retombe au niveau le plus bas, qui est aussi celle que l'hydrogène neutre absorbe le plus volontiers. Une galaxie entourée de gaz neutre devrait voir cette raie effacée avant qu'elle ne s'échappe vers nous.

L'argument tient en trois pas. La raie est là, et intense. À 330 millions d'années, le gaz intergalactique est encore neutre presque partout ; le mi-parcours ne viendra que des centaines de millions d'années plus tard. 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 d'elle une bulle de gaz déjà ionisé, creusée par son propre rayonnement. L'équipe écrit que des étoiles massives et chaudes, ou un noyau actif de galaxie, ont créé « une région réionisée précoce » qui a empêché « l'extinction complète » de la raie. Personne n'a vu le gaz ionisé. Il est déduit de ce que la raie aurait dû subir en son absence.

Deux réserves bornent ce que cela établit. L'équipe ne tranche pas entre des étoiles chaudes et un trou noir qui avale du gaz et le fait briller : dès la première bulle, la question « par qui » se pose, et elle reste ouverte. Et c'est un cas isolé, qui ne mesure rien de l'état global du gaz. Une galaxie qui a creusé sa bulle à 330 millions d'années dit que le rallumage avait commencé quelque part à cette date, pas quelle fraction de l'Univers était ionisée — et cette fraction devait être minuscule, puisque le fond diffus place le mi-parcours bien plus tard. Le cas suffit pourtant à fixer une date. Cette galaxie est vue à peine 50 millions d'années après MoM-z14, la plus lointaine confirmée ; à ce qu'on peut voir, dès qu'une source brille assez fort, elle commence à ioniser son voisinage.

L'observation donne aussi l'image qui organise tout le reste. 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, et la frontière de la région ionisée avance tant que la source brille. Les sources sont nombreuses ; leurs bulles grossissent jusqu'à se toucher, puis se rejoindre, et le gaz neutre se réduit à des îlots de plus en plus petits, dans les régions les plus éloignées des sources. À un même instant, un lieu peut être ionisé depuis longtemps et un autre encore neutre. La réionisation n'a pas lieu à une date : chaque région de l'Univers a la sienne.

Six paramètres, et celui-là

Le milieu se lit dans la plus vieille lumière. Les électrons que la réionisation libère dévient de nouveau une petite part du fond diffus, qui voyageait en ligne droite depuis 380 000 ans, et la grandeur qui compte ces déviations est la profondeur optique — celle-là même qui définissait la surface de dernière diffusion, le nombre moyen de fois qu'un photon est dévié sur son trajet. Planck la mesure pour la réionisation à $\tau = 0,054 \pm 0,007$: environ un photon sur vingt du fond diffus a été dévié une seconde fois.

Ce nombre n'est pas une mesure annexe. La profondeur optique de réionisation est l'un des six paramètres ajustés du modèle cosmologique de base de Planck, avec la densité de matière ordinaire, celle de matière noire, l'échelle angulaire des ondes sonores figées à la recombinaison, et l'amplitude et la pente des inégalités primordiales ; tout le reste en dérive, l'âge de l'Univers compris. Une déviation supplémentaire, même faible, atténue et brouille un peu les motifs de la carte, et il faut la compter pour les lire : Planck ne peut pas se passer de la réionisation pour lire sa carte. Le rallumage laisse 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, pas le moment où elle les a rencontrés, et une réionisation précoce et étalée peut donner le même total 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, lente au début, rapide au milieu, lente à la fin, décrite par une tangente hyperbolique autour d'un décalage central qu'on ajuste. Le mi-parcours tombe à $z = 7,68 \pm 0,79$, et les tables le précisent : ce mi-parcours « suppose un modèle tanh simple ».

Converti en âge par la règle du chapitre des âges sombres, $z = 7,68$ donne environ 670 millions d'années, entre 590 et 780 pour la marge. Le tableau du Particle Data Group, calculé avec l'ajustement Planck 2018 en intégrant toute l'histoire de l'expansion dans le modèle Λ CDM, donne 690 millions d'années pour $z = 7,7$; la règle néglige l'énergie noire, qui commence à peser un peu à ces époques. Ces vingt millions d'années entre deux conversions sont quatre à cinq fois plus petits que la marge de la mesure elle-même. Écrire 670 ou 690 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 sur un exemple. Un scénario où les seuls trous noirs conduiraient la réionisation place son mi-parcours à $z \approx 6,5$ à $6,7$, 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. Le fond diffus penche 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 », avec une réionisation achevée vers 900 millions d'années. Le communiqué ne dit pas quelle grandeur il retient comme fin, ni sur quelle mesure antérieure reposait l'estimation plus précoce ; le sens du déplacement, lui, est clair. Chaque analyse du fond diffus a repoussé le rallumage plus tard, et les premières galaxies ont eu plus de temps pour le produire.

Soixante-sept lignes de visée

Pour la fin, 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 — des noyaux de galaxies extrêmement lu-

mineux, alimentés par des trous noirs géants qui avalent du gaz. Leur éclat les rend visibles de très loin, et leur lumière traverse sur son trajet tout le gaz intergalactique qui les sépare de nous.

Le principe est celui d'une carotte prélevée dans le temps. 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 celle de la raie Lyman- α , que l'hydrogène neutre absorbe le plus volontiers, et s'il reste à cet endroit du trajet de l'hydrogène neutre, la lumière y est absorbée. Le spectre garde ainsi, longueur d'onde par longueur d'onde, la trace de l'état du gaz tout au long de la ligne de visée. Le titre de l'étude de référence dit ce qu'elle mesure : la « profondeur optique Lyman- α » du gaz intergalactique.

En 2022, Sarah Bosman et ses coauteurs analysent les spectres de 67 quasars lointains et trouvent des « fluctuations liées à la réionisation » qui persistent dans le gaz intergalactique « au moins jusqu'à $z = 5,3$ », 1,1 milliard d'années après le Big Bang — la même valeur que donne la règle du livre. Ces fluctuations sont des variations de l'absorption d'une ligne de visée à l'autre, la signature des dernières poches de gaz neutre que la lumière des sources n'avait pas encore atteintes : un gaz entièrement ionisé depuis longtemps serait plus uniforme ; un gaz où survivent des îlots 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 $z = 5,3$ ».

Le nombre compte. Une seule ligne de visée pourrait traverser, par hasard, une région particulièrement neutre ou particulièrement ionisée ; soixante-sept donnent une statistique, et montrent que la dispersion elle-même, pas un cas particulier, persiste jusqu'à cette époque. La méthode a 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 ; Planck, en 2015, la voyait achevée vers 900 millions ; les quasars, en 2022, la prolongent jusqu'à 1,1 milliard. Sur l'année cosmique, la fin est passée du 13 au 24, puis au 29 janvier. Entre la première estimation et la dernière, elle a reculé de six cents millions d'années — plus que la durée entière de la réionisation telle que la voyaient les synthèses anciennes.

Ce recul ne tient pas à une suite d'erreurs corrigées ; il tient à ce qu'on cherche. Le début d'un processus par bulles se signale par une source brillante et sa bulle. La fin ne se signale par rien de brillant : il faut trouver les derniers îlots neutres, petits, dispersés, loin des sources, et on ne les détecte qu'en accumulant des lignes de visée, si bien que 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 ».

Environ sept cents millions d'années

Les trois repères se mettent bout à bout. Au début, une galaxie a déjà creusé sa bulle à 330 millions d'années ; au milieu, le fond diffus place le mi-parcours vers 670 millions, dans un modèle de transition simple ; à la fin, les quasars montrent des îlots neutres jusqu'à 1,1 milliard. Quelque 770 millions d'années séparent le premier du dernier, et la réionisation est un processus d'environ 700 millions d'années, par bulles qui grossissent et se rejoignent — l'intervalle qu'inscrit la frise du livre, de $\sim 0,3$ à $\sim 1,1$ milliard d'années après le début.

Ce bilan ne donne pas de date, pour trois raisons qui ne sont pas de même nature. Le processus dure plus longtemps que tout ce qui l'a précédé depuis la première lumière, et dater reviendrait à choisir un moment :

le premier photon ionisant qui s'échappe d'une galaxie, la moitié du gaz ionisée, ou la dernière poche neutre effacée. Par bulles, il avance plus vite près des sources et plus lentement loin d'elles ; même avec un critère — « le gaz est ionisé ici » —, la date dépendrait du lieu. Et chacun des trois repères vient d'un observable qui voit une chose différente : une bulle à un endroit ; un total sur toute l'histoire et tout le ciel, converti par une forme supposée ; le gaz le long de soixante-sept lignes de visée. Aucun ne mesure la même grandeur que les autres. Tous livrent des décalages vers le rouge convertis dans le modèle standard, et la conversion est solide à quelques pour cent près ; 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, du prochain îlot neutre qu'on détectera plus tard ; le milieu, 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. La seule formule exacte est celle de la frise — entre quelques centaines de millions et un milliard d'années environ.

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.

Le compte des photons

Pour ioniser l'hydrogène d'un Univers entier, il faut des photons ultraviolets au moins aussi nombreux que les atomes à ioniser, et trois quantités font ce nombre : combien de sources ; combien de photons ionisants chacune produit ; quelle fraction de ces photons sort de la galaxie qui les émet, car son propre gaz et sa propre poussière en absorbent une part avant qu'ils n'atteignent le milieu intergalactique. Le produit des trois doit suffire, et au bon rythme. Longtemps, le problème fut de trouver assez de photons. Webb l'a inversé.

En 2024, l'équipe d'Hakim Atek observe des galaxies faibles du premier milliard d'années derrière un amas de galaxies dont la masse courbe la lumière de ce qui se trouve derrière lui et l'amplifie — comme pour le candidat LAP1-B du chapitre des premières étoiles —, ce qui rend mesurables des galaxies que rien d'autre ne permettrait d'étudier. Ces galaxies produisent quatre fois plus de photons ionisants, pour une même lumière ultraviolette, que les valeurs qu'on supposait couramment. 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 % ». Même si dix-neuf photons sur vingt restent piégés dans leur galaxie, le vingtième suffit. Le titre en tire la conclusion, la plupart des photons qui ont réionisé l'Univers viennent des galaxies naines : individuellement modestes, elles sont bien plus nombreuses que les brillantes, et leur somme l'emporte.

La même année, Julian Muñoz et ses coauteurs font le compte dans l'autre sens, en additionnant la production des galaxies déjà observées directement, celles qui sont assez brillantes pour être vues au-dessus d'un certain seuil. Ces galaxies-là « non seulement peuvent conduire la réionisation, mais l'achèveraient trop tôt » pour le calendrier que fixent le fond diffus — mi-parcours vers 670 millions d'années — et les quasars — îlots neutres jusqu'à 1,1 milliard ; ils appellent ce désaccord une « crise du budget de photons ». Elle prolonge celle du chapitre précédent. Des galaxies brillantes cent fois plus nombreuses que prévu à 280 millions d'années, des galaxies faibles qui produisent quatre fois plus de photons : chacun des deux résultats augmente le budget, et additionnés ils le font déborder. Là où l'on se demandait d'où venaient assez de photons, on se demande maintenant où sont passés ceux qui excèdent le besoin.

L'erreur est quelque part, dans la théorie ou dans les observations, et la fiche qui sert de base à ce chapitre désigne un suspect principal : la fraction de photons qui s'échappe. Des trois facteurs, 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 ; mais les photons qui quittent la galaxie sont justement ceux qui ne nous parviennent pas, absorbés en chemin par le gaz intergalactique qu'ils ionisent. Si cette fraction était nettement plus faible que 5 % dans les galaxies du premier milliard d'années, le budget pourrait se refermer. Les sources de ce livre ne disent ni comment on la contraint, ni quelle valeur il faudrait.

Une troisième piste change de sources. Webb a trouvé, dans le premier milliard d'années, de nombreux petits trous noirs en train d'accréter du gaz, et 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 : un mi-parcours à $z \approx 6,5$ à $6,7$, vers 800 à 850 millions d'années, plus tard que la valeur centrale de Planck, et une fin à 99 % vers $z \approx 5,3$ à $5,5$, qui s'accorde avec les quasars. Le scénario est minoritaire et discuté. Il se heurte aux galaxies elles-mêmes — pour les deux plus lointaines du relevé JADES, la lumière est dominée par les étoiles, pas par un trou noir —, et il demanderait que les photons des galaxies restent piégés bien au-dessous des 5 % d'Atek. Il a un mérite dans la crise : il déplace la réionisation vers la fin, là où les quasars la voient. Et la première bulle déduite, à 330 millions d'années, pourrait avoir été creusée par des étoiles ou par un noyau actif ; Witstok ne sait pas le dire.

Le consensus, prudent, attribue l'essentiel de la réionisation aux galaxies qui forment des étoiles, et surtout aux petites, et laisse deux quantités 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. Une source manquante peut toujours avoir été oubliée ; un excès dit qu'une des quantités mesurées, ou un des modèles qui les relient, est faux. Les mesures qui départageraient les hypothèses ont un nom : contraindre la fraction d'échappement directement dans des galaxies comparables, recenser les noyaux actifs et mesurer leur contribution, et suivre la croissance des bulles dans le temps, pour un calendrier indépendant de la forme que Planck suppose.

Ce qui tranchera, et ce qui commence

Le calendrier comme les sources attendent le même arbitre : le signal de l'hydrogène neutre à 21 centimètres, que le chapitre des âges sombres a présenté comme le seul moyen d'observer la nuit. L'hydrogène neutre absorbe ou émet ce rayonnement, que l'expansion étire en ondes radio, et il ne répond que du gaz neutre. Une bulle ionisée n'émet ni n'absorbe à 21 centimètres ; une carte du signal la montrerait comme un trou. Chaque fréquence reçue correspond à une époque, et une série de cartes à des fréquences différentes serait un film des bulles qui naissent, grossissent et se rejoignent. 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 moyennée sur le ciel, puis des cartes, et 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, qu'elle lisait comme la marque d'étoiles déjà présentes vers 180 millions d'années — mais plus de deux fois plus profond que les plus grandes prédictions. 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. La radioastronomie à 21 centimètres reste attendue pour trancher, et les sources de ce livre ne lui donnent aucune échéance : aucune carte de la réionisation à 21 centimètres n'existe dans la base à la date où ce chapitre s'écrit.

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 montrent 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 », deux milliards d'années avant l'assemblage final de son halo interne. Sur l'année cosmique, c'est le 21 janvier — avant le 29, où les quasars voient encore des îlots neutres. Notre Galaxie a commencé à se construire dans un Univers encore troué de gaz neutre, où des îlots d'hydrogène gardaient leurs électrons à l'écart de toute source. Les sources de ce livre ne disent pas si la région où elle naissait était déjà ionisée.

Cette partie du livre se referme là. Après la première lumière, l'Univers était transparent et obscur. Des étoiles que personne n'a vues l'ont allumé. Des galaxies plus nombreuses et plus brillantes que prévu l'ont éclairé. Leur lumière a lentement ionisé le gaz entre elles, jusqu'à le rendre transparent à l'ultraviolet un peu après le premier milliard d'années — et la chronologie de cet allumage, qui a plus bougé qu'aucune autre en dix ans, bougera encore. La suite change d'échelle. L'oxygène déjà présent dans JADES-GS-z14-0, à 300 millions d'années, en est la trace la plus ancienne : les étoiles qui ont ionisé l'Univers ont aussi fabriqué, dans leur cœur et dans leur mort, ce qui manquait au gaz des premières minutes.

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
2. L'or des catastrophes
3. Une Galaxie agitée
4. Le Soleil arrive tard

La forge

brouillon · 3834 mots

Au centre d'une étoile qui pèse vingt-cinq fois le Soleil, des noyaux d'hydrogène se soudent en hélium depuis des millions d'années, et la chaleur de cette soudure tient la boule de gaz contre son propre poids. Puis l'hydrogène manque au centre. Le cœur se tasse, s'échauffe, et trois noyaux d'hélium s'y rencontrent à la fois : deux font un béryllium 8, qui se défait aussitôt ; le troisième arrive avant qu'il ne se soit défait, et ce qui reste est un carbone 12, qui tient.

Le cœur se tasse de nouveau, s'échauffe de nouveau. Le carbone brûle, puis l'oxygène, puis le silicium, chaque combustion plus chaude et plus courte que la précédente, jusqu'à ce que le silicium se consume en cinq jours et laisse du nickel 56, qui ne donne presque plus de chaleur. La lumière du cœur est alors si chaude qu'elle brise les noyaux au lieu de les laisser s'assembler. Rien ne retient plus le centre. Il se contracte en quelques minutes, tombe sur lui-même en quelques secondes, et l'étoile éclate. De l'oxygène, du magnésium, du silicium, du soufre et du calcium s'en vont dans le gaz alentour.

Ailleurs, une étoile bien moins lourde, devenue géante à la fin de sa vie, n'éclate pas. Elle laisse partir ses couches extérieures dans un vent, lentement, et le carbone que trois noyaux d'hélium ont fait dans son cœur s'en va avec, sans explosion. Le gaz entre les étoiles reçoit les deux, ce qu'une explosion a jeté et ce qu'un vent a laissé aller. De l'étoile moyenne il reste un cœur nu de carbone et d'oxygène, qui ne brûle plus, et qui tourne autour d'une compagne.

Entre presque rien et 1,4 %

Ce qui manquait au gaz des premières minutes se mesure à ce qu'il contenait, et l'inventaire tient en trois lignes. En masse, trois quarts d'hydrogène et un quart d'hélium 4. Du deutérium et de l'hélium 3, quelques cent-millièmes de l'hydrogène. Un dix-milliardième de lithium 7. Le quart 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 un quart par simple comptage — deux neutrons et deux protons dans chaque hélium, douze protons restés seuls, quatre nucléons sur seize. Les mesures d'aujourd'hui discutent la troisième décimale, entre 0,240 et 0,245, pas le quart lui-même.

Ni carbone, ni oxygène, ni fer. L'arrêt ne tient pas au temps mais aux noyaux. La chaîne des premières minutes monte en ajoutant à un noyau un proton, un neutron ou un noyau léger, et il n'existe aucun noyau stable de masse 5 ni de masse 8 : un hélium 4 qui capte un proton ou un neutron donne un noyau qui ne tient pas ; deux héliums 4 qui fusionnent donnent un noyau qui ne tient pas davantage. Les noyaux plus lourds se repoussent par leurs charges, le gaz est aussi dilué que l'air et seules y comptent les rencontres à deux, et vers vingt minutes tout est trop froid et trop lâche pour souder quoi que ce soit. Le chapitre des trois minutes a raconté cet arrêt ; celui-ci part de ce qu'il a obligé : fabriquer ailleurs tout le reste du tableau.

Le principe en est posé en 1957, dans un article de revue dont le titre dit la chose, « Synthesis of the Elements in Stars », signé de quatre noms : Margaret Burbidge, Geoffrey Burbidge, William Fowler et Fred Hoyle. Soixante ans plus tard, Chiaki Kobayashi, Amanda Karakas et Maria Lugaro reconstruisent l'origine de tous les éléments stables du carbone à l'uranium, et le formulent par une frontière de masse : les éléments dont le noyau compte au moins douze protons et neutrons ne sortent pas du Big Bang ; ils sont formés à l'intérieur des étoiles.

Les astronomes appellent métaux tout ce qui est plus lourd que l'hélium, carbone et oxygène compris. Au départ, la part des métaux dans la matière ordinaire est pratiquement nulle. Dans la photosphère du Soleil,

la couche dont vient sa lumière, elle vaut aujourd'hui 1,39 % de la masse. Tout ce que ce chapitre raconte tient entre ces deux nombres : de presque rien à 1,4 %, en un peu plus de neuf milliards d'années.

Un produit daté

La forge a un premier produit daté, et c'est de l'oxygène. En 2025, l'équipe de Sander Schouws détecte avec le réseau de radiotélescopes ALMA une raie de l'oxygène ionisé dans la galaxie JADES-GS-z14-0, vue « à peine 300 millions d'années après le Big Bang », et la part de métaux de son gaz vaut de 5 à 20 % de celle du Soleil — de l'ordre de 0,07 à 0,3 % de sa masse. L'oxygène ne sort pas des premières minutes. Des étoiles ont donc dû naître, en fabriquer, mourir et le rendre au gaz avant que cette galaxie ne forme celles qu'on voit briller.

Les ouvrières de ce premier travail manquent. Les étoiles de la première génération, dites de population III, nées d'un gaz sans aucun métal, n'ont jamais été observées directement ; le chapitre des premières étoiles a pesé leur seul candidat, trouvé tard derrière un amas de galaxies, et l'a laissé candidat. Ce qu'une étoile sans métaux de telle ou telle masse fabrique et rejette n'est pas dans les sources de ce livre.

Deux sortes d'indices pourraient faire mieux : les compositions des étoiles les plus pauvres en métaux de la Galaxie, où se lit le premier enrichissement, et l'observation d'un système de première génération lui-même. En l'état, la confiance est haute sur le fait qu'une forge a précédé les premières galaxies visibles, basse sur ce qu'elle a produit. La forge a un produit daté, l'oxygène d'une galaxie à 300 millions d'années, et un commencement que personne n'a vu.

Trois à la fois

Une étoile brûle d'abord son hydrogène en hélium, et « brûler » est un mot de métier : rien n'y prend feu comme dans un foyer, où des atomes se réarrangent — des noyaux s'y soudent, et la soudure dégage de l'énergie. Par quelles réactions quatre noyaux d'hydrogène finissent en un hélium, les sources de ce livre ne le détaillent pas, et le résultat suffit. Pendant la plus longue phase de sa vie, une étoile refait lentement dans son cœur ce que les premières minutes avaient fait d'un coup dans tout l'Univers ; 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 l'obstacle même qui avait arrêté les premières minutes : deux noyaux d'hélium qui fusionnent donnent un béryllium 8, qui ne tient pas. Elle le franchit à trois. Trois noyaux d'hélium donnent un carbone 12 en passant par le béryllium 8, et les physiciens, qui appellent « particule alpha » le noyau d'hélium 4, nomment cette réaction triple alpha. Le béryllium 8 n'est pas absent : il est le passage. Il ne dure pas ; s'il capte un troisième hélium avant de se défaire, le carbone est formé, et le carbone, lui, est stable.

Ce que le cœur d'une étoile a et que le gaz des premières minutes n'avait pas, ce sont les conditions. D'un côté, un gaz de la densité de l'air, où seules les rencontres à deux comptaient, ouvert une vingtaine de minutes : qu'un troisième noyau arrive pendant la brève existence d'un béryllium 8 y était presque impossible. De l'autre, un cœur bien plus dense, qui brûle son hélium pendant des millions d'années. La densité et la température qui y règnent ne sont pas chiffrées dans les sources de ce livre, et le principe tient en deux faits : la masse 8 ne se franchit qu'à trois, et seul le cœur d'une étoile rend une rencontre à trois assez fréquente.

Trois conséquences en découlent. La frontière de masse 12 : puisque le seul passage au-dessus des masses 5 et 8 aboutit au carbone 12 et exige une étoile, tout ce qui pèse au moins douze nucléons sort d'une étoile — « à cause de la nature des réactions triple alpha », écrivent Kobayashi et ses coautrices. Ce que le passage

saute : le béryllium et le bore stables, de masse 9 à 11, dont aucune source de ce livre ne traite l'origine. Et le mot de la source, « dans tous les cas » : l'hélium fusionne en carbone par cette réaction dans toute étoile qui brûle son hélium, et la plus modeste des étoiles fait du carbone comme la plus lourde.

Cinq jours

Une étoile est une boule de gaz que son propre poids comprime et que la chaleur de son cœur retient de tomber. Tant qu'un combustible brûle, les deux se compensent. Quand il manque au centre, la chaleur ne compense plus ; le cœur se contracte et, en se contractant, s'échauffe, jusqu'à la température qui allume le combustible suivant — qui n'est autre que ce que le précédent a laissé. Chaque nouveau combustible est plus lourd. Ses noyaux portent plus de charges et se repoussent plus fort ; la barrière coulombienne, qui freinait déjà les premières minutes, exige à chaque fois un cœur plus comprimé et plus chaud. Chez les étoiles massives, la contraction et l'échauffement allument ainsi, l'un après l'autre, le carbone, l'oxygène, puis le silicium.

Les durées s'effondrent. Pour une étoile de 25 masses solaires, la combustion de l'hydrogène dure 10 millions d'années et celle du silicium 5 jours, un rapport d'environ sept cents millions : si l'hydrogène de cette étoile brûlait une année, son silicium brûlerait quatre centièmes de seconde. Les durées de l'hélium, du carbone et de l'oxygène ne sont pas dans les sources, ni les raisons de l'accélération, ni la masse au-dessous de laquelle une étoile s'arrête avant le silicium ; et les chiffres sont ceux d'une étoile d'aujourd'hui. Le fait suffit à la chimie du cosmos : une étoile massive passe presque toute sa vie à faire de l'hélium, et fabrique du carbone au silicium dans un temps qui, rapporté à cette vie, est presque nul.

La combustion du silicium est la dernière. Elle aboutit au nickel 56, un noyau radioactif qui devient cobalt 56 puis fer 56, le fer ordinaire — on dit que la forge s'arrête « au fer » alors que son dernier produit direct est un nickel. 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 ; deux noyaux légers qui fusionnent en libèrent parce que le produit est plus solidement lié que ses parents ; ce gain diminue en montant dans les masses et s'annule dans la région du fer et du nickel, les noyaux les plus solidement liés de tous. Après le nickel 56, les réactions sont « beaucoup moins exothermiques », et le nickel 56 n'est pas un combustible pour la suite : c'est une cendre qui ne brûle plus.

La seconde raison est le retour de l'obstacle qui avait retardé les premières minutes : la photodésintégration, la destruction d'un noyau par un photon assez énergétique pour le briser. C'est elle qui avait tenu le deutérium en échec, le goulot du chapitre des trois minutes — un milliard de photons par noyau, qui cassaient chaque deutérium dès sa formation jusqu'à ce que la lumière faiblisse. Au fond d'une étoile massive, la situation est symétrique. Pour souder des noyaux de plus en plus lourds, le cœur doit être de plus en plus chaud, et à la température requise sa lumière se met à défaire les noyaux au lieu de laisser la forge les construire. 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, puis la contraction s'emballe en un effondrement de quelques secondes : la supernova à effondrement de cœur, que les astronomes classent d'après sa lumière en types II, Ib et Ic. Ce qui se passe pendant ces secondes — comment la chute du cœur devient l'explosion qui disperse le reste de l'étoile, ce qui reste au centre — n'est pas décrit dans les sources de ce livre. La vie entière de l'étoile tient dans ses durées : dix millions d'années d'hydrogène, cinq jours de silicium, quelques minutes de contraction, quelques secondes d'effondrement.

Qui a fait quoi

Tant qu'une étoile vit, ce qu'elle fabrique reste en elle. Les éléments sont faits pendant sa vie, combustion après combustion, et ne rejoignent le gaz de la galaxie qu'à sa mort — « avant d'être éjectés », dit la revue de Kobayashi pour les éléments intermédiaires. Pour qu'un atome d'oxygène entre dans une étoile de la génération suivante, il faut que la première soit morte. Et savoir comment une étoile fabrique un élément ne dit pas quelle part en vient de telle sorte d'étoile. Cette part sort de modèles d'évolution chimique, qui suivent une galaxie au fil du temps, y font naître des étoiles de toutes masses, attribuent à chacune ce qu'elle rejette en mourant et comparent le mélange aux compositions mesurées dans les étoiles réelles. Les « environ la moitié » qui suivent sont des résultats de modèle, donnés en ordres de grandeur, et la fiche de base les range parmi les points à vérifier avant publication.

Les vents des étoiles moyennes, d'abord. Environ la moitié du carbone, de l'azote et du fluor vient d'étoiles de masse faible ou moyenne, pendant la phase de fin de vie que les astronomes appellent branche asymptotique des géantes, ou AGB. Ces étoiles ne meurent pas en explosant : elles rendent leur matière par des vents, en perdant peu à peu leurs couches extérieures. Toute étoile qui brûle son hélium fait du carbone ; les étoiles modestes sont bien plus nombreuses que les massives ; elles rendent leur carbone doucement. Le carbone ne vient donc pas surtout des supernovas.

Les supernovas à effondrement de cœur, ensuite. L'oxygène, le magnésium, le silicium, le soufre et le calcium sont surtout produits dans les étoiles massives et éjectés par leurs explosions ; les astronomes les appellent éléments « alpha », parce que leurs noyaux les plus abondants comptent un nombre de nucléons multiple de quatre, comme des assemblages de noyaux d'hélium. L'oxygène de JADES-GS-z14-0 relève de cette source. Une étoile de 25 masses solaires vit de l'ordre de dix millions d'années, trois cents fois moins que les 300 millions d'années qui séparent le début de cette galaxie ; les étoiles massives sont les seules à avoir eu le temps de vivre et de mourir plusieurs fois avant elle, et leur oxygène est le premier métal qu'on ait trouvé dans le jeune Univers.

Les naines blanches qui explosent, enfin. La moitié environ des éléments du pic du fer — chrome, manganèse, fer, nickel, cobalt, cuivre, zinc — vient des supernovas de type Ia, explosions de naines blanches carbone-oxygène dans des systèmes doubles, où deux étoiles tournent l'une autour de l'autre. Une naine blanche est le cœur mis à nu d'une étoile de masse faible ou moyenne qui a perdu son enveloppe, fait du carbone que la triple alpha a produit et d'oxygène ; pourquoi elle finit par exploser, quel rôle y tient sa compagne, les sources de ce livre ne le disent pas. La moitié environ du fer vient de ces restes d'étoiles moyennes. L'extrait de la revue ne nomme pas la source de l'autre moitié ; la fiche la rapporte, par contraste, aux massives.

Au-delà du fer, à partir d'une masse d'environ 64, on ne fusionne plus des noyaux chargés : on capture des neutrons, qui n'ont pas de charge et qu'aucune barrière n'empêche d'approcher un noyau, si lourd soit-il. Un noyau qui en absorbe s'alourdit ; puis certains de ses neutrons se changent en protons, et il monte d'un rang dans le tableau. Deux régimes se distinguent par la densité de neutrons disponibles : le processus lent, ou s, à environ 10^7 neutrons par centimètre cube ; le processus rapide, ou r, au-delà de 10^{20} . Le processus s principal, du strontium au plomb, a lieu dans les étoiles AGB de faible masse — les mêmes étoiles modestes qui fournissent environ la moitié du carbone. Le processus r relève d'autres lieux.

Le partage tient en cinq lignes : hydrogène, hélium et traces de lithium aux premières minutes ; environ la moitié du carbone, de l'azote et du fluor aux vents des étoiles moyennes ; l'oxygène, le magnésium, le silicium, le soufre et le calcium aux explosions des massives ; environ la moitié du pic du fer aux naines blanches de systèmes doubles ; du strontium au plomb aux vents des AGB de faible masse. Il fait voir ce

que l'image d'une forge unique cachait. Les moyennes ont fourni sans exploser une grande part du carbone et de l'azote et la plupart des éléments du processus s ; leurs restes ont fourni environ la moitié du fer. Les étoiles massives et leurs explosions n'ont pas tout fait : le tableau périodique est l'ouvrage de toutes les masses d'étoiles, chacune à son rythme.

Une horloge et une boucle

Les sources ne rendent pas leur matière au même rythme : une étoile massive meurt au bout de quelques millions d'années, et une naine blanche n'explose qu'après la vie entière d'une étoile moyenne, qui est longue — la supernova de type Ia arrive en retard. Dans une galaxie qui commence à former des étoiles, seules les supernovas à effondrement de cœur ont d'abord eu le temps de se produire ; elles enrichissent le gaz en oxygène, magnésium et silicium, avec un peu de fer, et le rapport entre éléments alpha et fer est haut. Plus tard les Ia s'ajoutent, beaucoup de fer et peu d'éléments alpha, et le rapport baisse. La revue de Kobayashi énonce le fait et sa cause : « l'enrichissement retardé en fer par les supernovas Ia ».

Le rapport devient une horloge. Une étoile riche en éléments alpha par rapport à son fer est née d'un gaz enrichi surtout par des massives, donc tôt dans l'histoire de sa galaxie ; une étoile au rapport plus bas est née après l'arrivée des Ia. L'horloge est relative : elle ordonne des populations d'étoiles et ne donne pas d'âge en années, et les sources ne disent pas si elle bat au même rythme dans une galaxie qui forme ses étoiles vite et dans une autre qui les forme lentement. Pour dater en années, il faut d'autres méthodes — l'âge des étoiles sous-géantes dont Maosheng Xiang et Hans-Walter Rix se sont servis pour dater le disque ancien de la Voie lactée. Les deux se combinent, et c'est ainsi que se lira l'ordre de formation des populations de notre Galaxie.

L'horloge tient à une propriété plus large. 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 ; chaque étoile garde dans son atmosphère la composition du gaz dont elle est née, et les astronomes appellent archéologie galactique l'étude qui s'en sert, nommée au chapitre des premières étoiles. Les étoiles les plus pauvres en métaux gardent l'état le plus ancien de cette boucle : les vieilles étoiles du halo descendent jusqu'à environ cinq cents fois moins de fer que le Soleil. Le Soleil, avec 1,39 % de métaux, est né d'un gaz qui en avait fait beaucoup de tours.

Combien de tours, on ne peut pas le chiffrer, et ce n'est pas une lacune qu'une meilleure observation comblerait. Une lignée se compte parce que chaque génération y descend d'une seule précédente. Le gaz d'une galaxie 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, et 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 en nombre, parce qu'une boucle où tout se mêle ne définit pas de générations successives.

La photosphère du Soleil contient aujourd'hui, en masse, 74,4 % d'hydrogène, 24,2 % d'hélium et 1,39 % de tous les autres éléments. Le 1,4 % est l'œuvre de la forge ; les 74 % ne le sont pas. Les étoiles ne fabriquent pas d'hydrogène, elles en consomment, et tout l'hydrogène qui existe vient des premières minutes. Le carbone de nos cellules vient pour moitié environ des vents d'étoiles moyennes ; le fer de notre sang, pour moitié environ, de naines blanches qui ont explosé ; et 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. Dans une molécule d'eau, l'oxygène a été fabriqué dans une étoile massive et rendu par sa supernova ; les deux atomes d'hydrogène datent du premier jour.

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, et l'or et le platine en font partie. Ce processus exige plus de 10^{20} neutrons par centimètre cube, dix mille milliards de fois la densité du processus s, et rien de ce que ce chapitre a visité ne la fournit : ni la combustion tranquille de l'hydrogène et de l'hélium, ni les combustions rapides du carbone au silicium, ni les vents des étoiles AGB, qui atteignent 10^7 . 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 des éléments plus lourds que le fer « est restée longtemps incertaine ». Les candidats que recense la revue de John Cowan 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. Kobayashi et ses coautrices reproduisent l'évolution de l'euporium, un élément du processus r, si environ 3 % des hypernovas de 25 à 50 masses solaires sont des supernovas dites magnéto-rotationnelles ; elles relèvent que les fusions d'étoiles à neutrons, capables de produire jusqu'au thorium et à l'uranium, ont des délais « trop longs » pour les étoiles les plus pauvres en métaux, qui en contiennent déjà. Le lieu du processus r reste l'une des deux grandes incertitudes du domaine, avec la physique des noyaux très riches en neutrons.

En août 2017, une fusion de deux étoiles à neutrons est détectée en ondes gravitationnelles, puis vue en lumière. Ce qu'on y a vu briller, et ce que ce premier témoin direct laisse ouvert, est l'objet du chapitre suivant : la forge s'arrête au fer, et la première fois qu'on a vu naître des éléments plus lourds, c'était en août 2017.

L'or des catastrophes

brouillon · 4397 mots

Deux étoiles à neutrons tournent l'une autour de l'autre, chacune une masse d'étoile serrée en une boule de neutrons, et chaque tour est plus court que le précédent. Autour d'elles, l'espace ondule. Chaque ondulation qui s'en va emporte un peu de l'énergie du couple ; l'orbite se resserre d'autant ; les deux boules se rapprochent en spiralant, tournent plus vite, font onduler l'espace plus fort, se rapprochent encore. Au dernier tour, elles se touchent.

Au contact, de la matière est arrachée aux deux étoiles et jetée dans l'espace, et moins de deux secondes après part un éclair de rayons gamma. La matière jetée est riche en neutrons, comme les étoiles dont elle vient. Dans ce flot, des noyaux captent des neutrons plus vite qu'ils ne se défont ; ils se gonflent bien au-delà de ce qu'un noyau peut tenir, et tiennent quand même tant que les neutrons arrivent. Puis le flot tarit. Les noyaux gonflés se désintègrent alors, l'un après l'autre, en cascade, jusqu'à des noyaux qui tiennent. Ce qui reste est plus lourd que le fer, tout entier : les uns comptent moins de cent quarante nucléons, les autres davantage.

Ces désintégrations chauffent la matière, et la matière chaude brille. Elle est bleue d'abord ; en quelques jours elle rougit ; en une dizaine, la lueur s'éteint. La matière, elle, continue de s'éloigner, et ses noyaux, qui ne se défont plus, se mêlent au gaz de la galaxie.

Deux horloges

Une étoile vit de l'énergie de ses fusions, et au fer, fusionner ne rapporte plus rien. La forge s'arrête au nickel 56, qui donnera le fer : au-delà, les réactions de fusion sont « beaucoup moins exothermiques », elles ne libèrent presque plus rien, et le cœur est alors si chaud que la photodésintégration, la destruction des noyaux par des photons trop énergétiques, défait ce qui se construirait. Privé de combustible, le cœur s'effondre en quelques secondes. Le chapitre de la forge a raconté cette chute.

Le tableau périodique, lui, continue : strontium, europium, platine, or, plomb, thorium, uranium. Au-delà d'une masse d'environ 64 — le nombre des protons et des neutrons d'un noyau —, ces éléments sont fabriqués « surtout par captures de neutrons ». Un neutron n'a pas de charge électrique ; il approche un noyau sans que rien le repousse, le noyau l'absorbe et s'alourdit. Puis l'un de ses neutrons se change en proton, et le noyau monte d'un rang dans le tableau. Il n'y faut pas de chaleur extrême, il y faut des neutrons libres, et tout dépend de leur nombre : vers dix millions par centimètre cube, le processus est dit lent, ou s ; au-delà de cent milliards de milliards, rapide, ou r.

Quand les neutrons sont rares, un noyau qui vient d'en capter un et qui ne tient pas a presque toujours le temps de se désintégrer avant que le suivant n'arrive ; la montée se fait pas à pas, au voisinage des noyaux stables. C'est le processus s, et son lieu est connu. Sa forme principale, du strontium au plomb, opère dans les étoiles de faible masse en fin de vie, pendant la phase que les astronomes appellent branche asymptotique des géantes, ou AGB ; les pics d'abondance du baryum et du plomb sont « bien reproduits » par ce que ces étoiles rejettent. Une étoile ordinaire, dans sa vieillesse, suffit.

Tout se joue entre deux horloges, celle des captures et celle des désintégrations : le temps qui sépare deux neutrons captés, le temps qu'un noyau instable met à se défaire. Quand les neutrons arrivent par centaines de milliards de milliards dans chaque centimètre cube, la première horloge va plus vite que la seconde : les captures s'empilent avant toute désintégration, les noyaux se gonflent de neutrons bien au-delà de ce qui est stable, et c'est seulement une fois le flux tari qu'ils se désintègrent, en cascade, jusqu'à des noyaux

stables — souvent autres que ceux du processus s. Le chemin longe ainsi la limite au-delà de laquelle un noyau ne retient plus un neutron de plus, ce que les physiciens appellent la neutron drip line. Ces noyaux-là ne vivent qu'un instant, et ce qu'ils sont, ce qu'ils font, est l'une des deux grandes incertitudes du domaine. L'autre est le lieu.

Ce processus produit « environ la moitié » des éléments lourds présents dans la nature, dont l'or et le platine. Et rien, dans la vie ordinaire d'une étoile, ne fournit cent milliards de milliards de neutrons par centimètre cube : ni l'hydrogène qui brûle en hélium pendant des millions d'années, ni les combustions rapides du carbone au silicium, ni les vents des étoiles AGB, qui plafonnent à dix millions. Le site principal du processus r est débattu « depuis près de 60 ans », et la question tient en une densité : où, dans l'Univers, trouve-t-on assez de neutrons libres pour faire de l'or ?

Un cahier des charges

Daniel Kasen et ses coauteurs ouvrent leur article de 2017 sur un constat : l'origine cosmique des éléments plus lourds que le fer « est restée longtemps incertaine ». Depuis 1957, on savait que les étoiles fabriquent les éléments ; la physique du processus r était comprise ; et 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 cent milliards de milliards par centimètre cube. Une densité qui dure assez pour que les noyaux se gonflent, puis qui cesse, pour qu'ils aient le temps de se désintégrer vers la stabilité. Et une matière rendue au gaz de la galaxie, parce qu'un élément resté enfermé dans l'objet qui l'a produit n'entre dans aucune étoile de la génération suivante : fabriquer n'est pas rendre, et le chapitre de la forge l'a montré.

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. 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. Un trou noir est un objet si compact que rien, pas même la lumière, n'en ressort.

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, dans la matière même. Les supernovas ont un autre atout, qui tient au calendrier. Elles sont la mort d'étoiles massives, et les étoiles massives vivent peu : une étoile de 25 masses solaires brûle son hydrogène en une dizaine de millions d'années. 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, alimentée par la radioactivité de ce qu'il venait de fabriquer, et les modèles pouvaient en prévoir l'éclat, jour après jour. On l'a appelée kilonova. Il restait à trouver un site au bon moment, et à regarder.

Entendre, puis voir

Deux étoiles à neutrons qui tournent l'une autour de l'autre émettent des ondes gravitationnelles, de même nature que celles que l'inflation aurait dû laisser dans le fond diffus : des ondulations de la géométrie de l'espace. Ces ondes emportent de l'énergie. L'orbite se resserre, les tours raccourcissent, et le couple spirale jusqu'au contact ; pendant les derniers instants, quand les deux boules tournent au plus près et au plus vite, 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, puis la date. Environ 1,7 seconde plus tard, le satellite Fermi capte, de son côté, un sursaut de rayons gamma. Le signal gravitationnel place la source à quelque 130 millions d'années-lumière, dans une zone du ciel qu'il faut fouiller galaxie par galaxie, et moins de 11 heures après la fusion, un télescope de 1 mètre découvre dans la galaxie NGC 4993 une source lumineuse nouvelle, AT 2017gfo. 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 fait.

La source est d'abord bleue et s'éteint en 48 heures dans l'ultraviolet ; puis elle rougit, et évolue dans le visible et l'infrarouge pendant une dizaine de jours. C'est la kilonova attendue : son éclat et sa décroissance, jour après jour, correspondent à ce que prédisent les modèles pour la désintégration d'éléments du processus r tout juste formés. 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. 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 de matière éjectée : l'une faite surtout d'éléments « légers » du processus r, de moins de 140 nucléons, l'autre d'éléments « lourds », au-delà. 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. La kilonova dit des familles, non des éléments : aucune raie ne permet, dans AT 2017gfo, de lire tel ou tel noyau, et l'or n'y est pas nommé.

Le premier élément lu nommément l'a été 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 130 nucléons, et une source très rouge, qui émet l'essentiel de sa lumière dans l'infrarouge moyen, ce que les auteurs attribuent aux lanthanides, la famille de l'euporium. Le tellure appartient à la famille légère ; la rougeur des lanthanides signale la lourde.

Reste à passer d'un événement à l'Univers, et il y 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, et Kasen et ses coauteurs concluent que de telles fusions sont « un mode dominant » de production du processus r — « un », non « le ». La portée de GW170817 tient à ce qu'il réunit deux témoins indépendants du même événement : l'onde 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.

Trop tard pour les plus vieilles

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 ; il faut ensuite que celui-ci spirale jusqu'au contact, tour après tour. Benoit Côté et ses coauteurs décrivent ces délais par une loi tirée des sursauts gamma courts observés et des modèles d'étoiles doubles : la probabilité qu'une fusion survienne au bout d'un temps donné décroît comme l'inverse de ce temps — deux fois plus de temps, deux fois moins de chances —, de sorte que les fusions s'étalent sur toute l'histoire d'une galaxie au lieu de se concentrer au début. Deux observations résistent à l'idée que ces fusions suffisent seules.

La première pièce à charge vient des plus vieilles étoiles. Chaque étoile garde dans son atmosphère la composition du gaz dont elle est née, un fossile de la chimie de ce gaz, et l'archéologie galactique consiste à lire ces fossiles. Les étoiles les plus pauvres en métaux — les astronomes appellent métaux tout ce qui est plus lourd que l'hélium — sont nées d'un gaz que peu d'étoiles avaient enrichi, donc, en règle générale, aux premières époques ; en règle générale seulement, car une étoile peut être pauvre en métaux parce qu'elle est née tard, dans une petite galaxie que peu d'étoiles avaient enrichie. Or ces étoiles contiennent déjà des éléments du processus r.

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 ». 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.

La seconde vient du disque de la Galaxie, et elle ne dépend pas 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, parce que c'est un élément du processus r que l'on sait mesurer dans l'atmosphère des étoiles. Avec les fusions pour seule source et leur loi de délais, Côté et ses coauteurs ne reproduisent pas cette baisse. Une loi plus raide, 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 est un site supplémentaire, actif tôt et qui s'éteint à mesure que la teneur en métaux monte, et qui aurait pu faire environ la moitié de l'europium des premiers temps, avant l'arrivée des supernovas de type Ia.

Reticulum II est une galaxie naine ultra-pâle, très ancienne, formée peu après les premières étoiles, et les deux camps la revendiquent. En 2016, Alexander Ji et ses coauteurs y observent neuf étoiles en spectroscopie fine : sept portent le motif du processus r, cent à mille fois plus marqué que dans toute autre galaxie naine de ce type. Dans un système aussi petit, un seul événement suffit à marquer tout le gaz, et les auteurs concluent à un événement unique et rare, au rendement incompatible avec les supernovas ordinaires, compatible avec une fusion d'étoiles à neutrons. Daniel Siegel et ses coauteurs invoquent le même objet pour des supernovas rares agissant à basse métallicité. Reticulum II établit qu'un événement rare et prolifique a eu lieu tôt ; il ne dit pas lequel, le motif chimique étant celui du processus r en général. Les deux arguments reposent d'ailleurs 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 au-

raient du mal à être seules. GW170817 prouve que les fusions d'étoiles à neutrons font de l'or, pas qu'elles le font seules.

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, et les auteurs calculent, dans ces simulations, qu'ils pourraient fournir « plus de 80 % » du processus r de l'Univers. 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 vingt-cinq 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. 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. Thielemann et Cowan notent que le rendement des collapsars dépend de la richesse en neutrons de leur disque, qui reste mal connue. Les 80 % sont donc un résultat de simulation, que vingt-cinq supernovas muettes 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. Kobayashi et ses coautrices reproduisent l'évolution de l'euporium dans la Galaxie si, dans leur modèle, environ 3 % des hypernovas de 25 à 50 masses solaires sont de ce type et produisent des éléments du processus r. 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'euporium observé, non des propriétés mesurées des hypernovas, et aucune supernova magnéto-rotationnelle n'a été vue 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. Le désaccord oppose des simulations différentes ; aucune observation ne le tranche aujourd'hui.

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 de ces sursauts sont dits géants. Le magnétar SGR 1806-20 en a connu un en décembre 2004.

L'enregistrement contenait une composante restée inexpliquée. Après le pic initial, une émission de rayons gamma durs, dont les photons portent de l'ordre du 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 un millionième de masse solaire d'éléments du processus r fraîche-

ment formés — de l'ordre d'un tiers de la masse de la Terre —, et le titre de leur article parle de « preuve directe ». Le mécanisme proposé est un choc, qui chauffe la matière de la croûte de l'étoile à neutrons et l'éjecte à grande vitesse. Une croûte d'étoile à neutrons est un réservoir de neutrons ; l'arracher remplit la première des trois conditions.

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 — la seconde des deux horloges du processus r, celle des désintégrations, qui bat encore quand le flux de neutrons s'est tari. Le raisonnement est celui de la kilonova de 2017, et ce qui change est la lumière captée : 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.

Les auteurs en tirent, par extrapolation de ce seul cas, une estimation pour la Galaxie : les sursauts géants de magnétars contribueraient « au moins à 1–10 % » des abondances galactiques du processus r, une fourchette qui couvre un facteur dix. L'intérêt tient au calendrier plus qu'à la quantité. Les magnétars sont des objets jeunes : nés de la mort d'une étoile massive, ils agissent peu après la formation des étoiles, « en particulier aux toutes premières époques sondées par les étoiles pauvres en métaux », écrivent-ils. 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, et l'expression « sites confirmés » employée par les auteurs 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. Chaque noyau radioactif émet en se désintégrant des photons gamma à des énergies qui lui sont propres, des raies, et le spectromètre COSI de la NASA devrait pouvoir les résoudre lors d'un prochain sursaut géant.

Un or sans origine unique

Dans une croûte rocheuse du fond du Pacifique, Anton Wallner et ses coauteurs ont cherché deux isotopes radioactifs tombés de l'espace : le fer 60, dont la moitié disparaît en 2,6 millions d'années et que produisent surtout les étoiles massives et leurs supernovas, et le plutonium 244, dont la moitié disparaît en 80,6 millions d'années et que seul le processus r produit. Ils détectent deux arrivées de fer 60 au cours des 10 derniers millions d'années, accompagnées de plutonium en moindre quantité — trop peu si les supernovas dominaient le processus r. L'argument pèse contre les supernovas courantes, celles qui ont livré le fer 60 ; il ne dit rien des rares. Les éléments les plus lourds offrent 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 pic de l'or et du platine et les actinides, thorium et uranium, de sorte qu'un site qui ne fait qu'un processus r « faible » ne saurait expliquer une vieille étoile riche en uranium.

Rassemblés, les résultats dessinent un paysage plutôt qu'une réponse : les fusions de deux étoiles à neutrons, observées deux fois, « un mode dominant », au délai long ; les collapsars, simulés, non détectés sur vingt-cinq supernovas, « plus de 80 % » par simulation, au délai court ; les supernovas magnéto-rotationnelles, 3 % des hypernovas de 25 à 50 masses solaires par réglage de modèle, un processus r « faible » selon la revue de 2026, au délai court ; les sursauts géants de magnétars, un événement relu, « au moins 1–10 % » par extrapolation de ce cas, au délai court. Les fusions 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. Et les chiffres ne s'additionnent pas : « un mode dominant » sort d'une masse et d'un taux, « plus de 80 % » d'une simula-

tion de disques, « au moins 1–10 % » d'un cas unique, les « 3 % » du réglage d'un modèle ; les deux premiers, mis bout à bout, dépassent déjà 100 %, et le partage de l'or galactique entre les sites 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 ; l'autre moitié des éléments lourds, dont l'or et le platine, demande une densité de neutrons que seuls fournissent des événements violents — 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.

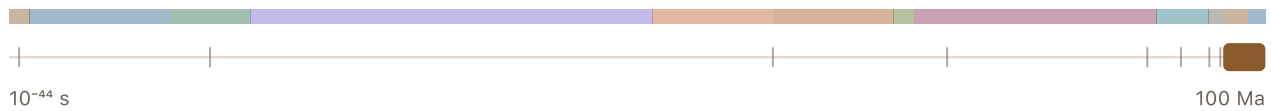
Pour nous, humains faits de la matière de la Terre, la conséquence se dit au conditionnel, puisque les chapitres suivants auront à établir que la matière de la Terre est bien celle du nuage dont est né le Soleil. Si c'est le cas, l'or de la Terre a été fabriqué, avant la naissance du Soleil, par un ou plusieurs de ces événements, puis dispersé et mêlé au gaz de la Galaxie jusqu'à entrer dans ce nuage ; et on ne peut pas dire lequel, parce que le gaz d'une galaxie mêle les rejets de toutes les époques, et qu'on ne peut même pas compter les générations d'étoiles qui ont précédé le Soleil. L'or d'une alliance ne remonte pas à une catastrophe identifiable, mais à un mélange de catastrophes : deux étoiles à neutrons qui se sont touchées quelque part, à quelque époque, et peut-être d'autres morts d'étoiles encore, dont la matière s'est éloignée, a cessé de briller, et s'est mêlée au gaz longtemps avant que le nuage du Soleil ne se referme sur elle.

Reste le retournement de l'argument. Les étoiles pauvres en métaux ont servi de pièce à charge contre les fusions seules, et elles n'ont parlé que parce que chaque étoile garde la chimie du gaz dont elle est née. 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.

Une Galaxie agitée

dès $\sim 0,8$ Ga ; fusion il y a 10 à 11 Ga

brouillon · 4320 mots



Dans un amas de gaz et d'étoiles qui n'a pas encore de forme, chaque étoile suit son propre chemin : l'une monte, l'autre plonge, leurs orbites se croisent dans toutes les directions, et l'ensemble tourne à peine. Du gaz arrive encore. Il apporte avec lui un peu de rotation ; il se refroidit en tournant, et ce qui tourne en se refroidissant s'étale : le gaz s'amincit et se range dans un plan. Les étoiles qui naissent de ce gaz-là ne montent ni ne plongent. Elles tournent ensemble, dans le même sens, sur des orbites presque rondes, et au milieu de l'amas qui s'agite encore un disque se fait, en un à deux milliards d'années. Entre les galaxies, l'hydrogène n'a pas partout perdu ses électrons ; par endroits il est encore entier, et l'ultraviolet qui l'atteint s'y éteint.

Le disque tourne, et les étoiles s'y succèdent. Les plus lourdes vivent peu ; elles éclatent, et jettent dans le gaz l'oxygène, le magnésium, le silicium qu'elles ont faits. Les moyennes durent, puis laissent partir leur carbone dans un vent, et leurs cœurs éteints, bien plus tard, éclatent à leur tour et donnent leur fer. Le gaz reçoit tout, le mêle à ce qu'il avait, et le porte d'un bord à l'autre du disque en tournant. Les étoiles qui en naissent ensuite ont dans leur matière un peu plus de ces éléments que celles d'avant, et celles qui naîtront après elles un peu plus encore.

Deux ou trois milliards d'années plus tard, une galaxie plus petite s'approche, le quart de la sienne à peu près. La plus lourde tire sur elle, plus fort sur son côté proche que sur son côté lointain, et ses bords cèdent. Des étoiles et du gaz s'étirent derrière elle en traînées ; elle tourne encore autour de la grande, chaque fois plus mince, et ce qui la tenait ensemble ne tient plus rien. Le disque reçoit le choc. Ses orbites plates se soulèvent, les unes au-dessus du plan, les autres au-dessous ; elles s'allongent, et le disque s'épaissit. Les étoiles de la petite galaxie sont maintenant partout dans le halo, mêlées à celles qui s'y agitaient déjà. Elles ne sont plus tenues ensemble ; elles se déplacent encore comme si elles l'étaient.

Nous sommes dedans

Le télescope Webb voit MoM-z14 telle qu'elle était 280 millions d'années après le Big Bang, parce que sa lumière a mis presque toute l'histoire du cosmos à nous atteindre ; la Voie lactée, personne ne l'a vue jeune, et personne ne la verra. Le recul de Webb a une contrepartie : une galaxie lointaine n'est vue qu'une fois, au seul moment où sa lumière est partie, et aucune n'est vue à deux âges, jeune puis vieille. La nôtre pose un problème de plus. Nous sommes dedans. La lumière de ses étoiles nous arrive après un trajet qui, rapporté aux milliards d'années de l'histoire galactique, ne compte pas : nous les voyons telles qu'elles sont aujourd'hui. Il n'y a pas d'image ancienne de la Voie lactée, et il n'y en aura pas ; son passé doit se lire dans son présent.

La méthode tient à une propriété des étoiles, établie à la forge. Les éléments plus lourds que l'hélium sont fabriqués dans les étoiles et rejetés quand elles meurent ; la génération suivante naît de nuages qui les contiennent ; et une étoile garde dans son atmosphère, toute sa vie ou presque, la composition du gaz dont elle est née. Chaque étoile d'aujourd'hui est ainsi un fossile de la chimie de son gaz natal, et l'étude qui s'en sert porte un nom, l'archéologie galactique. L'astronome, comme l'archéologue, 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 il se brise. Ceux-là brillent, et se comptent par centaines de milliers dans les relevés — 250 000 dans une seule des études qui suivent. Les plus anciens ont l'âge de la Galaxie, parce qu'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 brûlent encore.

La première chose qu'on lit dans un fossile stellaire est sa teneur en métaux, c'est-à-dire en tout ce qui est plus lourd que l'hélium, et on la mesure par son fer, rapporté à celui du Soleil : telle étoile en a autant, telle autre cent fois moins. Comme chaque génération ajoute des métaux au gaz, la métallicité tend à monter avec le temps, et une étoile pauvre en métaux est en général née tôt, d'un gaz que peu d'étoiles avaient enrichi. En général : une étoile peut aussi être pauvre parce qu'elle est née dans une petite galaxie, peu active, où le gaz s'enrichit lentement, et cela même tard. La réserve a déjà servi au chapitre de l'or ; elle compte ici, puisque ce chapitre rencontrera justement une petite galaxie absorbée par la nôtre.

La seconde lecture est plus fine, et la forge l'a racontée. Les éléments alpha — oxygène, magnésium, silicium, soufre, calcium — viennent surtout des étoiles massives, qui meurent en quelques millions d'années ; la moitié environ du fer vient des supernovas de type Ia, l'explosion de naines blanches dans des systèmes doubles, et une naine blanche est ce qui reste d'une étoile moyenne au bout de sa longue vie. Le gaz d'une galaxie jeune reçoit donc d'abord des éléments alpha, avec peu de fer ; le fer des Ia arrive ensuite, et le rapport entre éléments alpha et fer baisse avec le temps, par « l'enrichissement retardé en fer par les supernovas Ia ». Une étoile riche en éléments alpha par rapport à son fer est née avant que les Ia aient beaucoup donné ; une étoile au rapport plus bas est née après. Cette horloge range les populations d'étoiles dans l'ordre et ne donne aucune date en années. Pour une date, il faut l'âge des étoiles elles-mêmes, et il ne se mesure bien que pour certaines d'entre elles, les sous-géantes, qui viennent d'épuiser l'hydrogène de leur cœur ; Xiang et Rix vont s'en servir.

Il manque une dimension, qui n'est pas chimique : le mouvement. Une étoile née dans un disque de gaz qui tourne hérite de sa rotation ; elle décrit une orbite presque ronde, dans le plan, au milieu de voisines qui font de même. Une étoile née dans un gaz agité, ou arrachée à une autre galaxie, suit une orbite désordonnée, inclinée sur le plan, allongée. Dans une galaxie, les étoiles ne se heurtent presque jamais, et leurs orbites ne changent que lentement ; le mouvement garde donc, lui aussi, après des milliards d'années, une trace des origines. Le satellite Gaia le mesure, par la position des étoiles et leur déplacement sur le ciel ; des relevés spectroscopiques comme APOGEE décomposent leur lumière pour y lire la composition. Chimie, âge, mouvement : avec ces trois coordonnées, on range les étoiles par familles et les familles dans le temps, et l'on reconstitue un ordre de formation sans avoir vu le passé de la Galaxie.

De l'aube au disque

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, et la question de départ tient en une ligne : la Galaxie a-t-elle toujours été un disque ? En 2022, Vasily Belokurov et Andrey Kravtsov la posent aux étoiles les plus pauvres en métaux. Ils croisent les compositions d'APOGEE et les mouvements de Gaia, et ils isolent, parmi ces étoiles, une population ancienne et pauvre en métaux qu'ils nomment « Aurora » — l'aurore, en latin. Leur article s'intitule « De l'aube au disque ».

Cette population est « cinématiquement chaude », et le mot vient des 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 chaude quand les vitesses de ses membres sont dispersées au hasard, dans tous les sens ; froide quand ses étoiles se déplacent ensemble, sur des orbites semblables, comme celles d'un disque qui tourne. Aurora a aussi une « rotation d'ensemble modeste » : ses étoiles tournent un

peu autour du centre de la Galaxie, en moyenne, mais ce tour d'ensemble 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, des plus pauvres aux plus riches, et qu'on regarde à quelle vitesse chacune tourne autour du centre, la vitesse reste faible tant que la métallicité reste basse ; puis, au-delà d'un seuil, elle augmente brusquement. 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, dans une structure qui tourne. La valeur du seuil n'est pas dans l'extrait de l'article dont dispose ce livre.

La métallicité sert ici à ranger dans le temps, approximativement — le gaz s'enrichit, une étoile plus riche est en général née plus tard —, et le saut en métallicité se lit 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. La Galaxie n'a pas toujours été un disque ; elle l'est devenue, et assez vite. Du mécanisme, les sources ne disent rien, et 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. Pourquoi à ce moment-là, et à cette métallicité-là, reste hors des sources.

Trois réserves encadrent ce résultat. Il date de 2022, et la fiche qui sert de base à ce chapitre le range parmi les résultats récents. Ce livre le connaît par le résumé de l'article, paraphrasé, et non par l'article lui-même ; la source est marquée « à vérifier ». Enfin la métallicité ne date pas une étoile en années : pour placer le spin-up sur la frise, il faudrait savoir quel âge correspond au seuil, et l'extrait ne le donne pas. Les un à deux milliards d'années disent combien de temps le disque a mis à se faire, pas quand ; une autre étude, la même année et par une autre méthode, donne la date.

Vers le 22 janvier

Maosheng Xiang et Hans-Walter Rix partent de 250 000 étoiles sous-géantes, dont ils mesurent l'âge et la métallicité. Une sous-géante vient d'épuiser l'hydrogène de son cœur ; elle traverse alors une phase brève, pendant laquelle sa luminosité et sa température dépendent fortement de son âge, de sorte que l'endroit où elle en est dans cette phase donne un âge en années, avec une précision que les autres étoiles n'offrent pas. Deux cent cinquante mille âges suffisent à tracer, pour la Galaxie entière, la métallicité en fonction du temps.

Le premier résultat est une date. La formation du disque ancien, dit disque épais, a commencé il y a 13 milliards d'années, 0,8 milliard d'années après le Big Bang. Le disque épais est la composante la plus ancienne du disque : ses étoiles s'écartent davantage du plan que celles du disque mince, plus jeune, où se trouve aujourd'hui le Soleil. L'Univers a environ 13,8 milliards d'années ; ce début tombe dans ses six premiers pour cent. Sur l'année cosmique, où toute cette histoire tient en douze mois, le disque de la Voie lactée commence vers le 22 janvier.

Cette date place le début de notre Galaxie dans un chapitre déjà raconté, celui de la réionisation : la lumière des premières étoiles et des premières galaxies arrache au gaz entre les galaxies ses électrons, et ce gaz, redevenu chargé, laisse passer les ultraviolets. Ce travail s'étend de 0,3 à environ 1,1 milliard d'années après le Big Bang. À 0,8 milliard d'années, il n'est pas achevé ; des fluctuations qui lui sont liées persistent dans le gaz intergalactique jusque vers 1,1 milliard d'années. Le disque de la Voie lactée commence donc à se for-

mer dans un Univers qui n'a pas fini de se rallumer. Les sources ne disent pas si la région où naissait notre Galaxie était, à ce moment, déjà ionisée.

La date a une autre conséquence. Les galaxies que Webb observe aux plus grandes distances, MoM-z14 à 280 millions d'années, JADES-GS-z14-0 vers 300, sont les objets les plus anciens qu'on ait vus, et moins de six cents millions d'années séparent MoM-z14 du début de notre disque. 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 plus anciennes encore. Notre Galaxie est presque aussi vieille que l'Univers visible par Webb, et les galaxies précoces qui surprennent par leur nombre et leur éclat appartiennent à la même génération que la nôtre. Webb les voit telles qu'elles étaient ; nous voyons la nôtre telle qu'elle est devenue.

Une coupure à huit milliards d'années

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 : d'un côté les étoiles plus vieilles, de l'autre les plus jeunes, et les secondes ne prolongent pas simplement les premières. Il y a une rupture dans l'histoire de la Galaxie, et elle se lit dans la chimie de ses étoiles. Ce qui distingue chimiquement les deux parties, et la cause que les auteurs donnent à la coupure, ne sont pas dans l'extrait lu.

Le troisième résultat porte sur le rythme. Pendant les 5 à 6 milliards d'années qui suivent le début du disque, l'enrichissement chimique a été multiplié par dix, et il s'est fait dans un gaz resté bien mélangé. Si le gaz du disque ancien avait été fait de poches séparées, les unes enrichies par une supernova voisine, les autres épargnées, des étoiles nées au même moment auraient eu des métallicités très différentes. Qu'il soit resté mélangé veut dire que les étoiles d'un même âge ont à peu près la même métallicité : sur le graphique, la relation entre âge et métallicité est une ligne étroite plutôt qu'un nuage épais. Chaque génération rejetait ses produits dans un réservoir commun, et le réservoir s'enrichissait d'un bloc.

Les chiffres se tiennent. Treize milliards d'années moins cinq à six milliards d'années d'enrichissement donnent sept à huit : la phase d'enrichissement du disque ancien se termine à peu près là où passe la coupure. Ce rapprochement est fait par ce livre, pas par l'extrait de l'article. Il suggère que la partie ancienne de la distribution est 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 ; Xiang et Rix datent le début du disque ancien à 13 milliards d'années. L'une donne l'ordre et la durée, l'autre la date. Les sources 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 occupe les tout premiers temps, avant 0,8 milliard d'années, et le disque se met 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.

Une galaxie qu'on reconnaît à sa marche

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. Leur résultat principal tient en une phrase. Le halo interne — 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.

Ils le baptisent Gaia-Enceladus, du satellite dont les données ont permis de le reconnaître et d'un géant de la mythologie grecque ; Xiang et Rix emploient une variante plus longue, Gaia-Sausage-Enceladus.

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 ; sa masse n'est pas chiffrée dans les sources de ce livre. La comparaison dit l'ordre de grandeur : Gaia-Enceladus n'était pas un petit amas d'étoiles, mais une galaxie à part entière, une 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. 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 : c'est à leur marche qu'on les reconnaît. 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. Des centaines d'étoiles RR Lyrae, d'abord : des étoiles vieilles dont l'éclat bat régulièrement, en moins d'une journée, et dont l'éclat moyen est connu, ce qui donne leur distance ; là où elles sont, la population est ancienne. Treize amas globulaires, ensuite : des amas d'étoiles très denses et très anciens, qui gravitent autour de la Voie lactée et de ses voisines. Treize d'entre eux, dans notre Galaxie, seraient donc des immigrants, apportés par Gaia-Enceladus. Le nombre total d'amas globulaires de la Voie lactée n'est pas dans les sources de ce livre, et la part que ces treize représentent ne se dit pas.

La collision a eu des conséquences pour la Galaxie qui a absorbé Gaia-Enceladus. Helmi et ses coauteurs estiment le rapport de masse à 4 pour 1 : la Voie lactée n'était que quatre fois plus massive que ce qu'elle absorbait. Avec un tel rapport, la fusion a dû « chauffer » le précurseur du disque épais, au sens posé plus haut — augmenter l'agitation de ses étoiles. Celles d'un disque jeune, qui tournaient sur des orbites presque rondes et presque dans le plan, reçoivent de la collision des vitesses désordonnées ; leurs orbites s'inclinent et s'allongent, et le disque s'épaissit. Cela se passe il y a environ 10 milliards d'années, selon ces auteurs. Le disque épais serait, au moins en partie, un disque qui existait déjà et que la collision a secoué.

Dix ou onze

L'ordre des événements se précise : le disque ancien commence à se former il y a 13 milliards d'années, et la collision survient plus tard, sur un disque déjà en place, puisque Helmi et ses coauteurs parlent du « précurseur » du disque épais. Le halo interne, lui, achève de s'assembler deux milliards d'années après le début du disque, il y a environ 11 milliards d'années. L'intuition voudrait que le halo, fait d'étoiles plus désordonnées et souvent plus pauvres en métaux, soit plus ancien que le disque ; sur le point de son assemblage final, le disque commence 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 la collision, et les deux études ne donnent pas la même date. Helmi et ses coauteurs situent la contribution de la fusion au disque épais il y a environ 10 milliards d'années. Xiang et Rix 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, et leur date pour l'assemblage final du halo interne conduit elle aussi vers 11. L'écart est d'environ un milliard d'années, et il reste ouvert. Ce livre écrit donc que la Voie lactée a absorbé

Gaia-Enceladus il y a 10 à 11 milliards d'années, entre 2,8 et 3,8 milliards d'années après le Big Bang — sur l'année cosmique, entre la mi-mars et le début d'avril.

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, et leur date est celle d'un pic de naissances 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 au disque épais, sans dire de quelle mesure d'âge elle vient. Et une fusion n'est pas instantanée. La petite galaxie tourne autour de la grande, perd ses étoiles par ses bords, puis se dissout, et chaque étape peut durer. Les deux dates désignent peut-être deux moments d'un même processus, le pic de naissances 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 livre ; les sources ne tranchent pas. Ce qui départagerait, ce sont des âges mesurés par une même méthode sur les étoiles des débris et sur celles du disque épais que la collision a le plus secouées.

Sur le fond, les deux équipes s'accordent. Dans ses trois ou quatre premiers milliards d'années, la Voie lactée a subi une collision majeure avec une galaxie naine assez massive, qui 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 qui brillent autour de nous ne sont pas nées dans la Voie lactée.

Ce que le halo garde

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. Pour les étoiles de trente à cinq cents fois plus pauvres en fer que le Soleil, plus de cent au total, l'abondance de lithium est la même, avec peu de dispersion — le plateau de Spite —, et elle vaut environ trois fois moins que ce que la nucléosynthèse des premières minutes prédit : $(1,6 \pm 0,3) \times 10^{-10}$ atome de lithium par atome d'hydrogène, contre $4,70 \times 10^{-10}$. Le chapitre des trois minutes a exposé ce désaccord et les pistes qui s'y disputent : une physique nucléaire presque disculpée, une destruction du lithium dans les étoiles elles-mêmes, la piste la plus suivie, et une physique nouvelle que le deutérium contraint.

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 ; il est donc possible qu'une partie des étoiles du plateau soient nées dans une autre galaxie que la nôtre. La fiche de base signale ce lien comme un « pont possible », pas comme un fait, et aucune source ne dit quelles étoiles du plateau viennent de Gaia-Enceladus et lesquelles sont nées dans la Voie lactée. Mais si des étoiles des deux origines portent le même lithium, cette uniformité devient un indice de plus : ce lithium est un héritage commun, antérieur aux deux galaxies, reçu par chacune longtemps avant qu'elles se rencontrent, et ce qui l'a réduit, s'il y a eu réduction, agit de la même façon partout. C'est un raisonnement de ce livre, qui attend des données.

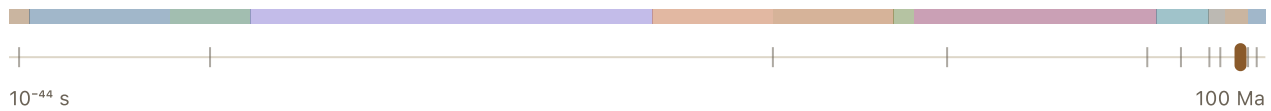
Le halo garde ainsi deux strates. La plus profonde est celle des premières minutes : un lithium fabriqué avant toute étoile, que des étoiles pauvres en métaux ont reçu presque intact, au facteur trois près. La plus récente est celle de l'assemblage : la proto-Galaxie chaotique d'Aurora, puis les débris d'une galaxie absorbée il y a 10 à 11 milliards d'années. Le disque, lui, a continué. Pendant les 5 à 6 milliards d'années qui suivent son début, son enrichissement est multiplié par dix, dans un gaz bien mélangé ; puis vient la coupure des 8 milliards d'années, et une seconde partie de l'histoire. Le gaz du disque fait tour après tour de la boucle de la forge : des étoiles naissent, forgent des éléments, les laissent au gaz en mourant, et d'autres étoiles naissent de ce gaz enrichi. Les supernovas Ia y ajoutent leur fer, avec retard, et le rapport entre éléments alpha et fer baisse ; les catastrophes plus rares du chapitre précédent y ajoutent leur or.

De ce gaz travaillé 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 — sur l'année cosmique, à la fin d'août, quand le disque de la Voie lactée avait sept mois. Il hérite d'un gaz où les métaux font 1,39 % de la masse. Et il n'est probablement pas né là où il se trouve : il est plus riche en métaux que ses voisins du même âge, ce qui suggère une naissance plus près du centre de la Galaxie, puis une migration vers l'extérieur, et une étude de 2026, portant sur des milliers d'étoiles semblables au Soleil, conclut que ce déplacement est « partagé par de nombreuses étoiles du disque interne ». Où, quand et comment il est né, et ce que cette naissance lui a donné en héritage, le chapitre suivant le raconte. Le Soleil est né tard, et probablement ailleurs.

Le Soleil arrive tard

~9,2 Ga (il y a ~4 567 Ma)

brouillon · 3609 mots



Dans le disque d'une galaxie, plus près de son centre que de ses bords, là où les étoiles naissent en plus grand nombre et où le gaz porte davantage de ce qu'elles ont fait, un nuage de gaz froid se contracte sur lui-même. Sur mille grammes de ce gaz, sept cent cinquante environ sont un hydrogène qu'aucune étoile n'a fait ; deux cent quarante, un hélium ; et quatorze, à peu près, tout le reste — du carbone, de l'oxygène, du fer, quelques traces d'or —, laissé par des étoiles mortes à toutes les époques et mêlé sans ordre, de sorte qu'un atome ne dit rien de celui qui le touche. Le centre du nuage se tasse ; il s'échauffe ; une étoile s'allume.

Elle n'est pas seule. Des milliers d'étoiles naissent du même gaz au même moment, et la galaxie qui tourne les emporte toutes ensemble autour de son centre, sur des orbites presque rondes, dans le même plan. Au-delà, entre les galaxies, l'espace s'étire ; la matière s'y fait plus rare à mesure qu'il grandit, et ce qui étire l'espace pèse déjà presque autant que toute la matière qu'il écarte.

Autour de l'étoile neuve, un disque de gaz et de poussière tourne à son tour. Près d'elle, dans le plus chaud, les premiers solides se forment : des grains clairs, faits de minéraux de calcium et d'aluminium, ceux qui tiennent là où tout le reste reste gaz. Dans chacun de ces grains, parmi tous les autres atomes, deux sortes d'uranium commencent à se défaire, chacune à son rythme — l'une perd la moitié de ses noyaux en sept cents millions d'années, l'autre en quatre milliards et demi. Chaque noyau défait laisse un plomb.

Le mot « tard »

Le Soleil est né tard, et « tard » se calcule. L'Univers a environ 13,8 milliards d'années dans le modèle standard de la cosmologie ; les plus vieux solides du Système solaire — de petits grains clairs pris dans certaines météorites, qu'on datera plus loin — en ont 4 567 millions ; la soustraction place la naissance du Soleil environ 9,2 milliards d'années après le Big Bang. Neuf virgule deux sur treize virgule huit font un peu plus de 0,66 : le Soleil naît aux deux tiers de l'histoire cosmique.

Ramenée à douze mois, l'histoire fait voir la proportion. Le fond diffus, la plus ancienne lumière qu'on puisse recevoir, est émis un quart d'heure après minuit le 1er janvier, comme l'a dit le chapitre de la première lumière ; les premières étoiles s'allument dans la première semaine de janvier ; la réionisation s'achève vers la fin du mois ; le disque de la Voie lactée commence vers le 22 janvier ; Gaia-Enceladus est absorbée entre la mi-mars et le début d'avril. Le Soleil naît vers la fin d'août — aux premières heures du 2 septembre, au calcul exact —, et il reste quatre mois, septembre, octobre, novembre, décembre, avant le présent.

Quand il se forme, le disque de la Galaxie a déjà plus de huit milliards d'années : il a commencé il y a treize milliards d'années, et treize moins 4,57 font 8,4. La collision avec Gaia-Enceladus a eu lieu cinq à six milliards d'années plus tôt. Dans les 250 000 étoiles de Xiang et Rix, la coupure passe à huit milliards d'années, et le Soleil, avec ses 4,57, se tient sans ambiguïté du côté récent. La forge des étoiles massives, qui fabrique l'oxygène et le silicium puis s'arrête au fer ; les naines blanches qui explosent et donnent la moitié

du fer ; les fusions d'étoiles à neutrons, et peut-être les sursauts de magnétars, qui font l'or ; l'assemblage agité de la Voie lactée : tout cela s'est produit avant lui. Plus de neuf milliards d'années de ces opérations ont précédé sa naissance, et leurs produits se trouvaient dans le gaz dont il est né.

Une autre coïncidence de dates tombe à ce moment. Depuis un peu moins de dix milliards d'années après le Big Bang — plus de 9,8 selon les chronologies de référence —, l'expansion de l'Univers est menée par l'énergie noire, et depuis elle accélère. L'écart avec la naissance du Soleil est d'environ six cents millions d'années, deux semaines de l'année cosmique. Le rapprochement n'est qu'un repère : le Soleil appartient à l'Univers qui accélère, et le chapitre du tournant y reviendra. 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 ; rien ne relie les deux.

Quatorze grammes sur mille

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 y laisse des raies qui lui sont propres, un peigne de traits sombres qui n'est pas le même pour le fer, pour le calcium, pour l'hydrogène. En 2021, Martin Asplund, Anish Amarsi et Nicolas Grevesse publient une nouvelle synthèse de ces mesures. Un kilogramme de surface solaire, pesé d'après elle, contient 744 grammes d'hydrogène, 242 grammes d'hélium et 14 grammes de tout le reste — 74,4 %, 24,2 % et 1,39 %, que les astronomes notent X, Y et Z ; la dernière, qu'ils appellent la métallicité, vaut 0,0139 à 0,0006 près.

Ces quatorze grammes résument la partie du livre qui s'achève ici. Du carbone, de l'oxygène, de l'azote, du silicium, du fer, et à l'état de traces de l'or et du platine : tout ce que l'astronomie range sous le mot « métaux ». Aucun d'eux, à quelques traces de lithium près, n'existait à la sortie des premières minutes. Tous ont été faits dans des étoiles ou dans leurs catastrophes, rejetés dans le gaz de la Galaxie, repris par les étoiles suivantes ; la forge a dit lequel vient d'où.

Les 744 grammes demandent autant d'attention que les 14. Les étoiles ne fabriquent pas d'hydrogène : elles en consomment, et leur premier travail est de le changer en hélium. Les sept cent quarante-quatre grammes du Soleil viennent donc des premières minutes de l'Univers, et neuf milliards d'années d'étoiles n'y ont pas ajouté un atome. La formule qui fait de nous une « poussière d'étoiles » est vraie des quatorze grammes et fautive des sept cent quarante-quatre ; elle vaut de même pour nos corps, où aucun atome d'hydrogène, où qu'il se trouve, n'est sorti d'une étoile.

L'hélium pose une question plus fine. Les premières minutes en avaient laissé environ un quart de la masse — 24,5 %, d'après les galaxies les plus pauvres en métaux —, et 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 attend donc dans le Soleil plus d'hélium que dans le gaz primordial. Sa photosphère en montre 24,2 %, à un demi-point près : autant, ou à peine moins.

Ce manque est l'indice le plus visible d'une première réserve. Les valeurs d'Asplund et de ses coauteurs sont celles de la surface actuelle, un peu modifiée depuis la naissance de l'étoile ; la composition du nuage d'origine ne se lit pas, elle se déduit de la surface en corrigeant ce que 4,57 milliards d'années ont changé. La seconde réserve est plus embarrassante. Les modèles qui calculent la structure de l'intérieur du Soleil à partir de sa composition ne s'accordent pas avec les abondances mesurées à la surface ; le désaccord porte un nom, le « problème de modélisation solaire », et il « reste entier », écrivent les auteurs en 2021. Trois portes restent ouvertes : une surface mal mesurée, une surface qui représente mal l'intérieur, une physique que les

modèles ignorent. Les quatorze grammes sont une mesure solide de la surface ; ce qu'il y avait dans le nuage se déduit, à travers un modèle qui ne s'accorde pas encore avec l'étoile.

Ce qui ne se compte pas

On lit souvent que le Soleil serait une étoile de troisième génération, ou de quatrième, et ce nombre ne se compte pas — pas faute de mesures. Une lignée se compte parce que chaque génération y descend d'une seule précédente ; le gaz d'une galaxie ne descend de personne en particulier, il mêle les rejets d'étoiles de toutes masses, mortes à toutes les époques. Dans les quatorze grammes, l'oxygène d'une étoile massive morte quelques millions d'années avant la naissance du Soleil côtoie le fer d'une naine blanche formée des milliards d'années plus tôt. Deux atomes voisins n'ont pas la même histoire.

Ce qui se mesure, c'est la profondeur du mélange. Pendant les cinq à six milliards d'années qui ont suivi le début du disque ancien de la Galaxie, l'enrichissement du gaz a été multiplié par dix. Les vieilles étoiles du halo, celles où l'on mesure le lithium des premières minutes, descendent à des teneurs en fer des centaines de fois plus faibles que celle du Soleil. Le Soleil se tient à l'autre bout de cette échelle.

Un lieu qu'il a quitté

Le Soleil tourne aujourd'hui autour du centre de la Galaxie, dans son disque, et l'on a longtemps pu croire qu'il était né à peu près sur cette orbite ; or il est plus riche en métaux que ses voisines du même âge. Parmi les étoiles nées à la même époque que lui, il a reçu plus d'éléments forgés que celles qui l'entourent aujourd'hui.

Le disque a une propriété : son gaz 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. Une étoile trop riche pour son voisinage et pour son âge s'est donc vraisemblablement formée plus au centre, là où le gaz de son époque avait déjà cette richesse, puis a migré vers l'extérieur. Elle peut faire ce chemin sans rien perdre : son atmosphère garde, pour l'essentiel, la composition du gaz dont elle est née, et le gaz l'a posée une fois pour toutes. Ce qui change, c'est le rayon de son orbite ; les astronomes appellent cela une migration radiale.

Takuji Tsujimoto et ses coauteurs montrent en 2026 que ce déplacement est fréquent. Ils prennent 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, qui donne, en plus des positions et des mouvements, des paramètres tirés de la lumière de millions d'étoiles, et ils en établissent la distribution des âges. Parmi ces jumeaux proches de nous, ceux de 4 à 6 milliards d'années sont nombreux ; cette population fournit selon eux une preuve « convaincante » que la migration du Soleil sur une longue distance, 3 kiloparsecs ou plus — près de dix mille années-lumière —, « est partagée par de nombreuses étoiles du disque interne ».

L'argument se lit 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 celles qui lui ressemblent et qui ont à peu près son âge abondent autour de lui ; elles partagent sa richesse en métaux, donc vraisemblablement son origine, et leur nombre signale un déplacement collectif plutôt qu'un voyage isolé. Le Soleil a migré avec une foule d'étoiles venues du disque interne.

Deux points restent ouverts. Le rayon de naissance exact du Soleil, d'abord, que « 3 kiloparsecs ou plus » fixe en ordre de grandeur et non en lieu. La cause du déplacement collectif, ensuite, que Tsujimoto et ses coauteurs relient, peut-être, à l'époque où s'est formée la barre de la Galaxie, la structure allongée d'étoiles

qui occupe sa région centrale : une hypothèse des auteurs, que mettrait à l'épreuve une date de formation de la barre obtenue indépendamment, par les âges de ses étoiles, et comparée aux 4 à 6 milliards d'années de la population migrante. Le Soleil est né dans une région de la Galaxie plus active et plus riche que celle où il se trouve ; son héritage de quatorze grammes est celui d'un lieu qu'il a quitté.

Deux uraniums dans la même 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 ; elles gardent les briques du disque qui entourait le jeune Soleil — des gouttelettes de silicate figées, des grains réfractaires, une matrice de poussière fine. Pour lire leur âge, on se sert de la radioactivité. Certains noyaux sont instables et se transforment spontanément en d'autres, selon une règle simple : au bout d'une durée fixe, propre à l'espèce, qu'on appelle demi-vie, la moitié des noyaux s'est transformée ; au bout de deux demi-vies, les trois quarts. La quantité de noyaux transformés mesure le temps écoulé — à condition de savoir combien il y en avait au départ, et c'est cette condition qui gêne.

L'uranium naturel existe sous deux formes, deux isotopes de même chimie et 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 en plomb 207, avec une demi-vie de 0,70 milliard d'années. Depuis la naissance du Système solaire, le premier a traversé à peu près une demi-vie, il en reste la moitié ; le second plus de six, il en reste un pour cent : dans le même grain, l'un est à moitié, l'autre presque épuisé. Au début, l'uranium pressé produisait du plomb 207 en abondance ; puis, à mesure qu'il s'épuisait, cette production a ralenti, pendant que celle du plomb 206 continuait à un rythme presque régulier. Le rapport entre les deux plombs change donc avec le temps, d'une manière entièrement fixée par les deux demi-vies et par le rapport entre les deux uraniums.

Là est tout l'intérêt : 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, et le rapport entre eux suffit à donner un âge, sans qu'on ait besoin de connaître la concentration d'uranium. Deux comptes qui avancent à des vitesses différentes dans la même pierre se lisent l'un 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. La valeur actuelle, 4,567, n'en diffère que de 17 millions d'années, moins de 0,4 % ; la méthode a été affinée depuis, pas remplacée.

L'une des corrections modernes touche au cœur du mécanisme. Le rapport des deux plombs dépend du rapport des deux uraniums, qu'on a longtemps supposé le même dans toutes les météorites ; il varie en réalité de l'une à l'autre, et une valeur supposée constante, appliquée à une pierre qui s'en écarte, fausse l'âge calculé. Les datations modernes le mesurent donc dans l'échantillon lui-même, et la valeur révisée est de 137,786, à 0,013 près. Il y a aujourd'hui, dans une pierre, cent trente-huit atomes d'uranium 238 pour un seul d'uranium 235, et ce rapport, on ne le suppose plus : on le compte.

Ce que la date désigne

Parmi les grains des chondrites, certains sont faits de minéraux de calcium et d'aluminium qui ne se forment qu'à très haute température : les inclusions réfractaires, ou CAI, tenues pour la première matière solide du Système solaire. Leur âge est assimilé à son origine cosmochimique, que les spécialistes notent t

= 0. Quatre CAI datées par le plomb-plomb donnent 4 567,30 millions d'années, à 0,16 million près ; c'est de là que vient la soustraction du début de ce chapitre.

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. 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 écoulé un temps que le plomb-plomb ne mesure pas.

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 — un résultat de modèle, non une mesure, et qui ne couvre pas la phase d'avant le disque. Mais cinquante mille ans font 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. 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 $t = 0$, l'origine à partir de laquelle on compte, comme la cosmologie parle du « début » sans prétendre dater un instant zéro. Pour eux aussi, une origine commode peut se révéler moins bien fixée qu'on ne le croyait.

Un million d'années

Le plomb-plomb n'est pas la seule façon de compter dans une météorite. L'aluminium 26, une forme radioactive de l'aluminium, se transforme en magnésium 26 avec une demi-vie d'environ 0,72 million d'années. 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. Ce compte, dont le chapitre suivant détaille le principe, ne donne pas d'âge en années : il 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 en 2023, dont le titre annonce « un test de l'homogénéité de l'aluminium 26 ».

Les deux méthodes se complètent : l'une donne des âges absolus, en millions d'années avant le présent, l'autre des écarts très fins entre objets anciens, et 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, et parmi elles celles qui se sont refroidies vite, parce qu'un refroidissement rapide garantit que les deux comptes ont commencé au même instant. Pour ces pierres, on connaît à la fois l'âge absolu par le plomb et l'écart au $t = 0$ par l'aluminium ; on en déduit la date du $t = 0$ lui-même. Le résultat est 4 568,42 millions d'années, à 0,24 près, « significativement plus ancienne », écrivent-ils, que les quelque 4 567,3 millions mesurés directement sur les CAI. L'écart est d'environ 1,1 million d'années, plusieurs fois les incertitudes déclarées de part et d'autre ; les deux valeurs ne peuvent pas être justes ensemble.

Leur explication : le plomb de certaines CAI aurait été perturbé après leur formation. Si des CAI ont perdu une partie de leur plomb, ou en ont échangé avec leur environnement, leur plomb-plomb indique un âge trop jeune ; la mesure directe serait biaisée, et le détour par les achondrites donnerait la bonne valeur. Ils en tirent une recommandation de méthode : dater les événements du début du Système solaire en écart au $t = 0$ plutôt qu'en âge absolu, parce que les écarts sont plus sûrs que la position de l'origine.

Une seconde équipe va dans le même sens. Maxime Piralla et ses coauteurs, en 2023 également, combinent l'aluminium-magnésium et le plomb-plomb en une chronologie unifiée et réévaluent l'âge des CAI à 4 568,7

millions d'années. Deux équipes, par des chemins voisins, trouvent donc une origine plus ancienne d'environ un million d'années que la mesure directe. Rapporté à l'âge du Système solaire, cet écart vaut 0,02 % ; sur l'année cosmique, trois quarts d'heure environ, aux premières heures du 2 septembre. Pour le récit cosmique, il ne change rien : le Soleil naît toujours tard, environ 9,2 milliards d'années après le Big Bang, aux deux tiers de l'histoire, et l'incertitude sur l'âge de l'Univers lui-même, qui dépend du modèle standard et de ses tensions, dépasse de loin ce million d'années.

Ce qui départagerait se laisse énoncer : 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 ; et la confirmation 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 — si l'homogénéité tombait, l'argument contre les 4 567,3 millions d'années tomberait 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 ; le noyau de Jupiter aurait atteint une vingtaine de masses terrestres en moins d'un million d'années. 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 : les écarts mesurés par rapport au $t = 0$ restent valables quelle que soit la date du $t = 0$ lui-même.

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 faits par les étoiles et leurs catastrophes sont réunis autour d'une étoile neuve ; autour d'elle, 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 suivant le raconte. La suite ne fabrique plus d'éléments ; elle les trie et les assemble.

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 [storyboard · 7 plan\(s\)](#)
2. La Terre et la Lune [storyboard · 8 plan\(s\)](#)
3. L'eau, les océans et l'air [storyboard · 7 plan\(s\)](#)
4. Ce dont la vie est faite [storyboard · 6 plan\(s\)](#)
5. Les dernières secondes de décembre [storyboard · 8 plan\(s\)](#)

Le disque et les planètes

premiers millions d'années après le $t = 0$

storyboard · 7 plan(s)

Autour du Soleil naissant, le disque de gaz et de poussière condense ses premiers grains, les inclusions réfractaires, puis les agrège en corps de plus en plus gros jusqu'aux embryons de planètes. Au-delà de la ligne des glaces, l'eau gèle et les corps grossissent plus vite ; une frontière isotopique sépare les météorites du dedans et du dehors. L'horloge aluminium-magnésium mesure ces étapes en écarts de temps de quelques centaines de milliers d'années depuis le $t = 0$.

Le storyboard : les plans du chapitre, chacun avec son cadre et ses micro-récits, dans l'ordre.

A Ce que l'aluminium a laissé

Les grains d'une chondrite, où l'aluminium 26 n'existe plus et où le magnésium 26 est en excès ; un minéral formé tôt, un autre formé tard ; un corps qui fond, son métal qui coule au centre, le tungstène qui part avec le métal et l'hafnium qui reste dans la roche ; les deux uraniums et les deux plombs, rappelés comme l'ancrage absolu ; une pierre dont on connaît à la fois l'écart et l'âge, et le raccord entre les deux comptes · 0,72 million d'années de demi-vie ; sept millions d'années pour qu'il n'en reste qu'un millième ; quelques centaines de milliers d'années de finesse ; 8,9 millions d'années ; les premières dizaines de millions d'années ; 4,5 et 0,70 milliard d'années ; aucune date absolue · Plan d'entrée, qui prend la chute du chapitre précédent au mot — trier, assembler — sans la citer : trier et assembler se mesure avec d'autres comptes. Il entre par une absence dans une pierre, et place chaque effet après sa cause (le métal était là, il s'est changé en magnésium, l'excès reste) ; « horloge éteinte » est nommée une fois, comme nom de méthode, parce que le père a disparu, et ce qu'elle donne se dit par ce qu'elle ne donne pas (pas une date, un écart) puis par sa finesse. L'hafnium-tungstène est une scène : un corps fond, le métal coule, le tungstène part avec lui, l'hafnium reste et continue de faire du tungstène que le noyau ne reçoit plus — l'excès du manteau date le noyau ; le renvoi au chapitre suivant se fait en une proposition. Les deux uraniums reviennent en une phrase d'ancrage, sans l'image du chapitre précédent, et par ce qu'ils ont de plus : ils tournent encore, ils datent aussi des minéraux terrestres. La chute dit où les deux familles se raccordent, et ouvre B.

1. Dans les grains des chondrites, l'aluminium 26 n'existe plus : cette forme radioactive de l'aluminium perd la moitié de ses noyaux en 0,72 million d'années et se change en magnésium 26, sept millions d'années après les premiers solides il n'en restait déjà qu'un millième, et aujourd'hui, à sa place, il y a le magnésium qu'il a laissé.
2. Un minéral formé quand l'aluminium 26 abondait en a pris une part, devenue depuis du magnésium 26 ; un minéral formé plus tard, quand l'aluminium avait décru, en a pris moins, et l'excès de magnésium 26 d'un grain mesure donc l'avance de sa formation sur celle d'un autre — ce que donne cette horloge éteinte, dont le père a disparu, n'est pas une date en années avant le présent mais un écart de temps entre deux objets, et cet écart est fin : quelques centaines de milliers d'années suffisent à changer l'excès d'un grain à l'autre.
3. Un second métal disparu compte plus longtemps : l'hafnium 182 devient du tungstène 182 avec une demi-vie de 8,9 millions d'années, et les deux éléments ne vont pas au même endroit, l'hafnium reste dans la roche, le tungstène suit le fer — quand un corps fond et que son métal coule vers le centre, le tungstène part avec le métal et l'hafnium reste dans le manteau, où il continue de produire du tungstène 182 que le noyau ne reçoit plus, de sorte que l'excès de tungstène 182 d'un manteau date la formation du noyau, d'autant plus grand que le noyau s'est formé tôt ; ce compte couvre les premières dizaines de millions d'années, et c'est lui qui datera le noyau de la Terre au chapitre suivant.
4. Ces comptes ne donnent que des écarts ; l'ancrage, lui, vient toujours des deux uraniums du chapitre précédent, l'uranium 238 qui devient plomb 206 avec une demi-vie de 4,5 milliards d'années et l'uranium 235 qui devient plomb 207 avec une demi-vie de 0,70, et dont le rapport des deux plombs suffit à donner un âge en millions d'années avant le présent — ces deux-là tournent encore, et ils datent aussi les plus vieux minéraux de la Terre ; les deux familles se complètent, l'ordre fin par les métaux éteints, la position dans le temps par le plomb, et pour changer un écart en date il faut une pierre dont on connaisse les deux, l'écart et l'âge : c'est dans ce raccord que se loge un million d'années.

B Le zéro qui glisse

Les CAI, grains clairs des chondrites, les plus vieux solides ; un disque de cinquante mille ans ; trois nombres pour un seul zéro, 4 567,30, 4 568,42, 4 568,7 ; des achondrites refroidies vite ; du plomb perturbé ; 0,02 %, et 9,23 contre 9,232 ; un zéro qui recule et des écarts qui restent ; un aluminium 26 réparti partout pareil, ou non ; une chronologie de 0,3, de moins de 1, de 4 à 5 millions d'années ; un corps qui fond, ou ne fond pas · les 50 000 premières années du disque ; $\pm 0,16$, $\pm 0,24$; environ un million d'années ; 0,02 % ; 0,3, moins de 1, 4 à 5 millions d'années après le $t = 0$ · Le plan du zéro. Les CAI sont nommées à nouveau, mais cette fois comme l'origine d'un compte, et Woitke entre par un modèle et une image (le disque a à peine commencé à tourner). Les trois valeurs tiennent en un paragraphe, comme un tableau, sans refaire l'argument du chapitre précédent : Desch par ses achondrites refroidies vite et par la déduction, le plomb perturbé en une proposition, Piralla par un nombre ; ni « significativement », ni le titre de l'article. Le million est pesé deux fois, et c'est l'ordre qui fait voir : sur le cosmos il ne pèse rien (9,23 ou 9,232, et l'âge de l'Univers pèse plus), sur cette matinée il recouvre les trois durées du chapitre. La règle se montre par son effet — le zéro recule, chaque événement recule avec lui, les écarts restent —, et la réserve d'homogénéité se dit en image : une région pauvre en aluminium se lit comme une naissance tardive. La chute est la seule phrase du plan qui se permette un rythme, et elle ouvre C.

- 1. Les plus vieux solides du Système solaire sont de petits grains clairs pris dans les chondrites, des inclusions riches en calcium et en aluminium, les CAI, et leur âge est le zéro à partir duquel les cosmochimistes comptent tout le reste ; un modèle publié en 2024 par Peter Woitke et ses coauteurs les fait naître dans les cinquante mille premières années du disque de gaz et de poussière qui entoure le Soleil neuf — le disque a à peine commencé à tourner que ses premiers grains sont là.*
- 2. Ce zéro a trois valeurs : quatre CAI datées par le plomb donnent 4 567,30 millions d'années, à 0,16 près ; Steven Desch et ses coauteurs, en 2023, lisent sur des achondrites refroidies vite à la fois l'âge par le plomb et l'écart au zéro par l'aluminium, en déduisent le zéro lui-même et trouvent 4 568,42, à 0,24 près, le plomb de certaines CAI ayant selon eux été perturbé après leur formation ; Maxime Piralla et ses coauteurs, la même année, arrivent à 4 568,7.*
- 3. L'écart est d'environ un million d'années, 0,02 % de l'âge du Système solaire, et pour l'histoire du cosmos il ne pèse rien : que le Soleil naisse 9,23 ou 9,232 milliards d'années après le Big Bang ne déplace ni sa place aux deux tiers de l'histoire ni l'ordre de ce qui l'a précédé, et l'incertitude sur l'âge de l'Univers lui-même pèse davantage.*
- 4. Un écart mesuré par l'aluminium entre une CAI et un autre objet ne dépend pas de l'âge de la CAI : si le zéro recule d'un million d'années, chaque événement recule avec lui et les écarts restent ce qu'ils sont — d'où la règle que Desch et ses coauteurs recommandent, dater le début du Système solaire en « tant de millions d'années après le $t = 0$ » plutôt qu'en âge absolu, et que ce chapitre suit ; une réserve la borde, car l'aluminium 26 doit avoir été réparti partout de la même façon dans le disque, un excès de magnésium plus faible pouvant aussi bien signaler une région pauvre en aluminium qu'une formation tardive, et c'est cette condition même que leur article met à l'épreuve.*
- 5. Pour ce chapitre, le même million d'années est énorme : les premiers petits corps viennent moins de 0,3 million d'années après le zéro, le noyau de Jupiter en moins d'un million, le gaz du disque s'en va vers 4 à 5 millions, et sur une chronologie de cette finesse une date dite « il y a 4 567 millions d'années » peut coïncider avec le zéro ou le suivre d'un million d'années — pour un corps de quelques dizaines de kilomètres chauffé par l'aluminium 26, c'est la différence entre fondre et ne pas fondre.*

c Nés grands, et fondus

Une chondrite ouverte : les grains clairs, des chondres d'un millimètre, une poussière fine qui cimente ; des grains qui rebondissent ou se brisent, et glissent vers le Soleil ; des galets amassés en nuages denses qui s'effondrent, et des corps de cent kilomètres ; des corps de plusieurs dizaines de kilomètres en orbite moins de trois cent mille ans après les premiers grains ; la chaleur de l'aluminium 26 prise dans la roche, le métal qui coule au centre ; un fer, morceau de noyau mis à nu ; une chondrite, corps venu trop tard ; vingt-deux chondres datés un à un · moins de 0,3 million d'années après les CAI ; environ un million d'années plus tard pour l'extérieur ; deux millions d'années, un septième ; trois millions, un seizième ; vingt kilomètres de rayon ; cent kilomètres ; trois millions d'années ou un million suivi d'un recyclage · Le plan des premiers corps, raconté depuis la pierre vers le disque. Il entre par les trois ingrédients d'une chondrite, nommés, les chondres par ce qu'ils sont (des gouttelettes fondues puis figées) sans dire ce qui les a chauffées. La croissance se dit par ce qui échoue (rebondir, se briser, glisser) puis par ce qui marche (des galets, des nuages, un effondrement), et « nés grands » est le mot du plan ; « instabilité de courant » est nommée une fois. La précocité est une scène : moins de trois cent mille ans, et des corps de dizaines de kilomètres tournent. La chaleur se dit par contraste, un grain la laisse partir, un corps la garde ; Lichtenberg entre par un seuil, vingt kilomètres ; le métal coule, la roche reste, et « différenciés » n'est pas prononcé. L'ordre inverse se montre par l'ordre des faits : ce qu'on attendait, ce qu'on trouve ; un fer est un morceau de noyau, une chondrite un corps venu trop tard. Le débat des chondres ferme le plan, deux lectures côte à côte, sans verdict.

- 1. Une chondrite ouverte montre trois choses : les grains clairs, des chondres — gouttelettes de silicate fondues puis figées, grosses d'un millimètre ou moins, que quelque chose dans le disque a chauffées brièvement à haute température avant qu'elles ne soient prises dans la roche — et une poussière fine qui cimente le tout, gardés dans l'état où ils se sont agglomérés parce que le corps n'a jamais fondu ; les autres météorites, les fers et les achondrites, viennent de corps qui ont fondu, et leurs grains d'origine ont disparu dans la fusion.*
- 2. Faire d'un grain millimétrique un corps de dizaines de kilomètres ne se fait pas grain à grain : au-delà d'une certaine taille, deux grains qui se heurtent rebondissent ou se brisent au lieu de coller, et ceux qui grossissent glissent vers le Soleil, freinés par le gaz ; le mécanisme aujourd'hui privilégié saute les tailles intermédiaires — des galets, du millimètre au centimètre, s'amassent en nuages denses sous l'effet du gaz, les nuages s'effondrent sous leur propre poids, et cette instabilité de courant produit d'un coup des corps d'environ cent kilomètres, qui n'ont jamais été un rocher, puis une colline : ils sont nés grands.*
- 3. Ils naissent aussi tôt : les premiers planétésimaux connus 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 — moins de trois cent mille ans après les premiers grains, des corps de plusieurs dizaines de kilomètres tournent déjà autour du Soleil.*
- 4. L'aluminium 26 est alors abondant, et sa désintégration chauffe : dans un grain isolé la chaleur s'échappe aussitôt, dans un corps de plusieurs dizaines de kilomètres elle reste prise, la roche conduit mal et le chemin jusqu'à la surface est long ; les corps de plus de vingt kilomètres de rayon formés dans les deux millions d'années suivant les CAI ont, selon la synthèse de Tim Lichtenberg et de ses coauteurs, probablement fondu en entier, et dans un corps fondu le métal, plus dense, coule au centre et fait un noyau, la roche reste autour — un corps formé après deux millions d'années ne reçoit plus qu'un septième de cette chaleur, après trois millions un seizième.*
- 5. On attendrait des roches les plus primitives qu'elles soient les plus vieilles, et des roches fondues qu'elles viennent de corps qui ont eu le temps de mûrir ; c'est l'inverse : les plus anciens planétésimaux sont les corps qui ont fondu et dont viennent les fers et les achondrites, les chondrites viennent de corps formés plus tard, quand il ne restait plus assez d'aluminium 26 pour les fondre — une météorite de fer est un morceau du noyau d'un des premiers corps du Système solaire, mis à nu par des collisions, et une chondrite un morceau d'un corps venu trop tard pour fondre, primitive parce que tardive.*
- 6. Combien de temps le disque a fabriqué des chondres reste disputé : datés un à un par le plomb, ceux de James Connelly et de ses coauteurs en 2012 s'étalent sur environ trois millions d'années à partir des CAI, tandis que Jean Bollard et ses coauteurs, en 2017, sur vingt-deux chondres, concluent que la fabrication s'est limitée au premier million d'années et que les âges plus jeunes sont ceux de chondres refondus ou remaniés longtemps après — un chondre daté à trois millions d'années est un objet neuf, ou un objet ancien remis à zéro, et les deux lectures restent côte à côte.*

▯ Deux familles et un sillon

Les isotopes de provenance ; deux super-familles, les carbonées CC et les non carbonées NC, l'externe et l'interne ; des fers des deux familles où l'on croise molybdène-tungstène et hafnium-tungstène ; deux réservoirs séparés de un à trois ou quatre millions d'années ; un disque où la poussière dérive et le gaz se brasse ; le sillon d'une planète géante, une bande vidée de gaz, des galets entassés à son bord ; vingt masses terrestres en moins d'un million d'années, une cinquantaine vers trois à quatre ; une mesure, une déduction, une interprétation ; la Terre, mélange des deux · d'environ un million à environ trois à quatre millions d'années après le $t = 0$; moins d'un million d'années ; trois à quatre millions d'années ; 2017 · Le plan de la frontière. Il entre par ce qu'une météorite porte en plus d'une date, une provenance ; les deux familles sont nommées par leurs sigles, une fois, et la frontière est dite isotopique, pas chimique. Kruijer entre par un geste : deux lectures croisées sur les mêmes fers. La séparation est une scène — des corps se forment de part et d'autre, aucun ne mêle les deux signatures. La difficulté est posée en physique (un disque se mélange), puis le sillon en image (une bande vidée de gaz, des galets qui s'entassent au bord au lieu de traverser) ; « le plus plausible » est le mot des auteurs. La masse et l'âge de Jupiter sont donnés, puis leur statut en trois faits rangés — mesuré, déduit, interprété —, et ce qui ferait tomber l'appui ; aucun jugement, pas de « provisoire ». La Terre ferme le plan, « notre planète » une fois, et tend la main au chapitre de l'eau sans « ligne des glaces ».

1. *Une météorite ne porte pas seulement une date, elle porte une provenance : les proportions de certains isotopes, qui changent un peu d'une région du disque à l'autre, rangent toutes les météorites en deux familles, sans intermédiaire — les carbonées, notées CC, qu'on lit comme venues du Système solaire externe, et les non carbonées, NC, venues du Système solaire interne, où se forment les planètes rocheuses ; les noms sont ceux d'une classification des météorites, la frontière qui compte ici est isotopique.*
2. *Thomas Kruijer et ses coauteurs prennent en 2017 des météorites de fer des deux familles — des noyaux de planétésimaux précoces — et y croisent deux lectures, les isotopes du molybdène et du tungstène qui disent la famille, et l'hafnium-tungstène qui dit l'âge du noyau : 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 $t = 0$, des corps se formant de part et d'autre sans qu'aucun mêle les deux signatures.*
3. *Un disque de gaz et de poussière ne reste pas rangé : la poussière y dérive vers le Soleil, le gaz s'y brasse, et deux régions voisines devraient se mélanger en bien moins de trois millions d'années ; quelque chose les a tenues séparées, et Kruijer et ses coauteurs jugent « le plus plausible » que ce soit Jupiter — une planète géante qui grossit dans le disque y ouvre un sillon, une bande vidée de gaz le long de son orbite, et les galets venus de l'extérieur s'entassent au bord de ce sillon au lieu de le traverser.*
4. *Pour que la barrière tienne dès un million d'années, Jupiter doit avoir grossi très vite : son noyau aurait atteint environ vingt masses terrestres en moins d'un million d'années, puis une cinquantaine vers trois à quatre millions, ce qui en ferait la plus vieille planète du Système solaire, formée quand les planétésimaux internes venaient d'apparaître et bien avant la Terre ; les signatures et les âges des fers sont des mesures, la séparation des réservoirs s'en déduit, la barrière de Jupiter l'explique sans être observée, et la masse de son noyau à un million d'années suit cette explication — qu'un autre mécanisme ait tenu les solides séparés, une structure du disque sans planète, et l'âge de Jupiter perd son appui.*
5. *Notre planète n'a pas reçu seulement la matière du disque proche du Soleil ; le moment et la manière du mélange ne sont pas établis, et le chapitre sur l'eau reviendra sur ce passage, puisqu'une part de l'eau terrestre pourrait être née là où la glace se condensait : la Terre n'appartient à aucune des deux familles, elle est faite des deux, et une part de sa matière vient d'au-delà de la barrière.*

E Le gaz s'en va

Des minéraux qui, en se formant ou en refroidissant, enregistrent le champ magnétique qui les entoure ; un disque qui porte un champ, des météorites qui le gardent, puis plus rien ; des corps de cent kilomètres qui deviennent des embryons gros comme la Lune ou comme Mars, par collisions ou par capture de galets ; Mars à demi faite en 1,8 million d'années, finie en dix à quinze, embryon resté embryon ; une proto-Terre de six dixièmes au plus ; des orbites rondes et séparées tant que le gaz freine, allongées et croisées après · quatre à cinq millions d'années après le $t = 0$; 1,8 million d'années (de 0,8 à 2,7) ; dix à quinze millions d'années ; de deux à quatre jusqu'à dix à quinze pour le noyau de Mars ; 0,6 masse terrestre · Le plan de la dissipation. Il entre encore par la pierre, des minéraux qui gardent un champ, et le paléomagnétisme est nommé une fois ; la fin du gaz se date par une trace qui s'arrête. La croissance de cent kilomètres à la taille de Mars tient en un paragraphe hors verrou, deux voies, non tranchées, dites par ce qui les distingue (la vitesse, la provenance de la matière). Mars est racontée comme un corps qui grandit tant que le gaz est là et s'arrête ensuite ; « un embryon resté à l'état d'embryon » est la phrase de la fiche, dite une fois, et ce qui l'a épargnée n'est pas dit. La proto-Terre se dit par ce qu'elle n'est pas encore : six dixièmes au plus, un corps ou plusieurs ; « le reste est venu après, et autrement » reprend l'essai. Le gaz comme frein est une scène, et la chute tend la main au chapitre suivant sans nommer la naissance de la Lune.

1. Certains minéraux, en se formant ou en se refroidissant, enregistrent le champ magnétique qui les entoure ; tant que le disque de gaz existe il porte un champ, que des météorites ont gardé, et celles qui se forment plus tard n'en portent plus la trace — ce paléomagnétisme des météorites date la fin du gaz : vers quatre à cinq millions d'années après le $t = 0$, le disque s'est dissipé.
2. Entre les corps de cent kilomètres et les embryons de planètes, gros comme la Lune ou comme Mars, le chemin n'est pas établi : soit les planétésimaux se heurtent et s'agglomèrent entre eux, soit un corps assez gros capture les galets qui dérivent vers le Soleil et grossit à leurs dépens, d'une matière venue de plus loin que lui ; les deux voies ne donnent ni la même vitesse ni la même composition, et la synthèse de Lichtenberg et de ses coauteurs les laisse en discussion.
3. Mars est le cas le mieux tenu : elle aurait atteint la moitié de sa masse en 1,8 million d'années — entre 0,8 et 2,7 —, achevé l'essentiel de sa croissance en dix à quinze millions d'années, et formé son noyau entre deux à quatre et dix à quinze millions d'années après le $t = 0$ selon les auteurs ; elle a grandi pendant la vie du gaz et presque plus ensuite, et la lecture la plus probable en fait un embryon planétaire resté à l'état d'embryon, un de ces corps gros comme Mars qui ailleurs se sont heurtés et fondus en planètes plus grandes, et qui a échappé à ces collisions.
4. La Terre a pris l'autre chemin : pendant toute la vie du disque, la proto-Terre n'aurait pas dépassé six dixièmes de la masse actuelle, et quand le gaz se dissipe, la future Terre n'est pas une planète mais un embryon, ou plusieurs, dont la masse réunie n'atteint pas ce chiffre ; le reste est venu après, et autrement.
5. Tant que le gaz est là, il freine : un corps qui s'y déplace perd un peu de son mouvement, et ce frottement garde les orbites presque rondes et bien séparées ; le gaz parti, le frein disparaît, les attractions des embryons entre eux déforment leurs orbites, qui s'allongent, se croisent, et des corps de la taille de la Lune ou de Mars se percutent — l'étape des impacts géants commence.

F L'argon des astéroïdes

Les planètes géantes dont les orbites se modifient brutalement, selon des modèles ; des météorites venues d'astéroïdes ; le potassium 40 qui devient argon 40, un gaz qui fuit la roche chaude et s'accumule dans la roche froide ; un bombardement qui commence à 11,3 millions d'années ; une marge de 5 à 21 ; une mesure et deux attributions ; l'état des lieux vers dix millions d'années, et une Terre inachevée · 11,3 millions d'années après la naissance du Soleil, 9,5 en plus, 6,6 en moins ; d'environ 5 à environ 21 millions d'années ; vers 10 millions d'années après le $t = 0$; 2024 · Plan court, trois paragraphes. Il entre par les géantes et leur secousse telle que les modèles la disent, puis par la pierre : un gaz qui part quand la roche est chaude et reste quand elle est froide, et qui date donc le dernier coup de chaleur. Edwards entre par cette méthode et par un nombre. La marge se dit comme une fourchette qui se voit, cinq à vingt et un, et les deux pas entre la mesure et l'interprétation comme des faits rangés (la mesure date un réchauffement ; les auteurs l'attribuent à des impacts, puis aux géantes), avec « d'une équipe » pour ce que c'est. Le dernier paragraphe est l'inventaire de l'essai vers dix millions d'années, ce qui est fait et ce qui ne l'est pas ; la chute laisse la Terre inachevée, sans la Lune, que G nommera.

- 1. Les planètes géantes ont eu leur propre secousse : plusieurs modèles de l'histoire du Système solaire font passer leurs orbites par une phase où elles se modifient brutalement et dispersent les petits corps, la date diffère d'un modèle à l'autre, et en 2024 Graham Edwards et ses coauteurs en proposent une trace datée — le potassium 40 se change en argon 40, un gaz qui s'échappe de la roche tant qu'elle est chaude et s'y accumule quand elle refroidit, de sorte que l'argon gardé date le dernier coup de chaleur, un choc par exemple ; sur des météorites venues d'astéroïdes, ils lisent ainsi un bombardement qui commence 11,3 millions d'années après la naissance du Soleil, et l'attribuent à l'instabilité des géantes.*
- 2. La marge est large et penche d'un côté, 9,5 millions d'années en plus, 6,6 en moins : le bombardement a pu commencer entre cinq et vingt et un millions d'années après le $t = 0$, dans les premières dizaines de millions d'années quoi qu'il en soit, du côté des modèles qui placent l'instabilité tôt ; la mesure date un réchauffement des roches de la ceinture d'astéroïdes, l'attribution de ce réchauffement à des impacts, puis de ces impacts aux géantes, est celle des auteurs, et c'est le résultat récent d'une équipe.*
- 3. 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.*

G La matinée du 2 septembre

Douze mois pour 13,8 milliards d'années, Carl Sagan en 1977 et en 1980 ; un jour de 37,8 millions d'années, une heure de 1,58 million, une minute de vingt-six mille ans ; la frise du livre qui dit « vers la fin août », le calcul qui dit le 2 septembre entre 4 h et 5 h ; 244,2 jours écoulés, le 31 août fini à minuit au bout de 243 ; une matinée : dix minutes, quarante minutes, 7 ou 8 h, la fin de la matinée, 10 h à 14 h ; une cinquantaine de minutes sur 8 760 heures ; un calendrier qui suppose 13,8 ; des écarts lus dans une pierre ; 23 h, le 3 et le 5 septembre · le 2 septembre, entre 4 h et 5 h du matin ; 1,4 million d'années, une cinquantaine de minutes ; la matinée du 2 septembre ; vers 23 h ; du 3 au 5 septembre · Le plan du calendrier, seul usage de l'année cosmique dans le chapitre. Sagan entre par un livre et une série ; les trois unités sont données une fois. La correction de la frise du livre est dite platement : la frise arrondit, le calcul donne le 2 septembre, et le sens ne change pas — la charnière de l'été et de la rentrée est l'image du plan. Tout le chapitre est rejoué en une matinée, heure par heure, chaque événement avec son « si » là où l'essai en met un (Jupiter) et son « selon l'équipe » (les chondres). La cinquantaine de minutes est pesée deux fois, comme le million l'était en B, mais sans ses mots : moins d'une heure sur 8 760, et sur la matinée, les planétésimaux et Jupiter. Les deux manières de compter se distinguent par ce sur quoi elles reposent — un âge calculé, un excès de magnésium dans une pierre —, et l'ouverture de l'essai (des dates calculées jusqu'au Soleil, lues ensuite) vient ici, là où elle se voit. La chute laisse la journée en cours et nomme ce que le chapitre suit date.

1. *L'année cosmique, que Carl Sagan a rendue familière en 1977 dans un livre puis en 1980 à la télévision, ramène les 13,8 milliards d'années de l'histoire à douze mois — un jour y vaut 37,8 millions d'années, une heure 1,58 million, une minute vingt-six mille ans —, et le $t = 0$ du Système solaire y tombe le 2 septembre, entre 4 h et 5 h du matin selon la valeur retenue ; la frise de ce livre l'a placé « vers la fin août » en arrondissant l'âge du Soleil aux deux tiers de l'histoire, le calcul exact le décale de quelques heures, 244,2 jours écoulés quand le 31 août s'est achevé à minuit au bout de 243, et le sens ne change pas : le Soleil naît à la charnière de l'été et de la rentrée.*
2. *Tout ce chapitre tient dans la matinée de ce jour : les premiers planétésimaux du Système solaire interne apparaissent au plus une dizaine de minutes après le $t = 0$, le noyau de Jupiter a ses vingt masses terrestres en moins de quarante minutes si Kruijer et ses coauteurs lisent juste, les chondres se forment dans les quarante premières minutes ou dans les deux premières heures selon l'équipe qu'on suit, le gaz se dissipe vers 7 h ou 8 h, les géantes se dérangent vers la fin de la matinée, avec une marge qui va de 7 h du matin au milieu de l'après-midi, et Mars finit de grandir entre 10 h et 14 h.*
3. *Le désaccord sur le zéro se lit sur le même cadran : entre 4 567,3 et 4 568,7 millions d'années il y a 1,4 million d'années, une cinquantaine de minutes de l'année cosmique, moins d'une heure sur les 8 760 de l'année — et sur la matinée du 2 septembre, cette heure recouvre les premiers planétésimaux et le noyau de Jupiter.*
4. *Les deux manières de compter ne reposent pas sur la même chose : le calendrier suppose les 13,8 milliards d'années de l'Univers, c'est ce nombre qui fixe la longueur d'un jour et la date du 2 septembre, et si l'âge de l'Univers était revu, toutes les heures de cette matinée glisseraient ; 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 — toutes les dates du livre jusqu'au Soleil étaient calculées dans un modèle, celles du disque sont lues dans la pierre, à rebours depuis aujourd'hui, et l'année cosmique est une image rapportée à un âge calculé, quand la chronologie du disque est une mesure.*
5. *La journée n'est pas finie : il reste au noyau de la Terre une trentaine de millions d'années à se former, jusque vers 23 h sur ce calendrier, ou plus tard, et la Lune, dont les datations se disputent l'âge, naît le 3 septembre, ou le 5.*

La Terre et la Lune

storyboard · 8 plan(s)

La Terre s'assemble à partir des embryons du disque et se sépare en un noyau de métal et un manteau de roche ; la Lune naît d'un impact sur la jeune Terre, dont la date reste discutée. Les premières roches terrestres ont été refondues ou détruites : les dates viennent de zircons isolés, de météorites et des échantillons rapportés de la Lune, chacun avec son horloge. Le chapitre dit quelle date est lue sur quel objet.

Le storyboard : les plans du chapitre, chacun avec son cadre et ses micro-récits, dans l'ordre.

A Mars, restée entière

Mars, qui tourne à côté de la Terre et a cessé de grandir presque aussitôt née ; la proto-Terre à six dixièmes de sa masse pendant la vie du disque ; le gaz qui part, les galets qui ne dérivent plus, les embryons qui se heurtent ; une planète faite de chocs, sans jour de naissance ; quatre questions, chacune sur son objet · 1,8 million d'années (de 0,8 à 2,7) ; dix à quinze millions d'années ; quatre à cinq millions d'années après le $t = 0$; des dizaines de millions d'années de chocs · Plan d'entrée, qui prend la chute du chapitre précédent (les impacts géants commencent ; la Terre n'est pas finie) sans la citer : il entre par Mars, un corps qu'on voit tourner à côté et qui a fini de grandir, puis par la Terre qui ne l'est pas. Mars n'est plus « un embryon resté à l'état d'embryon » (dépensé) mais « un de ces corps dont la Terre s'est nourrie, resté entier ». Le gaz qui part est rappelé en une incise avec sa méthode (le champ magnétique gardé par des météorites), parce que le verrou l'exige, pas rejoué ; la fin du frein se dit en trois mots (le gaz parti, les embryons se heurtent). Le paragraphe hors verrou pose la forme du chapitre : une planète faite de chocs n'a pas de jour de naissance comme un grain en a un, et la question se défait en quatre, chacune sur son objet — c'est la chute, qui annonce par le fait, pas par le programme.

1. *À côté de la Terre tourne un corps qui a cessé de grandir presque aussitôt né : Mars a atteint la moitié de sa masse en 1,8 million d'années — entre 0,8 et 2,7 — et achevé l'essentiel de sa croissance en dix à quinze millions, pendant la vie du gaz ou juste après, et elle est probablement un de ces corps gros comme elle dont la Terre s'est nourrie, resté entier.*
2. *La future Terre, elle, n'a pas dépassé six dixièmes de sa masse pendant toute la vie du disque ; quand le gaz s'en va, vers quatre à cinq millions d'années après le $t = 0$ — la date est celle du champ magnétique que des météorites ont gardé tant que le disque en portait un —, les quatre dixièmes qui manquent ne peuvent plus venir ni du gaz ni des galets qui dériveraient en lui, le gaz parti les embryons se heurtent, et le reste de la Terre arrive par chocs entre gros corps, en une suite étalée sur des dizaines de millions d'années : la différence entre les deux voisines tient au calendrier.*
3. *Une planète faite de chocs n'a pas de jour de naissance comme en a un grain de météorite : chaque grand impact apporte de la masse, fond une part de la planète, mêle des matières venues d'ailleurs, et la question « quel âge a la Terre ? » se défait en quatre — quand son métal a coulé, quand le dernier grand choc a eu lieu, quand sa surface a pris, quand ont cristallisé les premiers grains qui nous sont parvenus —, chacune avec son compte et son objet.*

B Le tungstène du manteau

L'intérieur de la Terre chauffée par les chocs : le fer qui coule au centre, les silicates qui restent, une croûte mince ; l'hafnium 182 qui reste dans la roche, le tungstène qui suit le fer ; l'excès de tungstène 182 du manteau ; un compte qui s'éteint au bout de dix demi-vies ; le noyau d'un impacteur qui plonge sans échanger ; les CAI et la Terre, deux objets · 8,9 millions d'années de demi-vie ; quatre-vingt-dix millions d'années ; trente millions d'années ou plus après le $t = 0$; 142 ± 25 ; un facteur quatre ; 4 567 millions d'années ; moins de 1 % · Le plan du noyau. L'hafnium-tungstène a déjà été mis en scène au chapitre précédent (le métal coule, le tungstène part) ; ici on le reprend par ce qu'il a de neuf : la différenciation nommée une fois, l'excès du manteau terrestre, et le compte qui s'éteint au bout de dix demi-vies, quatre-vingt-dix millions d'années — une horloge qui devient aveugle à ce qui vient ensuite. Lichtenberg entre par une synthèse et un plancher. Le facteur quatre se dit par sa cause et par une image : le noyau d'un impacteur qui plonge jusqu'au centre sans échanger son tungstène ; « borne basse » se dit en deux propositions (pas plus tôt ; peut-être bien plus tard). Le 4 567 est corrigé platement, sans « on croit souvent que » ; la chute pèse trente millions d'années des deux côtés, moins de 1 % et deux objets différents. Sec, sauf la chute.

- 1. Chaque grand choc chauffe la Terre jusqu'à la fondre en grande partie, et dans une planète fondue le fer, plus dense, coule au centre pendant que la roche, les silicates, reste au-dessus — un noyau, un manteau, une croûte mince : la différenciation — ; or l'hafnium 182, qui devient du tungstène 182 avec une demi-vie d'environ 8,9 millions d'années, reste dans le silicate quand le tungstène suit le fer, de sorte que l'excès de tungstène 182 que garde le manteau dit quand le métal est parti, et qu'au bout d'une dizaine de demi-vies, quatre-vingt-dix millions d'années, il ne reste presque plus d'hafnium 182 et le compte devient aveugle à ce qui vient ensuite.*
- 2. Lu sur le manteau terrestre, ce compte donne, dans la synthèse de Tim Lichtenberg et de ses coauteurs, un noyau formé — et donc une accréation principale achevée — environ trente millions d'années ou plus après le $t = 0$, quand certaines estimations la repoussent jusqu'à 142 millions d'années, à 25 près, en la liant à l'impact qui a fait la Lune : plus qu'un facteur quatre entre les deux.*
- 3. Le calcul suppose que le métal, en coulant, a échangé son tungstène avec la roche qu'il traversait, mais le noyau d'un impacteur peut plonger jusqu'au centre sans rien échanger, et il emporte alors une signature qui n'est pas celle du manteau : selon la part de métal qui s'est équilibrée, le même excès de tungstène 182 donne un noyau précoce ou un noyau tardif, l'« âge du noyau » est une moyenne pondérée d'épisodes, un métal par choc, et trente millions d'années sont une borne basse — le noyau n'a pas pu finir plus tôt, il a pu finir bien plus tard.*
- 4. L'âge de 4 567 millions d'années, qu'on donne souvent pour celui de la Terre, est celui des premiers solides du disque, les CAI, lu dans leur plomb ; la Terre n'a pas cet âge, elle achève sa croissance principale au moins trente millions d'années après ces premiers grains, et ces trente millions d'années font moins de 1 % de l'âge du Système solaire, mais ils séparent deux objets, un grain de poussière du disque et une planète.*

c Un satellite trop gros

La Lune, anormalement grosse pour sa planète ; une conférence en 1984 ; un corps de la taille d'une planète qui heurte la jeune Terre, des débris projetés en orbite ; quatre faits expliqués d'un coup ; un impacteur gros comme Mars en fin d'accrétion ; une Lune qui devrait être faite de lui et qui ne diffère presque pas de la Terre ; des scénarios concurrents ; le dernier choc et le dernier métal · 1984 ; la fin de l'accrétion ; 142 millions d'années après le $t = 0$ pour l'estimation la plus tardive du noyau · Le plan du choc. Il entre par un fait qui se voit (un satellite trop gros) et par une date de conférence, sans lieu ; l'impacteur n'a pas de nom, parce que l'essai ne lui en donne pas. Les quatre faits tiennent en une énumération, Canup entre par sa revue ; les isotopes de provenance reviennent en une proposition qui renvoie aux deux familles du chapitre précédent sans « la barrière ». La crise se montre par l'ordre des faits : le modèle rend compte de la dynamique ; il fait la Lune de l'impacteur ; un corps né ailleurs devrait différer ; il ne diffère presque pas — « crise isotopique » entre guillemets, comme mot d'autrui. Le paragraphe hors verrou range ce qui est acquis et ce qui ne l'est pas (l'impact ; lequel), puis raccorde à B par le dernier métal : la chute lie l'âge de la Lune à la fin de la Terre.

- 1. La Lune est un satellite trop gros pour sa planète, et depuis une conférence tenue en 1984 l'hypothèse qui domine la fait naître d'un impact géant : un corps de la taille d'une planète heurte la jeune Terre, des débris sont projetés en orbite, et la Lune s'assemble à partir d'eux.*
- 2. Elle 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 les mêmes isotopes de l'oxygène sur la Terre et sur la Lune —, et les isotopes, dont les proportions varient un peu d'une région du disque à l'autre, sont la signature de provenance qui rangeait au chapitre précédent les météorites en deux familles.*
- 3. Le quatrième fait est aussi le problème : le modèle dit canonique fait venir, en fin d'accrétion, un impacteur gros comme Mars, et il rend compte de la masse de la Lune et de la rotation du couple, mais la Lune y est faite surtout de l'impacteur, un corps né ailleurs dans le disque, qui devrait porter une autre signature — or les deux astres ont des compositions isotopiques presque identiques, ce qui s'expliquerait le plus simplement si la Lune était sortie de la Terre, et certains ont parlé d'une « crise isotopique » du modèle.*
- 4. De nombreux scénarios d'impact concurrents cherchent depuis une Lune tirée surtout de la Terre, ou un mélange assez complet pour que les deux corps finissent pareils ; qu'un impact géant ait fait la Lune n'est pas contesté, lequel reste ouvert, et c'est à cet impact que se rattachent les estimations les plus tardives du noyau, vers 142 millions d'années après le $t = 0$: le dernier grand choc aurait apporté le dernier métal, et dater la Lune, c'est aussi dater la fin de la construction de la Terre.*

▯ Les zircons d'Apollo 14

Des échantillons rapportés par les missions Apollo ; des comptes qui datent la formation d'un minéral ou son dernier réchauffement, pas le choc ; des zircons d'Apollo 14 sous deux lectures ; une croûte lunaire déjà séparée en couches ; un amas d'âges vers 4,35 ; une Lune pétrie par la gravité de la Terre, refondue de l'intérieur ; deux publications à un an d'intervalle sur le même nombre · avant 2017, de 4,45–4,47 à 4,35–4,42 milliards d'années, une centaine à 150–200 millions d'années après le $t = 0$; 2017 ; 4,51 milliards d'années, soixante millions d'années ; 2024 ; 4,35 ; 4,43 à 4,53 ; 4,51 à 4,53 ; 2025 · Le plan des pierres rapportées, le plus technique du chapitre, tenu par deux gestes humains. Il entre par l'objet (des échantillons rapportés) et par ce que donnent les comptes — pas l'instant du choc, la formation ou le dernier réchauffement d'un minéral ; « remise à zéro » est nommée ici comme terme. L'étalement d'avant 2017 est donné comme un tableau, sec. Barboni entre par deux lectures croisées sur les mêmes grains, et l'argument se dit par l'ordre des événements (exister, fondre, se séparer, puis cristalliser) : un âge de croûte est un plancher. Nimmo, Kleine et Morbidelli entrent par les marées : la Terre pétrit la Lune, la chaleur refond l'intérieur, les comptes repartent ; « probablement » entre guillemets. La compatibilité (4,51–4,53) est dite en une proposition, et la tendance sans consensus. Le paragraphe hors verrou ferme sur Westall et le même nombre qui date deux choses — pas « les deux lectures restent côte à côte » (dépensé).

- 1. La Lune ne se date pas sur la Terre : ses dates viennent des échantillons rapportés par les missions Apollo et des horloges longues qui y tournent encore, l'uranium-plomb d'abord, et ces comptes ne donnent pas l'instant du choc mais le moment où un minéral lunaire s'est formé, ou la dernière fois qu'il a été assez chauffé pour que son compte reparte de zéro — une remise à zéro — ; avant 2017 les estimations allaient de 4,45–4,47 milliards d'années, une Lune formée une centaine de millions d'années après le $t = 0$, à 4,35–4,42, un impact tardif à 150 ou 200 millions d'années, soit une centaine de millions d'années d'écart, plus de trois fois ce qui sépare le $t = 0$ du noyau terrestre dans l'estimation basse.*
- 2. En 2017, Melanie Barboni et ses coauteurs prennent des zircons des échantillons d'Apollo 14 — le zircon, silicate de zirconium, résiste à presque tout et se date par l'uranium-plomb — et y croisent deux lectures, l'uranium-plomb pour l'âge de cristallisation de chaque grain, le lutécium-hafnium pour l'histoire de la matière dont il est issu : la croûte lunaire était déjà séparée en couches à 4,51 milliards d'années, ce qui place la Lune dans les soixante premiers millions d'années après la naissance du Système solaire, car il faut qu'elle existe, qu'elle ait fondu et qu'elle se soit séparée en couches avant qu'une croûte cristallise des zircons — un âge de croûte est un plancher, la Lune est au moins aussi vieille.*
- 3. Restait l'amas d'échantillons lunaires groupés vers 4,35 milliards d'années, et en 2024 Francis Nimmo, Thorsten Kleine et Alessandro Morbidelli lui donnent une autre cause : les déformations que la gravité de la Terre impose à la Lune y dissipent de la chaleur, cette chaleur aurait refondu une partie de l'intérieur lunaire vers 4,35 milliards d'années, et la refonte a remis à zéro les comptes d'une partie des roches, qui affichent depuis cette date et non celle de leur première formation ; la Lune serait née bien avant, « probablement » entre 4,43 et 4,53 milliards d'années — une Lune née entre 4,51 et 4,53 satisfait Barboni et Nimmo à la fois, et la tendance penche vers une Lune ancienne, sans consensus.*
- 4. Un même âge mesuré peut donc dater deux événements : l'amas à 4,35 se lit comme la naissance de la Lune ou comme la remise à zéro tardive d'une Lune déjà vieille, sur les mêmes mesures, et la lecture tardive circule encore — dans sa synthèse de 2025 sur les premières traces de vie, Frances Westall place l'impact qui fait la Lune vers 4,35 milliards d'années, et le même nombre sert ainsi, dans deux publications à un an d'intervalle, à dater la naissance de la Lune et à dater autre chose.*

E Un océan de roche

La Terre après le dernier impact : de la roche fondue sur une grande profondeur, une atmosphère de vapeur de silicates ; la chaleur qui s'échappe plus ou moins vite ; une enveloppe d'hydrogène et d'hélium prise dans le disque, puis du néon et de l'argon qui manquent ; une pluie de matière chondritique après le dernier choc ; de l'or resté dans le manteau · de cent mille à cent millions d'années selon les modèles ; au plus 0,5 à 0,8 % de la masse de la Terre · Le plan de l'après. Il entre par un état sans témoin (aucune roche actuelle ne l'enregistre) et par deux images, l'océan de magma et la vapeur de roche ; la fourchette des modèles se dit par ses deux bornes qui ne racontent pas la même Terre (prise aussitôt ; fondue aussi longtemps que tout ce qui précède). L'air arraché se dit par les gaz qui ne peuvent pas se cacher : le néon et l'argon manquent, donc l'air du disque est parti, l'effet avant la cause nommée ; la main tendue au chapitre de l'eau tient en une proposition, sans « ligne des glaces ». Le placage tardif ferme le plan : trop de fer, d'or, de platine ; une pluie de matière chondritique après le dernier choc ; un noyau déjà fermé ; « raisonnement par défaut », dit comme tel. L'or renvoie aux étoiles à neutrons du chapitre de l'or en une proposition, et la chute rend à ce placage sa seule portée : comment une part de l'or est restée en haut.

- 1. Le dernier impact laisse la Terre dans un état dont aucune roche d'aujourd'hui ne garde la trace : de la roche fondue sur une grande profondeur, un océan de magma, sous une atmosphère de vapeur de silicates, et les modèles font prendre à une planète de cette taille de cent mille à cent millions d'années pour se solidifier en entier, trois ordres de grandeur, selon la vitesse à laquelle la chaleur s'échappe vers l'espace à travers cette couverture — à cent mille ans la surface prend presque aussitôt après le choc, à cent millions elle reste fondue aussi longtemps que tout ce qui s'est passé depuis le $t = 0$.*
- 2. Les chocs n'ont pas seulement fondu la Terre, ils ont emporté son air : elle a pu avoir très tôt une enveloppe d'hydrogène et d'hélium prise dans le disque, mais elle est aujourd'hui très pauvre en néon et en argon, des gaz qui ne se combinent presque à rien et ne peuvent pas se cacher dans les roches, qu'une planète ayant gardé son atmosphère du disque posséderait en grande quantité, et leur rareté dit que les impacts géants ont arraché ses atmosphères l'une après l'autre ; l'air et l'eau d'aujourd'hui sont venus ensuite, de l'intérieur qui dégaze et d'apports dont l'origine se discute, et c'est l'histoire du chapitre suivant.*
- 3. Le manteau garde trop de fer, d'or et de platine, des métaux qui aiment le fer et auraient dû couler avec lui dans le noyau : l'explication proposée est un placage tardif — après le dernier impact géant, de la matière chondritique, pareille aux météorites non fondues, continue de tomber, au plus 0,5 à 0,8 % de la masse de la Terre, trop tard pour que ses métaux rejoignent un noyau déjà fait —, un raisonnement par défaut, qui comble un écart entre ce qu'on mesure et ce que prévoit la séparation du métal, et qui tient tant qu'aucun autre processus ne retient ces métaux dans le manteau ; l'or lui-même a été forgé bien avant, dans des collisions d'étoiles à neutrons, et le placage tardif ne dit que la manière dont une part en est restée dans le manteau au lieu de couler au centre.*

F Des grains, pas des roches

Le complexe de gneiss d'Acasta, au Canada, une roche à bandes ; l'Hadéen, premier éon, dont la croûte a presque entièrement disparu ; les collines de Jack Hills, en Australie occidentale, des quartzites de trois milliards d'années et des zircons arrachés à des roches disparues ; les atomes d'un grain replacés en trois dimensions ; la ceinture de roches vertes de Nuvvuagittuq, au Québec, sans zircons, et un filon de gabbro qui la recoupe · 4,02 milliards d'années ; d'environ 4,567 à 4,0 ; environ trois milliards d'années pour les quartzites ; $4\,404 \pm 8$ millions d'années ; 2001 ; 2014 ; de 3,75 à 4,32 selon la méthode ; 4 157 millions d'années en 2025 ; au moins cent quarante millions d'années de plus qu'Acasta · Le plan des pierres de Terre, raconté depuis les lieux : Acasta, Jack Hills, Nuvvuagittuq, chacun nommé avec son pays. Il entre par la roche la plus vieille et la plus sûre, puis dit l'Hadéen par ce qu'il n'en reste pas, sans « archive » ni « mémoire » ; la Lune et les météorites, témoins plus vieux que la Terre, en une proposition. Jack Hills est une scène d'érosion : des cristaux arrachés, transportés, déposés dans un sable durci ; la roche disparue, les grains survivants ; Wilde entre par un grain et une date à 8 près. L'objection du plomb déplacé se dit avant la réponse, Valley entre par des atomes replacés un à un, et le titre de l'article, « postérieur à l'océan de magma », est donné comme titre ; l'eau des zircons est renvoyée au chapitre suivant en une proposition. Nuvvuagittuq est le cas sec : deux méthodes, deux nombres, un principe (ce qui recoupe est plus jeune), un filon de 2025 ; le conditionnel reste. La chute est la règle du grain et de la roche, dite par ce qu'il y a entre les âges : des grains, puis des pierres venues d'ailleurs.

1. *Au Canada, dans le complexe de gneiss d'Acasta, une roche dont la chaleur et la pression ont rangé les minéraux en bandes a 4,02 milliards d'années, et c'est la plus vieille roche entière connue avec certitude ; les géologues appellent Hadéen le premier éon de la Terre, d'environ 4,567 à 4,0 milliards d'années, et de sa croûte il ne reste presque rien, refondue, enfouie, érodée ou transformée par une planète restée active qui a recyclé sa surface — la Lune et les météorites gardent des témoins plus vieux que la Terre elle-même, et Acasta date la fin de l'Hadéen, pas son début.*
2. *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 tiennent des zircons détritiques, des cristaux arrachés par l'érosion à des roches plus anciennes, transportés, puis déposés dans un sable qui a durci à son tour ; la roche d'où ils venaient a disparu, les grains ont survécu parce que le zircon résiste à presque tout, leurs âges uranium-plomb montent jusqu'à 4,4 milliards d'années, et le record est un grain de 4 404 millions d'années, à 8 près, publié en 2001 par Simon Wilde et ses coauteurs.*
3. *Un âge pareil sur un grain unique appelait une objection — dans un vieux cristal, le plomb né de l'uranium peut se déplacer et se concentrer par endroits, et une mesure tombée sur un tel amas donnerait un âge trop grand —, et en 2014 John Valley et ses coauteurs regardent un zircon de 4,4 milliards d'années par tomographie à sonde atomique, qui remplace en trois dimensions les atomes d'un volume minuscule du cristal : l'âge hadéen tient, leur titre fait de ce grain un zircon « postérieur à l'océan de magma », les zircons sont la seule preuve physique qui reste des premières phases de la Terre, et ce que leur chimie dit de l'eau est l'affaire du chapitre suivant.*
4. *Nuvvuagittuq, au Québec, montre ce que coûte l'absence de zircons : cette ceinture de roches vertes, des laves anciennes transformées, a de 3,75 à 4,32 milliards d'années selon la méthode — 3,75 par l'uranium-plomb sur les zircons de granites qui la traversent et lui sont donc postérieurs, un minimum ; 4,32 par le samarium-néodyme sur les roches elles-mêmes, un compte discuté parce que ces basaltes n'ont presque pas de zircons propres —, et en 2025 un filon de gabbro, roche magmatique sombre qui recoupe une de ses unités, est daté de 4 157 millions d'années, un minimum lui aussi, qui ne tranche pas entre 4,16 et 4,32 mais relève le plancher de 3,75 à 4,16 et plaide pour l'Hadéen : si cet âge tient, Nuvvuagittuq est plus vieille qu'Acasta d'au moins cent quarante millions d'années.*
5. *Vers 4,4 milliards d'années, on date des minéraux, pas des roches, et 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 en a peut-être 4,16 ou plus, et 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.*

G Le cachet de la poste

Six objets pour six dates : les CAI, le magnétisme des météorites, le tungstène du manteau entier, des zircons d'un autre astre, des zircons australiens, un gneiss canadien ; un système chimique qui se ferme — un grain, un métal, une roche — et qui se rouvre ; le bassin d'Imbrium sur la face visible de la Lune, des éclats sur une grande partie de la surface, des pierres d'Apollo ; un pic d'impacts qui n'en est peut-être pas un ; une lettre et son cachet · 4,35 milliards d'années pour l'amas lunaire ; un pic entre 4,1 et 3,8 milliards d'années, s'il a eu lieu · Le plan de la méthode, placé avant le calendrier pour que le chapitre ferme sur un cadran et non sur une règle. Il entre par un inventaire qui se voit — six objets, six dates —, puis range ces objets par nature (deux du ciel, le manteau, un autre astre, deux de la croûte) ; la fermeture d'un système chimique se dit en trois images (un grain qui cristallise, un métal qui se sépare, une roche qui refroidit) et par ce qui rouvre (l'amas lunaire à 4,35). Le Grand Bombardement tardif entre par un lieu, le bassin d'Imbrium sur la face visible, et ses deux raisons sont rangées (l'horloge ; l'objet), avec « posent problème » pour l'argon-argon sans en dire la nature, puisque l'essai ne la dit pas ; « biais d'échantillonnage » est nommé. Le dernier paragraphe est court : les dates n'étaient pas fausses, la question n'était pas posée ; le cachet de la poste est l'image du plan, une fois — une comparaison de méthode, pas une morale.

1. *Chaque date de cette histoire se lit sur un objet : le $t = 0$ dans les CAI des météorites, la fin du gaz dans leur magnétisme, le noyau dans le tungstène 182 du manteau terrestre entier, la Lune dans des zircons rapportés d'un autre astre, les premiers grains de Terre dans des zircons australiens, la première roche entière dans un gneiss canadien — deux pierres tombées du ciel, le manteau tout entier, un autre astre, deux morceaux de croûte —, aucune ne date « la Terre » en bloc, et chacune date un moment où un système chimique s'est fermé, un grain qui cristallise, un métal qui se sépare, une roche qui refroidit, car le compte ne commence que lorsque l'isotope fils ne peut plus sortir ni l'isotope père entrer, et il repart si le système se rouvre, comme pour l'amas lunaire à 4,35 milliards d'années.*
2. *Sur la face visible de la Lune s'ouvre le bassin d'Imbrium, un cratère d'impact immense, et une partie des pierres d'Apollo pourrait en être les éclats : de leurs âges on avait déduit un Grand Bombardement tardif, un pic d'impacts sur la Terre et la Lune entre 4,1 et 3,8 milliards d'années, et l'hypothèse est aujourd'hui contestée pour deux raisons — l'horloge, car ces âges viennent de l'argon-argon, qui date la dernière fois que la roche a été assez chaude pour laisser fuir son argon, et ils posent problème ; l'objet, car Imbrium a pu projeter ses débris sur une grande partie de la surface et contaminer les échantillons —, et si beaucoup de pierres datent un seul et même choc, leur regroupement dans le temps signale un biais d'échantillonnage plutôt qu'un pic, et un déclin graduel des impacts suffirait à rendre compte du relevé.*
3. *Le 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, et le même avertissement vaut pour la Lune et pour Nuvvuagittuq : une date lue sans l'objet qui la porte ni l'événement qui a fermé son compte est un cachet de la poste sans la lettre qu'il a timbrée.*

H La première quinzaine de septembre

Le cadran de l'année cosmique : le 2 septembre à 4 h 45, le gaz parti vers 7 ou 8 h, le noyau vers minuit ou le 5 vers 23 h ; la Lune du 3 à 4 h au 5 à 20 h, sa croûte le 3 en fin d'après-midi ; l'océan de magma en quelques minutes ou deux jours et demi ; le zircon des Jack Hills le 6 à midi et demi ; la refonte à minuit entre le 7 et le 8 ; le filon de Nuvvuagittuq le 13 à 1 h ; Acasta le 16 dans l'après-midi ; le Bombardement, s'il a eu lieu, du 14 au 22 ; quatre jours, puis un grain dans une main · un jour de 37,8 millions d'années ; du 2 au 22 septembre ; les quatre premiers jours, le sixième, la deuxième quinzaine · Le plan du calendrier, seul usage de l'année cosmique dans le chapitre, qui reprend la chute du chapitre précédent (la Lune le 3 ou le 5) en lui donnant ses heures. Seule l'unité du jour est rappelée ; le 2 septembre à 4 h 45 est repris comme établi. Tout le chapitre est rejoué heure par heure en deux paragraphes, chaque événement avec son « si » (le dernier métal venu avec la Lune ; le Bombardement, s'il a eu lieu) et son « selon le modèle » (l'océan de magma : quelques minutes ou deux jours et demi). Ni la dépendance du calendrier à l'âge de l'Univers, ni « la charnière de l'été et de la rentrée », déjà dépensées. La chute est le seul paragraphe lyrique : quatre jours de septembre, un grain qu'une main peut tenir le sixième, des roches entières qui attendent la deuxième quinzaine — l'humain entre par sa main, une fois.

- 1. Sur l'année cosmique, où un jour vaut 37,8 millions d'années, le $t = 0$ est tombé le 2 septembre vers 4 h 45 et le gaz du disque est parti vers 7 ou 8 h ; la Terre achève son noyau vers minuit, à la fin de cette même journée, dans l'estimation basse, ou le 5 septembre vers 23 h, à un jour et demi près, si le dernier métal est venu avec le choc qui a fait la Lune.*
- 2. La Lune naît entre le 3 septembre vers 4 h et le 5 vers 20 h, et sa croûte datée sur les zircons d'Apollo 14 existe dès le 3 en fin d'après-midi ; l'océan de magma de la Terre prend 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 ; les marées refondent la Lune à minuit entre le 7 et le 8 ; le filon de Nuvvuagittuq se met en place le 13 vers 1 h, le gneiss d'Acasta se forme le 16 dans l'après-midi, et le Grand Bombardement tardif, s'il a eu lieu, s'étendrait du 14 au 22.*
- 3. Tout ce qui fait la Terre et la Lune tient dans les quatre premiers jours de septembre ; les plus vieux grains de Terre qu'une main puisse tenir arrivent le sixième, et les plus vieilles roches entières attendent la deuxième quinzaine.*

L'eau, les océans et l'air

storyboard · 7 plan(s)

L'hydrogène de l'eau date des vingt premières minutes, son oxygène des étoiles massives : chaque molécule porte deux atomes du premier jour pour un atome forgé. Cette eau est venue surtout de la matière du disque, peu des comètes ; une part reste cachée dans le manteau. Les zircons de Jack Hills suggèrent de l'eau liquide il y a plus de 4 milliards d'années, des océans que de gros impacts ont pu vaporiser plusieurs fois ; l'atmosphère primitive reste sans oxygène libre.

Le storyboard : les plans du chapitre, chacun avec son cadre et ses micro-récits, dans l'ordre.

A Trois atomes dans une main

Le creux d'une main, un peu d'eau ; une molécule, trois atomes ; le gaz des premières minutes, la fabrique qui ferme à la vingtième ; des étoiles massives dont le cœur de fer s'écroule ; le corps d'un adulte, pour moitié d'eau ; le disque du jeune Soleil, vers lequel le plan se tourne · Entre trois et vingt minutes après le début de l'expansion ; de janvier à la fin d'août sur l'année cosmique, avant la naissance du Soleil ; aujourd'hui · Plan d'entrée, qui reprend la chute du chapitre précédent (un grain dans une main) par un autre contenu de la même main : de l'eau. Il entre par un lieu minuscule et par un compte à trois, puis range les deux atomes par leur atelier — la fabrique des premières minutes, nommée une fois, avec son arrêt faute de masse 5 et de masse 8 ; la forge des étoiles massives, nommée une fois, avec « surtout » donné comme le mot d'un partage calculé pour une galaxie entière, pas mesuré sur un atome. Le troisième paragraphe est le compte double (deux tiers et un tiers en atomes, un neuvième et huit neuvièmes en masse) qui descend au corps : 53 %, 62 % des atomes, et la main qui tient l'eau en est faite à moitié — l'humain entre comme témoin ici seulement. Le paragraphe hors verrou est court et tourne le plan vers le disque : les deux histoires des atomes sont connues, celle de leur assemblage non, et la Terre s'est formée là où l'eau ne restait pas solide.

1. *Dans le creux d'une main, un peu d'eau : chaque molécule qui y tient compte trois atomes, deux d'hydrogène et un d'oxygène, qui n'ont pas été faits au même endroit ni au même moment — l'hydrogène sort de la fabrique des premières minutes, celle qui travaille entre la troisième et la vingtième après le début de l'expansion et ne produit que de l'hydrogène, de l'hélium et des traces de lithium, parce qu'il n'existe aucun noyau stable de masse 5 ni de masse 8 et que la suite des fusions s'arrête là ; depuis, la quantité d'hydrogène de l'Univers n'a fait que baisser, les étoiles le brûlent et aucune n'en fabrique, tout ce qui pèse 12 ou plus, du carbone à l'uranium, est né dans les étoiles, et chaque atome d'hydrogène de cette eau date des premières minutes.*
2. *L'oxygène vient de la forge : il est de ces éléments dits alpha, avec le magnésium, le silicium, le soufre et le calcium, que les modèles de Chiaki Kobayashi, Amanda Karakas et Maria Lugaro font naître surtout dans les étoiles massives et sortir par les supernovas à effondrement de cœur, l'explosion qui suit l'écroulement d'un cœur de fer — « surtout » est le mot d'un partage calculé pour la Galaxie entière, qu'aucune mesure n'établit pour un atome en particulier, et qui dit la source principale sans dire la part ; sur l'année cosmique, cet oxygène a été forgé un jour quelconque entre janvier et la fin d'août, avant la naissance du Soleil, par des générations d'étoiles qu'on ne sait pas compter.*
3. *Une molécule d'eau réunit ainsi les deux ateliers du livre, pour deux tiers de ses atomes le premier jour et pour un tiers les étoiles, mais un atome d'oxygène pèse seize fois un atome d'hydrogène et en masse le compte s'inverse, un neuvième du premier jour, huit neuvièmes d'étoile ; dans le corps d'un adulte, l'eau fait environ 53 % de la masse, un peu plus de la moitié, avec de fortes différences d'une personne à l'autre, et l'essentiel des atomes d'hydrogène du corps, qui sont à eux seuls 62 % de ses atomes, est pris dans cette eau — la main qui la tient en est faite à moitié.*
4. *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, et la Terre s'est formée dans une région de ce disque où l'eau ne pouvait pas rester solide.*

B Trop près du Soleil

Le disque du jeune Soleil, où il fait plus froid à mesure qu'on s'éloigne ; une ligne au-delà de laquelle l'eau gèle ; des grains, des galets, des planétésimaux qui s'assemblent sans glace ; deux familles de météorites, l'une du dedans, l'autre du dehors ; les mers de la Terre, et l'eau du manteau qu'on ne voit pas · La vie du disque ; de un à trois ou quatre millions d'années après le $t = 0$ pour la séparation des deux réservoirs ; aujourd'hui pour le compte des océans · Le plan du problème, posé en trois paragraphes qui vont du froid au compte. Il entre par un gradient qu'on voit (plus loin, plus froid) et nomme la ligne des glaces avec sa température, 170 kelvins et $-103\text{ }^{\circ}\text{C}$; « sur place » est le mot de l'interdit. Les deux familles du chapitre du disque reviennent en une phrase, sans « la barrière », et les deux notions sont distinguées par leur nature (une température, une signature) avant d'être rapprochées par leur effet, qui va dans le même sens. Le troisième paragraphe renverse : la Terre est humide, 3 à 11 océans, l'unité dite, la fourchette expliquée par le manteau, et l'image de l'eau qui ne se voit pas, dans la roche — posée ici, dépensée en chute de C. La chute formule le problème par ses deux issues, sans « sauf » ni « à une exception près ».

- 1. Dans le disque du jeune Soleil, plus on s'éloigne de l'étoile, plus il fait froid, et l'eau n'y gèle qu'au-delà d'une ligne, la ligne des glaces, où la température passe sous 170 kelvins, environ $-103\text{ }^{\circ}\text{C}$; en deçà elle reste vapeur, et les solides qui s'y assemblent, grains, galets, puis planétésimaux, ne peuvent pas la prendre en glace — la région où se forment les planètes rocheuses, dont la Terre, est trop chaude pour que l'eau y entre sur place.*
- 2. Le chapitre du disque a rangé les météorites en deux familles, les non carbonées venues du Système solaire interne et les carbonées venues de l'externe, deux réservoirs restés à part entre un et trois ou quatre millions d'années après le $t = 0$; la ligne des glaces est une température, la frontière des familles une signature, et rien dans la base ne dit comment elles se placent l'une par rapport à l'autre, mais elles pèsent dans le même sens : les matières riches en eau étaient au loin, et la Terre s'est faite près du Soleil.*
- 3. Or la Terre est humide, bien plus que ne le montrent ses mers : manteau, océans et atmosphère ensemble, elle contient l'équivalent de 3 à 11 océans, l'océan d'aujourd'hui servant d'unité — l'océan et l'air se pèsent directement, la largeur de la fourchette vient de l'eau du manteau, un hydrogène pris dans les minéraux, et même à la borne basse l'essentiel de l'eau de la planète ne se voit pas, elle est dans la roche ; une planète née là où l'eau ne gelait pas tient en elle plusieurs océans : cette eau est venue d'ailleurs, ou elle était là sous une autre forme que la glace, et ce sont les deux pistes qu'on suit aujourd'hui.*

c Venue de loin, ou déjà là

Au-delà de la ligne des glaces, des planétésimaux qui prennent la glace avec la roche ; des planètes géantes qui grossissent, bougent et jettent des corps vers le Soleil ; des chondrites à enstatite, météorites jamais fondues et sèches ; deux isotopes de l'hydrogène comme signature ; des comètes aux confins ; une pluie tardive sèche ; l'intérieur de la planète pendant les chocs · La croissance et la migration des géantes ; une instabilité vers 11 millions d'années après le $t = 0$; 2020 ; 2022 ; l'accrétion, par collisions entre embryons · Le cœur du chapitre, cinq paragraphes qui suivent l'ordre de l'enquête : la piste lointaine d'abord, avec son mécanisme dit par ses gestes (grossir, changer d'orbite, bousculer, jeter) et ses limites (de la matière du dehors est arrivée ; ni quand ni comment) ; la piste locale ensuite, qui retourne le problème — la ligne interdit la glace, pas l'hydrogène lié —, et Piani entre par une mesure sur des pierres sèches, avec l'argument isotopique dit en une image, une signature qu'un mélange trahirait, et le test passé pour l'hydrogène et l'azote, sans valeurs puisque la base n'en a pas. La combinaison d'Izidoro et Piani se dit en une phrase et déplace la question (partager, dater). Les deux sources écartées se disent en deux faits, le placage tardif raccordé à l'or du chapitre précédent en une incise ; l'hydrogène dissous dans le magma reste une clause. Le paragraphe hors verrou est la déduction de l'essai, donnée comme telle : si l'eau est venue pendant l'accrétion, elle a traversé les chocs, donc à l'abri, dans la roche — l'image posée en B est dépensée ici, en chute.

1. *Au-delà de la ligne des glaces, les planétésimaux prennent la glace avec la roche, et pour qu'ils nourrissent la Terre il faut qu'ils aient traversé le disque vers l'intérieur : André Izidoro et Laurette Piani confient ce travail aux planètes géantes, qui, en grossissant et en changeant d'orbite, bousculent les petits corps voisins et en jettent une part vers le Soleil — le chapitre du disque a placé Jupiter entre les deux réservoirs, une instabilité des géantes vers 11 millions d'années après le $t = 0$, et une Terre qui mélange les deux familles ; de la matière du dehors a donc bien atteint la région de la Terre, et la base ne dit ni quand ni par quel épisode.*
2. *La seconde piste retourne le problème : la ligne des glaces interdit la glace, pas l'hydrogène lié aux minéraux de la roche elle-même, et en 2020 Laurette Piani et ses coauteurs mesurent l'hydrogène des chondrites à enstatite, des météorites jamais fondues, faites surtout d'un silicate de magnésium, formées dans un milieu très pauvre en eau et isotopiquement les plus proches de la Terre, les meilleurs témoins de ce dont elle s'est assemblée — ils y trouvent assez d'hydrogène pour au moins trois fois l'eau des océans ; l'hydrogène a deux isotopes stables, l'ordinaire, un seul proton, et le deutérium, qui y ajoute un neutron, leur rapport change d'un corps à l'autre du Système solaire et sert de signature de provenance, une source dont la signature différencierait de celle de la Terre ne pourrait pas être la principale sans que le mélange trahisse l'écart, et les chondrites à enstatite passent ce test pour l'hydrogène et pour l'azote ; les valeurs mesurées ne sont pas dans la base, seulement la conclusion.*
3. *Les deux pistes ne s'excluent pas, et Izidoro et Piani, dans leur synthèse de 2022, les combinent : l'eau des planètes rocheuses vient de matériaux porteurs d'hydrogène propres au disque interne, complétés par des planétésimaux riches en eau formés au-delà de la ligne des glaces, sans que la part de chacun soit chiffrée — la question n'est plus de choisir entre un héritage local et un apport lointain, mais de partager, et de dater.*
4. *Deux sources sont écartées ou réduites : la part des comètes, ces corps glacés venus des confins, est jugée faible, et le placage tardif, la petite pluie de matière chondritique tombée après le dernier impact géant, celle qui a laissé l'or et le platine dans le manteau, était probablement sec — l'essentiel de l'eau est donc arrivé plus tôt, pendant l'accrétion elle-même, quand la Terre grossissait par collisions entre embryons, et une autre voie reste discutée, un hydrogène pris directement au gaz du disque et dissous dans l'océan de magma.*
5. *L'origine de l'eau terrestre reste débattue, et ce qui a changé, c'est que la piste locale, longtemps tenue pour impossible à cause de la ligne des glaces, dispose d'un réservoir mesuré ; mais si l'eau est arrivée pendant l'accrétion, elle a traversé les impacts géants, qui ont fondu la planète et arraché ses premiers airs, et pour qu'elle soit encore là il a fallu qu'une grande part de cette eau traverse les grands chocs à l'abri, dans la roche, où la plupart des océans de la Terre se trouvent encore.*

▯ Un air sorti de la roche

Une enveloppe d'hydrogène et d'hélium prise au disque, dont il ne reste rien ; le néon et l'argon qui manquent ; l'océan de magma sous sa vapeur de roche ; des silicates qui retombent, des volatils qui montent ; un manteau oxydé ou réduit, et deux premiers airs ; une vapeur d'eau et de gaz carbonique sans une molécule d'oxygène libre · Pendant que la proto-Terre grossit ; après l'impact lunaire ; de 10^5 à 10^8 ans selon les modèles, de cent mille à cent millions d'années · Le plan de l'air, quatre paragraphes qui vont de l'air perdu à l'air gardé. Il entre par un renversement simple (l'eau des mers a été de l'air) et reprend l'argument du néon et de l'argon du chapitre précédent par un autre tour — deux gaz qui ne s'attachent à rien et qu'aucune roche ne garde — pour en tirer la seule conséquence utile ici : l'air d'ensuite ne descend pas de l'air du disque. L'océan de magma est repris sans les deux Terres ni les trois ordres de grandeur, par ce qui s'y passe (les silicates retombent, les volatils montent) et par la durée nue, avec l'air qui freine son propre refroidissement. L'oxydation est définie en une relative et montrée par les deux airs qu'elle donne, l'un qui peut condenser en mer, l'autre un mélange combustible où l'eau ne vient pas d'emblée ; « scénario standard » entre guillemets, classé hypothèse. Le paragraphe hors verrou dit le premier air durable, ses lacunes (pression, parts, azote), et la chute pose le refrain lié / libre, qui reviendra en attaque de G.

- 1. L'eau des océans a été de l'air avant d'être une mer, et la Terre n'a pas eu un air mais plusieurs, dont les premiers n'ont pas tenu : le tout premier a pu être une enveloppe d'hydrogène et d'hélium prise au gaz du disque pendant que la proto-Terre grossissait, et il n'en reste aucune trace directe — la Terre d'aujourd'hui est très pauvre en néon et en argon, deux gaz rares qui ne s'attachent presque à rien et qu'aucune roche ne garde, dont une planète qui aurait conservé son air d'origine serait pleine, et leur rareté dit que les impacts géants ont arraché les premières atmosphères ; l'air que la Terre a eu ensuite ne descend pas de l'air du disque.*
- 2. Après l'impact qui fait la Lune, la surface est un océan de magma sous une atmosphère de roche vaporisée, et à mesure que le magma refroidit les silicates retombent tandis que l'air se remplit de volatils, les substances légères que la roche fondue lâche en refroidissant ; une planète de la taille de la Terre met, selon les modèles, de 10^5 à 10^8 ans à se solidifier en entier, de cent mille à cent millions d'années, et la fourchette dépend en partie de l'air même qui recouvre le magma et retient sa chaleur.*
- 3. De quoi est fait ce premier air dégazé dépend de l'état d'oxydation du manteau, la quantité d'oxygène que la roche tient disponible pour se lier au reste : un manteau oxydé laisse sortir l'hydrogène lié à l'oxygène, en vapeur d'eau, et le carbone en dioxyde de carbone ; un manteau réduit, pauvre en oxygène disponible, libère de l'hydrogène, du monoxyde de carbone ou du méthane — d'un côté une vapeur d'eau et de gaz carbonique qui peut condenser en mer, de l'autre 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, et la base le range parmi les hypothèses sans dire sur quels indices il tient.*
- 4. Si l'on suit ce scénario, le premier air durable de la Terre est surtout de la vapeur d'eau et du dioxyde de carbone sortis de l'intérieur de la planète, l'eau y est dès le départ, en gaz, et la base ne donne ni la pression de cet air, ni la part de chaque gaz, ni rien de l'azote qui domine l'air actuel ; dans cet air, l'oxygène ne manque pas : il est tout entier lié, dans l'eau et dans le gaz carbonique, et pas une molécule n'en est libre.*

E Un grain de sable, et l'eau froide

La surface qui refroidit, la vapeur qui tombe ; l'Hadéen dont presque rien n'a tenu ; les Jack Hills, en Australie occidentale, un zircon détritique ; l'oxygène du grain ; un magma disparu ; une roche de surface altérée par une eau froide, refondue ensuite ; le gneiss d'Acasta, au Canada · $4\,404 \pm 8$ millions d'années ; 2001 ; 2014 ; 150 millions d'années environ après le $t = 0$; 4,02 milliards d'années ; près de quatre cents millions d'années connues par des grains seulement · Le plan que le chapitre précédent a promis (« ce que leur chimie dit de l'eau est l'affaire du chapitre suivant »). Il entre par la première pluie, dite en une phrase, et par ce qu'il n'en reste pas, puis par le grain : la scène d'érosion de Jack Hills n'est pas rejouée (un cristal arraché à une roche disparue et déposé dans un sédiment plus jeune, en une relative), Wilde entre par le titre de son article. Le deuxième paragraphe déplace l'argument de l'âge vers l'oxygène et cite la phrase traduite, avec ses deux mots glosés. Le troisième est les quatre étapes, données comme quatre inférences dans l'ordre, puis la date de Lichtenberg et le statut (inférence largement acceptée, pas l'observation d'un océan), et ce que le grain ne dit pas (étendue, profondeur, durée) avant ce qu'il dit (liquide, froide, assez longtemps). Le quatrième reprend Acasta en une phrase, sans la scène du chapitre précédent, et ferme sur la reconstruction dont chaque étape tient et dont la conclusion dépend de toutes — pas de « marche ». Le grain ne « contient » pas d'eau et ne « montre » pas d'océan.

- 1. Quand la surface refroidit assez, la vapeur d'eau condense et tombe, et de ce premier océan il ne reste aucune roche — de l'Hadéen, le premier éon, jusque vers 4,0 milliards d'années, presque rien n'a tenu — : l'indice le plus ancien de l'eau liquide est un grain de sable, un zircon détritique des Jack Hills, en Australie occidentale, cristal arraché à une roche disparue et déposé dans un sédiment plus jeune, dont le plus vieux a 4 404 millions d'années, à 8 près, un âge hadéen confirmé en 2014 par tomographie à sonde atomique ; l'article de Simon Wilde et de ses coauteurs, en 2001, porte dans son titre ce qu'ils en tirent, une croûte continentale et des océans sur la Terre il y a 4,4 milliards d'années.*
- 2. Pour l'eau, l'argument ne vient pas de l'âge du grain mais de son oxygène : l'oxygène a plusieurs isotopes dont les proportions, dans une roche, changent quand elle touche de l'eau liquide à basse température, et un zircon qui cristallise dans un magma garde les proportions de ce magma — selon Wilde et ses coauteurs, celles du zircon de 4,4 milliards d'années « désignent l'intervention de matériaux supracrustaux ayant subi une interaction à basse température avec une hydrosphère liquide », des matériaux formés à la surface de la croûte, et de l'eau liquide en surface.*
- 3. Le raisonnement compte quatre étapes, et chacune ajoute une inférence : le grain a cristallisé dans un magma dont il porte l'oxygène ; cet oxygène n'est pas celui d'un magma sorti droit du manteau, il faut que le magma ait repris de la matière venue de la surface ; cette matière avait été altérée par une eau liquide et froide ; il y avait donc de l'eau liquide à la surface de la Terre avant 4,4 milliards d'années — la synthèse de Tim Lichtenberg et de ses coauteurs en tire une date, de l'eau liquide en surface dès 150 millions d'années environ après le $t = 0$, et la base appelle cela une inférence largement acceptée, pas l'observation d'un océan ; 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.*
- 4. 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, et entre le zircon et Acasta près de quatre cents millions d'années ne sont connues que par des grains ; l'océan hadéen est une reconstruction qui passe par la chimie d'un magma disparu : chacune de ses quatre étapes tient, et la conclusion repose sur toutes à la fois.*

F Une eau qui n'aurait pas dû tenir

Les océans « habitables » de Westall ; une Lune vieille ou jeune, et deux ordres pour la même eau ; un pic d'impacts entre 4,1 et 3,8 qui n'en est peut-être pas un ; un Soleil jeune qui donne un quart d'énergie en moins ; une Terre qui aurait dû être gelée deux milliards d'années ; trois gaz candidats dans l'air ; des roches archéennes qu'on n'a pas encore fait parler · 4,34 milliards d'années ; 4,35 contre 4,43–4,53 ; dix millions d'années à peine ; de 4,1 à 3,8 ; les deux premiers milliards d'années ; l'Archéen, de 3,8 à 2,5 ; 2012 ; plus de cinquante jours de l'année cosmique · Le plan des menaces sur l'eau, trois à la suite, chacune laissée dans son état : une Lune dont l'âge change l'ordre des événements (Westall entre par sa date et par l'impact qu'elle suppose ; les deux ordres se disent en deux suites de faits, pas en jugement) ; un bombardement contesté, repris en une phrase depuis le chapitre précédent, dont l'enjeu ici est seulement chronologique (il aurait frappé une planète déjà mouillée depuis des centaines de millions d'années ; la base ne dit pas ce qu'il en aurait fait) ; un Soleil pâle, où Feulner entre par une revue et une phrase, et où le conflit se montre par ses deux témoins (la physique des étoiles, la géologie) avant les trois gaz, dont deux renvoient aux deux airs de D. Le paragraphe hors verrou laisse le paradoxe ouvert, en rangeant ce qui est établi (l'eau, le Soleil faible) et ce qui manque (le mécanisme), et le ferme sur une durée vue en jours cosmiques. Sec dans Feulner ; pas d'explication du Soleil jeune.

1. *Frances Westall, dans sa synthèse de 2025 sur les premières traces de vie, place des océans « habitables » dès 4,34 milliards d'années, un peu après l'eau des zircons, et juste après un impact lunaire qu'elle met vers 4,35 — or cette date lunaire est contestée, l'amas d'âges vers 4,35 daterait une refonte de la Lune par les marées et la Lune serait née entre 4,43 et 4,53 ; les deux lectures ne font pas la même histoire de l'eau : avec une Lune ancienne, l'impact, puis l'océan de magma, puis une eau liquide dès 4,40 que les zircons enregistrent ; avec une Lune à 4,35, le zircon de 4,40 témoignerait d'une eau d'avant le dernier impact géant, qui aurait refondu la surface après elle, et les océans de Westall suivraient ce choc de dix millions d'années à peine.*
2. *Reste le Grand Bombardement tardif, un pic d'impacts qui aurait frappé la Terre et la Lune entre 4,1 et 3,8 milliards d'années, contesté aujourd'hui parce que les âges lunaires qui le portaient posent problème et que les pierres d'Apollo ont pu être contaminées par les débris d'un seul bassin, Imbrium, un déclin graduel suffisant à rendre compte du relevé ; pour l'eau, l'enjeu est de calendrier : un tel pic aurait frappé une planète qui portait déjà de l'eau liquide depuis plusieurs centaines de millions d'années, et la base ne dit pas ce qu'il en aurait fait, ni s'il aurait vaporisé ces océans en tout ou en partie.*
3. *Cette eau liquide pose un second problème, de climat : selon les modèles d'évolution des étoiles, la Terre primitive recevait du Soleil environ 25 % d'énergie de moins qu'aujourd'hui, et Georg Feulner, qui a fait en 2012 la revue de ce « 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, alors que la géologie montre de l'eau liquide à l'Archéen, l'éon qui va de 3,8 à 2,5 milliards d'années, et que la vie y apparaît ; les zircons hadéens repoussent le problème plus loin encore dans le passé, et la base ne dit pas pourquoi un Soleil jeune brille moins, elle rapporte le chiffre.*
4. *Le paradoxe oppose deux sources indépendantes, la physique des étoiles qui donne l'énergie reçue et la géologie qui montre l'eau, et pour les accorder il faut que la Terre ait retenu davantage de la chaleur reçue ou en ait moins renvoyé vers l'espace : la plupart des solutions mettent dans l'air plus de gaz à effet de serre, qui laissent passer la lumière du Soleil et retiennent une part de la chaleur que le sol réémet, trois candidats en tête, le dioxyde de carbone, le méthane et l'ammoniac — le premier est justement le gaz que le dégazage standard met dans le premier air, le second un produit du dégazage réduit —, et selon Feulner « toutes présentent des difficultés considérables » ; ce qui départagerait est clair dans son principe, mesurer dans des roches archéennes la composition de l'air qui les a touchées, et la base ne rapporte aucune mesure de ce genre.*
5. *Le paradoxe reste ouvert : l'eau liquide ancienne est établie, par les zircons pour l'Hadéen et par la géologie pour l'Archéen, le Soleil plus faible est une prédiction robuste des modèles d'étoiles, et ce qui manque est le mécanisme qui a tenu la Terre au-dessus du gel pendant deux milliards d'années — plus de cinquante jours de l'année cosmique, du début de septembre à la fin d'octobre.*

G Deux mois sans oxygène

L'air de la Terre pendant la moitié de son histoire ; des sédiments où le soufre, le fer et le carbone gardent le passage de l'oxygène ; l'excursion de Lomagundi ; le cadran de l'année cosmique du 2 septembre au 3 novembre ; des cyanobactéries, vers lesquelles le plan se tourne · Environ la moitié de l'histoire de la Terre ; 2,43 milliards d'années ; environ deux cents millions d'années ; 2,22 ; 2,46–2,426 et 2,06 dans l'autre présentation ; 2021 ; le 28 octobre vers 17 h 30 ; un peu plus de cinq jours ; le 3 novembre vers 7 h ; près de deux mois cosmiques · Le plan de fermeture, qui reprend le refrain lié / libre de la chute de D en attaque, par un autre angle (un air qui ne se respirait pas), et ne le redit plus. Poulton entre par deux dates et par les sédiments qui les portent ; la montée se montre par son mouvement (monter, redescendre, pendant deux cents millions d'années) et les deux statuts des deux dates se rangent en une fin de paragraphe, avec l'autre présentation et la raison de l'écart (deux définitions). Le calendrier est repris dans un seul paragraphe, pas dans un plan à part comme au chapitre précédent : seules les heures de ce chapitre, du 2 septembre au 3 novembre, sans les minutes de l'océan de magma (dépensées), et il se ferme sur la durée qui compte, deux mois d'eau liquide sous un air sans oxygène libre. Le paragraphe hors verrou est la main tendue au vivant, en mots de l'essai : la cause est biologique, les cyanobactéries, et le reste est l'affaire des chapitres suivants ; la chute est de fait, pas de morale.

- 1. Le premier air de la Terre ne se respirait pas : pendant à peu près la moitié de son histoire, l'atmosphère n'a pas contenu d'oxygène libre, de molécules d'O₂ qui ne soient liées à rien, alors que l'oxygène ne manquait nulle part sur la planète, puisqu'il fait le plus gros de la masse de l'eau et des roches — il y était pris, dans l'eau, le gaz carbonique et les minéraux, et le dégazage du scénario standard donne un air plein d'atomes d'oxygène sans une seule molécule d'oxygène libre.*
- 2. La date de l'arrivée de l'oxygène libre est connue avec une précision rare, et elle a été affinée récemment : selon Simon Poulton et ses coauteurs, la concentration d'oxygène dans l'air dépasse pour la première fois 10⁻⁵ du niveau actuel vers 2,43 milliards d'années, un cent-millième de l'air d'aujourd'hui, le seuil le plus bas que les roches permettent de repérer, et 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 qui lient fer, soufre et carbone dans les sédiments l'oxygène a ensuite oscillé pendant environ deux cents millions d'années, montant et redescendant, et il ne s'installe pour de bon que vers 2,22 milliards d'années, au moment d'une anomalie des isotopes du carbone, l'excursion de Lomagundi — le début est bien établi, l'instabilité et la date de 2,22 viennent d'une étude de 2021, et une présentation encyclopédique fait durer l'événement de 2,46–2,426 jusque vers 2,06, d'accord sur le début, pas sur la fin, parce qu'elle ne définit pas l'événement de la même manière.*
- 3. Sur l'année cosmique, le t = 0 tombe le 2 septembre vers 4 h 45 ; 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, vers 5 h du matin ; le gneiss d'Acasta n'arrive que le 16, et le Grand Bombardement tardif, s'il a eu lieu, irait du 14 au 22 ; l'oxygène franchit son premier seuil le 28 octobre vers 17 h 30, oscille un peu plus de cinq jours et s'installe le 3 novembre vers 7 h du matin — depuis les océans des zircons, près de deux mois cosmiques, pendant lesquels la Terre a de l'eau liquide et un air sans oxygène libre.*
- 4. La cause de ce changement est biologique : on l'attribue aux cyanobactéries, des micro-organismes dont la photosynthèse rejette de l'oxygène, et ce qu'ils sont, depuis quand ils existent et de quoi ils sont faits, c'est l'affaire des chapitres suivants ; l'eau et l'air sont en place ; ce qui les changera est vivant.*

Ce dont la vie est faite

storyboard · 6 plan(s)

Le corps humain est pesé, puis dénombré : à la masse, il doit 90 % aux étoiles ; aux atomes, trois sur cinq au premier jour. Les éléments majeurs sont rapportés à leurs usines, le premier jour pour l'hydrogène, les vents d'étoiles pour une bonne part du carbone et de l'azote, les supernovas pour l'oxygène ; les éléments mineurs, phosphore, soufre, calcium, potassium, fer, à des sites que les modèles reproduisent encore mal. La formule « poussière d'étoiles » est corrigée pour de bon.

Le storyboard : les plans du chapitre, chacun avec son cadre et ses micro-récits, dans l'ordre.

A Peser, puis compter

Un corps d'adulte posé sur une balance ; six éléments qui font 99 % de ce qu'il pèse, cinquante-quatre autres pour le centième qui reste ; l'eau qui fait un peu plus de la moitié de ce poids, et ses deux atomes légers pour un lourd ; le même corps compté atome par atome, un sept suivi de vingt-sept zéros · Aujourd'hui ; aucun événement, une mesure prise deux fois · Plan d'entrée. Il entre par ce qu'on voit, un corps d'adulte sur une balance (R8), et reprend la chute du chapitre précédent par son objet, non par ses mots : ce qui changera l'eau et l'air est vivant, et le premier vivant que le livre rencontre est pesé. Ton d'inventaire d'abord, en fractions (deux tiers, un cinquième, un dixième) plutôt qu'en pourcentages, les pourcentages gardés à portée. L'eau revient du chapitre précédent avec ce qu'il n'avait pas dit : 48 et 58, un peu plus de la moitié de l'hydrogène et près des trois quarts de l'oxygène du corps pris dans l'eau — c'est l'eau qui fait peser l'oxygène si lourd, et l'ordre des phrases le montre sans l'expliquer (R1). Le paragraphe hors verrou range les moyennes comme des moyennes (eau, graisse, dix points entre femmes et hommes, l'adulte « moyen » sans masse dite). Le dernier paragraphe compte au lieu de peser, et le refrain du chapitre, peser / compter, est posé par l'inversion, dite en deux poids d'atomes (seize fois, douze fois) ; l'arithmétique tient en une phrase, et la chute ne conclut rien : elle dit l'ordre.

1. Un corps d'adulte posé sur une balance est d'abord de l'oxygène, près des deux tiers de ce qu'il pèse, 65 % ; puis du carbone, un peu moins d'un cinquième, 18,5 % ; l'hydrogène ne vient qu'en troisième, avec moins d'un dixième, 9,5 %, et derrière lui l'azote, 2,6 %, le calcium, 1,3 %, le phosphore, 0,6 % — ces six-là font 99 % de la masse, et les cinquante-quatre autres sortes d'atomes qu'on y détecte, le fer du sang parmi elles, se partagent le centième qui reste.
2. Plus de la moitié de ce poids est de l'eau, 53 % en moyenne, 48 chez les femmes et 58 chez les hommes, à six ou huit points près d'une personne à l'autre ; 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, de sorte que l'eau d'un corps porte un peu plus de la moitié de tout son hydrogène et près des trois quarts de tout son oxygène — le reste des deux est pris dans les autres molécules, avec le carbone, l'azote et le phosphore.
3. Ces chiffres sont des moyennes, et ils bougent d'une personne à l'autre avec l'eau et la graisse : dix points d'eau séparent la moyenne des femmes de celle des hommes, 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 donnée par leur source, et rien de ce que le chapitre tire d'eux ne tient à la première décimale.
4. On peut aussi compter au lieu de peser : un adulte compte environ 7×10^{27} atomes, un sept suivi de vingt-sept zéros, et comptés, ces atomes sont d'abord de l'hydrogène, un peu plus de six sur dix, l'oxygène n'en fait plus qu'un sur quatre, le carbone un sur huit — l'inversion tient au poids des atomes, un atome d'oxygène pèse seize fois un atome d'hydrogène, un atome de carbone douze fois, il faut beaucoup d'hydrogène pour faire peu de masse et peu d'oxygène pour en faire beaucoup ; pesé, le corps est d'abord de l'oxygène ; compté, il est d'abord de l'hydrogène, et l'ordre ne tient à aucun arrondi : l'élément le plus léger est aussi le plus nombreux.

B Ce que les étoiles ne font pas

Le gaz de l'Univers entier entre la troisième et la vingtième minute ; des étoiles qui changent leur hydrogène en hélium et n'en re-font jamais ; un proton qui a été le gaz d'une nébuleuse, l'eau d'un océan, la nourriture d'un repas ; le premier dixième de microseconde du 1er janvier, avant la première lumière de minuit et quart ; l'hélium de la photosphère du Soleil, absent du corps · De la troisième à la vingtième minute après le début de l'expansion ; 0,09 microseconde du 1er janvier sur l'année cosmique ; minuit et quart pour la première lumière ; aujourd'hui · Le plan de la première usine, qui n'a pas à refaire le chapitre des trois minutes ni le premier plan du chapitre précédent : le bilan des premières minutes se dit en une phrase, comme un bilan, avec l'arrêt faute de masse 5 et de masse 8, et le renvoi tient lieu de démonstration. Le second paragraphe est une déduction par la suite des faits (les étoiles consomment, aucune ne refait, la quantité ne fait que baisser, donc chaque atome d'hydrogène du corps a la même date), sans « donc » si l'ordre suffit. Le paragraphe hors verrou est l'image propre du chapitre, le proton qui traverse une nébuleuse, une roche, un océan, un repas sans que son âge bouge — c'est le seul paragraphe lyrique du plan, et il tient à une distinction sèche (la chimie défait les liaisons, pas les noyaux). La microseconde se montre contre la première lumière de minuit et quart, déjà placée par les chapitres de janvier. La chute est l'hélium : ce qui manque, dit par ce qu'il est (un quart du premier jour, 24,2 % du Soleil) avant ce qu'il ne fait pas (se lier), avec le néon et l'argon du chapitre précédent rappelés en une incise, sans reprendre « qu'aucune roche ne garde ».

1. *L'hydrogène de ce corps a une seule origine, et elle est courte : entre la troisième et la vingtième minute après le début de l'expansion, le gaz de l'Univers entier fait de l'hydrogène, de l'hélium et des traces de lithium, et rien de plus, parce qu'il n'existe aucun noyau stable à cinq ni à huit nucléons et que la chaîne s'y arrête — le chapitre des trois minutes l'a raconté, et il suffit ici d'en retenir le bilan.*
2. *Depuis ces vingt minutes, rien dans l'Univers n'a refait d'hydrogène en quantité : les étoiles en consomment, leur premier travail est de le changer en hélium, elles font ensuite, selon leur masse, du carbone, de l'oxygène et plus lourd, mais jamais d'hydrogène, et la quantité d'hydrogène de l'Univers n'a fait que baisser — chaque atome d'hydrogène d'un corps, les six sur dix, qu'il soit pris dans l'eau ou dans une autre molécule, porte la même date de fabrication, celle des premières minutes.*
3. *Ce qui date de là est le noyau, un proton : les molécules dont il a fait partie ont changé un nombre de fois qu'on ne compte pas, il a pu être le gaz d'une nébuleuse, l'eau d'une roche ou d'un océan, la nourriture d'un repas, la chimie défait et refait les liaisons entre atomes sans toucher aux noyaux, seules les réactions des étoiles changent un noyau en un autre, et elles détruisent l'hydrogène au lieu d'en faire — aucun de ces passages n'a touché à son âge.*
4. *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, 0,09 microseconde : la matière la plus nombreuse d'un corps a été faite là, bien avant que la première lumière ne se libère, vers minuit et quart.*
5. *L'autre grand produit de ces minutes manque : l'hélium fait un quart de la masse sortie du premier jour et 24,2 % de la photosphère du Soleil, la couche d'où part sa lumière, et il est absent du corps, parce qu'il ne se lie à rien, ne forme aucune molécule et ne peut entrer dans aucune de celles dont un corps est fait — le chapitre précédent a rencontré la même propriété chez le néon et l'argon, que la Terre n'a pas su retenir ; des deux grands produits du premier jour, un corps n'a gardé que l'hydrogène.*

c Les grandes usines

Douze nucléons dans un noyau de carbone, quatorze dans un azote, seize dans un oxygène ; le cœur calme d'étoiles massives et l'écroulement de leur cœur de fer ; des géantes en fin de vie qui laissent partir leurs couches dans un vent ; un modèle qui fait naître dans une galaxie des étoiles de toutes masses ; deux noyaux de carbone 12, le même · Des millions d'années de vie calme, puis une explosion ; un vent lent ; aujourd'hui pour les modèles · Le plan de la seconde usine, et il reste sec : une règle, puis deux lignes du corps rapportées chacune à son mode de sortie de l'étoile — jetée par une explosion, laissée aller par un vent —, puis le statut de ces parts. Kobayashi, Karakas et Lugaro entrent par leur règle, et la règle se montre en comptant les nucléons des éléments du corps, un à un, ce que ni le chapitre de la forge ni le précédent n'ont fait. L'oxygène se dit par son enfermement (fait pendant la vie calme, gardé jusqu'à la mort) avant sa libération, pour que l'ordre des faits porte la cause (R1) ; « surtout » est glosé une fois, comme le mot d'une source principale. Le carbone et l'azote corrigent l'image reçue par la seule suite des faits : ces étoiles n'explorent pas, elles rendent par des vents. Le dernier paragraphe fait voir 1.11 par deux noyaux identiques plutôt que par une phrase sur les modèles ; la migration du Soleil reste à l'essai.

- 1. Un noyau de carbone compte douze nucléons, un noyau d'azote quatorze, un noyau d'oxygène seize, et Chiaki Kobayashi, Amanda Karakas et Maria Lugaro en font la règle : les éléments de masse douze ou plus, du carbone à l'uranium, ne sont pas produits pendant le Big Bang, ils sont formés à l'intérieur des étoiles — le calcium, le phosphore et les traces de tous les autres éléments du corps sont au-delà de la limite comme ces trois-là, et savoir qu'ils viennent des étoiles ne dit pas encore de quelles étoiles ; la réponse sort de modèles 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.*
- 2. L'oxygène appartient à la famille dite alpha, avec le magnésium, le silicium, le soufre et le calcium : ces éléments sont surtout produits dans les étoiles massives, pendant leur vie calme, et restent enfermés en elles jusqu'à ce que leur cœur de fer s'écroule et que l'explosion qui suit, la supernova à effondrement de cœur, les jette au dehors — les deux tiers du poids d'un corps ont été faits ainsi, au cœur d'étoiles massives, et libérés par cette fin violente, et « surtout » dit la source principale dans le modèle, sans dire que tout l'oxygène en vient.*
- 3. Le carbone et l'azote ont une autre histoire pour la moitié de leurs atomes : environ la moitié vient d'étoiles de masse faible ou moyenne, pendant la phase de fin de vie que les astronomes appellent branche asymptotique des géantes, ou AGB, et ces étoiles n'explorent pas, elles rendent leur matière par des vents, en perdant peu à peu leurs couches extérieures — le carbone qui fait 18,5 % du poids d'un corps et l'azote qui en fait 2,6 % doivent à peu près la moitié de leurs atomes à des étoiles mourantes qui ont soufflé leur enveloppe.*
- 4. Ces partages sont des sorties de modèles d'évolution chimique, et ils disent d'où vient en moyenne le carbone ou l'oxygène de la matière galactique, pas l'histoire d'un atome en particulier : un noyau de carbone 12 soufflé par une géante mourante est le même qu'un noyau de carbone 12 jeté par une supernova, rien sur un atome ne dit l'étoile dont il sort, et ces parts valent pour la Galaxie, pas pour un corps.*

▯ Le dernier centième

Dans un adulte de soixante-dix kilos, 175 grammes de soufre, une centaine de grammes de potassium, autant de sodium et de chlore, 35 grammes de magnésium, 4 grammes de fer, une dizaine de milligrammes d'iode ; le carbone qui fusionne au-delà de 500 millions de degrés, l'oxygène entre 1,5 et 2,6 milliards ; des naines blanches pour quatre atomes de calcium sur dix ; les débris encore jeunes de Cassiopée A, vus en infrarouge ; des modèles qui font six fois trop peu de potassium · Mille ans environ, puis quelques jours à quelques années, dans une étoile de 25 masses solaires qui a brûlé son hydrogène dix millions d'années ; 2013 ; aujourd'hui · Le plan des petites lignes, et il entre par des grammes qu'on voit : un adulte de soixante-dix kilos, le soufre, le sel, le fer, l'iode, pesés. Le ton est celui d'une hiérarchie de feux dite par ses durées (mille ans, puis quelques jours à quelques années), pas par des étages ; le sel du corps et le potassium des nerfs en sortent par la suite des faits. « Surtout » n'est pas « tout » se dit une fois, par le calcium et le soufre des naines blanches, au conditionnel que l'essai pose (si le modèle est juste). Le fer entre par les deux explosions qui le font, et le partage se dit avec son flottement (la moitié du pic, 60 % du fer seul) comme un choix de modèle. Le dernier paragraphe est le seul moment du chapitre où une usine est vue en train de travailler — Koo, Cassiopée A, 2013, cent fois —, aussitôt mis en regard de ce que les modèles ne savent pas faire : le phosphore disputé, le potassium six fois trop rare ; les remèdes sont une liste d'hypothèses, et la chute dit le partage de ce qu'on sait (où) et de ce qu'on ne sait pas (combien). Les noms des équipes du phosphore, hors Koo, restent à l'essai.

- 1. Dans un adulte de soixante-dix kilos, après les six éléments qui font presque tout, il reste 175 grammes de soufre, une centaine de grammes de potassium, autant de sodium et autant de chlore, 35 grammes de magnésium, 4 grammes de fer et une dizaine de milligrammes d'iode ; ces onze éléments sont tous nécessaires à la vie, plus d'une douzaine d'autres le sont à l'état de traces, et aucun n'est primordial, tous ont un noyau de masse douze ou plus — la question est seulement de savoir quelles étoiles, et avec quelle certitude.*
- 2. La plupart sortent des mêmes étoiles massives, à des profondeurs et des chaleurs différentes : au-delà de 500 millions de degrés, le carbone fusionne et laisse de l'oxygène, du néon, du sodium et du magnésium, mille ans environ pour une étoile de 25 masses solaires qui a brûlé son hydrogène dix millions d'années ; plus profond, entre 1,5 et 2,6 milliards de degrés, l'oxygène fusionne à son tour en silicium, soufre, chlore, argon, potassium et calcium, et le cœur l'épuise en quelques jours à quelques années ; l'explosion disperse le tout, et le sel d'un corps, sodium et chlore, et le potassium dont dépendent les nerfs sortent ainsi des derniers milliers d'années, puis des dernières années, d'étoiles massives — le calcium et le soufre rappellent que « surtout » n'est pas « tout » : dans le même modèle, 39 % du calcium et 29 % du soufre viennent de naines blanches qui explosent, et le calcium des os doit près de six atomes sur dix aux étoiles massives et près de quatre aux naines blanches, si le modèle est juste.*
- 3. Le fer naît de la combustion explosive du silicium, et deux sortes d'explosions le produisent, les supernovas de type Ia, où une naine blanche explose dans un système double, deux étoiles qui tournent l'une autour de l'autre, et les supernovas à effondrement de cœur : la moitié des éléments du pic du fer, du chrome au zinc, vient des Ia, et pour le fer seul le modèle ne leur en attribue que 60 %, le reste venant surtout d'hypernovas, des explosions d'étoiles de 20 à 50 masses solaires plus énergiques que les supernovas ordinaires — le poids donné à celles-ci est un choix du modèle, pas une mesure, et les quatre grammes de fer d'un adulte renvoient pour moitié ou un peu plus à des naines blanches, pour le reste à des étoiles massives qui ont explosé.*
- 4. Un seul de ces éléments mineurs a été vu en train de naître : en 2013, Bon-Chul Koo et ses coauteurs observent en infrarouge les débris encore jeunes de la supernova Cassiopée A, et le phosphore y est jusqu'à cent fois plus abondant, rapporté au fer, que dans la moyenne de la Voie lactée ; la quantité, elle, fait débat, deux équipes manquent de phosphore dans leurs modèles et une troisième n'en manque pas, et le potassium est le cas le plus net d'un échec reconnu, les modèles en fabriquent six fois moins qu'on n'en mesure dans les étoiles, les remèdes proposés — les neutrinos d'une supernova qui frappent les noyaux, la rotation des étoiles, la fusion de deux couches en combustion — sont des hypothèses, et pour le phosphore comme pour le potassium d'un corps on sait dans quelles étoiles ils ont été faits, pas encore combien chaque sorte d'étoile en a fait.*

E Le compte fermé

Deux comptes qui se croisent sur une ligne, celle de l'hydrogène ; le premier dixième de microseconde du 1er janvier et huit mois d'étoiles ; les plus vieux solides du Système solaire et le 2 septembre vers cinq heures du matin ; des étoiles mortes avant le nuage solaire ; une formule pesée puis comptée ; une balance et une molécule d'eau · Le 1er janvier, 0,09 microseconde ; de janvier à la fin d'août ; le 2 septembre vers cinq heures du matin, 4 567 millions d'années ; aujourd'hui · Le plan où les deux tableaux se croisent, et le refrain peser / compter y est résolu, une fois. Il entre par la ligne unique de l'hydrogène, qui suffit à partager le corps en deux origines, et donne le compte des deux côtés en fractions qui se voient (un dixième du poids et six atomes sur dix ; neuf dixièmes et moins de quatre). La date butoir est une heure du calendrier, le 2 septembre vers cinq heures du matin, pas la fin d'août, et le plan dit où ces étoiles sont mortes dans l'année (de janvier à la fin d'août) sans déplier le calendrier, qui est au chapitre suivant. Le partage entre étoiles se donne comme ordres de grandeur, et il établit par la suite des nombres qu'une part du corps n'est jamais passée par une explosion. La formule est citée une fois, entre guillemets, avec son « nous » dedans, et corrigée en deux temps (vrai si l'on pèse, faux si l'on compte) ; le chapitre de la forge l'avait promise sans chiffre. Le paragraphe hors verrou dit pourquoi les deux comptes sont légitimes (une balance, une molécule) et ferme sur le calendrier ramassé en une phrase à trois membres, puis sur ce que le vivant a fait et n'a pas fait — un fait, pas une morale (R4).

- 1. Les deux comptes se croisent sur une seule ligne, celle de l'hydrogène : tout ce qui y est vient des premières minutes, tout ce qui n'y est pas vient des étoiles, et le partage d'un corps entre ses deux origines se lit là — le premier jour fournit environ 9,5 % de la masse et 62 % des atomes, environ 4×10^{27} atomes, quatre sur les sept de l'inventaire ; les étoiles fournissent environ 90 % de la masse et 38 % des atomes, $2,7 \times 10^{27}$; d'un côté un peu moins d'un dixième du poids mais six atomes sur dix, de l'autre les neuf dixièmes du poids mais moins de quatre atomes sur dix.*
- 2. La seconde ligne a une date butoir, la naissance du Soleil : les plus vieux solides du Système solaire ont 4 567 millions d'années, le chapitre du Soleil a dit comment on les date, et sur l'année cosmique cela tombe le 2 septembre, vers cinq heures du matin, pas à la fin d'août — les éléments que les étoiles ont forgés pour un corps l'ont été avant cette heure, dans des étoiles mortes avant que le nuage solaire ne se forme, entre les premières étoiles de janvier et la fin du mois d'août.*
- 3. Le partage entre étoiles se chiffre aussi, avec moins de précision : l'oxygène, 65 % de la masse, vient surtout des étoiles massives et de leurs supernovas, et en gros les deux tiers de la masse d'un corps sortent d'étoiles massives qui ont explosé ; la moitié du carbone et de l'azote vient des vents de géantes AGB, environ 9 % de la masse pour le carbone et un peu plus de 1 % pour l'azote, à peu près un dixième du corps soufflé par des étoiles mourantes sans explosion, un atome sur quinze en nombre ; les naines blanches, par le calcium et le fer, ajoutent de l'ordre d'un demi-centième — ce sont des ordres de grandeur, des proportions approchées multipliées par des moyennes, et ils suffisent à établir qu'une part du corps n'est jamais passée par une explosion.*
- 4. « 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 de la forge avait posé cette correction sans pouvoir la chiffrer, et le tableau du corps la formule exactement : poussière d'étoiles pour neuf dixièmes du poids, matière du premier jour pour six atomes sur dix.*
- 5. Les deux comptes sont légitimes et ne répondent pas à la même question : la masse est ce que mesure une balance, 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, une molécule d'eau prend deux hydrogènes pour un oxygène quel que soit leur poids, et pour savoir de quels atomes le vivant est construit c'est le nombre qui compte — six atomes sur dix d'un corps ont été faits dans le premier dixième de microseconde de l'année cosmique, les quatre autres au long des huit mois qui suivent, dans des étoiles massives qui ont explosé, des étoiles moyennes qui ont soufflé leur enveloppe, des naines blanches qui ont sauté ; tous ont attendu le 2 septembre pour se trouver réunis dans un même nuage, puis dans un disque, puis sur une planète ; le vivant n'a fabriqué aucun noyau, il a assemblé ce que ces deux usines avaient laissé.*

F Là où la chaîne s'arrête

Les maillons de la chaîne, chacun avec sa mesure : le deutérium retrouvé dans des nuages lointains, le phosphore dans les débris d'une supernova, les horloges radioactives, les signatures de l'eau ; un ballon de 1952 où des molécules organiques apparaissent ; une seule sorte de molécule pour deux rôles ; des sources chaudes au fond des océans et des mares de surface ; les stromatolithes de Dresser, en Australie-Occidentale ; une fenêtre du 8 au 30 septembre · 1952 ; entre 4,32 et 3,48 milliards d'années ; du 8 septembre, six jours après le Soleil, au 30 septembre au soir ; trois semaines cosmiques, 840 millions d'années · Plan de fermeture, et c'est un manque, dit en ordre : d'abord ce que chaque maillon avait (un mécanisme, une mesure), énuméré par ses objets pour qu'on voie la chaîne tenir jusqu'au dernier maillon ; puis les trois repères de l'essai, chacun avec son statut en mots de la source (« n'a pas été observé », « loin d'être compris », « jugent »). Miller et Urey entrent par une expérience et sortent par ce qu'ils n'ont pas fait ; le monde ARN est une hypothèse, dite par les deux rôles qu'une seule molécule aurait tenus ; le débat de méthode et le lieu sont un paragraphe hors verrou, sec, avec ce qui départagerait. La fenêtre se donne par ses deux bornes et par ses dates cosmiques, et Dresser n'est qu'une borne nommée ici — le chapitre suivant possède les stromatolithes et le dépliage de septembre. La chute met face à face les deux savoirs du chapitre, l'hydrogène daté à la minute et le passage sans mécanisme, et tend la main au chapitre suivant par la fenêtre, sans rien conclure ; le mystère n'est nulle part ailleurs que dans l'histoire (R5).

- 1. Jusqu'ici, chaque maillon de la chaîne avait un mécanisme décrit et une mesure pour le vérifier : le deutérium que prédisent les premières minutes est retrouvé dans des nuages lointains à un pour cent près, la forge des étoiles a ses réactions et ses rendements et le phosphore a été vu dans les débris d'une supernova, l'âge du Système solaire a ses horloges radioactives, l'eau de la Terre a ses signatures isotopiques — on sait d'où vient chaque atome du vivant, et au passage du non-vivant au vivant la chaîne n'a plus de mécanisme établi.*
- 2. Ce passage n'a pas été observé expérimentalement, aucune expérience n'a fait naître un organisme de molécules inertes, et même rebâtir, à partir de composants simples, le dernier ancêtre commun de tous les vivants actuels reste loin d'être compris ; le premier repère est une expérience, en 1952 Stanley Miller et Harold Urey montrent que des molécules organiques, bâties autour du carbone comme celles des êtres vivants, se forment spontanément à partir de composés plus simples — une partie des briques du vivant n'a pas besoin du vivant pour apparaître, et 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, et Miller et Urey n'ont pas recréé la vie.*
- 3. Le deuxième repère est une hypothèse, le monde ARN : dans une cellule d'aujourd'hui, l'ADN garde l'information héréditaire et les protéines accélèrent les réactions chimiques, et l'hypothèse décrit une Terre primitive où une seule sorte de molécule, l'ARN, aurait tenu les deux rôles, se copier et catalyser, avant l'ADN et avant les protéines ; beaucoup de chercheurs jugent qu'un tel monde a dû précéder la vie à ADN, et « jugent » dit le statut — une reconstruction plausible, soutenue par une large part de la communauté, pas un résultat.*
- 4. Le troisième repère est un débat de méthode : les approches « réplique d'abord » cherchent comment sont apparues des molécules capables de se copier elles-mêmes, les approches « métabolisme d'abord » comment une chimie entretenue sans organisme a pu fournir leurs précurseurs, et elles ne s'opposent pas sur les ingrédients mais sur l'ordre, l'information d'abord ou la chimie qui l'alimente ; le lieu reste ouvert de la même manière, des sources hydrothermales où l'eau chauffée par la roche sort du fond des océans, ou des mares de surface, et ce qui 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 mène à l'autre.*
- 5. On connaît en revanche la fenêtre : d'après le registre géologique, la vie est très probablement apparue entre 4,32 et 3,48 milliards d'années, la borne récente est l'âge des stromatolithes de Dresser, en Australie-Occidentale, des structures que la plupart des scientifiques attribuent à des communautés de microbes, et la borne ancienne est proche des océans habitables de Frances Westall, 4,34 ; sur l'année cosmique, la fenêtre s'ouvre le 8 septembre, six jours après la naissance du Soleil, et se ferme le 30 au soir, trois semaines cosmiques, 840 millions d'années, sur une planète qui avait déjà de l'eau liquide — pour l'hydrogène d'un 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, une fenêtre de trois semaines cosmiques, du 8 au 30 septembre, et aucun mécanisme observé.*

Les dernières secondes de décembre

des premières traces de vie ($\sim 3,5$ Ga, candidats plus anciens contestés) à aujourd'hui

storyboard · 8 plan(s)

Le chapitre déplie l'année cosmique, utilisée par fragments depuis le premier jour, à partir du 2 septembre, où naît le Soleil (la datation du Soleil a été faite au chapitre « Le Soleil arrive tard », on y renvoie). Des océans existent peut-être dès le 8 septembre, et les horloges moléculaires placent l'ancêtre commun de tout le vivant entre le 8 et le 14, mais c'est un résultat de modèle. Les roches ne donnent une trace sûre que le 30 septembre : les stromatolithes de Dresser, en Australie, datés de 3,48 milliards d'années. 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. Comment la vie est née reste inconnu. On sait dans quelle fenêtre elle est apparue, pas par quel mécanisme. Ensuite le vivant attend. Il reste microbien pendant deux mois. Les cyanobactéries existent peut-être dès le 21 octobre, mais l'oxygène n'entre dans l'air que du 27 octobre à début novembre, et il oscille avant de s'installer. La cellule à noyau, née de l'union d'une archée et d'une bactérie, apparaît vers la mi-novembre. Les animaux surgissent dans les fossiles le 17 décembre, avec le Cambrien, mais leurs lignées divergent plus tôt. Cinq grandes extinctions, du 20 au 30 décembre, dont l'astéroïde du 30 au matin, rythment la fin de l'année. Le 31 décembre, les lignées humaine et chimpanzé se séparent entre 18 h 17 et 19 h 33. Homo paraît à 22 h 13, sapiens à 23 h 48, sort d'Afrique vers 23 h 56. L'écriture arrive à 23 h 59 min 48 s. Le chapitre se clôt en distinguant les trois « histoires humaines » que l'image confond : douze secondes pour l'histoire écrite, douze minutes pour l'espèce, quatre heures et demie pour la lignée. Tout ce qui s'est passé depuis le 2 septembre s'est passé dans un Univers dont l'expansion accélère déjà : c'est là que reprend la partie suivante.

Le storyboard : les plans du chapitre, chacun avec son cadre et ses micro-récits, dans l'ordre.

A Une année, et sa règle

Un livre de 1977 et une série télévisée de 1980 ; une règle de trois, 13,8 milliards d'années pour 365 jours ; le premier dixième de microseconde du 1er janvier, minuit et quart, le 8 janvier vers 10 h ; les plus vieux solides du Système solaire et deux uraniums dans un même grain ; le 2 septembre vers 5 h du matin, et une quarantaine de minutes plus tôt ; mille grammes de surface solaire ; des planètes, une Lune, un zircon australien · 1977, 1980 ; de la troisième à la vingtième minute ; 380 000 ans ; 280 millions d'années ; 4 567 millions d'années, peut-être un million de plus ; 9,2 milliards d'années après le Big Bang, les deux tiers ; les 2, 3 à 5 et 6 septembre · Plan d'entrée, qui prend la chute du chapitre précédent par son objet et non par ses mots : les dates qu'elle donnait (du 8 au 30 septembre) ont une règle, et le chapitre commence par la poser. Il entre par un personnage (R8), Sagan et son livre, et la règle se dit en quatre durées qui se voient, une fois pour tout le chapitre ; la seule phrase de statut est celle de l'essai, la conversion n'a pas d'incertitude. Le début saturé reprend en une phrase ce que les chapitres de janvier ont placé, sans refaire la formule de la première lumière (« tout tient dans la première milliseconde », dépensée) ; le Soleil entre par ses pierres et par le renvoi au chapitre qui les a datées, l'écart d'un million d'années se voit en minutes sur le même matin, et « fin août » n'est que l'arrondi, à côté du calcul. Le quatrième paragraphe porte en une ligne ce que le chapitre du Soleil a établi de l'étoile (1.6, 1.7, 1.10) et tend la main au dernier chapitre du livre (1.12, par le seul renvoi que l'essai fait) ; il reste sec, c'est un rappel. Le dernier paragraphe range en trois dates ce que trois chapitres ont raconté, sans « il reste quatre mois » (chute du Soleil), et la chute est la phrase de l'essai, la seule qui respire.

1. En 1977, dans *Les Dragons de l'Éden*, puis en 1980 à la télévision, dans la série *Cosmos*, l'astronome américain Carl Sagan ramène l'histoire de l'Univers à une seule année ; recalculée sur 13,8 milliards d'années pour 365 jours, le 1er janvier à minuit pour le début conventionnel des horloges et le 31 décembre à minuit pour le présent, la règle donne 37,8 millions d'années à chaque jour, 1,58 million à chaque heure, 26 000 ans à la minute et 438 ans à la seconde — la conversion ne comporte aucune incertitude, et celles qu'on lira viennent toutes des âges convertis.
2. Le début de l'année est saturé : les noyaux d'hydrogène et d'hélium, fabriqués entre la troisième et la vingtième minute après le début, sont achevés dans le premier dixième de microseconde du 1er janvier ; la première lumière, celle qui arrive aujourd'hui comme fond diffus, part vers minuit et quart, quand l'Univers a 380 000 ans ; la galaxie MoM-z14, vue telle qu'elle était 280 millions d'années après le début, brille le 8 janvier vers 10 h — et le Soleil arrive bien plus tard.
3. Les plus vieux solides du Système solaire ont 4 567 millions d'années, peut-être un million de plus, et le chapitre du Soleil a dit comment on les date, par deux uraniums qui se défont dans un même grain ; la soustraction place la naissance du Soleil environ 9,2 milliards d'années après le Big Bang, aux deux tiers de l'histoire cosmique, et sur l'année le 2 septembre vers 5 h du matin, la fin d'août si l'on arrondit — le million d'années en plus la recule d'une quarantaine de minutes sur le même matin.
4. Ce que ce chapitre a établi de l'étoile tient en une ligne : sur mille grammes de sa surface, sept cent quarante-quatre sont un hydrogène qu'aucune étoile n'a fait et quatorze tout le reste, reçus d'un gaz mêlé où les générations ne se comptent pas, dans une région de la Galaxie plus centrale et plus riche que celle où elle tourne aujourd'hui ; et le chapitre qui demande qui raconte 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.
5. Tout ce que les chapitres précédents ont placé dans cette fin d'année tient dans ses premiers jours : les planètes se forment le 2 septembre, la Lune naît entre le 3 et le 5, le plus vieux grain de Terre, un zircon australien, cristallise le 6 septembre et porte déjà l'indice d'une eau liquide en surface ; le reste de l'année appartient au vivant.

B Septembre : une vie déduite

Des océans « habitables » six jours après le Soleil ; trois à sept corps de plus de 500 km, chacun capable de vaporiser l'océan entier, et l'eau qui retombe en pluie ; une vie enfouie dans la roche ; un arbre sans groupe extérieur, des familles de gènes dédoublées avant LUCA, treize points de calibration ; une cellule déjà complète, sans oxygène, qui vit d'hydrogène et de gaz carbonique et se défend contre les virus · 4,34 milliards d'années, le 8 septembre ; le dernier grand impact vers 4,3 milliards d'années dans la moitié des simulations, vers 4 dans une sur dix ; 2024 ; 4 510 millions d'années à 10 près ; 4,2 milliards d'années, entre 4,09 et 4,33, du 8 au 14 septembre ; 100 à 200 millions d'années, trois à cinq jours · Le plan de ce qu'on déduit. Il entre par Westall et une date, et le mot « habitable » est aussitôt mis à l'épreuve par les simulations de Marchi, dites par leurs objets (des corps, un océan vaporisé, la pluie qui retombe) et par leur partage (la moitié, une sur dix) ; la stérilisation se dit par ce qu'il faudrait (un corps de 2 000 à 2 700 km), et la phrase de l'essai ferme : possible, pas à l'abri. LUCA entre par la méthode, montrée geste par geste (convertir des différences en temps, enraciner un arbre sans dehors, treize points, l'impact lunaire comme borne), pour que la date vienne après la méthode (R1) et que le statut soit visible avant d'être dit. Fournier est cité pour ce qu'il nie, le portrait est celui de l'essai, et la durée de Goldman et Becerra se voit en jours. Le dernier paragraphe est sec : les calibrations, deux réserves nommées, aucune contre-analyse, et la chute donne le statut en trois mots, résultat de modèle, récent, non confirmé.

- 1. La géologue Frances Westall place des océans « habitables » dès 4,34 milliards d'années, le 8 septembre, six jours après le Soleil, et le mot 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 reçoit trois à sept corps de plus de 500 km, chacun capable de vaporiser l'océan entier, le dernier vers 4,3 milliards d'années dans la moitié des simulations et vers 4 milliards dans une sur dix, et l'eau vaporisée retombe ensuite en pluie — vaporiser l'océan ne stérilise pas la planète, une vie enfouie dans la roche peut survivre, seule la fusion de toute la surface y suffirait et il y faudrait un corps de 2 000 à 2 700 km : au début de septembre, la vie devient possible sur Terre sans y être à l'abri.*
- 2. Aucune roche de cette époque ne montre de vie, et le premier argument pour une vie très précoce vient des gènes : tous les êtres vivants actuels descendent d'un dernier ancêtre commun universel, LUCA, qu'Edmund Moody et ses coauteurs datent en 2024 par une horloge moléculaire, en convertissant en temps le nombre de différences accumulées entre des gènes apparentés ; un arbre qui n'a aucun groupe extérieur ne s'enracine pas, ils le contournent avec des familles de gènes dédoublées avant LUCA, dont les deux copies se retrouvent chez les bactéries comme chez les archées, puis ancrent l'arbre par treize points de calibration, le plus ancien étant l'impact qui a formé la Lune, 4 510 millions d'années à 10 millions près, avant lequel aucune vie n'aurait survécu — le résultat est d'environ 4,2 milliards d'années, entre 4,09 et 4,33 selon le modèle d'horloge : LUCA vit entre le 8 et le 14 septembre, moins de deux semaines après la naissance du Soleil.*
- 3. 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 la fin de l'histoire de l'origine de la vie, et le portrait qu'en tirent Moody et ses coauteurs est celui d'une cellule déjà complète, sans oxygène, qui tire son énergie de l'hydrogène et du gaz carbonique et se défend déjà contre les virus — si LUCA a 4,2 milliards d'années, la vie est plus ancienne encore, et selon Aaron Goldman et Arturo Becerra le chemin de l'origine à LUCA aurait tenu en 100 à 200 millions d'années, trois à cinq jours de l'année.*
- 4. Le temps n'entre dans l'arbre que par les calibrations, et l'âge bouge si l'une d'elles est révisée ; 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, et ces objections sont des réserves, aucune contre-analyse publiée n'ayant proposé une autre date — LUCA vers 4,2 milliards d'années reste un résultat de modèle, récent, que rien dans les roches ne confirme.*

c Le 30 septembre

La formation de Dresser, en Australie-Occidentale, et des structures en couches bâties par des tapis de microbes ; le chert de Strelley Pool ; des carbonates d'Isua dégagés par la fonte de la neige, des cônes de 1 à 4 cm ; une douzaine de chercheurs sur l'affleurement en août 2019 ; des filaments d'hématite au Québec et un filon de 4 157 millions d'années ; un zircon de Jack Hills et son graphite ; des roches chauffées, écrasées, recristallisées · 3,48 milliards d'années, le 30 septembre vers 23 h ; 3,4 ; plus de 600 millions d'années, deux semaines et demie ; 3,7, le 25 septembre ; 2016, 2018, 2020, août 2019 ; de 3,75 à 4,32, et 4 157 millions d'années ; 4,1, le 14 septembre ; de 4,32 à 3,48, du 8 au 30 septembre · Le plan de ce qu'on voit, et il commence par la seule trace que la plupart acceptent : les stromatolithes de Dresser, que le chapitre précédent n'avait fait que nommer, sont décrits ici pour la première fois, par le geste des microbes (piéger des sédiments, couche après couche), et l'écart avec LUCA se voit en semaines. Les trois dossiers sont trois paragraphes secs, chacun avec ses dates, ses gestes et ses relectures, l'ordre des faits portant le doute sans mot d'évaluation : des cônes décrits, puis relus comme déformation, puis sans lamination, puis un affleurement où l'on repart « sans réel consensus » ; une hématite et un âge qui bouge, un filon qui le fixe ; un graphite compatible avec trois origines. L'obstacle commun se dit une fois, par ce que les roches font aux signes, et ce qui départagerait est donné avec la durée que Nutman lui-même comptait. Le dernier paragraphe est la fenêtre, et il ne reprend pas la chute du chapitre précédent : il dit la précision de la date (trois semaines) puis le statut des pistes, renvoyées en une liste, et la chute est un constat, non une morale (R4).

- 1. Les roches répondent plus tard, et plus sûrement : à partir de 3,5 milliards d'années, des signes de vie abondants apparaissent dans des roches mieux conservées, formées sans oxygène, et les plus anciens sont les stromatolithes de la formation de Dresser, en Australie-Occidentale, datés de 3,48 milliards d'années, des structures en couches que bâtissent des tapis de microbes en piégeant des sédiments, couche après couche, suivis vers 3,4 milliards d'années par les structures microbiennes du chert de Strelley Pool, dans la même région ; pour Dresser, la plupart des scientifiques acceptent l'origine biologique sans que d'autres explications soient tout à fait exclues, et cette première trace largement admise tombe le 30 septembre vers 23 h — entre LUCA et Dresser s'étendent plus de 600 millions d'années, deux semaines et demie de l'année, pendant lesquelles la vie est déduite des gènes et non vue dans les roches.*
- 2. Plusieurs candidats prétendent combler cet intervalle, et aucun n'est accepté : à Isua, au Groenland, dans des carbonates de 3,7 milliards d'années dégagés par la fonte de la neige, Allen Nutman et ses coauteurs décrivent en 2016 des stromatolithes de 1 à 4 cm de haut, antérieurs de 220 millions d'années à ceux de Dresser, le 25 septembre ; en 2018, Abigail Allwood et ses coauteurs, dont le spécialiste d'Isua Minik Rosing, y voient plus plausiblement des structures de déformation, formées dans la roche longtemps après son enfouissement, en 2020 une nouvelle étude ne trouve dans ces formes aucune lamination interne, leur litage apparent venant de l'altération inégale des surfaces, et en août 2019 une douzaine de chercheurs des deux camps et de tiers, réunis sur l'affleurement, repartent « sans réel consensus » mais d'accord sur un point, les indices ne franchissent pas la barre élevée qu'exige la plus ancienne trace de vie — il ne faut pas confondre ces formes avec le graphite d'Isua, un carbone que de nouvelles analyses jugent plutôt d'origine biologique.*
- 3. À Nuvvuagittuq, au Québec, des filaments d'hématite, un oxyde de fer, ont été lus comme des microfossiles de bactéries qui oxydaient le fer, et des processus non biologiques pourraient expliquer à la fois leur forme et leurs isotopes, l'âge de la roche étant lui-même disputé, de 3,75 milliards d'années selon les zircons des granites qui la recoupent à 4,32 selon une autre méthode, un filon qui la traverse ayant été daté en 2025 de 4 157 millions d'années, ce qui la fait au moins aussi vieille ; à Jack Hills, en Australie, un zircon de 4,1 milliards d'années, le 14 septembre, enferme un graphite dont les isotopes du carbone sont compatibles avec une origine biologique, mais aussi avec des processus de la croûte ou une origine extraterrestre — la plus ancienne trace chimique proposée, et elle est contestée.*
- 4. 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 par des roches mieux conservées et des signes abondants et variés, 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, et Nutman lui-même comptait en 2019 « cinq à dix ans » pour trancher le cas d'Isua.*
- 5. 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, et la date est connue à trois semaines près ; le mécanisme, lui, n'a pas été observé, et les pistes présentées au chapitre précédent, le monde ARN, l'ordre entre la réplication et le métabolisme, les sources hydrothermales ou les mares de surface, n'ont pas changé de statut : aucune n'est un résultat.*

▯ Deux mois de microbes

Des cyanobactéries dont la photosynthèse rejette de l'oxygène ; un oxygène qui franchit un seuil, oscille, s'installe ; une archée sans oxygène et une bactérie qui respire, unies, et la mitochondrie ; le groupe de Ruyang, en Chine ; Grypania, une spirale ; les isotopes du chrome ; Bangiomorpha, une algue rouge ; des océans où les bactéries restent les seuls producteurs · 2,7 milliards d'années, le 21 octobre ; 2,45 à 2,32 ; 2,43, environ deux cents millions d'années, 2,22 ; 2,46 à 2,06 ; du 27 au 28 octobre, le 3 novembre, le 7 novembre ; une semaine cosmique ; 1,8 à 1,6, du 14 au 19 novembre ; 2,1 ; de 1,8 à 0,8, 0,1 % ; 1,047, le 4 décembre ; 720 millions d'années ; les deux tiers · Le plan de l'attente, et il est fait de trois durées : une semaine entre les premières cyanobactéries et l'oxygène libre, si la date ancienne tient ; un mois de discrétion pour la cellule à noyau ; les deux tiers de l'histoire pour les microbes. L'oxygène entre par renvoi au chapitre de l'eau, qui a raconté la Grande Oxydation, et ne garde ici que ses dates et son geste (franchir, osciller, s'installer), avec les deux présentations côte à côte ; le décalage se dit par l'alternative, sans trancher, et la phrase de l'essai ferme : c'est la date des cyanobactéries qui décide. L'eucaryote est l'image propre du plan, deux cellules qui s'unissent, dite par ses deux partenaires nommés et par ce que l'un devient ; sa date vient de fossiles qui « pourraient être », et le statut (« mal résolue ») est cité. Le dernier paragraphe est sec, isotopes du chrome et molécules fossiles, et la chute est la phrase de l'essai, les deux tiers, un fait qui se voit sur l'année.

- 1. 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, le 21 octobre, la date de cette invention restant discutée ; l'oxygène, lui, n'entre dans l'air que plus tard, et le chapitre de l'eau a raconté la Grande Oxydation — il 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, une présentation plus large la faisant courir de 2,46 à 2,06 : sur l'année, l'oxygène arrive entre le 27 et le 28 octobre, s'installe le 3 novembre, et la période large s'achève le 7 ; si les cyanobactéries existaient dès le 21 octobre, une semaine cosmique, plus de deux cents millions d'années, sépare les premières d'entre elles de l'oxygène libre dans l'air, si elles n'apparaissent que vers 2,45 milliards d'années le décalage disparaît presque, et c'est leur date qui décide de sa durée.*
- 2. La cellule à noyau, l'eucaryote, naît d'une union : une archée sans oxygène, parente des archées dites d'Asgard, s'associe à une bactérie qui respire l'oxygène, une alphaprotéobactérie, et cette bactérie devient la mitochondrie, la centrale énergétique des cellules actuelles ; 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, ce qui place la cellule complexe entre le 14 et le 19 novembre, Grypania, une forme spiralée jusqu'à 2,1 milliards d'années, reste contestée, et selon une autre synthèse le registre montre des eucaryotes dès 1,9 à 1,4 milliard d'années, avec une histoire ancienne « mal résolue ».*
- 3. 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 dépasse pas 0,1 % du niveau actuel, d'autres traceurs donnant des valeurs plus hautes, et la plus ancienne algue qui ait encore des descendants, l'algue rouge Bangiomorpha, est datée de 1,047 milliard d'années, le 4 décembre — 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 : pendant les deux tiers de son histoire, la vie terrestre a été microbienne.*

E La Terre blanche, puis les animaux

Des glaciers qui touchent la mer aux basses latitudes ; le gaz carbonique des volcans accumulé sous un ciel où la glace bloque l'altération des roches ; une bande d'eau libre à l'équateur, ou non ; des algues planctoniques qui prennent la mer ; les grands organismes d'Avalon ; un Dickinsonia avec du cholestérol ; les fossiles du Cambrien, où presque tous les embranchements apparaissent · 717 millions d'années, 57 à 59 millions d'années ; 635 ; les 13 et 14 décembre, le 14 au soir, le 15 vers 5 h ; 659 à 645 ; 833 à 650, du 9 au 14 décembre ; 575, le 16 décembre au soir ; 558, le 17 vers 6 h ; 538,8, le 17 vers 18 h ; 13 à 25 millions d'années, huit à seize heures ; avant 580 · Le plan où l'année change de rythme : après deux mois dits en semaines, décembre se lit en jours, puis en heures. La Terre blanche est le seul moment lyrique du plan, et elle se montre par ses causes dans l'ordre (la glace bloque l'altération, le gaz carbonique s'accumule, la glaciation cède), avec l'inconnue de l'équateur dite comme inconnue ; les algues prennent la mer entre deux glaces, en une proposition. Les animaux entrent par la façon de les chercher, et les deux lectures se succèdent sans être tranchées, les horloges d'abord (avec l'avertissement de leurs auteurs), la roche ensuite (Avalon, puis un Dickinsonia confirmé par une molécule) ; l'air du moment est dit en une incise. Le Cambrien garde ses guillemets, dure huit à seize heures, et la phrase statistique est citée pour ce qu'elle est ; la chute donne l'écart entre fossiles et lignées et ce qui le fait, des corps mous et des coquilles, sans « donc ».

- 1. 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, des glaciers touchent alors 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 ; on ignore encore si tout l'océan était gelé ou si une bande d'eau libre subsistait à l'équateur — sur l'année, la Terre blanche occupe le 13 et le 14 décembre, revient après un répit le 14 au soir et repart le 15 vers 5 h, et entre les deux glaciations, vers 659 à 645 millions d'années, les algues planctoniques prennent la mer.*
- 2. Les animaux viennent ensuite, et 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, avec l'avertissement de leurs auteurs que ces dates sont trop imprécises pour tester un lien avec les glaciations, et la plus ancienne trace attribuée aux éponges, une molécule fossile du Cryogénien, s'est révélée probablement d'origine algale ; dans les roches, les premiers grands organismes, ceux d'Avalon, apparaissent vers 575 millions d'années, le 16 décembre au soir, et un Dickinsonia de 558 millions d'années contient du cholestérol, la marque de la vie animale — l'un des plus anciens animaux confirmés, le 17 décembre vers 6 h, sous un air dont l'oxygène, intermédiaire et très variable, ne se serait stabilisé près de son niveau actuel qu'à la fin du Paléozoïque.*
- 3. L'« explosion cambrienne » commence vers 538,8 millions d'années, le 17 décembre vers 18 h, dure de 13 à 25 millions d'années, huit à seize heures de l'année, et presque tous les embranchements animaux y font leur première apparition dans les fossiles ; 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 — les animaux surgissent dans les fossiles le 17 décembre alors que leurs lignées divergent quelques jours plus tôt, et la part de cet écart qui tient à la conservation, des corps mous qui ne fossilisent pas, des coquilles qui le font, reste débattue.*

F Cinq coupures

Cinq extinctions, à la fin de l'Ordovicien, du Dévonien, du Permien, du Trias et du Crétacé ; les éruptions géantes de Sibérie ; un astéroïde ; des mammifères aux côtés des dinosaures, puis sans eux ; Corral Bluffs, au Colorado ; Purgatorius, un petit mangeur d'insectes et de fruits du Montana ; trois continents sous un réchauffement de 5 à 8 °C ; l'Antarctique sous la glace ; des grands singes qui se ramifient l'un après l'autre · 445 à 444 millions d'années, le 20 décembre ; 372, le 22 ; 252, le 25 vers 8 h ; 201, le 26 ; 66, le 30 vers 6 h ; 100 000 ans, moins de quatre minutes ; 105 000 à 139 000 ans, quatre à cinq minutes ; 68 à 65 millions d'années ; 56, vers midi ; le 31 décembre vers 2 h 30 ; 25,2, vers 8 h ; de 12 h 30 à 16 h 20 ; 16 h 20 ; de 18 h 15 à 18 h 55 · Le plan des coupures, et il est sec : le tableau de l'essai devient une seule phrase à cinq membres, chaque crise avec sa date, son jour et sa perte, sans adjectif ; les deux causes connues sont dites en une proposition chacune, et le chiffre de cinq est rendu à ce qu'il est, une convention, avec ce qui le montre. Le second paragraphe est celui du rebond, où l'année change encore d'échelle (des minutes après un impact), et l'ordre des faits suffit : l'astéroïde frappe, les mammifères étaient là, ils se diversifient, un site les voit retrouver leur taille, un petit fossile du Montana vit quatre minutes plus tard, les génomes placent l'ancêtre des primates autour de l'impact, un réchauffement de midi répand les primates modernes. Le troisième paragraphe est l'après-midi du 31, dit comme un emploi du temps — glace, séparation, gibbons, orangs-outans, gorilles —, avec la réserve des sources sur la précision, et la chute est le chevauchement, qui tend la main à G sans l'annoncer.

- 1. La fin de l'année est rythmée par cinq grandes extinctions : à la fin de l'Ordovicien, il y a 445 à 444 millions d'années, le 20 décembre, 85 % des espèces disparaissent ; au Dévonien supérieur, il y a 372 millions d'années, le 22, au moins 70 % ; à la fin du Permien, il y a 252 millions d'années, le 25 vers 8 h, environ 81 % des espèces marines ; à la fin du Trias, il y a 201 millions d'années, le 26, 70 à 75 % ; à la fin du Crétacé, il y a 66 millions d'années, le 30 vers 6 h, 75 % — on attribue la crise du Permien au gaz carbonique des éruptions géantes de Sibérie, celle du Crétacé est liée à l'impact d'un astéroïde, et le chiffre de cinq est une convention : aucune mesure ne sépare nettement ces cinq crises des nombreuses autres, et d'autres méthodes de calcul changent le classement.*
- 2. L'astéroïde frappe le 30 décembre vers 6 h ; les mammifères existaient bien avant lui, aux côtés des dinosaures, et 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 de l'année, 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, les génomes placent l'ancêtre commun de tous les primates actuels entre 68 et 65 millions d'années, autour de l'impact, et 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.*
- 3. Le 31 décembre vers 2 h 30, l'Antarctique se couvre de glace ; 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, et 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 — ces trois dernières dates viennent d'horloges moléculaires résumées, que les sources ne donnent pas au million d'années près, et la fourchette des gorilles chevauche celle de la séparation suivante.*

G Le soir du 31 décembre

Un ancêtre commun et deux branches sœurs ; Sahelanthropus, au Tchad ; la mâchoire de Ledi, en Éthiopie ; le crâne de Yunxian 2, en Chine, reconstruit ; Jebel Irhoud, au Maroc ; des humains qui quittent l'Afrique et se mêlent en chemin à d'autres humains ; de l'art, des parures, des outils complexes ; quatre inventions de l'écriture et des signes qu'un lecteur ultérieur peut relire · 9 à 7 millions d'années, de 18 h 17 à 19 h 33 ; environ 7 ; 2,75 à 2,8, 22 h 13 ; 1,8 à 1,3, de 22 h 51 à 23 h 10 ; un million d'années, avant 23 h 22, 2025 ; vers 300 000 ans, 315 000 à 34 000 près, 23 h 48, et 23 h 52 chez Sagan ; 100 000 à 50 000 ans, de 23 h 56 à 23 h 58 ; 50 000 ans ; 3400 à 3100 avant notre ère, 23 h 59 min 48 s, et 47 s chez Sagan · Le plan du cadran, l'image propre du chapitre : un seul soir lu heure par heure, et chaque heure a son fossile, son lieu et son statut. Il entre par la séparation d'avec les chimpanzés, dite d'abord par ses heures, puis corrigée dans l'image reçue par la seule suite des faits (deux branches d'un même ancêtre), et Sahelanthropus entre disputé. Homo entre par une mâchoire, erectus par une sortie, Yunxian par une reconstruction de 2025, et le résultat est pesé exactement (la lignée reculée, l'espèce non, le lieu rouvert), avec la réserve de Stringer. Sapiens entre par une fourchette et un site, et la version de Sagan sert ici de mesure de ce qui a changé, une première fois (23 h 52) ; la sortie d'Afrique et les mélanges se disent en parts qui se voient, et la question de la modernité comportementale avec ce qui la départagerait. L'écriture ferme le soir : quatre inventions, la différence entre un aide-mémoire et un texte relisible, et la chute est une heure, douze secondes avant minuit, avec Sagan une seconde fois ; aucune phrase sur ce que cela signifie, le cadran suffit.

- 1. D'après la génétique, les lignées humaine et chimpanzé se séparent d'un ancêtre commun entre 9 et 7 millions d'années, le 31 décembre entre 18 h 17 et 19 h 33, et l'homme ne descend pas du chimpanzé : les deux espèces descendent d'un même ancêtre 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.*
- 2. Le genre Homo paraît à 22 h 13, avec son plus ancien représentant documenté, la mâchoire de Ledi, en Éthiopie, datée de 2,75 à 2,8 millions d'années ; Homo erectus sort d'Afrique le premier, entre 1,8 et 1,3 million d'années, entre 22 h 51 et 23 h 10, et 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, avant 23 h 22 — le coauteur Chris Stringer souligne que des fossiles africains de la même période n'ont pas pu être inclus, et le résultat recule l'âge de la lignée de sapiens, pas celui de l'espèce reconnaissable, et rouvre la question du lieu.*
- 3. Homo sapiens apparaît en Afrique vers 300 000 ans, entre 260 000 et 350 000 selon les indices : les plus anciens fossiles attribués à l'espèce viennent de Jebel Irhoud, au Maroc, Daniel Richter et ses coauteurs les datent de 315 000 ans à 34 000 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, et sur l'année sapiens arrive à 23 h 48, là où la version de Sagan disait 23 h 52, avec l'ancienne date d'environ 200 000 ans ; les humains modernes quittent l'Afrique il y a 100 000 à 50 000 ans, entre 23 h 56 et 23 h 58, et se mêlent en chemin à d'autres humains, tous les non-Africains portant 1,5 à 2,6 % d'ADN néandertalien et certaines populations de Mélanésie jusqu'à 6 % d'ADN dénisovien — on ignore encore si l'art, les parures et les outils complexes sont apparus brusquement vers 50 000 ans ou peu à peu au cours du Paléolithique moyen, et ce qui départagerait serait des traces de ces comportements nettement plus anciennes que 50 000 ans, assez nombreuses pour ne pas passer pour des exceptions.*
- 4. L'écriture arrive à la toute fin, inventée quatre fois sans que l'une copie l'autre, en Mésopotamie vers 3400 à 3100 avant notre ère, en Égypte vers 3250, en Chine avant 1250, en Mésoamérique avant le début de notre ère, et l'écriture véritable, celle dont un lecteur ultérieur peut reconstituer exactement l'énoncé, succède à des systèmes de symboles qui servaient d'aide-mémoire ; l'écriture mésopotamienne tombe à 23 h 59 min 48 s, douze secondes avant minuit, là où Sagan la plaçait à 23 h 59 min 47 s.*

H Trois histoires

Une formule qu'on dit souvent ; douze secondes, douze minutes, quatre heures et demie ; l'ère chrétienne et une vie de quatre-vingts ans ; un corps qui écrit, six atomes sur dix faits dans le premier dixième de microseconde ; la matière qui se dilue et l'énergie noire qui ne se dilue pas ; des supernovas lointaines en 1998 ; le 16 septembre · douze secondes ; 4,6 secondes ; un peu moins de deux dixièmes de seconde ; douze minutes, soixante fois plus ; 1 h 47 ; quatre heures et demie, près de six ; le premier dixième de microseconde, de la troisième à la vingtième minute ; de janvier à la fin d'août ; un peu moins de 10 milliards d'années, deux semaines après le Soleil, vers le 16 septembre ; 1998, 10 à 15 % · Plan de fermeture, en trois paragraphes, et c'est le seul où l'assertion 1.2 est prise au mot : la formule est citée une fois, entre guillemets, et l'année la sépare en trois durées qui se voient, une seconde pour une ère, deux dixièmes pour une vie, soixante fois pour une espèce ; le verdict de l'essai (exacte pour l'une, fausse pour les deux autres, vraie en un sens) est donné tel quel, et le dernier soir n'est pas commenté. Le second paragraphe est l'attestation du témoin (R4), par un seul geste et sans le mot : ce corps qui écrit depuis 23 h 59 min 48 s, dont six atomes sur dix datent du premier instant de l'année ; « poussière d'étoiles » est nommée en quatre mots, sans être refaite, la correction ayant été dépen-sée deux fois dans le livre, et la troisième et la vingtième minute reviennent pour 1.8 comme un rappel daté. Le troisième paragraphe est la date qui encadre tout, dite par ses causes dans l'ordre (la matière se dilue, l'énergie noire non, elle l'emporte) et par sa découverte en une proposition ; aucun lien de cause entre l'accélération et ce qui se passe sur Terre, et la chute est la phrase de l'essai, une liste de ce que le chapitre a placé, rendue à l'Univers où elle s'est passée, sans annonce de la suite.

1. *On dit souvent que « toute l'histoire humaine tient dans les dernières secondes du 31 décembre », et la formule confond trois histoires que l'année sépare : l'histoire au sens des historiens, celle qu'on lit dans des textes, commence avec l'écriture et occupe les douze dernières secondes, l'ère chrétienne en prend 4,6, une vie 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, les quatre heures et demie dernières, près de six si l'on retient la date la plus ancienne, et entre les deux le genre Homo occupe 1 h 47 — la formule est exacte pour la première histoire et fausse pour les deux autres, et elle reste vraie dans un sens : à l'échelle de l'année, même la lignée humaine est un événement du dernier soir.*
2. *L'année situe aussi la matière dont ces humains sont faits : le chapitre précédent 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, entre la troisième et la vingtième minute de l'Univers, les quatre autres ont été forgés dans des étoiles entre janvier et la fin d'août, et « poussière d'étoiles » ne vaut que pour ces quatre-là — 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.*
3. *Une dernière date encadre tout le chapitre, parce que l'Univers ne s'est pas contenté d'attendre pendant que la Terre se peuplait : au fil de l'expansion, la matière se dilue, l'énergie noire ne se dilue pas et finit par l'emporter, l'ère qu'elle domine commence un peu moins de 10 milliards d'années après le Big Bang, deux semaines après la naissance du Soleil, vers le 16 septembre, et 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 ; Dresser, l'oxygène, les animaux et les humains appartiennent tous à un Univers dont l'expansion accélère.*

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 [storyboard · 7 plan\(s\)](#)
2. Le tournant [storyboard · 6 plan\(s\)](#)
3. Deux mesures qui ne s'accordent pas [storyboard · 7 plan\(s\)](#)
4. Un ciel qui se vide [synopsis seul](#) [brouillon](#)

Ce qu'on ne voit pas

storyboard · 7 plan(s)

Des galaxies tournent trop vite, une masse absente dévie la lumière, et dans l'amas du Boulet la masse traverse la collision sans le gaz. La nucléosynthèse interdit que ce soit de la matière ordinaire, et aucune particule candidate n'a été trouvée.

Le storyboard : les plans du chapitre, chacun avec son cadre et ses micro-récits, dans l'ordre.

A Trop vite pour tenir

L'amas de Coma, plusieurs centaines de galaxies que leur gravité mutuelle retient ensemble, et qui s'y agitent trop vite pour ce qui y brille ; un spectrographe nouveau et des galaxies spirales vues par la tranche, un bord qui s'approche, un bord qui s'éloigne, des raies vers le bleu d'un côté et vers le rouge de l'autre ; les planètes lointaines du Système solaire, plus lentes que les proches ; un disque dont la lumière s'éteint vers le bord et dont la vitesse ne baisse pas ; NGC 4605 et UGC 2885 ; un halo plus vaste que la galaxie qu'il enveloppe · 1933 ; les années 1970 ; 1980 ; vingt et une galaxies, de 13 000 à 400 000 années-lumière de rayon ; le XVII^e siècle de Kepler ; une masse qui double quand le rayon double · Plan d'entrée par un personnage et un lieu (R8), qui reprend la chute du chapitre précédent par son geste et non par ses mots : le livre quittait une Terre peuplée pour un Univers entier, et le premier plan lève les yeux sur un amas. Ton d'enquête, sans adjectif : on mesure des mouvements, on en déduit par la loi de la gravitation la masse qui les gouverne. Le théorème du viriel se dit par ce qu'il relie (un amas qui ne se disperse pas et ne s'effondre pas, des galaxies assez rapides pour ne pas tomber au centre, pas assez pour s'échapper) et non par son énoncé ; Zwicky n'entre que par sa mesure et par le nom qu'il donne, en allemand, et le récit ne dit ni quel facteur il trouvait ni comment on l'a reçu, parce que l'essai ne le sait pas. Rubin et Ford entrent par un geste qui se voit, les deux bords d'un disque, l'un vers le bleu, l'autre vers le rouge, et la courbe de rotation est nommée avant d'être lue. L'attente de Kepler vient avant le résultat (R1) : les planètes lointaines plus lentes, la lumière qui s'éteint vers le bord, donc une vitesse qui devrait tomber — et elle ne tombe pas ; les vingt et une galaxies sont données par leurs deux extrêmes en années-lumière, et la phrase du résumé (aucune ne descend, la plupart montent encore) telle quelle, le statut de la source restant dans l'essai. Le halo se construit par l'arithmétique la plus simple, une masse qui double quand le rayon double, et le paragraphe se ferme sur la galaxie rendue à ce qu'elle est, la partie lumineuse d'une chose plus grande. Le dernier paragraphe est sec : deux pesées, un même principe, une même hypothèse, et deux explications laissées ouvertes sans trancher — c'est le plan suivant qui tranchera, par la suite des faits.

1. En 1933, l'astronome suisse Fritz Zwicky mesure l'agitation des galaxies de l'amas de Coma, plusieurs centaines de galaxies que leur gravité mutuelle retient ensemble, et il lui applique le théorème du viriel : 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, et plus sa masse est grande, plus il peut retenir des galaxies rapides, de sorte que la dispersion de leurs vitesses donne la masse qu'il faut pour les tenir ; les galaxies de Coma s'agitent trop vite pour que la seule matière lumineuse de l'amas puisse les retenir, il faut, pour que l'amas tienne, une masse qu'on ne voit pas, et Zwicky lui donne un nom en allemand, *dunkle Materie*, matière sombre, qui traverse le siècle.
2. Le deuxième indice vient de l'intérieur des galaxies : 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, dont un bord s'approche et l'autre s'éloigne, les raies du spectre décalées vers le bleu d'un côté et vers le rouge de l'autre donnant la vitesse de rotation à chaque distance du centre — une courbe de rotation.
3. Ce que ces courbes devraient montrer est connu depuis 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, et dans une spirale la lumière se concentre au centre et s'éteint vers le bord du disque, de sorte que, si la masse suivait la lumière, la vitesse devrait tomber au-delà de la région où se trouvent la plupart des étoiles ; elle ne tombe pas, loin du centre, là où il n'y a presque plus d'étoiles, elle reste à peu près la même, les courbes sont plates, et en 1980 Rubin, Ford et Norbert Thonnard publient celles de vingt et une galaxies spirales, de la plus petite, NGC 4605, dont le rayon fait 13 000 années-lumière, à la plus grande, UGC 2885, qui en fait 400 000 : aucune ne descend, et la plupart montent encore au point le plus éloigné qu'on ait pu mesurer.
4. Une courbe plate se traduit directement en masse : pour un corps en orbite circulaire, le carré de la vitesse vaut la masse contenue à l'intérieur de l'orbite divisée par son rayon, et si la vitesse reste la même quand le rayon double, la masse intérieure double aussi ; loin du centre, là où la lumière s'éteint, la masse continue donc de croître avec la distance, il faut une masse invisible qui s'étend bien au-delà du disque visible et l'enveloppe, un halo, et chaque galaxie spirale se trouve plongée dans une concentration de masse plus vaste qu'elle, dont elle n'est que la partie lumineuse.
5. Les deux pesées, celle de Zwicky et celle de Rubin et Ford, reposent sur le même principe, des mouvements mesurés et une masse déduite par la loi de la gravitation, et sur la même hypothèse, que cette loi s'applique telle quelle à l'échelle des galaxies et des amas ; deux explications restent ouvertes : ou bien une masse invisible existe, ou bien la loi de la gravitation change de forme à ces échelles.

B L'amas du Boulet

Un amas de galaxies posé comme une loupe imparfaite devant des galaxies plus lointaines, dont les images sont étirées, déformées, parfois dédoublées ; deux amas entrés en collision ; le gaz très chaud qui remplit l'espace entre les galaxies et porte l'essentiel de la matière ordinaire ; deux jets d'eau qui se croisent et se freinent ; une masse passée au travers ; le gaz resté au milieu, la masse partie plus loin, de part et d'autre ; un titre de 2006 ; une région presque vide de matière visible où se trouve l'essentiel de la masse · 2006 ; un décalage de 8σ , huit fois l'incertitude de la mesure, quand cinq suffisent à une découverte ; le moment où la collision est observée, les deux composantes déjà séparées · Le plan de l'image propre du chapitre, et le seul où le lyrisme est permis au milieu d'un paragraphe : la séparation. Il entre par la méthode, dite par ce qu'elle fait voir (une loupe imparfaite, des images étirées, dédoublées) et par son avantage, qu'elle ne suppose rien des mouvements ni de l'équilibre — ce qui répond, sans le dire, à l'hypothèse commune des deux pesées de A. La collision se raconte dans l'ordre des faits (R1) : deux amas se heurtent, les deux nuages de gaz se freinent comme deux jets d'eau qui se croisent, la masse passe au travers, et au moment où on regarde, le gaz est au milieu et la masse de part et d'autre ; aucun mot d'évaluation. Clowe entre par un titre cité et par un chiffre rendu à ce qu'il est, huit fois l'incertitude quand cinq suffisent, puis par sa phrase ; l'argument contre une loi modifiée se dit par le lieu, une loi qui pourrait renforcer ou affaiblir la déviation mais pas la déplacer vers une région presque vide, et la dernière phrase du paragraphe est le geste que la collision a fait et qu'aucune galaxie isolée ne permettait. Les deux derniers paragraphes sont secs : ce que la traversée dit des particules (elles se heurtent très peu, elles ne sentent que la gravité), puis les trois pesées rangées en une phrase, chacune avec son moyen, et ce qu'aucune ne dit ; la chute est la liste des atomes qui ne brillent pas, laissée ouverte, et c'est le plan suivant qui la ferme.

- 1. Une masse courbe la trajectoire de la lumière qui passe près d'elle, et un amas de galaxies agit comme une loupe imparfaite sur les galaxies situées loin derrière lui, dont les images sont déformées, étirées, parfois dédoublées ; ce phénomène s'appelle lentille gravitationnelle, mesurer ces déformations pèse la masse totale de l'amas, qu'elle brille ou non, et la méthode ne suppose rien des mouvements du système ni de son équilibre : elle mesure la masse par son seul effet sur la lumière qui la traverse, et donne sa répartition dans le ciel.*
- 2. L'amas du Boulet est deux amas de galaxies 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, et pendant la collision les deux nuages de gaz se sont heurtés et freinés, comme deux jets d'eau qui se croisent, tandis que la masse mesurée par lentille passait au travers sans être ralentie — au moment où on l'observe, la collision a séparé les deux composantes : le gaz, qui porte l'essentiel de la matière ordinaire, est resté en arrière, au milieu, et la masse est allée plus loin, de part et d'autre.*
- 3. 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 de celui de la matière ordinaire avec une significativité de 8σ , huit fois l'incertitude de la mesure, quand cinq suffisent d'ordinaire à une découverte, et ce décalage, écrivent-ils, « ne peut être expliqué par une modification de la loi de la gravitation » ; si l'on changeait la loi sans ajouter de matière, la seule source de gravité resterait la matière ordinaire et la déviation la plus forte se trouverait dans le gaz, une loi différente pouvant renforcer ou affaiblir la déviation, pas la déplacer vers une région presque vide de matière visible, et c'est pourtant là qu'on la trouve, là où il n'y a presque rien à voir — la collision a fait ce qu'aucune galaxie isolée ne permet : séparer physiquement la masse invisible de la matière ordinaire.*
- 4. La traversée dit aussi quelque chose de cette masse : la matière noire de chacun des deux amas a passé 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, et elles se comportent comme une population de corps qui ne sentent que la gravité.*
- 5. Zwicky a 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, et aucune de ces trois pesées ne dit de quoi la masse invisible est faite ; on pourrait imaginer des atomes qui ne brillent pas : du gaz trop froid pour émettre, des étoiles éteintes, des planètes errantes.*

c Le baryomètre

Les premières minutes, où tout atome d'aujourd'hui, qu'il soit dans une étoile, une planète, un nuage froid ou une étoile morte, était un proton ou un neutron ; six baryons pour dix milliards de photons ; un noyau d'hydrogène lourd, un proton et un neutron ; des nuages de gaz lointains éclairés par des quasars ; de vieilles étoiles et leur lithium · de la troisième à la vingtième minute ; jusqu'à 380 000 ans ; onze mesures ; à mieux qu'un pour cent ; six fois et demie plus de baryons ; trois fois moins de lithium · Le plan qui ferme la liste laissée ouverte en B, et il le fait en remontant au début de l'année : la pesée des atomes a eu lieu pendant les premières minutes, et le premier paragraphe le dit par ce qui se voit, chaque atome d'aujourd'hui, où qu'il soit, compté une fois pour toutes quand il n'était qu'un proton ou un neutron. Le ton est sec, celui d'une comptabilité : un seul paramètre, mesuré ailleurs par une physique sans rapport, et la phrase de Fields citée, « une théorie sans paramètre », rendue à ce qu'elle veut dire, plus rien à régler. Le deutérium entre par son nom de baryomètre et par deux nombres qui se voient comme un rapport, vingt-cinq atomes et demi pour un million d'hydrogène, prédits puis mesurés dans onze nuages, et le paragraphe se ferme sur les deux physiques, nucléaire et acoustique, qui comptent la même chose. Le quatrième paragraphe fait le raisonnement par la suite (R1) : si la masse manquante était des atomes, il y aurait eu six fois et demie plus de baryons, le deutérium ne tomberait plus sur la mesure, et la phrase de l'essai ferme, pas assez de baryons ; le récit dit, comme l'essai, que la base ne chiffre pas l'écart. Le lithium est le dernier paragraphe, un désaccord nommé pour ce qu'il est et pour ce qu'il ne touche pas, et la chute est un statut, « aucune piste sérieuse », sans morale.

- 1. 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, et entre la troisième et la vingtième minute après le début ces protons et ces neutrons ont pris part à la fabrication des premiers noyaux, racontée au chapitre des trois minutes ; quoi qu'ils soient devenus ensuite, ils y ont laissé une trace comptable.*
- 2. 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, et ce rapport, le fond diffus le mesure de son côté, par une physique toute différente : Planck compte six baryons pour dix milliards de photons, à un pour cent près, et 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.*
- 3. Le deutérium est la mesure la plus fine : ce noyau d'hydrogène lourd, un proton et un neutron, est un reste de la nucléosynthèse dont la quantité dépend de près de la densité de baryons, ce qui lui vaut le nom de baryomètre de l'Univers ; avec le rapport de Planck, la nucléosynthèse prédit vingt-cinq atomes et demi de deutérium pour un million d'atomes d'hydrogène, et dans des nuages de gaz lointains éclairés par des quasars on en mesure, en moyenne sur onze mesures, la même quantité 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 matière ordinaire.*
- 4. Cette quantité est celle des 4,9 % de Planck, et la matière totale pèse environ 31 % du contenu de l'Univers ; si la masse manquante était faite d'atomes, elle aurait été faite de protons et de neutrons pendant les premières minutes, il y aurait eu six fois et demie plus de baryons que Planck n'en compte, et le deutérium 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 que le deutérium mesuré ne laisse de place qu'à la densité de baryons de Planck, à un pour cent près : il n'y a pas assez de baryons pour faire la matière noire.*
- 5. 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, mais corriger ce désaccord en changeant le rapport des baryons aux photons désaccorderait le deutérium et l'hélium, et aucune piste sérieuse n'y cherche un surplus de baryons.*

▯ Ce qui oscillait, et ce qui ne l'était pas

Le plasma d'avant 380 000 ans, des électrons libres et des noyaux liés à la lumière par les chocs ; un fluide que la gravité serre et que la pression de la lumière repousse, des ondes sonores figées sur la carte ; une matière qui ne participe pas à l'oscillation et ne fait que tenir les puits ; les pics du spectre, le premier, le deuxième, le troisième ; l'amas du Boulet, où l'on ne voit aucun rayon gamma · avant 380 000 ans ; deux densités connues chacune à un pour cent près ; l'une 5,4 fois l'autre, un peu plus de cinq ; 84 % de la matière, les 85 % qu'on cite ; moins de trois millièmes · La deuxième pesée des atomes, indépendante de la première, et le plan est sec comme elle : il reprend du côté de la matière ce que le chapitre de la première lumière a raconté du côté de la lumière, en trois phrases et sans refaire ses images (le brouillard qui se lève reste là-bas). Le fluide se dit par ses deux forces dans l'ordre, la gravité serre, la lumière repousse, et la matière noire par ce qu'elle ne fait pas : elle n'oscille pas, elle tient les puits — « creuser ses puits » appartient aux âges sombres et ne revient pas. La propriété qui la définit est donnée ici comme ce que la carte distingue, couplée ou non à la lumière. Les pics entrent par ce qu'ils renseignent, le rapport du premier au deuxième pour les baryons, le troisième pour la matière noire, et les deux densités de Planck n'entrent que par ce qui se voit d'elles, connues chacune à un pour cent, l'une 5,4 fois l'autre, 84 % de la matière, les 85 % qu'on cite ; les valeurs chiffrées restent dans l'essai. Le troisième paragraphe range les deux arguments et dit enfin ce que la masse n'est pas, par la liste reprise de la chute de B, close cette fois, et donne le mot savant, non baryonique, en dernier. Le contrôle de l'antimatière est un ajout sec, par ce qu'on ne voit pas (des rayons gamma) et par une fraction qui se voit (trois millièmes), et la chute ferme le Boulet une seconde fois, sans le rouvrir.

- 1. La deuxième pesée des atomes se lit sur la carte du fond diffus : avant 380 000 ans, la matière ordinaire est un plasma d'électrons libres et de noyaux, lié aux photons par les chocs incessants entre électrons et lumière, et ce fluide oscille, la gravité le serre, la pression de la lumière le repousse, et ces ondes sonores se sont figées dans la carte, comme le chapitre de la première lumière l'a raconté ; la matière noire, elle, ne participe pas à ces oscillations, puisqu'elle n'interagit pas avec la lumière, elle ne fait que tenir les puits de gravité où le fluide oscille, et la carte distingue ainsi les deux sortes de matière par la propriété même qui définit la seconde : l'une était couplée à la lumière, l'autre non.*
- 2. 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 troisième sur la densité de matière noire, et le modèle ajusté à la carte compte deux paramètres de densité distincts, que Planck mesure tous les deux, l'un pour les baryons, l'autre pour la matière noire froide, chacun connu à un pour cent près ; le second vaut 5,4 fois le premier, la matière noire pèse un peu plus de cinq fois la matière ordinaire et fait environ 84 % de la matière totale, les 85 % qu'on cite couramment, et il est exclu que les deux soient la même chose.*
- 3. 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, elle est d'une autre nature que tout ce dont sont faits les étoiles, les planètes et les vivants, et le mot savant est « non baryonique » : elle n'est pas faite de protons et de neutrons.*
- 4. 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 millièmes, et la masse qui a traversé la collision sans se freiner n'est donc pas non plus un reflet d'antimatière de la matière ordinaire.*

E Elle était déjà là

Le plasma d'avant la première lumière, où c'est elle qui serre les surdensités ; le gaz des âges sombres, sans ressort, qui tombe vers une matière déjà rassemblée ; 46 748 galaxies et une distance privilégiée entre elles ; des halos, les mêmes que Rubin et Ford devinaient ; le réservoir de gaz d'un halo, une masse pour cinq ; les premiers candidats de Webb, en 2022, « à la limite même » ; MoM-z14, la Voie lactée, le Soleil né d'un gaz recyclé ; un échafaudage · avant 380 000 ans, au même rapport qu'aujourd'hui, un peu plus de cinq ; après la recombinaison ; 2005 ; 2022, 2023 ; 16 % au plus de la masse d'un halo ; depuis les ondes du plasma jusqu'aux halos · Le plan de la relecture : ce que les quatre plans précédents ont établi oblige à redire, en trois temps, l'histoire que le livre a déjà racontée, et chaque temps renvoie à son chapitre sans refaire ses images. Avant la première lumière, c'est elle qui serre, au même rapport qu'aujourd'hui parce que les deux matières se diluent de la même façon, et la phrase qui ferme fait de la plus vieille lumière la plus ancienne pesée — l'image propre de ce paragraphe, une seule fois. Les âges sombres sont redits du côté de ce qui tombe, sans ressort, vers une matière qui n'a jamais cessé de se rassembler, et Eisenstein entre par un compte de galaxies et une distance privilégiée, sans son chiffre en mégaparsecs. Le plafond des galaxies précoces n'est pas refait : il entre par la phrase de Boylan-Kolchin citée, par une masse pour cinq, et par le renvoi ; les candidats de Webb par « à la limite même », les trois issues par leur liste, et la spectroscopie par ce qu'elle a écarté ; la dernière phrase du paragraphe dit ce que la question montre, qu'on compte d'abord les halos. Le dernier paragraphe est la seule respiration du plan : chaque galaxie du livre nommée par ses deux bouts, le gaz qui tombe, refroidit, fait des étoiles, le Soleil né d'un gaz recyclé, et une matière qui n'a participé à rien, puis l'échafaudage, mot de l'essai, dépensé ici et nulle part ailleurs (R7) ; aucune morale ne suit (R4).

- 1. Ce qu'on vient d'établir oblige à relire l'histoire que ce livre a déjà racontée, parce que la matière noire n'est pas apparue avec les galaxies qu'on a pesées : avant 380 000 ans, dans le plasma qui deviendra le fond diffus, la gravité qui serre les surdensités est dominée par elle, son rapport à la matière ordinaire était déjà celui d'aujourd'hui, un peu plus de cinq, puisque les deux se diluent de la même manière avec l'expansion, c'est elle qui fournissait l'essentiel du ressort des ondes sonores, et c'est pourquoi le troisième pic en porte la marque — la plus vieille lumière de l'Univers est aussi la plus ancienne pesée de la matière noire.*
- 2. 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 d'approfondir pendant ce temps, de sorte que les âges sombres, 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, où Daniel Eisenstein et ses coauteurs détectent en 2005, parmi 46 748 galaxies, une distance privilégiée conforme à la trace prévue des oscillations acoustiques.*
- 3. Au bout de la nuit, la matière noire s'est rassemblée en halos, les mêmes concentrations que Rubin et Ford devinaient autour des spirales, et le gaz ordinaire tombé dans ces halos y forme un réservoir qui fixe une limite, « la masse d'étoiles d'une galaxie est limitée par le réservoir de matière ordinaire disponible dans son halo de matière noire », écrit Michael Boylan-Kolchin, à peu près une masse de gaz pour cinq de matière noire, 16 % au plus de la masse d'un halo, comme le chapitre des galaxies précoces l'a compté ; 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 à un moment donné, et les premiers candidats galaxies de Webb, en 2022, se tenaient « à la limite même » de ce plafond, ce qui mettait en jeu une erreur de mesure, une formation d'étoiles plus efficace que prévu, ou une faille du modèle lui-même — depuis, la spectroscopie a écarté beaucoup des candidats les plus massifs et la plupart des explications restent dans le modèle standard, mais pour décider si une galaxie est « trop tôt », on compte d'abord les halos de matière noire qui pouvaient l'accueillir.*
- 4. Chaque galaxie de ce livre, de MoM-z14 à la Voie lactée, s'est donc formée au fond d'un puits de matière noire : le gaz y est tombé, s'y est refroidi, y a fait des étoiles, les étoiles y ont forgé les éléments lourds, et le Soleil est né de ce gaz recyclé ; la matière noire n'a participé à aucune de ces transformations, puisqu'elle ne sent que la gravité, et 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.*

F Ce qu'on n'a pas trouvé

Une matière transparente plutôt qu'obscur, qui n'émet, n'absorbe ni ne diffuse la lumière ; des particules lentes, ou presque aussi rapides que la lumière ; les neutrinos, qui traversent la matière sans presque la toucher ; trois familles de candidats que personne n'a vus, WIMP, axions, trous noirs primordiaux ; une cuve de xénon liquide sous terre, protégée du reste du rayonnement, qui guette le choc d'une particule sur un noyau ; une loi modifiée qui mettrait la masse avec le gaz ; trois indices d'une physique au-delà du modèle standard · moins de 0,064 électronvolt, quand l'électron en pèse 511 000 ; 417 jours de données, de mars 2023 à avril 2025, annoncés en décembre 2025 ; cinq fois la masse d'un proton ; le seuil d'avant l'inflation, au premier chapitre · Le plan de l'inventaire des absences, et il est sec de bout en bout. Il entre par ce qu'on sait, en une liste, et par ce que le mot « noire » veut dire, transparente plutôt qu'obscur, invisible de la radio aux rayons gamma, détectable par sa seule gravité — la troisième précaution de l'essai, placée ici parce que c'est ici qu'on cherche à la voir autrement. La classification se dit par la vitesse et le CDM du modèle est rendu à son nom ; le récit ne dit pas pourquoi les modèles préfèrent le froid, parce que l'essai ne le sait pas. Les neutrinos entrent comme la seule matière noire qu'on connaisse, par ce qu'ils font (traverser, filer) et par deux masses qui se voient l'une contre l'autre. Les trois familles sont nommées et données pour non détectées, les neutrinos stériles en une proposition. LZ est raconté par son lieu et son geste, une cuve sous terre qui guette un choc, puis par ses dates, ses 417 jours et sa phrase, et le résultat nul est pesé exactement, une région de plus exclue, pas une réfutation. MOND reprend l'autre branche laissée ouverte en A, rend ce qu'elle rend, bute sur le Boulet, et son statut est donné avec les mots de l'essai, minoritaire, pas une hérésie. Le dernier paragraphe range deux énoncés de statut différent, établi et inconnu, puis les trois indices, et la chute renvoie au seuil du premier chapitre : une autre limite, dans l'Univers présent — sans « donc », sans leçon.

1. *On sait combien pèse la matière noire, où elle se trouve, et quelques-unes de ses propriétés, et le mot « noire » ne veut pas dire sombre au sens d'un nuage opaque, qui absorbe la lumière et donc interagit avec elle : elle n'en émet pas, n'en absorbe pas, n'en diffuse pas, elle est transparente plutôt qu'obscur, invisible à tous les instruments qui recueillent de la lumière, de la radio aux rayons gamma, et sa gravité est le seul moyen de la détecter qui ait réussi ; on la classe en « froide », « tiède » ou « chaude » selon que ses particules se déplacent lentement ou à une vitesse proche de celle de la lumière, les modèles récents favorisent la froide, c'est le CDM inscrit dans le nom du modèle standard, et on ne sait pas ce qu'elle est.*
2. *On connaît une matière noire chaude, et une seule, les neutrinos : ils existent, n'interagissent pas avec la lumière, traversent la matière presque sans la toucher et filent, tant ils sont légers, à une vitesse proche de celle de la lumière, mais ils pèsent beaucoup trop peu pour faire la masse manquante, le relevé DESI bornant la somme des masses des trois espèces à moins de 0,064 électronvolt, dans le cadre de Λ CDM, quand l'électron, déjà très léger, en pèse environ 511 000 — les neutrinos sont bien une matière noire, et une part infime de la matière noire.*
3. *Les candidats sérieux sont donc des particules ou des objets qu'on n'a jamais observés, en trois grandes familles : les WIMP, sigle anglais de « particules massives interagissant faiblement », les axions, particules hypothétiques très légères, et les trous noirs primordiaux, et aucune de ces trois familles n'a été détectée ; 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 leurs oscillations, la matière noire et l'excès de matière sur l'antimatière.*
4. *Les WIMP ont été la piste la plus poursuivie, et les résultats nuls s'y accumulent : les recherches directes guettent le choc d'une particule de matière noire sur un noyau atomique dans un détecteur protégé du reste du rayonnement, et le plus récent de ces détecteurs, LZ, une cuve de xénon liquide installée sous terre, a annoncé en décembre 2025 le résultat de 417 jours de données prises entre mars 2023 et avril 2025 — « aucun signe de WIMP » —, avec les meilleures limites au monde pour des particules de plus de cinq fois la masse d'un proton, qui « resserrent encore » les possibilités de ce que la matière noire pourrait être ; un résultat nul de ce genre ne réfute pas les WIMP, il exclut une région de plus dans l'espace des masses et des probabilités d'interaction où ils pouvaient se trouver.*
5. *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 s'appelle MOND, pour « dynamique newtonienne modifiée », rendent bien compte des courbes de rotation, mais elles ne décrivent pas toutes les observations à la fois, 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 ; MOND reste une position minoritaire, défendue par des chercheurs qui publient dans les revues du domaine, et non une hérésie.*
6. *L'état de la question tient 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, et sa nature est inconnue ; cette ignorance n'est pas seulement une lacune de l'astronomie, aucune particule du modèle standard de la physique des particules ne convient, et*

la matière noire compte, 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 — le livre s'était ouvert sur une limite de la physique connue, le seuil d'avant l'inflation, et la matière noire en est une autre, qui occupe l'Univers présent.

G Un vingtième

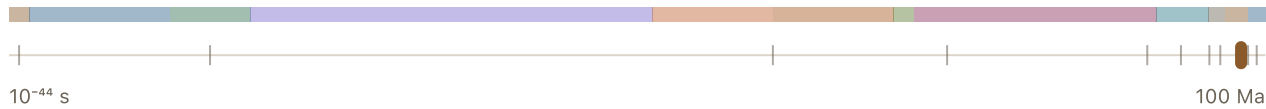
L'hydrogène et l'hélium des premières minutes, les atomes de la première lumière, le gaz des âges sombres, les étoiles, l'oxygène, l'or, le Soleil, et ceux qui ont pesé le reste dans les dernières secondes de l'année — la même étoffe, protons, neutrons, électrons ; trois sacs qu'on ne pèse pas sur une balance ; une carte ajustée étage par étage ; un espace plat, à densité critique ; ce qui ne se rassemble pas en halos, ne dévie pas la lumière, ne laisse pas de pic ; des supernovas lointaines ; la répartition des galaxies · aujourd'hui ; 2013, 2018 ; un vingtième ; il y a dix milliards d'années, quand la matière dominait ; environ 31 % ; environ 68 % ; 1998 · Plan de fermeture, le compte, et il vient en dernier parce que tout ce qui le fonde a été montré avant (R1). Il entre par l'étoffe : la liste de ce que le livre a suivi, chapitre par chapitre, rendue à ses trois particules, et c'est ici, par un seul geste, que l'humain est attesté comme témoin — ceux qui, dans les dernières secondes de l'année, ont pesé le reste —, sans le mot et sans conclure (R4) ; « ce corps qui écrit » reste au chapitre précédent. Les pourcentages sont donnés deux fois, 2013 et 2018, comme l'essai, et rendus à l'image, un vingtième ; le nom du modèle est lu lettre à lettre et les deux noires distinguées par ce qu'elles font, l'une attire et se rassemble, l'autre accélère. Le troisième paragraphe porte les deux précautions qui restent, le moment (la matière se dilue, l'énergie noire non, il y a dix milliards d'années la matière dominait — sans refaire le 16 septembre du chapitre précédent) et la méthode (trois sacs qu'on ne pèse pas, un ajustement étage par étage, l'énergie noire par différence, et la phrase conditionnelle de l'essai, sans emphase). Le quatrième est le bouclage : le premier pic mesure la courbure, l'espace est plat, la matière ne fournit que 31 %, il manque 68 %, et ce qui manque est défini par ce qu'il ne fait pas. Le dernier paragraphe lève l'objection de l'artefact par deux méthodes nommées, et la chute reprend la chute du chapitre précédent par son objet — l'expansion qui accélère — venue cette fois par l'autre bout, le manque ; rien n'annonce le chapitre suivant.

- 1. 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, et ceux qui, dans les dernières secondes de l'année, ont pesé le reste — autant d'assemblages de protons, de neutrons et d'électrons, que les cosmologistes appellent matière « ordinaire », ou « baryonique », d'après le nom de la famille de particules à laquelle appartiennent les protons et les neutrons.*
- 2. Dans le modèle standard de la cosmologie, cette matière ne représente qu'environ 5 % du contenu de l'Univers, la matière noire 26,8 % et l'énergie noire 68,2 %, selon les valeurs publiées par Planck en 2013, et les tables finales de 2018 donnent environ 4,9 %, 26,4 % et 68,5 %, le « 27 % » qu'on lit souvent étant un arrondi entre les deux ; tout ce que le livre a raconté depuis la fin du seuil tient dans un vingtième du total, et le modèle porte les deux inconnues dans son nom, Λ CDM, Λ pour la constante cosmologique, la forme la plus simple d'énergie noire, CDM pour la matière noire froide — les deux n'ont en commun que l'adjectif, la matière noire est de la matière, elle attire et se rassemble sous sa propre gravité, l'énergie noire n'en est pas, c'est le nom donné à ce qui accélère l'expansion.*
- 3. Ces parts valent aujourd'hui : au fil de l'expansion la matière se dilue, parce que la même quantité occupe un volume toujours plus grand, et l'énergie noire ne se dilue pas, de sorte qu'elle ne l'emporte sur la matière que depuis un peu moins de dix milliards d'années après le Big Bang, et qu'il y a dix milliards d'années la matière dominait, les 68 % ne s'appliquant pas au passé que ce livre a raconté ; elles sont aussi calculées, aucun des trois nombres n'étant mesuré séparément comme on pèserait trois sacs sur une balance, ils sortent d'un ajustement de l'ensemble du modèle à la carte du fond diffus, complétée par d'autres mesures, construit étage par étage comme le chapitre de l'âge l'a montré, les densités de matière ordinaire et de matière noire étant les grandeurs les plus directement lues sur la carte et la part d'énergie noire obtenue par différence — si le modèle était faux, les pourcentages le seraient aussi.*
- 4. 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 sous laquelle on les voit, et les données s'accordent avec un espace plat, dont la densité totale est bien définie, la densité critique ; toute la matière de l'Univers, ordinaire et noire, n'en fournit qu'environ 31 %, il manque environ 68 %, et ce qui les fournit n'est pas de la matière, noire ou non, puisque toute matière se dilue quand l'Univers grandit et que cette composante-là garde la même densité — 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, et dans Λ CDM sa part s'obtient d'abord par différence, ce qui manque pour atteindre la densité critique.*
- 5. Une composante déduite par soustraction pourrait n'être qu'un artefact du modèle, et 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 ; trois méthodes différentes aboutissent au même manque, et la première a surpris ses auteurs en 1998 : l'expansion de l'Univers accélère.*

Le tournant

~9,8 Ga (découverte en 1998)

storyboard · 6 plan(s)



La matière se dilue avec l'expansion, l'énergie noire non : un peu après la naissance du Soleil, elle l'emporte et l'expansion accélère. En 1998, deux équipes qui cherchaient à mesurer un ralentissement trouvent des supernovas 10 à 15 % plus lointaines que prévu. L'énergie du vide calculée par la théorie dépasse la valeur observée de 120 ordres de grandeur.

Le storyboard : les plans du chapitre, chacun avec son cadre et ses micro-récits, dans l'ordre.

A Chercher un freinage

Deux équipes d'astronomes tournées vers des explosions lointaines ; un Univers supposé fait de matière seule, où chaque morceau attire tous les autres et où les distances grandissaient autrefois plus vite qu'aujourd'hui ; un spectre dont les raies sont décalées vers le rouge ; une source deux fois plus loin, quatre fois moins brillante ; une naine blanche dans un système double, déjà rencontrée à la forge ; une lumière qui a voyagé plusieurs milliards d'années · 1998 ; avant 1998 ; le carré de la distance ; plusieurs milliards d'années de trajet ; le temps qu'un étirement a pris, court si l'expansion a ralenti, long si elle a accéléré · Plan d'entrée par des personnages (R8), qui reprend la chute du chapitre précédent par son geste — 1998, deux équipes, la surprise — mais en se plaçant avant la surprise : ce qu'elles cherchaient. Tout le plan est l'attente posée avant le résultat (R1), comme Kepler avant Rubin au chapitre précédent : un Univers de matière freine, on veut savoir de combien, et il faut pour cela des distances. L'outil entre par son nom et par ce qu'il est, une naine blanche carbone-oxygène dans un système double, renvoyée à la forge sans refaire « le cœur mis à nu » ; le « quasi » de « quasi standard » est tenu pour ce que l'essai en sait, rien. Le raisonnement du test est fait par la suite des deux cas (si l'expansion a ralenti... si elle a accéléré...) et la chute est l'énoncé du test, sans son résultat : c'est B qui le donne. Ton sec, sans adjectif, aucun mot d'évaluation.

1. En 1998, deux équipes d'astronomes cherchent à mesurer de combien l'expansion de l'Univers ralentit : jusque-là, les cosmologistes supposent un Univers fait de matière seule, où chaque morceau attire tous les autres et où cette attraction s'oppose à l'éloignement mutuel des galaxies, de sorte que les distances grandissaient autrefois plus vite qu'aujourd'hui, et que 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 ; la question ouverte porte sur l'ampleur de ce freinage.
2. Pour le mesurer, il faut comparer deux choses pour des objets lointains, de combien leur lumière a été étirée, ce qui se lit directement dans leur spectre par le décalage vers le rouge, et à quelle distance ils se trouvent, ce qui est difficile : l'éclat apparent d'une source diminue comme le carré de sa distance, une source deux fois plus loin paraît quatre fois moins brillante, et si l'on connaît son éclat réel, son éclat apparent donne sa distance ; les supernovas de type Ia jouent ce rôle, explosions de naines blanches carbone-oxygène dans des systèmes doubles, que le chapitre sur la forge a rencontrées comme une source du fer, leur luminosité est quasi standard, leur éclat apparent donne donc leur distance, et elles sont assez brillantes pour être vues là où leur lumière a voyagé plusieurs milliards d'années — pourquoi leur éclat varie si peu, et comment les astronomes corrigent ce « quasi », les sources de ce livre ne le disent pas.
3. 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, l'étirement 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, le même étirement a pris plus de temps, la lumière a voyagé plus longtemps, la source est plus loin, donc moins brillante — pour un même décalage vers le rouge, une supernova trop faible trahit une expansion qui a moins ralenti que prévu, ou qui a accéléré.

B Dix à quinze pour cent plus loin

Un article de 1998 dont le titre annonce le résultat ; des supernovas lointaines plus faibles qu'elles ne devraient ; l'Univers le moins freiné de tous les Univers de matière, pris pour comparaison ; 42 supernovas entre deux décalages ; une constante positive à 99 % ; un prix en 2011 ; un Univers qui paraissait plus jeune que ses plus vieilles étoiles · 1998 ; 1999 ; 10 à 15 % plus loin, 17 à 24 % plus faibles ; z de 0,18 à 0,83 ; 28 % de matière, 72 % pour le reste ; vingt ans plus tard, 31,5 et 68,5 ; 2011 ; 14,9 milliards d'années pour 63 km/s/Mpc ; à moins de 1 % · Le plan du résultat, et du retournement. Il entre par un titre cité, comme Clowe au chapitre précédent, et donne le chiffre de Riess rendu à ce qui se voit, plus loin donc plus faible, avec la prudence de la comparaison dite par ce qu'elle choisit (l'Univers le moins freiné, où elles devraient déjà paraître le plus loin). Perlmutter entre par un compte, 42, et par une probabilité, et le 72 % obtenu par soustraction est posé à côté du 68,5 de Planck comme deux nombres dont l'un tombe dans la marge de l'autre, sans emphase. Le troisième paragraphe est le retournement, dit en une phrase courte — elles cherchaient un freinage, elle accélère —, la force du résultat donnée par sa cause, deux équipes indépendantes ; le Nobel par trois noms et une date, et le rôle de Schmidt rendu à ce que la base en sait, rien. Le dernier paragraphe raconte le paradoxe dans l'ordre où il a été levé (R1), sans « lever le paradoxe » qui appartient au chapitre de l'âge : avant, un Univers plus jeune que ses étoiles ; l'accélération allonge l'âge, par la suite des causes (plus lent dans son passé récent, donc plus de temps) ; 14,9 ; et la chute est l'Univers qui cesse d'être plus jeune que ses étoiles. Ton de rapport, un seul instant lyrique permis au retournement.

1. *C'est ce que trouve l'équipe d'Adam Riess, et 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, et la comparaison est choisie pour être prudente, un Univers peu dense étant 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, ce qui, en éclat, les fait environ 17 à 24 % plus faibles que prévu.*
2. *L'équipe de Saul Perlmutter, le Supernova Cosmology Project, arrive au même résultat par ses propres observations : sur 42 supernovas dont les décalages vers le rouge vont de 0,18 à 0,83, elle trouve, pour un Univers plat, une densité de matière Ω_m de 0,28, la lettre Ω désignant une densité comptée en fraction de celle qui rend l'espace plat, et une constante cosmologique positive avec une probabilité de 99 % ; dans un Univers plat où la matière fournit 28 %, il reste environ 72 % pour la constante, et 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.*
3. *Le résultat a pris ses auteurs à contre-pied : les deux équipes cherchaient à mesurer de combien l'expansion ralentissait, et elles ont trouvé qu'elle ne ralentit plus, qu'elle accélère ; que deux équipes indépendantes, avec leurs propres supernovas et leurs propres analyses, soient arrivées à la même conclusion fait la force du résultat, et le prix Nobel de physique 2011 a récompensé Saul Perlmutter, Brian Schmidt et Adam Riess pour cette découverte — le rôle de Schmidt, les sources de ce livre ne le décrivent pas.*
4. *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, et l'accélération allonge l'âge calculé, parce qu'un Univers qui accélère aujourd'hui s'étendait plus lentement dans son passé récent et qu'il lui a fallu plus de temps pour atteindre sa taille actuelle ; 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 de 63 kilomètres par seconde et par mégaparsec, un chiffre qui, ramené au taux de Planck, tombe à moins de 1 % de la valeur actuelle — l'Univers cessait d'être plus jeune que ses étoiles.*

c Deux semaines après le Soleil

Une quantité fixe de particules dans un volume qui grandit ; des distances qui doublent, un volume multiplié par huit ; une composante qui garde la même densité à mesure que l'espace grandit ; l'Univers à la moitié de sa taille, puis quinze fois moins étiré, à l'époque de MoM-z14, puis au moment de la première lumière ; une densité qui baisse sans cesse et une densité qui ne change pas, et l'instant où la première passe sous la seconde, que personne n'a vu ; des pierres datées par la radioactivité ; un nuage de gaz qui s'effondre dans une galaxie parmi des milliards ; l'amas de Coma ; des distances entre amas qui grandissent de plus en plus vite · les distances doublent, la densité divisée par huit ; 31,5 et 68,5 aujourd'hui ; à la moitié de la taille, près de 80 % de matière contre 20 ; 280 millions d'années, 0,06 % ; de l'ordre du milliardième ; il y a dix milliards d'années ; plus de 9,8 milliards d'années ; 9,2, soit 13,8 moins 4,57 ; six cents millions d'années ; la charnière d'août et de septembre, la mi-septembre, deux semaines ; les trois quarts de sa taille ; 7,70, à un dixième près ; deux milliards d'années avant ; un milliard et demi avant le Soleil ; deux fois · Le plan de ce que les supernovas avaient trouvé, et il remonte le temps. Il entre par l'arithmétique la plus simple, des distances qu'on double et une densité divisée par huit, sans refaire « la même quantité occupe un volume toujours plus grand » du chapitre précédent, et pose la composante qui ne se raréfie pas en une proposition. Le deuxième paragraphe est le calcul à rebours, par trois stations que le livre a déjà visitées (la moitié de la taille, MoM-z14, la première lumière), chaque fois par un rapport qui se voit (80 contre 20, 0,06 %, un milliardième), et il ferme sur ce que les pourcentages ne couvrent pas, aucune des époques racontées, puis sur les dates du premier jour qui n'en dépendent presque pas. Le troisième paragraphe porte l'image propre du chapitre et le seul lyrisme permis du plan : une densité qui baisse passe toujours sous une densité qui ne change pas, aucun événement, seule la date reste à établir ; la date vient avec celle du Soleil, par la soustraction qui se voit (13,8 moins 4,57), par l'écart de six cents millions d'années et par l'année cosmique sans le quantième (« la mi-septembre », mot de l'essai, et non le 16) ; les deux dates sont rendues à leur statut, l'une lue dans des pierres, l'autre calculée, et personne n'a observé l'instant. Le quatrième paragraphe sépare les deux tour-nants, 7,7 et 9,8, par leur cause donnée dans l'ordre (à 7,7 la matière pèse encore deux fois l'énergie noire ; à densité égale un effet deux fois plus fort ; la pression négative sur laquelle E reviendra) et ferme sur le Soleil né entre les deux. Le dernier paragraphe est sec : ce que l'accélération fait et ne fait pas (Coma nommée ; la Galaxie, le Système solaire, la Terre ne grandissent pas), sans anticiper le ciel à venir, puis la non-cause, et la chute situe le Soleil sans rien conclure (R4).

- 1. Ce que les supernovas avaient trouvé est une composante qui ne réagit pas à l'expansion comme la matière : la matière se dilue, une quantité fixe de particules occupe un volume qui grandit et sa densité baisse en proportion du volume, quand les distances doublent le volume est multiplié par huit et la densité de la matière divisée par huit, tandis que l'énergie noire garde la même densité à mesure que l'espace grandit, elle ne se raréfie pas, de sorte que la part de chacune des deux change avec le temps et que la seconde finit par dominer.*
- 2. On peut suivre ce changement à rebours avec les chiffres d'aujourd'hui, où Planck donne 31,5 % de matière et 68,5 % d'énergie noire, la matière un peu moins de la moitié de l'autre : 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, près de 80 % du total contre à peine plus de 20 ; à l'époque de MoM-z14, vue 280 millions d'années après le début, l'Univers était plus de quinze fois moins étiré et l'énergie noire ne faisait plus que 0,06 % du contenu ; au moment où la première lumière s'est libérée, de l'ordre du milliardième — les 68 % ne valent qu'aujourd'hui, il y a dix milliards d'années la matière dominait, ils ne s'appliquent à aucune des époques que ce livre a racontées, et c'est aussi pourquoi les dates du premier jour, des trois minutes et des 380 000 ans ne dépendent presque pas de ce qu'est l'énergie noire.*
- 3. Une densité qui baisse sans cesse finit toujours par passer sous une densité qui ne change pas, pourvu que la seconde ne soit pas nulle, aucun événement n'a déclenché cette bascule, elle découle des deux manières de se diluer et seule sa date restait à établir : 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, et le Soleil naît environ 9,2 milliards d'années après le Big Bang, 13,8 milliards d'années d'Univers moins les 4,57 des plus vieux solides du Système solaire, six cents millions d'années plus tôt, à la charnière d'août et de septembre sur l'année cosmique quand la bascule tombe vers la mi-septembre, deux semaines plus tard ; les deux dates n'ont pas le même statut, celle du Soleil est lue dans des pierres, par la radioactivité, celle de la bascule est calculée dans le modèle standard, personne n'a observé l'instant où l'énergie noire a dépassé la matière, et si l'on vérifie à la main, avec les densités de Planck, que les deux s'égalent quand l'Univers mesurait environ les trois quarts de sa taille actuelle, convertir cette taille en années demande le taux d'expansion actuel, sur lequel deux mesures s'opposent — la date de 9,8 milliards d'années est précise dans le modèle, et dépendante de lui.*
- 4. 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, à un dixième près, deux milliards d'années avant que l'énergie noire ne domine et un milliard et demi avant la naissance du Soleil, parce qu'à cette époque la matière pèse encore à peu près deux fois l'énergie noire et que celle-ci suffit à accélérer*

l'expansion dès qu'elle atteint la moitié de la densité de la matière, son effet accélérateur étant, à densité égale, deux fois plus fort que le freinage de la matière, pour une raison qui tient à sa pression négative et qu'on verra plus bas ; le mot « tournant » désigne donc deux moments, vers 7,7 milliards d'années l'expansion cesse de ralentir, vers 9,8 l'énergie noire devient la composante principale, et le Soleil est né entre les deux, dans un Univers qui accélérât déjà mais où la matière pesait encore plus lourd que l'énergie noire.

- 5. Depuis, l'expansion accélère, et cette accélération isole peu à peu les amas de galaxies les uns des autres : 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, et 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, qui grandissent de plus en plus vite ; aucune relation de cause ne relie la naissance du Soleil à la bascule, l'une 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 milliards, et la coïncidence de date situe seulement le Soleil, et avec lui tout ce qui sera fait de sa matière, dans un Univers qui accélère.*

▫ Une règle dans les galaxies

Une seule sorte d'objet, qui pourrait tromper ; le plasma d'avant 380 000 ans, parcouru d'ondes sonores figées à la libération de la lumière ; autour de chaque surdensité, un peu de matière déposée à une même distance, et des galaxies qui gardent cet écart ; 46 748 galaxies rouges du SDSS, un pic ; une règle dont on connaît la longueur, vue à différentes distances ; la plus vaste carte en trois dimensions jamais construite ; le premier pic du fond diffus, un espace plat ; trois lumières d'âges différents, un même manque · avant 380 000 ans ; 144 mégaparsecs ramenés à l'échelle d'aujourd'hui ; 2005 ; 46 748 ; cent mégaparsecs dans une unité qui dépend du taux d'expansion, environ 148, près de 480 millions d'années-lumière ; 2025, plus de 14 millions de galaxies et de quasars ; onze milliards d'années ; des décalages inférieurs à 1 ; environ 31 % ; environ 68 % ; de 68 à 70 % · Le plan de la vérification par d'autres physiques, et il entre par l'objection, posée avant les méthodes qui y répondent (R1) : une seule sorte d'objet peut tromper, et la base ne documente pas les contrôles des deux équipes, elle documente deux méthodes sans explosion d'étoile. La règle entre par son mécanisme, dit du côté de la matière (un peu de matière déposée à une même distance autour de chaque surdensité), sans refaire « règle graduée », formule des chapitres de la première lumière et de l'âge ; Eisenstein revient, déjà nommé au chapitre précédent, mais ici par son pic, son adverbe cité (« excellent ») et la conversion qui se voit, 480 millions d'années-lumière. DESI entre par un compte et par un superlatif rendu au fait, la plus vaste carte en trois dimensions. Le fond diffus est rap-pelé en trois propositions sans refaire le bouclage du chapitre précédent, et rendu à ce qu'il dit et ne dit pas : combien il en faut, pas comment elle agit. Le dernier paragraphe range les trois méthodes par l'âge de la lumière qu'elles lisent, sans reprendre « trois méthodes, un même manque », dépensé au chapitre précédent ; la chute sépare deux statuts, établi et ouvert, sans morale.

- 1. Une découverte qui ne reposerait que sur les supernovas resterait exposée à une objection, parce qu'une seule méthode, appuyée sur une seule sorte d'objet, peut être trompée par une propriété de cet objet qu'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 ; les sources de ce livre ne documentent pas les vérifications qu'ont faites les deux équipes sur ce point, elles documentent deux méthodes indépendantes, qui ne font appel à aucune explosion d'étoile.*
- 2. 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, comme le chapitre de la première lumière l'a raconté, et la distance maximale qu'une de ces ondes a pu parcourir, l'horizon sonore, vaut 144 mégaparsecs ramenés à l'échelle d'aujourd'hui ; 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, que les cosmologistes appellent les oscillations acoustiques des baryons, BAO — en 2005, Daniel Eisenstein et ses coauteurs la détectent dans la répartition de 46 748 galaxies rouges lumineuses du relevé SDSS, un pic dans la corrélation entre galaxies à une séparation de cent mégaparsecs, comptés dans une unité qui dépend du taux d'expansion actuel, qui correspond « excellent » à la forme et à la position prédites de l'empreinte des oscillations de la recombinaison, et avec le taux de Planck cette séparation vaut environ 148 mégaparsecs, près de 480 millions d'années-lumière, du même ordre que l'horizon sonore calculé.*
- 3. Cette empreinte fournit une règle dont on connaît la longueur, et on la retrouve à différentes distances, donc à différentes époques, l'angle sous lequel on la voit et son décalage vers le rouge donnant chaque fois une distance, de sorte qu'on peut retracer l'histoire de l'expansion sans les supernovas, par une physique qui n'a rien de commun avec la leur, l'acoustique d'un plasma primordial d'un côté, l'éclat d'explosions d'étoiles de l'autre ; 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 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.*
- 4. 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, les données s'accordent avec un espace plat, toute la matière, ordinaire et noire, n'en fournit qu'environ 31 %, et il manque environ 68 %, que le fond diffus fixe par soustraction, en s'appuyant sur la platitude, sans rien dire de la manière dont l'énergie noire agit dans le temps, il dit combien il en faut ; les trois méthodes se recoupent, les supernovas mesurent un éclat d'explosions vues à des décalages inférieurs à 1, les oscillations acoustiques une règle dans la répartition des galaxies sur onze milliards d'années, le fond diffus une géométrie sur une lumière émise vers 380 000 ans, et toutes aboutissent au même manque, de 68 à 70 % de la densité critique, que la matière ne peut pas fournir — cet accord établit l'existence de l'accélération, et d'une composante qui ne se dilue pas ; il n'en établit pas la cause.*

E Quatre atomes par mètre cube

Un terme ajouté aux équations d'Einstein, la lettre Λ du modèle ; le vide du chapitre sur le rien, état le plus bas des champs, qui a une énergie ; chaque volume nouveau d'espace qui apporte la même énergie que les anciens ; quatre atomes d'hydrogène par mètre cube ; un laboratoire, le Système solaire, l'intérieur d'une galaxie, où la matière écrase cette densité ; les immenses espaces entre les amas ; une pression négative ; l'inflation du début du livre ; un 1 suivi de cent vingt zéros · aujourd'hui, partout la même ; $w = -1$; deux fois plus fort ; vers 7,7 milliards d'années ; une phase brève, d'une tout autre intensité ; 120 ordres de grandeur, un facteur 10^{120} · Le plan du nom posé sur le trou. Il entre par le nom, Λ , et par ce qu'il est (un terme ajouté aux équations d'Einstein), puis renvoie au chapitre sur le rien sans refaire la chambre qu'on vide : le vide a une énergie, et si l'espace vide porte une énergie propre, chaque volume nouveau apporte la même — la propriété qui fait le chapitre, dite une fois. Le deuxième paragraphe est le seul lyrisme permis du plan, et il est fait d'un nombre rendu à ce qui se voit : quatre atomes d'hydrogène par mètre cube, la valeur en grammes restant à l'essai (R2) ; écrasée partout où il y a de la matière, et vainqueur seulement entre les amas, parce qu'elle est la même partout. La pression négative est dite par ce qu'elle fait (en relativité générale la pression pèse aussi ; une pression négative assez forte fait l'inverse d'une attraction) et elle règle la dette de C, le facteur deux et les 7,7 milliards d'années. L'inflation est un rappel en une phrase, sans lien de cause, parce que la base n'en fait pas. Le dernier paragraphe est le désaccord, raconté dans l'ordre (si c'est l'énergie du vide, on doit pouvoir la calculer ; on la calcule ; 120 ordres de grandeur trop grand), le nombre rendu à ce qui se voit (un 1 suivi de cent vingt zéros), et la chute est l'alternative logique, sans le mot « énigme » ni « mystère ».

- 1. L'hypothèse la plus simple pour remplir le trou porte un nom depuis longtemps, la constante cosmologique, notée Λ , un terme ajouté aux équations d'Einstein, celles de la relativité générale, qu'on peut interpréter comme l'énergie du vide, et c'est le Λ du modèle standard Λ CDM ; 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 mais l'état de plus basse énergie des champs qui décrivent la matière et la lumière, et que cet état possède des propriétés, dont une énergie — 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.*
- 2. Sa densité est infime, à peu près la masse de quatre atomes d'hydrogène par mètre cube : 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, là où la matière s'est diluée.*
- 3. 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, et pour la constante w vaut -1 , sa pression est négative, égale en valeur à sa densité d'énergie ; en relativité générale, la pression d'une composante contribue elle aussi à sa gravité, et une pression négative assez forte produit l'effet inverse d'une attraction — c'est ce qui donne à l'énergie noire, à densité égale, un effet accélérateur deux fois plus fort que le freinage de la matière, et ce qui fait commencer l'accélération vers 7,7 milliards d'années, bien avant que l'énergie noire ne domine.*
- 4. L'Univers a déjà connu une telle expansion accélérée : l'inflation, au début de ce livre, était elle aussi une phase d'expansion accélérée, portée par un champ, mais brève et d'une tout autre intensité, et rien, dans les sources de ce livre, ne relie les deux épisodes ni ne dit qu'ils aient une même cause.*
- 5. Reste le désaccord qui empêche la constante d'être 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, un ordre de grandeur étant un facteur dix, et 120 ordres de grandeur un 1 suivi de cent vingt zéros, l'un des désaccords les plus massifs de la physique, dont les sources de ce livre ne détaillent pas le calcul ; si l'observation est juste, et trois méthodes la confirment, alors ou bien le calcul est faux, ou bien il omet quelque chose qui compense presque exactement la valeur calculée, et que rien de connu n'explique.*

F Une constante ou un champ

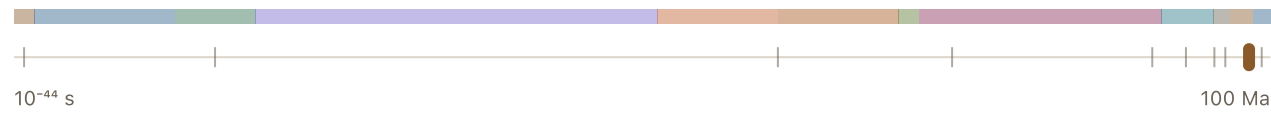
Un champ dont l'énergie pourrait varier dans le temps ; un w qui s'écarte de -1 ; le relevé DESI et des supernovas recalibrées ; une énergie noire en léger déclin, qui se dilue encore bien moins vite que la matière ; les horloges des galaxies et celles des grands vides ; deux hypothèses séparées par une seule grandeur mesurable · 2025 ; 2026 ; un peu plus de trois écarts-types, entre trois et quatre selon l'échantillon, ramené à 3,2, quand cinq font une découverte ; une bascule qui aurait bien eu lieu, une date et un avenir qui changeraient · Plan de fermeture, celui des statuts, et il est sec. La quintessence entre par son nom et par ce qui la distinguerait, un w qui bouge ; DESI par ce qu'il croit entrevoir, les écarts-types rendus à ce qui se voit, autour de trois quand il en faut cinq, et la recalibration de 2026 par sa phrase citée, « faible préférence » ; le chiffre détaillé reste à l'essai et au chapitre suivant, que rien n'annonce. Le principe du chapitre est rendu à ce qu'un champ changerait et ne changerait pas : la bascule a bien eu lieu, sa date et l'avenir bougeraient. Le deuxième paragraphe est le timescape, posé ici parmi les statuts et non dans D pour qu'il ne brouille pas l'accord ; il est dit par son mécanisme (des horloges qui divergent entre régions denses et grands vides), par son appui de 2025 et par ce qu'il lui faudrait encore. Le dernier paragraphe range ce qu'on ne sait pas, en trois énoncés (la nature, les 120 ordres, la date qui n'existe que dans le modèle), puis ce qui départagerait, et la chute est l'alternative laissée ouverte, sans morale, sans annonce.

- 1. L'alternative à la constante est un champ dynamique, qu'on appelle la quintessence, dont l'énergie pourrait varier dans le temps, et dans ce cas l'énergie noire ne garderait pas exactement la même densité, son w s'écarterait de -1 ; c'est ce que le relevé DESI croit entrevoir, ses mesures de 2025, combinées au fond diffus, préférant une énergie noire variable à un peu plus de trois écarts-types, entre trois et quatre avec les supernovas selon l'échantillon, une énergie noire qui se comporterait aujourd'hui un peu moins qu'une constante, en léger déclin ; le chiffre le plus élevé reposait sur des supernovas dont la recalibration, en 2026, le ramène à 3,2 écarts-types, une « faible préférence » selon ses auteurs, et aucune combinaison n'atteint les cinq qu'on exige d'une découverte — 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, mais sa date et, surtout, l'avenir de l'expansion changeraient.*
- 2. 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 une apparence et l'énergie noire une « identification erronée », et en 2025 Antonia Seifert et ses coauteurs trouvent, sur l'échantillon de supernovas Pantheon+, une préférence statistique « très forte » pour ce modèle ; 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, et pour que le timescape l'emporte il faudrait qu'il rende compte aussi des oscillations acoustiques et du fond diffus, ce que les sources de ce livre ne disent pas.*
- 3. On ne sait pas ce qu'est l'énergie noire : deux hypothèses s'opposent, une constante dont la densité ne change jamais ou un champ dont la densité évolue, et une seule grandeur mesurable les sépare, w et sa variation dans le temps, dont une analyse limitée aux données de l'Univers tardif ne trouve pas de trace robuste ; tant que dure le désaccord des 120 ordres de grandeur, interpréter l'énergie noire comme l'énergie du vide reste une hypothèse que la théorie de référence contredit, et la date de la bascule n'existe que dans le modèle, les rapports de taille se vérifiant à la main mais leur conversion en années dépendant d'un taux d'expansion sur lequel deux mesures s'opposent ; 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 cinq écarts-types, la constante cosmologique serait écartée ; s'il retombait, elle resterait l'hypothèse la plus simple.*

Deux mesures qui ne s'accordent pas

aujourd'hui (~13,8 Ga)

storyboard · 7 plan(s)



Mesuré de proche en proche, le rythme d'expansion vaut environ 73 km/s/Mpc ; calculé depuis le fond diffus, 67. L'écart dépasse cinq sigmas et son origine reste inconnue. En 2025, DESI signale une énergie noire qui varierait, un signal ramené à 3,2 sigmas en 2026. L'âge de l'Univers pourrait bouger, pas les dates du premier jour.

Le storyboard : les plans du chapitre, chacun avec son cadre et ses micro-récits, dans l'ordre.

A De barreau en barreau

La Terre sur son orbite ; une étoile proche qui oscille d'un va-et-vient sur le fond des étoiles lointaines ; des céphéides qui pulsent dans des galaxies voisines ; des supernovas la qui ont explosé dans ces mêmes galaxies, celles de 1998 ; des galaxies assez lointaines pour que l'expansion domine leur mouvement, assez proches pour que leur lumière n'ait voyagé qu'une petite fraction de l'âge de l'Univers ; un modèle à six paramètres qui attend un nombre · Aujourd'hui ; une année terrestre pour un va-et-vient ; 3,26 millions d'années-lumière pour un mégaparsec ; une petite fraction de l'âge de l'Univers ; 2022 ; $73,04 \pm 1,04$ · Plan d'entrée par un lieu (R8), au ras de la Terre qui tourne, et il reprend le Soleil sur lequel le chapitre précédent a fermé son plan C sans le nommer autrement que comme le centre d'une orbite. L'échelle se monte barreau par barreau dans l'ordre où elle se construit (R1) : la parallaxe, les céphéides, les supernovas, et chaque barreau est dit par ce qu'il est (un va-et-vient, un rythme de pulsation, une explosion à l'éclat quasi standard déjà rencontrée au chapitre précédent, sans la redéfinir). Le deuxième paragraphe nomme ce que l'échelle mesure, H_0 , son unité rendue à ce qui se voit (3,26 millions d'années-lumière ; l'étirement de l'espace, pas un mouvement des galaxies dans l'espace, sans refaire « une galaxie à un mégaparsec ... deux fois plus loin deux fois plus vite » dépensé au chapitre de l'âge) et sa propriété essentielle, dite par la durée du trajet de la lumière : une petite fraction de l'âge, pas le temps de changer de rythme. Le dernier paragraphe pose l'autre côté sans le développer : un modèle économe fait des prédictions, et l'une porte sur ce même nombre ; la chute est l'annonce d'une confrontation, sans son résultat, que B donne. Ton de mesure, sans adjectif, aucun mot d'évaluation.

- 1. 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 : c'est le premier barreau d'une échelle qu'on monte de proche en proche, ces distances géométriques étalonnent des étoiles pulsantes, les céphéides, dont l'éclat réel se déduit du rythme de leurs pulsations et qui sont assez brillantes pour être vues dans des galaxies voisines ; dans certaines de ces galaxies ont explosé des supernovas de type Ia, celles qui ont révélé l'accélération en 1998, 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 — chaque barreau s'appuie sur le précédent.*
- 2. Ce que l'échelle mesure tient en deux nombres par galaxie, la vitesse à laquelle elle s'éloigne, lue dans son spectre par le décalage vers le rouge, et sa distance, et leur rapport s'appelle la constante de Hubble, H_0 , exprimée en kilomètres par seconde et par mégaparsec, un mégaparsec valant 3,26 millions d'années-lumière ; ce nombre est le même partout, il ne décrit pas un mouvement des galaxies dans l'espace mais l'étirement de l'espace entre elles, mesuré aujourd'hui, et les supernovas qui servent à l'obtenir 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, un trajet trop court pour que l'expansion ait changé de rythme, de sorte que l'échelle ne suppose presque rien de l'histoire de l'expansion — l'équipe SHOES obtient ainsi, en 2022, $73,04 \pm 1,04$ km/s/Mpc.*
- 3. 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, réclamant la même composante qui ne se dilue pas, et Λ CDM rendant compte de toutes avec six paramètres seulement — un modèle qui rend compte de trois lumières d'âges différents avec six paramètres fait des prédictions, et l'une d'elles porte sur ce même nombre, la vitesse à laquelle l'espace s'étire aujourd'hui.*

B Ce que le modèle attend pour aujourd'hui

La carte de Planck, des ondes figées vers 380 000 ans vues sous un angle ; une taille calculée avec la physique du plasma ; une distance ; une histoire de l'expansion entre 380 000 ans et aujourd'hui, que personne n'a vue et que le modèle suppose ; un plasma qui contient exactement ce que le modèle y met, la soupe, la première lumière, la matière noire froide, une énergie noire constante pendant treize milliards d'années ; deux bouts d'une chaîne ; une phrase de 2022 · 380 000 ans ; treize milliards d'années d'énergie noire constante ; 2018, $67,4 \pm 0,5$; 73 et 67, 9 % ; cinq écarts-types ; 2022 · Le plan de l'autre chemin, et de la confrontation. Il entre par la carte et refait la chaîne en trois propositions brèves (un angle lu, une taille calculée, une distance), sans « étage par étage » ni « règle graduée », puis donne ce qu'il faut encore, une histoire entière supposée, et la liste de ce que Λ CDM y met ; Planck est cité pour « inféré », et le statut du chiffre est dit sans reprendre la formule du chapitre de l'âge : ce que le modèle attend pour aujourd'hui, lu sur une lumière partie à 380 000 ans. Le deuxième paragraphe est sec : 73 et 67, 9 %, cinq écarts-types, et σ défini en une phrase. Le troisième paragraphe porte le seul lyrisme du plan et la liturgie du chapitre : tout ce que le livre a raconté depuis la première lumière entre dans ce seul calcul, chapitre après chapitre, et la mesure locale ne suppose rien de cela — la chaîne tient si ses deux bouts s'accordent, un maillon cède sinon, dans le modèle ou dans l'échelle ; la chute est la phrase de Riess, citée, sans rien ajouter.

1. *Sur la carte de Planck, les ondes sonores figées vers 380 000 ans se voient sous un angle, leur taille réelle, l'horizon sonore, se calcule avec la physique du plasma primordial, le rapport des deux donne la distance de la surface d'où la lumière est partie, et pour passer de cette distance à la vitesse d'aujourd'hui il faut toute l'histoire de l'expansion entre 380 000 ans et maintenant, que personne n'a vue et que le modèle suppose : un espace plat, de la matière ordinaire, de la matière noire froide et une énergie noire constante ; Planck en tire $67,4 \pm 0,5$ km/s/Mpc, et ses auteurs écrivent eux-mêmes que ce paramètre est « inféré » « en supposant la cosmologie Λ CDM de base » — ce chiffre est ce que le modèle attend pour aujourd'hui, lu sur une lumière partie quand l'Univers avait 380 000 ans.*
2. *Les deux chemins aboutissent à 73 et à 67, un écart d'environ 9 %, qui, rapporté aux incertitudes des deux mesures, vaut cinq écarts-types : un écart-type, noté σ , mesure l'incertitude statistique d'un résultat, et cinq écarts-types sont le seuil à partir duquel les physiciens tiennent une différence pour réelle plutôt que due au hasard des mesures.*
3. *La comparaison vaut par ce que la prédiction contient, car le chiffre du fond diffus 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, la soupe et la première lumière de ce livre, que la recombinaison s'est faite comme la physique atomique le dit, que la matière noire est froide et que sa quantité n'a pas changé, que l'énergie noire a gardé la même densité pendant treize milliards d'années — presque tout ce que ce livre a raconté depuis la première lumière entre dans ce seul calcul, et 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, et en 2022 l'équipe SHOES concluait que « l'origine de ce désaccord désormais ancien reste inconnue ».*

c Le désert et le pôle

Le désert d'Atacama, au Chili, et le pôle Sud ; deux télescopes qui regardent la même lumière que Planck à travers l'atmosphère, avec d'autres détecteurs, sur d'autres régions du ciel ; une carte refaite ; un rapport signé par plus de cent chercheurs ; des parallaxes, des étoiles doubles qui s'éclipsent, des masers dans le disque de galaxies, des céphéides, des géantes rouges ; une seconde route vers la valeur basse, sans aucune carte du fond diffus · Observations de 2019 et 2020, publiées en 2025 ; $66,66 \pm 0,60$, à $6,2\sigma$; $67,19 \pm 0,38$; 2025, $73,50 \pm 0,81$; $6,31$ d'écart pour $0,89$ d'incertitude, $7,1\sigma$; $5,0\sigma$ · Le plan de la vérification, de chaque côté, et il entre par deux lieux. L'objection est posée avant la réponse (R1) : un seul satellite, une erreur propre à lui qui se serait propagée partout, et il fallait refaire la carte. SPT-3G entre par son chiffre, un peu plus bas que Planck, et le jalon par sa citation ; la portée de la confirmation est mesurée sans reprendre « ce n'est pas dans sa carte » : trois instruments ne vérifient qu'une carte, la règle et le trajet, aucun ne les regarde. Le côté local entre par le réseau, dit par sa liste d'indicateurs et par la redondance (une route biaisée se trahirait), et par ses deux écarts chiffrés, dont le second se passe de toute carte du fond diffus ; la chute laisse voir, sans le dire, ce que les deux routes vers la valeur basse ont en commun. Ton de relevé, sec ; les écarts-types entrent comme des rapports qui se voient.

1. Dans le désert d'Atacama, au Chili, et au pôle Sud, deux télescopes, ACT et SPT, regardent à travers l'atmosphère la même lumière que Planck observait depuis l'espace, avec d'autres détecteurs et sur d'autres régions du ciel : jusqu'à récemment, la valeur basse reposait pour l'essentiel sur un seul satellite, et une erreur propre à cet instrument, dans son étalonnage ou dans le traitement des émissions de la Galaxie qui se superposent au fond diffus, se serait propagée dans tous ses résultats — pour l'écarter, il fallait refaire la carte avec d'autres instruments.
2. 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 et obtient seule, sans Planck, $66,66 \pm 0,60$ km/s/Mpc, à $6,2\sigma$ des mesures locales de SHOES, une valeur même un peu plus basse que celle du satellite ; le même article marque un jalon, pour la première fois les données combinées des télescopes au sol, ACT et SPT, atteignent la puissance de Planck sur certains paramètres, et comme leurs erreurs possibles ne sont pas celles d'un satellite, qu'ils retrouvent la même valeur écarte une erreur propre à Planck ; les trois expériences réunies donnent $67,19 \pm 0,38$ km/s/Mpc, la contrainte la plus précise jamais tirée du fond diffus, et les données du fond diffus seules, précise l'équipe, ne montrent aucun signe de physique au-delà de Λ CDM.
3. Cette confirmation a une portée précise : elle porte sur la carte et sur les angles qu'on y lit, pas sur la taille calculée ni sur l'histoire supposée, Planck, ACT et SPT analysant leurs cartes avec la même physique d'avant la recombinaison et le même modèle, de sorte que s'il manque un ingrédient à cette physique, il manque pour les trois — trois instruments ne vérifient qu'une carte, la règle et le trajet, aucun d'eux ne les regarde.
4. Du côté local, la réponse à la même objection a pris la forme d'un rapport collectif : en 2025 le réseau HODN, pour H0 Distance Network, publie un rapport de consensus signé par plus de cent chercheurs, qui ne repose pas sur une seule échelle mais combine des parallaxes, des étoiles doubles qui s'éclipsent l'une l'autre, des masers, sources d'émission radio intense dans le disque de certaines galaxies, des céphéides, des géantes rouges et d'autres encore, chaque barreau pouvant être posé par plusieurs routes et une route biaisée se trahissant par son désaccord avec les autres ; le résultat de base est $73,50 \pm 0,81$ km/s/Mpc, une valeur que ses auteurs jugent « robustement déterminée », à $7,1\sigma$ de la combinaison Planck + SPT + ACT, $6,31$ km/s/Mpc d'écart pour une incertitude combinée de $0,89$, et à $5,0\sigma$ d'une combinaison qui se passe entièrement du fond diffus, la nucléosynthèse primordiale, qui fixe la quantité de matière ordinaire, associée aux oscillations acoustiques mesurées par DESI, qui relèvent la même règle sonore dans la répartition des galaxies — cette seconde route vers une valeur basse n'emprunte aucune carte du fond diffus ; elle s'appuie, elle aussi, sur la physique de l'Univers primordial.

▯ Le sommet des géantes rouges

Une étoile de faible masse qui a épuisé l'hydrogène de son cœur et gonfle en géante rouge, de plus en plus lumineuse, jusqu'à un maximum au-delà duquel son évolution change brutalement ; le télescope spatial Webb tourné vers les galaxies qui ont abrité des supernovas ; l'équipe de Wendy Freedman, le Chicago Carnegie Hubble Program ; quatre jeux de mesures de supernovas ; une erreur qui décale tout dans le même sens et ne diminue pas quand on multiplie les observations · 68,4 à 69,6 km/s/Mpc ; 2,4 au-dessus du fond diffus, 3,9 sous HODN ; 1,2 de jeu selon l'échantillon, plus que l'incertitude totale de HODN ; 2025 · Le plan du camp divisé, et il entre par une étoile, une image seule : la géante rouge qui monte jusqu'à un sommet commun à toutes. Freedman entre par ce choix, une échelle sans céphéides, Webb par le sommet qu'il mesure. Le deuxième paragraphe lit le chiffre par sa place et par sa fourchette, deux soustractions qui se voient, et avoue ce que la base ne donne pas (les incertitudes du CCHP). Le troisième dit ce que 5σ ne dit pas, et le fait par la définition de l'erreur systématique, posée avant la citation prudente du CCHP (R1) ; les deux positions sont rangées sans être départagées, la base ne dit pas pourquoi elles divergent alors que HODN compte aussi les géantes rouges, et la chute retient un fait à deux faces, sans verdict (R4). Ton sec, pas un adjectif sur les équipes.

- 1. 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, et ce maximum d'éclat est à peu près le même pour toutes les étoiles de ce type, le sommet de la branche des géantes rouges, qui sert donc d'étalon de distance : l'équipe de Wendy Freedman, le Chicago Carnegie Hubble Program, a construit son échelle sans les céphéides, elle étalonne les supernovas avec ce sommet, qu'elle mesure avec le télescope spatial Webb dans les galaxies qui ont abrité des supernovas.*
- 2. Le résultat tombe entre 68,4 et 69,6 km/s/Mpc, selon celui des quatre jeux de mesures de supernovas qu'on utilise, et deux choses se voient dans ce chiffre : sa place, entre les deux camps mais plus près du fond diffus, la borne haute, 69,6, dépassant de 2,4 km/s/Mpc la valeur du fond diffus et restant à 3,9 sous celle de HODN ; et 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 HODN — les sources de ce livre ne donnent pas l'incertitude propre à chacune des quatre valeurs, et ne permettent donc pas de dire à combien d'écarts-types elles se trouvent de l'un ou l'autre camp.*
- 3. Le seuil de cinq écarts-types dit qu'un écart est trop grand pour être dû au hasard des mesures, il ne dit pas d'où vient l'écart, et 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 produire un écart très significatif et entièrement faux ; c'est sur ce terrain que le CCHP demande 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 », et les deux positions se dessinent ainsi, d'un côté SHOES et le réseau HODN qui jugent la valeur locale « robustement déterminée », de l'autre le CCHP qui soupçonne dans l'échelle des distances locales des erreurs qui la tireraient vers le haut, sans que les sources de ce livre disent lesquelles, ni pourquoi les deux camps divergent alors que HODN compte lui aussi les géantes rouges parmi ses indicateurs — 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.*

E Retoucher la règle

Un angle lu sur la carte à 0,03 % près, sur lequel trois instruments s'accordent ; un trajet tardif que les oscillations acoustiques et les supernovas relèvent époque par époque ; l'horizon sonore, $144,43 \pm 0,26$ mégaparsecs, et sa marge qui ne couvre que les fluctuations à l'intérieur d'une physique ; Lloyd Knox et Marius Millea ; un plasma qui atteint 3 000 kelvins plus tôt ; une énergie noire précoce, une recombinaison déplacée, un électron un peu plus lourd ; un spectre que toute retouche abîme ; la jonction entre le fond diffus et les galaxies · Avant 380 000 ans ; les onze derniers milliards d'années, mesurés ; $144,43 \pm 0,26$; 3 000 kelvins ; des préférences de 2 à 3σ ; $2,3\sigma$ selon DESI, $2,8\sigma$ selon SPT-3G · Le plan de l'hypothèse « l'échelle est juste », et il entre par les trois prises qu'offre le calcul, dans l'ordre où elles se ferment (R1) : le premier étage mesuré, le troisième désormais mesuré lui aussi, et reste le deuxième. Knox et Millea entrent par ce qu'ils font, raccourcir la règle, et l'enchaînement est dit en une suite de causes plus brève qu'au chapitre de l'âge, sans « la carte resterait la même, sa lecture changerait » : 3 000 kelvins plus tôt, moins de temps pour le son, règle plus courte, même angle, surface plus proche, expansion plus rapide sur le trajet, H_0 monte, l'âge descend, deux nombres tirés de la même carte. Les candidats entrent par leur nom et par leur mécanisme, dont l'électron par ses niveaux d'énergie ; leur statut est un chiffre, 2 à 3, et une phrase, aucune n'est établie ; la contrainte est dite par ce que la carte enregistre aussi. Le dernier paragraphe pose le second écart, plus faible, et la chute le situe sans en tirer rien : exactement la période où l'énergie noire agit. Ton de calcul, sec.

- 1. Si la valeur locale est juste, le modèle doit céder quelque part, et des trois étages du calcul le premier n'offre aucune prise, l'angle est lu sur la carte à 0,03 % près, presque indépendamment du modèle, et trois instruments s'accordent sur la carte ; le troisième, l'histoire de l'expansion tardive, est supposé, et on pourrait imaginer de la modifier pour que la même distance corresponde à un H_0 plus élevé, mais cette histoire 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, et toute retouche tardive doit s'accorder avec ces relevés.*
- 2. Reste le deuxième étage, l'horizon sonore, $144,43 \pm 0,26$ mégaparsecs, calculé 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 est complète : c'est là que Lloyd Knox et Marius Millea situent les solutions les plus plausibles, celles qui augmentent le taux d'expansion avant la recombinaison, et la suite se déroule d'elle-même, un Univers qui s'étend plus vite atteint plus tôt les 3 000 kelvins où les atomes se forment, le son a moins de temps pour voyager dans le plasma, la règle rétrécit, l'angle sous lequel on la voit est mesuré et ne bouge pas, une règle plus courte vue sous le même angle est plus proche, et 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 H_0 déduit augmente, l'âge diminue, deux nombres tirés de la même carte qui changent ensemble si la physique d'avant la recombinaison change.*
- 3. Plusieurs mécanismes pourraient faire cela : une énergie noire précoce, une composante supplémentaire qui aurait pesé un peu dans le budget de l'Univers peu avant la recombinaison puis se serait effacée ; une recombinaison modifiée, dans son moment ou dans son déroulement ; une masse de l'électron légèrement différente à cette époque, qui 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 ; l'analyse de SPT-3G, combinée aux oscillations acoustiques, trouve de légères préférences pour plusieurs modèles ainsi modifiés, entre 2 et 3σ , et aucune n'est établie, parce que ces solutions ne sont pas libres, toucher à la physique d'avant la recombinaison modifie aussi la manière dont les photons diffusent dans le plasma et la forme des oscillations, que la carte enregistre avec la même précision que leur position, et une solution doit raccourcir la règle d'environ ce qu'il faut sans abîmer le reste d'un spectre que Λ CDM ajuste déjà très bien.*
- 4. Un second écart, plus faible, apparaît à la jonction entre le fond diffus et les galaxies : dans Λ CDM, les paramètres tirés du fond diffus et ceux tirés des oscillations acoustiques de DESI ne s'accordent pas tout à fait, $2,3\sigma$ selon l'équipe de DESI, $2,8\sigma$ selon celle de SPT-3G, moins que le seuil d'une découverte et bien moins que la tension sur H_0 — 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.*

F Quatorze millions de galaxies

La plus vaste carte en trois dimensions de l'Univers jamais réalisée, plus de 14 millions de galaxies et de quasars ; un point de départ dans le fond diffus, un point d'arrivée dans les mesures locales, et entre les deux un trajet relevé ; une équation d'état, w , qu'on laisse varier ; trois grands échantillons de supernovas, dont celui du Dark Energy Survey ; 1 800 supernovas dont on remeasure l'éclat ; un signal qui naît à la jonction · 2025 ; onze milliards d'années ; $w_0 > -1$, $w_a < 0$; $3,1\sigma$ avec le fond diffus, $2,8$ à $4,2\sigma$ avec les supernovas ; il y a environ cinq milliards d'années ; 2026, de $4,2$ à $3,2$; $1,1$ à $2,3\sigma$ sans le fond diffus ; septembre 2026 · Le plan de DESI, et il entre par la carte, le seul lyrisme permis du plan : un point de départ, un point d'arrivée, un trajet relevé. L'équation d'état entre par son nom et par ce qu'elle dit d'une constante (-1 , toujours), w_0 et w_a par ce qu'ils mesurent ; le signal est donné avec ses deux chiffres et rendu à ce qu'il signifierait pris au pied de la lettre, une énergie noire qui aurait crû puis décliné, le mot « fantôme » cité comme nom une seule fois. Le troisième paragraphe est la recalibration, dite par son image propre : un écart-type entier disparu sans une seule observation nouvelle du ciel, et les mêmes objets que ceux de l'échelle locale, sans reprendre « faible préférence » autrement que comme la citation obligatoire. Le quatrième donne l'analyse tardive seule et la jonction, avec les deux lectures laissées à égalité (R_4) ; le dernier range le statut en septembre 2026 par trois faits, et la chute sépare les deux doutes par leur époque, sans les relier, parce que la base ne le fait pas. Ton sec, celui des statuts.

- 1. Le relevé DESI, pour Dark Energy Spectroscopic Instrument, a construit la plus vaste carte en trois dimensions de l'Univers jamais réalisée, plus de 14 millions de galaxies et de quasars dans ses données de 2025, et il y suit l'influence de l'énergie noire sur les onze derniers milliards d'années par la méthode du chapitre précédent, la règle sonore figée à 380 000 ans retrouvée dans la répartition des galaxies à différentes distances, donc à différentes époques : là où le fond diffus donne un point de départ et les mesures locales un point d'arrivée, DESI relève le trajet.*
- 2. Ce qu'on cherche sur ce trajet est le comportement de l'énergie noire, que les cosmologistes résument par son équation d'état w , le rapport entre sa pression et sa densité d'énergie, qui vaut exactement -1 en tout temps pour une constante cosmologique dont la densité ne change jamais ; DESI laisse w varier et le décrit par deux nombres, w_0 , sa valeur aujourd'hui, et w_a , de combien il a changé au cours de l'expansion, et ses données de 2025 préfèrent $w_0 > -1$ et $w_a < 0$, à $3,1\sigma$ avec le fond diffus, de $2,8$ à $4,2\sigma$ en ajoutant les supernovas selon l'échantillon utilisé : une énergie noire qui se comporterait aujourd'hui un peu moins qu'une constante, sa densité diminuant lentement quand l'Univers s'étend, et dont le w était plus bas dans le passé, plusieurs analyses plaçant il y a environ cinq milliards d'années son passage d'une valeur inférieure à -1 , dite « fantôme », où la densité croît quand l'espace grandit, à une valeur supérieure — pris au pied de la lettre, le signal dit une énergie noire qui aurait crû pendant une partie de l'histoire, puis se serait mise à décliner.*
- 3. Les supernovas apportent à ce signal les distances relatives des époques récentes, et trois grands échantillons coexistent, dont celui du Dark Energy Survey, sur lequel reposait le chiffre de $4,2\sigma$: en 2026, l'équipe de DES réanalyse son programme avec un étalonnage révisé de ses quelque 1 800 supernovas, l'échantillon DES-Dovekie, et la préférence tombe à $3,2\sigma$, une « faible préférence » selon ses auteurs — 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, les mêmes objets dont dépend aussi l'échelle locale de H_0 .*
- 4. Une autre analyse montre 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 $2,3\sigma$ selon les modèles, et 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 de $2,3$ à $2,8\sigma$ dans Λ CDM ; les deux constats sont compatibles avec une énergie noire réellement variable, qui expliquerait ce désaccord de raccord, et aussi avec un désaccord de raccord dont l'origine serait ailleurs et qu'une énergie noire variable se contenterait d'absorber dans l'ajustement, et les sources de ce livre ne départagent pas ces deux lectures.*
- 5. Aucune combinaison n'atteint les 5σ exigés d'une découverte, et en septembre 2026 le signal de DESI est un indice sérieux, retrouvé dans plusieurs combinaisons de données, assez fort pour qu'une équipe ait réanalysé ses supernovas, et affaibli à cette réanalyse, ni confirmé ni réfuté — les deux doutes de ce chapitre ne portent pas sur la même époque, l'un sur la physique d'avant 380 000 ans, l'autre sur l'énergie noire des derniers milliards d'années, et rien, dans les sources de ce livre, ne dit si l'un réduirait ou aggraverait l'autre.*

G Le Soleil ne bougerait pas

Un âge de référence qui dépend de deux choses, la vitesse d'aujourd'hui et la composition qui dit comment elle a changé ; une marge de vingt millions d'années qui ne mesure que le jeu des mesures à l'intérieur d'un modèle ; une règle de trois faite pour ce livre ; les premières minutes et les 380 000 ans, qui ne bougent presque pas ; un grain de météorite daté sans cosmologie ; le Soleil à 9,2 milliards d'années après le Big Bang, ou à 8,1 ; l'étoile Mathusalem ; une question close en 1998 qui se rouvrirait ; l'époque d'où on regarde toute cette histoire · $13,787 \pm 0,020$ milliards d'années ; environ 12,7 pour 73,5 ; un peu plus d'un milliard d'années d'enjeu ; les premières minutes, 380 000 ans ; 4 567,30 millions d'années ; 9,2 et 8,1 ; $14,27 \pm 0,80$; un milliard et demi ; 1998 · Plan de fermeture, et le plan liturgique du chapitre. Il entre par l'âge de référence rendu à ce dont il dépend, et dit la marge sans reprendre « elle ne dit rien de l'erreur commise si le modèle était faux » autrement que par l'image du jeu intérieur : l'erreur d'un modèle faux n'a pas de marge. La règle de trois entre comme un calcul avoué pour ce livre, l'enjeu dit par sa taille (un peu plus d'un milliard d'années) sans le facteur cinquante dépensé au chapitre de l'âge, et le sens donné par Knox et Millea. Le troisième paragraphe sépare ce qui bougerait peu (l'énergie noire variable, les derniers milliards d'années) de ce qui ne bougerait presque pas (le premier jour), par la part de l'énergie noire à ces époques et par la seule famille qui y toucherait. Le quatrième est l'image propre du chapitre, et le seul lyrisme permis : le Soleil daté dans ses pierres, 9,2 qui deviendrait 8,1, et le Soleil qui ne bouge pas tandis que le début de la phase chaude se rapproche de lui. Mathusalem revient sans refaire le chapitre de l'âge (ni « quarante fois » développé, ni « un seul sens ») : par ce que 12,7 ferait, un milliard et demi sous l'étoile, et par la question de 1998 qui se rouvrirait, reprise de la chute du chapitre précédent. Le dernier paragraphe range le premier jour et le présent, nomme ce dont le futur dépend, et la chute atteste l'époque d'où tout cela est regardé, sans « nous » et sans morale (R4).

- 1. L'âge de référence, $13,787 \pm 0,020$ milliards d'années, dépend de deux choses, la vitesse de l'expansion aujourd'hui et la composition, qui dit comment cette vitesse a changé, et il est calculé dans Λ CDM avec les données de Planck et les oscillations acoustiques des baryons ; sa marge de vingt millions d'années est le jeu des mesures à l'intérieur du modèle, de combien l'âge varierait si l'on refaisait les observations en tenant le modèle pour vrai, et l'erreur qu'on ferait si le modèle était faux n'a pas de marge.*
- 2. Pour donner une taille à cette erreur possible, on peut faire une règle de trois, puisqu'à composition égale l'âge varie comme l'inverse de H_0 : avec 73,5 km/s/Mpc au lieu de 67,66, il tomberait à environ 12,7 milliards d'années, un calcul fait pour ce livre, qui n'est pas publié tel quel et qui ignore qu'une solution réelle à la tension modifierait aussi les autres paramètres, mais qui donne la taille de l'enjeu, un peu plus d'un milliard d'années ; pour les solutions précoces, l'enchaînement de Knox et Millea dit dans quel sens l'âge bougerait, vers le bas, et les sources de ce livre ne donnent pour aucun modèle précis l'âge qu'il prédit.*
- 3. Une énergie noire variable ferait beaucoup moins bouger l'âge, parce qu'elle agit sur les derniers milliards d'années, quand l'énergie noire pèse dans le bilan, et qu'avant la matière dominait, de sorte qu'elle ne modifierait qu'une partie du compte, et d'une quantité que les écarts de w observés laissent modeste, un raisonnement que les sources ne chiffrent pas ; les dates comptées depuis le début de la phase chaude, les premières minutes de la nucléosynthèse et les 380 000 ans de la première lumière, ne changeraient presque pas, le rythme de l'expansion à ces époques étant fixé par les densités de la matière et du rayonnement que la carte mesure, l'énergie noire en représentant alors de l'ordre du milliardième et le H_0 d'aujourd'hui n'y entrant pas — une seule famille d'hypothèses y toucherait, celles qui accélèrent l'expansion avant la recombinaison, un Univers plus rapide atteignant plus tôt les 3 000 kelvins, et les 380 000 ans raccourciraient un peu, d'une quantité que la carte limite.*
- 4. 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, et le Système solaire montre la différence : son « il y a », 4 567,30 millions d'années, est lu par une horloge radioactive dans des météorites, sans aucune cosmologie, et 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 — le Soleil ne bougerait pas ; c'est le début de la phase chaude qui se rapprocherait de lui.*
- 5. Un garde-fou indépendant limite ces révisions, l'Univers ne peut pas être plus jeune que ses étoiles, et l'âge d'une étoile se calcule par les modèles d'évolution stellaire sans passer par l'expansion : pour l'étoile dite Mathusalem, ces modèles donnent $14,27 \pm 0,80$ milliards d'années, un âge compatible avec celui que calcule Planck, et le garde-fou est lâche, sa marge bien plus large que celle de Planck, sans être muet, un Univers de 12,7 milliards d'années se trouverait un milliard et demi sous la valeur centrale de l'étoile, deux fois sa marge, sans compter les quelques centaines de millions d'années qu'il a fallu pour que naissent les premières étoiles — 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.*

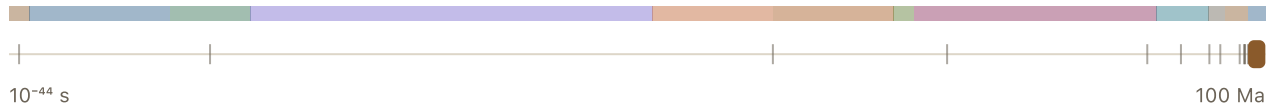
6. Le premier jour est calculé avec une physique testée, et ses dates tiennent quelle que soit l'issue des deux tensions ; le présent dépend d'une composante dont la nature est inconnue, dont la constance vient d'être mise en doute par DESI et dont le rythme d'expansion oppose deux méthodes, et c'est de cette composante que dépend aussi ce qui vient, le sort de l'Univers étant fixé par la quantité d'énergie noire et par son équation d'état, une constante promettant une expansion sans fin, une énergie noire qui varie ouvrant d'autres issues — la période la moins bien comprise de toute cette histoire est celle d'où on la regarde.

Un ciel qui se vide

futur

synopsis seul

brouillon



Si l'énergie noire est constante, les galaxies lointaines sortent une à une de l'horizon et l'Univers se refroidit sans fin. Si elle croît, elle déchire les structures ; si elle décline, l'expansion peut s'inverser. Aucune de ces échéances n'est une prévision.

Que décide l'énergie noire de la fin de l'Univers ?

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 ? ☐ synopsis seul ☐ brouillon

Qui raconte ?

[synopsis seul](#)[brouillon](#)

Les dates du livre sont en temps cosmique, celui d'un observateur qui suit l'expansion sans bouger ; nous n'en sommes pas un. Nous filons à 370 km/s par rapport au fond diffus, et sur la vie du Système solaire nos horloges ont pris quelques milliers d'années de retard, sans effet sur les dates mais révélateur de la place d'où l'on mesure. Le calendrier du livre coud deux sortes de dates, calculées dans un modèle jusqu'au Soleil, lues dans des pierres depuis ; et de lointains astronomes, privés des galaxies lointaines et du fond diffus, ne pourraient plus le reconstituer.

D'où l'histoire du cosmos est-elle racontée, et qu'est-ce que cette place permet ou interdit d'en savoir ?