

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 · 3 rédigés · 10 700 mots · état au 11/10/2026

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

synopsis seul

synopsis seul

synopsis seul

synopsis seul

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

synopsis seul

synopsis seul

synopsis seul

synopsis seul

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)

synopsis seul

synopsis seul

synopsis seul

synopsis seul

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

synopsis seul

synopsis seul

synopsis seul

synopsis seul

synopsis seul

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

synopsis seul

synopsis seul

synopsis seul

synopsis seul

VII · ÉPILOGUE

- 25 Qui raconte ?

synopsis seul

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

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, 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, 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, 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.

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 dé-

coupent pas le monde dans le même « maintenant » ; ce qui est simultané 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.

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.

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

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.

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, 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 ».

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'a 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.

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'ap-

proche « 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.

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.

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 Le-

maître, 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

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.

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.

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 millièmes 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.

« 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, 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.

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.

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.

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 Lehners 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 [synopsis seul](#) [brouillon](#)
2. Trois minutes pour faire l'hydrogène et l'hélium [synopsis seul](#) [brouillon](#)
3. La première lumière [synopsis seul](#) [brouillon](#)
4. Un âge calculé [synopsis seul](#) [brouillon](#)

La soupe

10^{-12} s à 1 s

synopsis seul

brouillon

La symétrie électrofaible se brise et les particules acquièrent leur masse ; un léger excès de matière sur l'antimatière survit à l'annihilation, sans qu'on sache pourquoi. Vers 10^{-5} s, les quarks se lient en protons et neutrons. Vers une seconde, les échanges entre neutrons et protons gèlent à un pour six, et les neutrinos cessent d'interagir : ils voyagent librement depuis.

Comment une soupe de particules devient-elle des protons et des neutrons, et pourquoi en reste-t-il ?

Trois minutes pour faire l'hydrogène et l'hélium

3 à 20 minutes

synopsis seul

brouillon

Pendant trois minutes, la lumière casse chaque noyau de deutérium qui se forme, et les neutrons se désintègrent. Quand elle faiblit, les neutrons survivants se réfugient en quelques minutes dans l'hélium. Il en sort 75 % d'hydrogène et 25 % d'hélium, et la chaîne s'arrête faute de noyau stable de masse 5 ou 8. Le deutérium et l'hélium tombent juste ; le lithium, trois fois trop rare, reste la seule fausse note.

D'où vient l'hydrogène de l'Univers, et pourquoi la chaîne s'arrête-t-elle si tôt ?

La première lumière

47 000 à 380 000 ans

synopsis seul

brouillon

Vers 47 000 ans, la matière l'emporte sur le rayonnement et la gravité commence à creuser les inégalités de densité. Vers 380 000 ans, à 3 000 K, les électrons se lient aux noyaux : la lumière cesse de rebondir et part en ligne droite. Deux ingénieurs la trouvent en 1964-1965 comme un bruit dans leur antenne ; COBE, WMAP et Planck y lisent les notes d'un Univers qui vibrait.

Quand l'Univers devient-il transparent, et que porte cette lumière ?

Un âge calculé

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

Planck mesure sur sa carte une échelle angulaire, la taille apparente des ondes sonores figées vers 380 000 ans, à 0,03 % près. La physique d'avant la recombinaison donne leur taille réelle, 144 mégaparsecs ; le rapport des deux donne la distance de la plus vieille lumière. Pour en tirer un âge, il faut supposer l'histoire de l'expansion du modèle standard : on obtient 13,8 milliards d'années, avec la composition et le rythme d'expansion qui vont avec.

Comment passe-t-on d'une carte du ciel à l'âge de l'Univers, et sur quelles hypothèses ?

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 [synopsis seul](#) [brouillon](#)
2. Les premières étoiles [synopsis seul](#) [brouillon](#)
3. Trop tôt, trop brillantes [synopsis seul](#) [brouillon](#)
4. Le rallumage [synopsis seul](#) [brouillon](#)

Les âges sombres

$\sim 0,4$ à ~ 100 Ma

synopsis seul

brouillon

L'Univers est rempli d'hydrogène et d'hélium neutres, sans aucune source de lumière. La gravité rassemble le gaz sans qu'on puisse l'observer. Un signal radio de l'aube, annoncé par EDGES, reste contesté.

Que se passe-t-il quand rien ne brille, et comment le saurait-on ?

Les premières étoiles

~ 100 à ~ 270 Ma ($z \approx 30$ à 15)

synopsis seul

brouillon

Des étoiles sans métaux naissent en petits amas, peut-être très massives, et forgent les premiers éléments au-delà du lithium. Aucune n'a été observée : leur existence est une nécessité, leurs propriétés une théorie. Le meilleur candidat, LAP1-B, est trouvé tard, dans une poche de gaz restée vierge, derrière une loupe gravitationnelle.

Les premières étoiles ont-elles été vues, ou seulement déduites ?

Trop tôt, trop brillantes

dès ~ 280 Ma

synopsis seul

brouillon

Webb confirme MoM-z14, vue 280 millions d'années après le début. Les galaxies brillantes de cette époque sont cent fois plus nombreuses que prévu, et contiennent déjà de l'oxygène. Les explications en concurrence restent pour la plupart dans le modèle standard : c'est la formation des galaxies qui est bousculée, pas le Big Bang.

Les galaxies trop précoces de Webb remettent-elles en cause le Big Bang ?

Le rallumage

$\sim 0,3$ à $\sim 1,1$ Ga

synopsis seul

brouillon

La lumière des premières galaxies ionise de nouveau le gaz intergalactique, par bulles qui grandissent et se rejoignent. Planck situe le mi-parcours vers 670 millions d'années, les quasars la fin vers 1,1 milliard. Les galaxies naines fournissent l'essentiel des photons, mais le bilan n'est pas bouclé.

Comment l'Univers redevient-il transparent, et qui a fourni la lumière ?

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

synopsis seul

brouillon

Les étoiles brûlent l'hydrogène en hélium, puis l'hélium en carbone par la réaction triple alpha. Les plus massives vont jusqu'au silicium, qui brûle en cinq jours contre dix millions d'années pour l'hydrogène ; la forge s'arrête au fer et le cœur s'effondre en quelques secondes. Vents d'étoiles moyennes, supernovas à effondrement et naines blanches qui explosent se partagent le tableau périodique jusqu'au fer.

Comment les étoiles fabriquent-elles les éléments, et pourquoi s'arrêtent-elles au fer ?

L'or des catastrophes

synopsis seul

brouillon

En août 2017, deux étoiles à neutrons fusionnent : on les détecte en ondes gravitationnelles, puis on voit briller les éléments lourds tout juste formés. Mais ces fusions arrivent trop tard pour expliquer les étoiles les plus anciennes ; collapsars et supernovas magnéto-rotationnelles restent en lice sans preuve directe. En 2025, un sursaut de magnétar relu vingt ans après s'ajoute aux candidats.

Où se fabrique l'or, puisque les étoiles ordinaires s'arrêtent au fer ?

Une Galaxie agitée

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

synopsis seul

brouillon

Une proto-Galaxie désordonnée se met à tourner, et le disque ancien commence à se former il y a 13 milliards d'années. Il y a 10 à 11 milliards d'années, la Voie lactée absorbe Gaia-Enceladus, dont les débris peuplent encore le halo autour de nous.

Comment notre Galaxie s'est-elle assemblée, et comment le lit-on dans ses étoiles ?

Le Soleil arrive tard

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

synopsis seul

brouillon

Le Soleil naît aux deux tiers de l'histoire cosmique, d'un gaz dont 1,4 % de la masse a été forgé par les étoiles et qui a fait trop de tours de recyclage pour qu'on compte des générations. Plus riche en métaux que ses voisins du même âge, il est probablement né plus près du centre de la Galaxie, qu'il a quitté avec une foule d'étoiles. Dans les premiers solides des météorites, deux uraniums qui se désintègrent en deux plombs donnent 4 567 millions d'années ; en accordant cette horloge à celle de l'aluminium, Desch et ses collègues reculent ce $t = 0$ d'environ un million d'années en 2023.

De quoi le Soleil est-il fait, d'où vient-il, et comment connaît-on sa date de naissance ?

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 [synopsis seul](#) [brouillon](#)
2. La Terre et la Lune [synopsis seul](#) [brouillon](#)
3. L'eau, les océans et l'air [synopsis seul](#) [brouillon](#)
4. Ce dont la vie est faite [synopsis seul](#) [brouillon](#)
5. Les dernières secondes de décembre [synopsis seul](#) [brouillon](#)

Le disque et les planètes

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

synopsis seul

brouillon

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 $t = 0$.

Comment un disque de poussière fait-il des planètes, et dans quel ordre ?

La Terre et la Lune

synopsis seul

brouillon

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.

Quand la Terre et la Lune se forment-elles, et sur quoi lit-on ces dates ?

L'eau, les océans et l'air

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

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.

D'où vient l'eau de la Terre, et depuis quand forme-t-elle des océans ?

Ce dont la vie est faite

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

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.

Que doit un corps vivant au premier jour, et que doit-il aux étoiles ?

Les dernières secondes de décembre

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

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

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.

Depuis quand la Terre porte-t-elle la vie, et quelle part de l'histoire cosmique occupent ceux qui la racontent ?

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 synopsis seul brouillon
2. Le tournant synopsis seul brouillon
3. Deux mesures qui ne s'accordent pas synopsis seul brouillon
4. Un ciel qui se vide synopsis seul brouillon

Ce qu'on ne voit pas

synopsis seul

brouillon

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.

Qu'est-ce qui tient les galaxies, si ce n'est pas la matière qu'on voit ?

Le tournant

~9,8 Ga (découverte en 1998)

synopsis seul

brouillon

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.

Pourquoi l'expansion accélère-t-elle, et depuis quand ?

Deux mesures qui ne s'accordent pas

aujourd'hui ($\sim 13,8$ Ga)

synopsis seul

brouillon

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.

Que vaut le modèle standard quand deux mesures du présent se contredisent ?

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 ?