

## L'âge de l'Univers est-il vraiment fini ?

*Jean-Marc Lévy-Leblond*

Le présent texte comporte deux parties.  
La première offre une discussion purement conceptuelle du problème posé,  
cependant que la seconde en donne une version théorique formalisée.

### I. Un début sans commencement<sup>1</sup>

La cosmologie physique moderne, sous l'étiquette à sensation de "théorie du Big Bang", a largement débordé les milieux professionnels, pour se répandre, sous des formes plus ou moins simplifiées ou déformées, dans le champ du savoir commun. Il est ainsi de notoriété publique que, « comme les savants l'ont démontré, l'Univers est né voici environ 20 milliards d'années en une gigantesque explosion – le "Big Bang" ». Cette "naissance" de l'Univers est vite, plus ou moins explicitement, assimilée à une création, et fait ainsi les choux gras de la récupération apologétique. Mais, indépendamment de telles exploitations, l'idée même d'une "origine" de l'Univers ne laisse pas de troubler les esprits, ceux des scientifiques autant que ceux des profanes, d'ailleurs.

Qu'un physicien puisse aujourd'hui discuter ès qualité la notion d'origine ne va pas de soi : la question pour sa discipline, est plutôt nouvelle. Telle qu'elle s'est constituée classiquement, du dix-septième siècle galiléen au début einsteinien du vingtième siècle, la physique s'est voulue résolument anhistorique. Elle a progressivement perdu son intérêt pour l'étude des choses particulières de ce monde et s'est consacrée à devenir science des lois générales et intemporelles qui régissent ces choses et leurs changements conjoncturels. On peut la considérer comme un effort déterminé pour construire dans l'espace-temps une scène, bientôt confondue avec cet espace-temps lui-même, assez vaste pour que puissent s'y jouer toutes les représentations du monde matériel. C'est dire que l'étude d'objets spécifiques, de leur évolution, de leur histoire et donc de leur origine, a été progressivement déléguée à des disciplines ancillaires ou extérieures. Ainsi l'histoire – et l'origine – de la Terre est-elle assignée à la géophysique, celle du Système solaire à l'astrophysique, celle de la vie à la biologie, etc. Le physicien pouvait donc se considérer, jusque dans les années 1920, comme un chercheur de vérités éternelles, disposant d'un cadre fixe et permanent à l'intérieur duquel seulement se poseraient des problèmes d'ordre généalogique. Au demeurant, il a toujours été de bon ton pour le physicien d'affecter une sorte de commisération désabusée pour le questionnement des origines, souvent et rapidement renvoyé à l'aporie de l'oeuf et de la poule.

---

<sup>1</sup> Ce texte est adapté de « L'origine des temps », in Jean-Marc Lévy-Leblond, *La pierre de touche (La science à l'épreuve...)*, Gallimard (Folio-Essais), 1996, pp. 337-350.

La décennie 1920-1930 a fait basculer cette vision, et réintroduit triomphalement l'histoire dans la physique. Évacuée "par le bas" vers des sciences considérées usuellement comme moins fondamentales, elle est revenue "par le haut" lorsque, en un geste d'extrême présomption, la physique s'est donné comme objet d'étude propre, rien moins que l'Univers dans son ensemble, c'est-à-dire le cadre spatio-temporel le plus général possible et son contenu matériel total. Les premiers modèles théoriques (Einstein, de Sitter, 1917) de cette cosmologie désormais scientifique montrèrent les difficultés rencontrées par toute conception statique : des hypothèses fort particulières et assez arbitraires sont nécessaires pour permettre à l'Univers de rester stationnaire, sans changements, identique à lui-même. Les travaux essentiels de Friedmann (1922-1924) et de Lemaître (1927) mirent en évidence l'évolutivité générique des modèles cosmologiques cependant que l'observation historique de l'éloignement mutuel des galaxies (Hubble, 1926) vint rapidement confirmer que l'Univers, de fait, évoluait<sup>2</sup>. On a pris l'habitude d'appeler "expansion de l'Univers" ce phénomène de récession universel. Le terme n'est pas le meilleur, dans la mesure où il suggère l'idée d'un Univers matériel à la fois borné et en cours d'accroissement au sein d'un espace par ailleurs vide – comme un gâteau levant au sein du four. Mais à la vérité, l'Univers n'a pas de limites spatiales définies dont le recul donnerait sens à cette "expansion". Il est homogène, et ne possède aucun point privilégié (« tous les lieux se valent pour lui », comme pour le Chat-qui-s'en-va-tout-seul de Kipling) ; son "expansion" n'a pas de foyer, elle a lieu partout à la fois dans l'espace. Sans doute vaudrait-il mieux parler de la "dilatation de l'Univers".

Mais c'est le temps, plutôt que l'espace, qui nous intéresse ici. La dilatation présente de l'Univers montre qu'il a connu dans le passé un état beaucoup plus condensé. L'étude détaillée, tant théorique qu'observationnelle, de cette dilatation, a permis de remonter le cours du temps jusqu'à un stade primordial d'extrême densité, d'où l'Univers actuel est issu par un phénomène expansif, souvent considéré comme explosif – le fameux Big Bang (Figure 1a). Malgré quelques tentatives désespérées pour éviter cette conclusion<sup>3</sup>, le consensus est aujourd'hui très large sur les grandes lignes de ce scénario. C'est l'observation expérimentale (Penzias et Wilson, 1962) d'un "bruit de fond" cosmique de rayonnement électromagnétique, sorte de rumeur radio de l'explosion primordiale affaiblie au cours des temps, qui a emporté la conviction générale. On s'accorde, tout au moins dans la version la plus simple du scénario à dater le Big Bang d'une quinzaine de milliards d'années (en arrondissant). Cette durée est ce qu'on appelle "l'âge de l'Univers" ; sa valeur numérique exacte importe d'ailleurs peu : c'est la signification de ce nombre que nous voudrions comprendre. La finitude admise de l'âge de l'Univers implique-t-elle donc que la théorie physique rejoint et conforte le mythe de la Création ? Puisque regarder loin, c'est regarder tôt (à une distance de deux milliards d'années-lumière, nous voyons

---

<sup>2</sup> Pour une étude historique de la naissance de la cosmologie moderne, voir Jean-Pierre Luminet, *L'invention du Big Bang*, Seuil (Points-Sciences), 2004.

<sup>3</sup> On pense surtout à la théorie moderne d'un Univers stationnaire proposée par Bondi et Gold en 1946, qui exigerait une permanente création de matière *ex nihilo*.

par définition ce qui s'est passé il y a deux milliards d'années), à braquer nos télescopes sur les profondeurs de l'espace, allons-nous apercevoir, à quinze milliards d'années-lumière, la main de Dieu à l'œuvre ? Certains le pensent. Pourtant, s'il est vrai que l'histoire de l'Univers, commence bien par "il fut une fois, il y a quinze milliards d'années...", ce conte de fées est un simple compte de faits que l'on peut interpréter de diverses façons, de façon à traiter le trouble intellectuel commun que suscite l'idée de ce commencement. C'est qu'évidemment, cet énoncé pose immédiatement la question de la pré-histoire : que s'est-il passé avant le Big Bang ?

On peut tenter, par exemple, une opération de banalisation. Après tout, si l'Univers est depuis le Big Bang en dilatation, il serait assez raisonnable d'imaginer qu'il a atteint cet état originel par une contraction préalable. Ainsi, le moment crucial du Big Bang ne serait que celui d'un rebond de l'Univers, rejaillissant après s'être effondré sur lui-même. Cette idée serait d'autant plus attractive qu'elle pourrait s'itérer, l'Univers alternant phases de dilatation et de contraction en une respiration cosmique perpétuelle (Figure 1b), ponctuée périodiquement par des états d'extrême compression, extraordinaires certes, mais quelque peu banalisés par leur répétition indéfinie. Une telle hypothèse suppose donc une future (re)contraction de l'Univers – qui est alors dit "fermé". Mais les données d'observations actuelles sur la vitesse de sa dilatation et sur la densité de son contenu matériel, qui régit son évolution, sont de plus en plus difficilement conciliables avec ce point de vue. Il semble bien au contraire que l'Univers soit "ouvert", et désormais promis à une dilatation perpétuelle. Dès lors et symétriquement, sa contraction préalable doit, elle aussi, avoir été monotone – jusqu'au Big Bang (Figure 1c) ; ainsi, même si ce moment s'insère désormais entre un avant et un après, il n'en demeure pas moins unique et joue un rôle singulier. Étrange d'ailleurs serait l'histoire de cet Univers en contraction, symétrique de l'histoire de sa dilatation que nous observons, et vivons : d'un état infiniment vaste et vide, mais peuplé de structures organisées (atomes, planètes, galaxies ?), il se contracterait en détruisant petit à petit toutes ces structures pour aboutir à l'informe chaos primordial d'où il renaîtrait. Mais cette vision même ne peut guère être prise au sérieux. En effet, l'état originel, dans les modèles cosmologiques usuels, se présente comme une *singularité* essentielle, au sens mathématique précis de ce terme. On veut dire par là qu'il est impossible à la théorie de remonter le temps de façon continue "à travers" le stade primordial, et de relier son éventuel avant à son après (et réciproquement). En ce sens, l'analogie avec le rebond d'une balle de tennis sur le sol (que pourraient suggérer les Figures 1b et 1c) est trompeuse et masque le caractère irréductiblement singulier de cet "instant".

On peut alors s'en remettre à un attentisme résigné. Après tout, nos scénarios actuels ne sont fondés que sur les lois de la physique telles que nous les connaissons... Cette lapalissade se concrétise dès lors que nous devons admettre notre méconnaissance des aspects quantiques de la gravitation. Nous savons pourtant qu'ils doivent nécessairement se manifester sur des échelles de temps inférieures à  $10^{-43}$  s pour le temps et  $10^{-35}$  m pour l'espace. Aussi infimes que soient ces dimensions, elles marquent pour l'instant les bornes d'un domaine à l'intérieur duquel nos théories actuelles sont insuffisantes. On peut d'ailleurs également conjecturer qu'entre les plus petites échelles actuellement maîtrisées par la physique (disons  $10^{-27}$  s et  $10^{-18}$  m) et

celles, rappelées ci-dessus, de la gravitation quantique, d'autres phénomènes, actuellement inconnus, se manifestent. Rien n'interdit donc de penser que la singularité originelle du Big Bang est un simple artefact de notre méconnaissance, et que des progrès ultérieurs dissiperont cette apparence, et doteront l'Univers d'une préhistoire complexe mais respectable, renvoyant à un passé indéfini la question de l'origine. Il n'y a, par essence, que peu à dire sur une telle démarche, à la fois confortable et frustrante. Bien entendu, il est tout à fait légitime de s'intéresser aujourd'hui à la théorie quantique de la gravitation, et d'essayer, malgré de considérables difficultés conceptuelles et calculatoires, d'en tirer des conséquences cosmologiques, sans nul doute appelées à profondément modifier nos conceptions ; pour autant, il reste nécessaire de vérifier la cohérence et d'approfondir l'interprétation des théories désormais "classiques" et certainement approximatives — mais ne le sont-elles pas toutes ? Il ne faut donc pas confondre la question de la validité empirique d'une conception comme celle du Big Bang "standard", avec les questions de sa solidité théorique et de sa signification.

Autrement dit, à l'inverse de ce que pensait Marx de la philosophie, peut-être est-il ici moins urgent de transformer la cosmologie que de l'interpréter... L'apparente finitude de la durée de l'Univers depuis l'état initial, cet intervalle de quinze milliards d'années, doit faire l'objet du soupçon épistémologique. Après tout, la physique a déjà connu, en deux occasions, ce trouble de la pensée suscité par la butée sur une borne brutalement assignée à une grandeur physique. Tout d'abord, la thermodynamique a mis en évidence, au siècle dernier, un "zéro absolu" des températures, qui dans l'échelle Celsius, se situe à  $-273,15^{\circ}\text{C}$ . Après quelque confusion, les physiciens ont reconnu que si l'existence de températures inférieures est inconcevable, s'il est impossible de descendre en-dessous de ce zéro, c'est qu'il est d'abord impossible de l'atteindre. Une situation tout analogue prévaut pour les vitesses. La relativité einsteinienne, au début de ce siècle, a mis en évidence une vitesse limite, d'environ 300.000 km/s. Si cette vitesse est indépassable, c'est qu'elle est inatteignable, en tout cas par les objets matériels usuels. Tant pour la température que pour la vitesse, les physiciens savent aujourd'hui que la finitude apparente des limites ( $-273,15^{\circ}\text{C}$  et 300 000 km/s) tient à des conventions de mesure, certes raisonnables et justifiables, mais particulières. Ces valeurs-limites numériquement finies sont conceptuellement infinies. D'autres définitions de grandeurs fonctionnellement liées à la température ou à la vitesse usuelles peuvent d'ailleurs modifier les échelles de mesure et renvoyer les "limites" à l'infini, mettant en évidence leur caractère asymptotique<sup>4</sup>.

Comme le zéro des températures et la vitesse limite, le Big Bang relève de la même illusion d'optique. L'arbitraire de sa détermination numérique est d'ailleurs patent. Quinze milliards d'années ? Mais qu'était l'année lorsque la Terre n'existait pas encore, ni le Soleil autour duquel sa rotation définit l'année ? Et s'il est vrai que l'unité de temps, la seconde, est aujourd'hui définie par référence à certaine vibration atomique, qu'était la seconde lorsque les atomes n'étaient pas encore formés ? La

---

<sup>4</sup> Voir « Pratiques de l'infini », in Jean-Marc Lévy-Leblond, *La pierre de touche (La science à l'épreuve...)*, Gallimard (Folio-Essais), 1996, pp. 286-307.

remontée du temps utilise des étalons qui, nécessairement, perdent leur signification physique présente en-deçà d'une certaine époque. La mesure se fait en prolongeant une convention dont il ne faut pas oublier la signification et sa progressive abstraction. De fait, le caractère asymptotique du Big Bang apparaît empiriquement par la réduction constante de l'échelle de temps explorée au fur et à mesure qu'on s'en rapproche : on étudie d'abord les quinze milliards d'années écoulées, puis le premier million, puis les premières années, les "trois premières minutes", les premiers millièmes, puis millionnièmes de seconde, etc.<sup>5</sup> La frange du mystère originel diminue *indéfiniment*, sans s'annuler. L'on bute en vérité sur une singularité, autrement dit, sur un point de rupture de la continuité, mieux, de la contiguïté, de l'axe des temps. C'est dire que l'instant "initial" ne peut être considéré comme le début des temps, comme un instant zéro. À proprement parler, il n'appartient pas au temps, qui, dès lors, n'a pas de commencement. Ainsi, on peut affirmer que quinze milliards d'années se sont écoulés depuis le Big Bang, sans pouvoir dire pour autant qu'il s'est produit il y a quinze milliards d'années... Il est donc injustifiable d'interpréter ce scénario cosmogonique comme une création ex-nihilo ; n'étant pas dans le temps, le Big Bang n'a évidemment pas d'"avant" et n'est pas un commencement. Il reste loisible de le considérer comme une origine pour le décompte du temps – mais à condition de ne pas oublier que cette origine n'appartient pas à la succession des instants que l'on repère à partir d'elle. Mieux vaut alors concevoir cet instant comme marquant un horizon infini. Il n'est d'ailleurs pas difficile de trouver d'autres conventions de mesure du temps, d'autres échelles, sur lesquelles le "début" du Big Bang est effectivement rejeté à "moins l'infini" (Figure 1d). Ainsi, l'Univers n'aurait jamais commencé, et, dans ce cadre, la question de savoir ce qui se serait passé avant le Big Bang ne se pose même pas. En vérité, la formalisation théorique de la cosmologie moderne, à savoir, la relativité générale, implique et suggère elle-même l'arbitraire du paramétrage temporel utilisé pour décrire les phénomènes physiques. Autrement dit, on peut définir, fort naturellement, d'autres échelles temporelles que celle du "temps cosmique universel". Dans certaines de ces échelles, il n'y a pas d'instant initial (le Big Bang "commence à moins l'infini", si l'on veut), et l'Univers a existé et évolué de toute éternité. Il est même aisé de spécifier une telle échelle de façon qu'elle prenne un sens physique clair : il suffit pour cela de considérer l'Univers comme sa propre horloge, autrement dit, d'utiliser son facteur de dilatation comme marqueur du passage du temps<sup>6</sup>.

Une métaphore concrète peut aider à comprendre cette dialectique subtile du fini et de l'infini. Considérons un monde absolument plat. Imaginons un prisonnier enfermé dans une cellule au sommet d'une tour. Par la fenêtre grillagée, il aperçoit une vaste plaine, dont les lointains sont masqués par la brume (Figure 2a). Devant le pénitencier, dans la plaine, s'étend une route sur laquelle le captif observe des allées et venues diverses ; ayant d'autant plus de temps libre que son espace ne l'est pas, il

---

<sup>5</sup> Hubert Reeves, *Dernières nouvelles du cosmos*, Seuil (Science ouverte), 1994 ; *La première seconde*, Seuil (Science ouverte), 1995.

<sup>6</sup> Jean-Marc Lévy-Leblond, « Did the Big Bang begin ? », *Am. J. Phys.* 58, 156, 1990 [une version française de cet article est donnée ci-après, cf. II] ; « The Unbegun Big Bang », *Nature* 342, 6177, 1988.

tente de préciser ses observations et d'en tirer de véritables mesures. Il dispose à cet égard d'une échelle de mesure toute naturelle pour repérer sur la route les gens et bêtes qui s'y déplacent : il lui suffit d'utiliser les barreaux du grillage de sa fenêtre comme une grille où se projettent les mobiles dont il étudie les mouvements. Dès que la brume lui laisse entrevoir plus que les abords immédiats de la tour, il constate avec quelque étonnement que la route semble rétrécir au fur et à mesure qu'elle s'éloigne. Tout naturellement, il imagine que, dans la brume qui lui cache toujours les lointains, elle se termine en un point bien défini où se rejoignent les deux bas-côtés convergents. Il peut même évaluer la distance de ce point limite : la route à ses yeux se projette sur le grillage de sa fenêtre de façon que, prolongés par la pensée, les bords se rejoignent entre le septième et le huitième des barreaux horizontaux. Les mouvements des véhicules et des individus sur la partie proche et visible de la route, correspondant aux premiers barreaux, lui permettent d'estimer à environ cinq cents mètres la longueur de la route correspondant à l'intervalle entre deux barreaux. Il en conclut que la route se termine ponctuellement à un peu plus de trois kilomètres, ce qui ne laisse pas de l'intriguer et de susciter en lui toutes sortes de questions métaphysiques sur l'au-delà de ce point : la route continue-t-elle en divergeant, qu'y a-t-il au-delà, les voyageurs peuvent-ils franchir ce point critique, etc. ? Un jour enfin, la brume se lève (Figure 2b). Et bien entendu, notre prisonnier prend conscience que la route est un ruban parallèle, dont les bords *semblent* se rejoindre en un point de fuite, situé évidemment sur l'horizon, lequel est à l'infini (nous avons supposé la plaine absolument plane). Seul un repérage local et arbitraire avait pu faire croire au captif que la finitude de la projection du point de fuite correspondait à sa réalité physique.

Peut-être, dans la brume qui s'étend au-delà des barreaux de notre prison temporelle, pouvons-nous de même imaginer que l'origine de l'Univers se perd à l'horizon rassurant de l'infinitude.

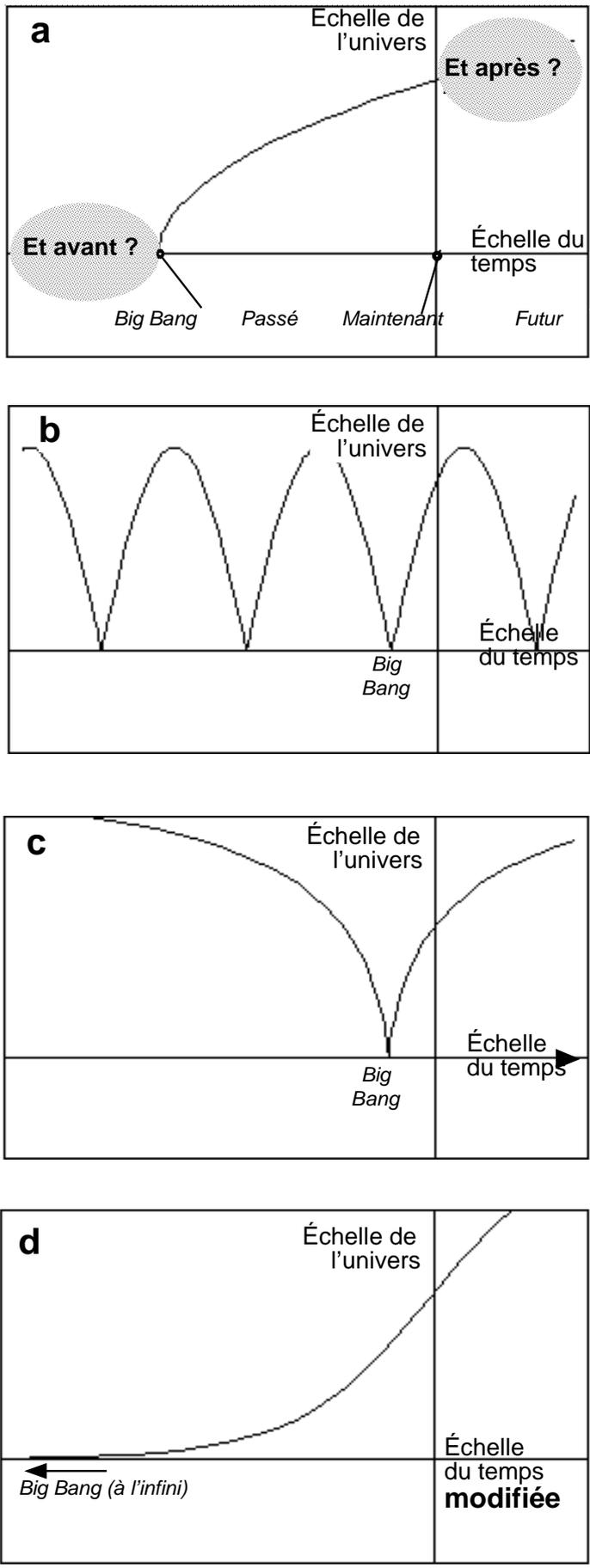
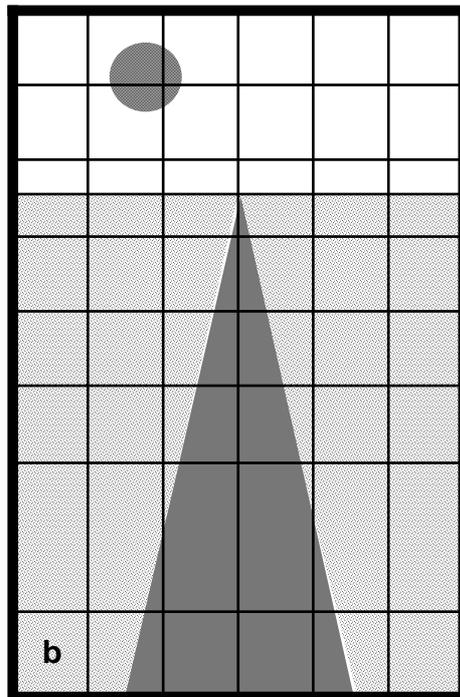
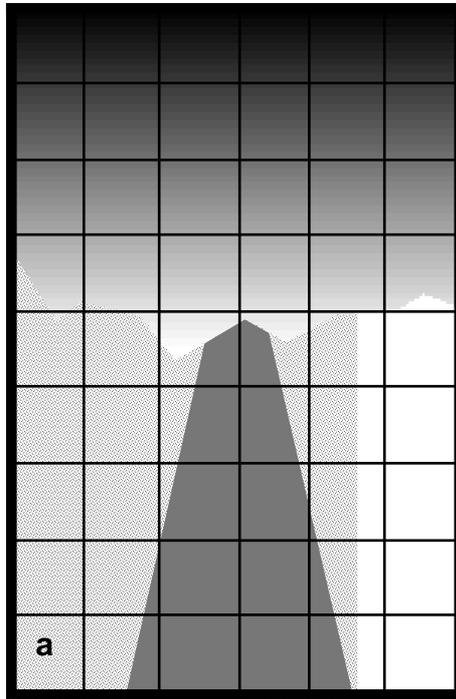


Figure 1



**Figure 2**

## II. Quand le Big Bang a-t-il commencé ?<sup>7</sup>

### 1. Introduction

Il est maintenant très généralement admis que l'Univers a un âge fini et qu'il est né avec un "grand boum" voici une quinzaine de milliards d'années. Cependant, un tel énoncé continue à stupéfier les profanes et laisse perplexe plus d'un physicien, sans parler des philosophes. Il est d'autant plus étonnant de constater la rareté des discussions récentes sur l'idée même d'une origine de l'Univers du point de vue de la cosmologie classique<sup>8</sup>. Car cette idée renvoie immédiatement à la question aporétique, qui remonte à la philosophie antique : « Que se passait-il *avant* ? ». On contourne souvent la difficulté en arguant que la "véritable" origine de l'Univers serait dissimulée par le voile de profonds mystères quantiques ou de phénomènes physiques exotiques encore inconnus. Mais cet aveu d'ignorance a sans doute pour effet de redoubler la frustration plutôt que de la dissiper. On avance encore comme réponse qu'il n'y aurait pas eu de temporalité avant l'origine de l'Univers, et que le temps serait né ...en même temps ; mais si l'on n'approfondit pas les notions qui se cachent sous les mots, il risque de ne s'agir là que d'une pirouette. Nous allons tenter d'éclairer le problème en réinterprétant la notion même de temps au sein de la cosmologie conventionnelle. Insistons-y : il ne s'agit nullement de proposer une alternative plus ou moins novatrice à la théorie standard, mais seulement de la comprendre plus profondément qu'on ne le fait usuellement. Nous allons montrer que la finitude numérique de l'âge de l'Univers dans la cosmologie orthodoxe est compatible avec son infinitude conceptuelle, et même qu'une nouvelle échelle de temps, parfaitement admissible, peut être définie sur laquelle le début de l'Univers est indéfiniment reculée dans le passé, de sorte que le mot même d'"origine" perd donc tout sens.

Commençons par considérer une analogie simple mais fiable. Soit la vitesse-limite einsteinienne  $c$  — souvent, mais restrictivement, appelée "vitesse de la lumière". Sa finitude ( $c = 300.000$  km/s) a longtemps constitué une pierre d'achoppement pour la compréhension de la relativité einsteinienne en termes intuitifs. On peut certes démontrer que, selon cette théorie elle-même, aucun corps massif ne peut atteindre, ni donc a fortiori dépasser cette vitesse-limite, de sorte que sa signification conceptuelle est bien celle d'un infini, inatteignable et indépassable ; mais ceci ne suffit usuellement pas à dissiper le malaise des novices. Il est plus convaincant alors de montrer que c'est la notion de vitesse qui, dans le domaine einsteinien, demande quelque subtilité dans sa définition — ou plutôt ses définitions<sup>9</sup>. Car les deux

---

<sup>7</sup> Ce texte est une version française de l'article : Jean-Marc Lévy-Leblond, « Did the Big Bang begin ? », *Am. J. Phys.* 58, 156, 1990 ; voir aussi « The Unbegun Big Bang », *Nature* 342, 6177, 1988.

<sup>8</sup> Parmi les rares articles consacrés à la question de fond, je citerais :

— Charles W. Misner, « Absolute Zero of Time », *Phys. Rev.* 186, 1328-1333 (1969).

— Michael Shallis, « Time and Cosmology », in *The Nature of Time*, R. Flood & M. Lockwood eds, Basil Blackwell, Oxford, 1986, 63-79.

— Joe Rosen, « When Did the Universe Begin ? », *Am. J. Phys.* 48, 498-499 (1987).

<sup>9</sup> Jean-Marc Lévy-Leblond, « Speed(s) », *Am. J. Phys.* 48, 345-347 (1980).

propriétés usuelles de la vitesse, celle de mesure du taux de variation temporelle de la position d'un corps ( $dx/dt$ ), et celle d'additivité par rapport à des changements successifs de référentiels ( $v_{M/R'} = v_{M/R} + v_{R/R'}$ ), équivalentes dans l'espace-temps galiléo-newtonien, cessent de l'être dans l'espace-temps einsteinien. La première caractérisation, qui définit la vitesse conventionnelle, conduit à des formules de transformation compliquées et non-additives — et bute sur cette fameuse limitation numérique. En revanche, la seconde caractérisation, exigeant l'additivité, conduit à définir une nouvelle grandeur, appelée "rapidité" ( $\varphi := c \operatorname{arctanh}(v/c)$ ), aujourd'hui reconnue comme le paramètre naturel des transformations de Lorentz, équivalent parfait de l'angle pour les rotations<sup>10</sup>. La rapidité peut prendre toutes les valeurs numériques entre  $-\infty$  et  $+\infty$ , sans buter sur une énigmatique limitation ; à la valeur limite  $c$  pour la vitesse, correspond une valeur infinie pour la rapidité. C'est une idée semblable que nous voulons proposer ici pour le temps.

## 2. Une redéfinition du temps

Nous nous plaçons dans le cadre des scénarios cosmologiques orthodoxes (de type "big bang") et classiques (non-quantiques), notre problème étant d'une nature conceptuelle que nous voulons traiter au niveau le plus conventionnel, sans pratiquer la fuite en avant dans des subtilités quantiques ou autres. Nous considérons donc un modèle cosmologique de Friedmann-Lemaître, caractérisé sans ambiguïté par son échelle spatiale (ce qu'on appelle souvent assez improprement le "rayon de l'Univers"), qui est une fonction  $R(t)$  d'un temps cosmique universel  $t$ . Notre but est de comprendre la signification de la valeur finie du "temps initial"

$$t_i \approx -15 \text{ milliards d'années (avant le présent)}$$

tel que

$$R(t_i) = 0.$$

Le point crucial est que, pour la valeur du temps  $t = t_i$ , la métrique de Roberston-Walker qui définit le modèle (voir Tableau Ia) connaît une singularité — autrement dit, que le modèle n'est plus défini et perd sa pertinence. C'est dire encore que la valeur  $t = t_i$  n'appartient pas au domaine temporel pour lequel le modèle est valide. La continuité, ou, mieux, la contiguïté du temps se brise en  $t = t_i$  : cette valeur ne peut être atteinte continûment à partir d'un instant physique (le présent par exemple, ou tout autre). La gamme des temps pour lesquels le modèle fait sens consiste en la demi-droite ouverte  $]t_i, +\infty]$  ; elle ne comprend pas la valeur  $t = t_i$ , qui ne désigne donc pas un instant physique, et n'appartient pas au passé de l'Univers. En tant qu'elle est inatteignable, cette valeur peut être considérée comme conceptuellement infinie, à l'instar de la vitesse-limite einsteinienne, ou du zéro absolu des températures, qui, tous deux, correspondent à des singularités des expressions théoriques idoines.

Or, d'après le cadre même de la cosmologie moderne, à savoir la relativité générale, le choix des coordonnées utilisées pour décrire l'Univers est arbitraire et peut être modifié à volonté. Ainsi le paramètre temporel usuellement utilisé pour exprimer la

<sup>10</sup> Jean-Marc Lévy-Leblond & Jean-Pierre Provost, « Additivity, Rapidity, Relativity », *Am. J. Phys.* **47**, 1045-1049 (1979).

métrique de Robertson-Walker répond à des critères de commodité et de simplicité, mais non à une exigence de nécessité. Le choix du temps cosmique universel est certainement utile, mais ne saurait prétendre a priori à l'exclusivité. La possibilité est ainsi ouverte d'une redéfinition du temps qui renverrait à (moins) l'infini la singularité de la métrique. Il faut d'ailleurs noter, comme nombre de commentateurs l'ont fait, que sur l'échelle du temps cosmique, au fur et à mesure qu'on le remonte, les épisodes successifs de l'Univers primordial sont d'une durée qui se réduit toujours plus et dans des proportions affolantes (Tableau II), ce qui rend quelque peu troublante cette idée d'un temps qui serait, pour ainsi dire incommensurablement plus "plein" dans le passé. On serait tenté d'étaler cette temporalité et de l'uniformiser par le simple recours à une échelle logarithmique. Mais un tel choix, sans fondement physique, apparaîtrait comme une astuce peu convaincante. On peut cependant donner un sens physique à une procédure analogue, comme nous allons le montrer.

De fait, il n'est pas évident de relier le temps cosmique, malgré son apparente simplicité, à notre idée commune du temps. Le paradoxe est que le temps cosmique est à la fois universel, et purement local. Comme le montre bien la métrique de Robertson-Walker exprimée avec ce paramètre (Tableau Ia), le temps cosmique coïncide avec le temps propre (intervalle spatio-temporel invariant) entre deux événements voisins ( $ds = c dt$ ) si et seulement si ces événements coïncident spatialement ( $dl = 0$ ). Or le temps, à notre échelle, est mesuré à l'aide de certains systèmes évolutifs censés exhiber quelque régularité dans leur évolution — que nous prenons comme horloges. De telles horloges, qu'elles soient mécaniques ou atomiques, sont des dispositifs complexes, comprenant diverses parties dont les interactions régissent l'évolution de l'ensemble, et qui occupent donc une certaine portion de l'espace. Aucune horloge concrète, donc non-ponctuelle, ne peut donc indiquer le temps cosmique ; dès lors que le temps est défini par l'évolution d'un système physique spatialement étendu, que ce soit une montre-bracelet ou une horloge au césium, ou un neutron qui se désintègre, ce temps ne peut coïncider avec le temps cosmique, et une analyse spécifique s'impose pour établir leur relation.

### 3. Le temps géométrodynamique

À titre d'exemple, et avant d'en venir à la solution proposée, considérons une intéressante définition opérationnelle du temps qui illustre les considérations générales de la section précédente. Puisque nous voulons traiter l'Univers dans ses états primordiaux, il nous faut éviter de recourir à une horloge compliquée, qui décompte par exemple les révolutions d'une planète ou les vibrations d'une molécule — systèmes inexistantes encore dans cet Univers primitif. Nous choisissons une horloge "géométrodynamique" constituée de deux "miroirs" entre lesquels rebondit une impulsion lumineuse<sup>11</sup> (ces "miroirs" pourraient être n'importe quel

---

<sup>11</sup> R. F. Marzke & J. A. Wheeler, « Gravitation as Geometry : The Geometry of Space-Time and the Geometrodynamical Standard Meter », in *Gravitation and Relativity*, H. Y. Chiu & W. F. Hoffmann eds, Benjamin, New-York, 1964, pp. 40-64.

système émetteur et absorbeur de lumière — de simples électrons feraient l'affaire). Il n'y a donc pas de mécanisme interne compliqué dans une telle horloge. Les deux miroirs sont libres, c'est-à-dire en déplacement inertiel, se comouvant avec l'Univers en expansion — d'où la dénomination "géométrodynamique". Ainsi la distance entre les deux miroirs mesurée en coordonnées spatiales universelles (soit le paramètre  $l$  dans les expressions de la métrique de Robertson-Walker, cf. tableau I) reste constante, et donnée, mettons, par  $a$ . Mais l'intervalle spatial effectif entre les deux miroirs varie évidemment avec le temps cosmique, puisque l'expansion de l'Univers a pour effet de les éloigner. Leur distance est simplement multipliée par le facteur d'échelle  $R(t)$  et vaut donc  $aR(t)$ . Le temps d'aller-retour de la lumière vaut alors  $2aR(t)/c$ . Pendant un intervalle de temps cosmique  $\delta t$ , l'impulsion lumineuse effectue un nombre  $\delta n = \delta t / (2aR(t)/c)$  d'aller-retours. Si l'on définit le "temps géométrodynamique"  $\tau$  comme celui qui donne à l'horloge un fonctionnement régulier, soit une même durée  $2a/c$  pour tous les aller-retours, alors l'intervalle de temps géométrodynamique  $\delta\tau = (2a/c)\delta n$  correspondant à l'intervalle de temps cosmique  $\delta t$  est donné par

$$\delta\tau = \delta t / R(t).$$

Pour des intervalles de temps non infinitésimaux, la relation prend une forme intégrale ; l'intervalle de temps géométrodynamique  $\Delta\tau$  correspondant à l'intervalle de temps cosmique entre les instants  $t$  et  $t + \Delta t$  s'écrit

$$\Delta\tau = \int_t^{t+\Delta t} \frac{du}{R(u)}.$$

Si le temps géométrodynamique est mesuré à partir d'un instant conventionnel de temps cosmique  $t_0$  (par exemple l'instant présent), le temps géométrodynamique correspondant au temps cosmique  $t$  devient :

$$\tau = \int_{t_0}^t \frac{du}{R(u)}.$$

Une telle définition du temps est utilisée en cosmologie pour des raisons formelles sous le nom de "temps conforme". Elle a l'avantage de donner à la métrique de Robertson-Walker une expression assez simple et plaisante (voir Tableau Ib), sous la forme de la métrique minkowskienne standard multipliée par un facteur d'échelle général. Pour en venir à la question de l'origine de l'Univers évaluée en temps géométrodynamique, on voit que l'"instant" initial  $t_i$  en temps cosmique, a pour équivalent en temps géométrodynamique l'instant

$$\tau_i = - \int_{t_i}^{t_0} \frac{du}{R(u)}.$$

Sa valeur numérique peut être finie ou infinie selon le comportement de la fonction  $R(t)$  lorsqu'elle approche zéro à la limite  $t \rightarrow t_i$ , qui régit la convergence (ou non) de l'intégrale. Il se trouve que le critère de finitude de  $\tau_i$  est le même que celui l'existence d'un horizon d'événement dans le modèle cosmologique considéré<sup>12</sup>. Les modèles courants ont un tel horizon, de sorte que l'âge de l'Univers y est fini en temps géométrodynamique, comme en temps cosmique. Pour les modèles standards, la valeur de l'âge géométrodynamique est un peu inférieure au triple de la valeur de

---

Hans C. Ohanian, *Gravitation and Spacetime*, Norton, New-York, 1976, chapitre 5.

<sup>12</sup> Wolfgang Rindler, *Essential Relativity*, Springer-Verlag, New-York, 1979, chapitre 9.

l'âge cosmique. Bien entendu, même si cela n'est pas directement visible sur la forme de la métrique (Tableau Ib), l'"instant" initial  $\tau_i$  marque une singularité, et, en tant que tel, ne fait pas partie de la gamme des instants physiques.

#### 4. Le temps additif

Il est maintenant temps, si j'ose dire, de se rappeler que la notion usuelle de temps n'a pas pour seul intérêt de fournir des marques pour spécifier la succession ordonnée des évènements ; à cet effet, toute fonction croissante monotone transformerait un temps admissible en un autre. Notre bon vieux temps possède une autre propriété essentielle : il s'additionne ! Deux intervalles de temps successifs peuvent être combinés pour fournir un intervalle de temps global. À défaut de l'existence d'une telle règle, on ne pourrait même pas mesurer proprement le temps, c'est-à-dire comparer la durée d'un phénomène à une succession d'intervalles temporels unités. Pour le temps ordinaire à notre échelle, que nous noterons  $T$ , la combinaison se fait par simple addition, de sorte que deux intervalles successifs  $\Delta T_1$  et  $\Delta T_2$  donnent un intervalle total

$$\Delta T_{12} = \Delta T_1 + \Delta T_2.$$

Mais nous devons reconnaître que pour une notion de temps plus abstraite et moins intuitive, à l'échelle cosmologique, rien ne garantit qu'une loi de composition des intervalles, à supposer qu'elle existe, soit simplement additive. L'exemple des vitesses en relativité einsteinienne nous sert ici d'avertissement. Ce qui importe est l'existence d'une loi de composition qui définisse une structure de groupe, de façon que soit garantie la mesurabilité du temps. Supposons que nous ayons pu définir une telle loi de combinaison des intervalles de temps cosmique

$$\Delta t_{12} = F(\Delta t_1, \Delta t_2)$$

où la fonction  $F$  a les propriétés nécessaires pour assurer la validité des axiomes de groupe. Alors, un résultat mathématique élémentaire mais profond de la théorie des groupes garantit qu'il existe une application (fonction)  $f$  qui reparamétrise le temps  $t$  en un nouveau temps  $\theta = f(t)$  pour lequel la loi de composition devient additive :

$$\Delta \theta_{12} = \Delta \theta_1 + \Delta \theta_2.$$

En d'autres termes (c'est l'énoncé général du théorème), tout groupe continu à un paramètre est isomorphe à un groupe additif<sup>13</sup>. De plus, le paramètre additif, ici  $\theta$ , est unique, à un choix d'unité près ; la preuve du théorème est constructive et fournit une procédure bien définie pour trouver la fonction  $f$ . C'est sur cette procédure d'ailleurs qu'est fondé le passage de la vitesse einsteinienne (non-additive) à la rapidité (additive).

Nous appellerons "temps additif" le temps  $\theta$  ainsi introduit. Pour le construire explicitement, il nous faut maintenant écrire une loi de combinaison naturelle pour les intervalles de temps cosmique. Cette loi ne peut être fondée que sur la seule caractéristique spécifique du modèle d'Univers considéré, à savoir son "rayon"  $R(t)$ . Nous utilisons ce facteur d'échelle spatial pour mesurer l'âge de l'Univers, et

---

<sup>13</sup> Voir réf. 3, et aussi Morton Hamermesh, *Group Theory*, Addison-Wesley, Reading (Mass.), 1964, Section 8-6.

définissons l'intervalle de temps total  $\Delta t_{12}$  correspondant aux intervalles successifs  $\Delta t_1$  et  $\Delta t_2$  comme la durée pendant laquelle l'échelle de l'Univers a crû dans une proportion égale au produit de ses facteurs de croissance pendant chacun des deux intervalles. Autrement dit, choisissant un certain temps cosmique de référence  $t_0$  (arbitraire à ceci près que, évidemment, cet instant ne peut coïncider avec la singularité initiale, soit  $t_0 > t_i$ ), on définit  $\Delta t_{12}$  par l'expression implicite

$$\frac{R(t_0 + \Delta t_{12})}{R(t_0)} = \frac{R(t_0 + \Delta t_1)}{R(t_0)} \times \frac{R(t_0 + \Delta t_2)}{R(t_0)}.$$

Il est aisé de vérifier que, si la fonction  $R(t)$  est monotonément croissante (c'est-à-dire si l'Univers est en expansion illimitée comme nous le pensons), c'est bien une loi de groupe qui est ainsi définie, bien que l'expression explicite de  $\Delta t_{12}$  en termes de  $\Delta t_1$  et  $\Delta t_2$  puisse être fort compliquée (selon la nature de la fonction  $R(t)$ ). Cependant, la définition de la loi combinaison est si naturelle que la construction du paramètre temporel additif  $\theta = f(t)$  est des plus aisées et le résultat si simple que nous pouvons omettre sa démonstration et écrire directement l'intervalle de temps additif

$$\Delta\theta = C \ln[R(t_0 + \Delta t)/R(t_0)]$$

correspondant à un intervalle de temps cosmique  $\Delta t$ , où la constante d'échelle  $C$  est pour l'instant arbitraire. La propriété d'additivité  $\Delta\theta_{12} = \Delta\theta_1 + \Delta\theta_2$  se vérifie immédiatement. Il est commode de fixer l'origine du temps additif de façon qu'elle coïncide avec le temps cosmique de référence ( $\theta = 0$  pour  $t = t_0$ ) soit

$$\theta = C \ln[R(t_0 + \Delta t)/R_0].$$

où nous avons simplifié l'écriture en notant  $R_0 = R(t_0)$ .

On peut encore préciser la relation entre temps cosmique et temps additif en remarquant que l'on a

$$\frac{d\theta}{dt} = C \frac{\dot{R}(t)}{R(t)} = CH(t)$$

où  $H(t)$  est le facteur de Hubble (souvent et malencontreusement appelé "constante de Hubble"), qui fait donc ici une apparition remarquable et imprévue en tant que facteur d'échelle reliant temps cosmique et temps additif. Il est plaisant alors de fixer la constante  $C$  de façon que le déroulement du temps additif  $\theta$  et du temps cosmique  $t$  coïncident au voisinage de l'origine, autrement dit :

$$\left. \frac{d\theta}{dt} \right|_{t=t_0} = 1,$$

d'où, en posant  $H_0 = H(t_0)$ , notre résultat final :

$$\theta = H_0^{-1} \ln[R(t)/R_0] \quad \text{et} \quad \frac{d\theta}{dt} = H(t)/H_0.$$

Pour résumer notre démarche : nous avons choisi l'échelle même de l'Univers pour marquer le passage du temps. Le groupe multiplicatif de dilatation qui agit naturellement sur le facteur d'échelle fournit alors, par isomorphisme, un groupe additif d'évolution temporelle. Par rapport au temps additif ainsi défini, l'expansion de l'Univers est, par construction, exponentielle :

$$R(\theta) = R_0 \exp(H_0 \theta).$$

En d'autres termes, il faut toujours le même intervalle de temps (additif) pour que

l'échelle de l'Univers soit multipliée par 2 (par exemple)<sup>14</sup>.

Au temps cosmique "initial"  $t_i$ , tel que  $R(t_i)=0$ , correspond maintenant pour le temps additif la valeur

$$\theta_i = -\infty,$$

comme on pouvait s'y attendre. Du point de vue du temps additif, donc, il n'y a pas de début" : l'Univers a toujours été là et le Big Bang n'a jamais commencé.

On peut alors calculer en temps additif les âges successifs de l'Univers lors des moments importants de son évolution selon le modèle cosmologique standard. La Table II présente ces valeurs et les compare aux dates correspondantes en temps cosmique. Il est intéressant aussi d'exprimer la métrique de Robertson-Walker en termes du temps additif [Table Ic]; elle prend une forme qui généralise agréablement la métrique du modèle de de Sitter, et ne dépend que du facteur de Hubble  $H(t)$ . Il est instructif de poser alors le problème à l'envers. Supposons que la métrique de Robertson-Walker nous ait été donnée directement en temps additif, sous la forme de la Table Ic. Le paramètre temporel y court naturellement de  $-\infty$  à  $+\infty$ , et la question d'un âge fini de l'Univers et de son début ne se poserait même pas. Bien entendu, il serait loisible de changer de paramétrage pour passer au temps cosmique (Table Ia), mais la valeur "initiale"  $t_i$  apparaîtrait alors clairement comme une singularité inatteignable, artefact dû justement au choix d'un paramètre temporel inapproprié à cet égard, quels que soient ses mérites par ailleurs.

Insistons-y en conclusion : notre objectif n'est nullement de plaider pour l'élimination du temps cosmique au profit du temps additif, mais seulement d'ajouter le second au premier et d'enrichir ainsi la panoplie des concepts cosmologiques utiles, de façon à mieux poser les problèmes fondamentaux d'interprétation de la théorie, au-delà de difficultés purement formelles. Bien entendu, cette discussion, menée dans le seul cadre de la cosmologie classique, laisse ouverte la question du passage à une cosmologie quantique — mais elle montre qu'il n'est pas nécessaire de connaître la réponse à cette question pour résoudre le paradoxe apparent de la prétendue "origine" de l'Univers.

---

<sup>14</sup> Une redéfinition du temps similaire avait déjà été proposée dans un autre contexte par Ch. Misner, réf. 8.

<i>Paramètre temporel</i>	<i>Métrie de Robertson-Walker</i>
a. temps cosmique $t$	$ds^2 = c^2 dt^2 - R^2(t) dl^2$
b. temps géométrodynamique $\tau$	$ds^2 = [R^2(\tau)/R_0^2][c^2 d\tau^2 - R_0^2 dl^2]$
c. temps additif $\theta$	$ds^2 = [H_0^2/H^2(\theta)][c^2 d\theta^2 - R_0^2 \exp(2H_0\theta) dl^2]$

TABLEAU I

**La métrique de Robertson-Walker exprimée avec trois différents paramètres temporels.**

La métrique spatiale est notée  $dl^2$ ,  $R$  est le "rayon de l'Univers",  $H$  le facteur de Hubble ( $R_0$  et  $H_0$  étant leurs valeurs au temps de référence  $t_0$ ).

<i>Évènement</i>	$R/R_0$	<i>Temps cosmique (depuis l'"origine")</i>	<i>Temps additif (depuis maintenant)</i>
Maintenant	1	$10^{10}$ a	0
Découplage du rayonnement	$10^{-4}$	$10^5$ a	$-1,2 \times 10^{11}$ a
Début de la nucléosynthèse	$10^{-10}$	1 s	$-3,5 \times 10^{11}$ a
Quarks $\rightarrow$ hadrons	$10^{-13}$	$10^{-6}$ s	$-4,5 \times 10^{11}$ a
Brisure de la symétrie électrofaible	$10^{-15}$	$10^{-10}$ s	$-5,2 \times 10^{11}$ a
Brisure de la grande unification	$10^{-28}$	$10^{-36}$ s	$-9,7 \times 10^{11}$ a
Temps de Planck	$10^{-32}$	$10^{-44}$ s	$-11 \times 10^{11}$ a
"Origine"	0	0	$-\infty$

TABLEAU II

**L'histoire de l'Univers**

Chronologie comparée des événements marquants dans l'évolution de l'Univers, selon le temps cosmique et selon le temps additif.

On constate que si les événements se précipitent lorsque l'on remonte le fil du temps cosmique, ils sont bien plus régulièrement répartis en temps additif.

[Les données numériques du tableau ne sont qu'indicatives des ordres de grandeur.]