

# Temps, Relativité et Origine de l'Irréversibilité

Thibault Damour

Séminaire Poincaré  
4 décembre 2010

# Conception habituelle du Temps

Héraclite : “Panta rei” (“Tout s’écoule”)

Virgile : “Fugit irreparabile tempus”

Ronsard : “Le temps s’en va, le temps s’en va ma Dame,  
Las ! le temps non, mais nous nous en allons,  
Et têt serons étendus sous la lame, . . .”

Lamartine : “Ô temps suspends ton vol ! [. . .]  
L’homme n’a point de port, le temps n’a point de rive ;  
Il coule et nous passons !”

# Conception habituelle du Temps

Petit Robert (1977) : “**Temps** I. Milieu indéfini où paraissent se dérouler irréversiblement les existences dans leur changement, les événements et les phénomènes dans leur succession.”

Bergson (Durée et simultanéité, 1923) : “Le sens commun croit à un temps unique, le même pour tous les êtres et pour toutes choses [. . .]. Chacun de nous se sent durer [. . .] il n’y a pas de raison, pensons-nous pour que notre durée ne soit pas aussi bien la durée de toutes choses.”

# Conception habituelle du Temps

Newton : “Hitherto I have laid down the definitions of such words as are less known, and explained the sense in which I would have them to be understood in the following discourse. I do not define time, space, place, and motion, as being well known to all. Only I must observe, that the common people conceive those quantities under no other notions but from the relation they bear to sensible objects. And thence arise certain prejudices, for the removing of which it will be convenient to distinguish them into absolute and relative, true and apparent, mathematical and common.

I. Absolute, true, and mathematical time, of itself, and from its own nature, flows equably without relation to anything external, and by another name is called duration: relative, apparent, and common time is some sensible and external (whether accurate or unequable) measure of duration by the means of motion, which is commonly used instead of true time; such as an hour, a month, a year.”

En résumé : Le Temps est quelque chose :

- (i) d'extérieur à l'univers matériel,
- (ii) de commun à toute la réalité,
- (iii) d'irréversible,
- (iv) qui "passe", ou "coule", en entraînant le "maintenant" du passé vers le futur.

# Irréversibilité du Temps et Physique

1. Thermodynamique : deuxième loi  $\frac{dS}{dt} \geq 0$
2. Électrodynamique : rayonnement par potentiels retardés
3. Expansion de l'Univers
4. Comportement irréversible des trous noirs
5. Mécanique Quantique : irréversibilité dans l'interprétation de Copenhague des mesures
- [6. Physique des particules : violation de T (mais CPT)]

Point de vue adopté :  $1 \Rightarrow 2$  et  $1 \Rightarrow 5$ .

Question principale : Y a-t-il un lien entre 1 (la deuxième loi) et 3 + 4 (la gravitation relativiste) ?

# Temps et Relativité Restreinte

Planck à propos de la RR : “La révolution dans l’image physique du monde” apportée par la RR “n’est comparable, en extension et en profondeur, qu’à celle introduite par le système de Copernic”.

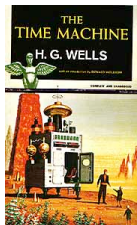
Il est étonnant que, plus d’un siècle plus tard, la révolution einsteinienne concernant le concept de Temps ait été si peu assimilée, et ait, en fait, perdu de sa violence. Heureusement, elle continue à diffuser à travers la littérature, en particulier de Science Fiction (Kurt Vonnegut, Philip K. Dick).

Einstein (1905) “Dilatation du temps”, Einstein (janvier 1911); Langevin (avril 1911) “Paradoxe des jumeaux”.

Relativité Restreinte  $\Rightarrow$  Voyager dans le Temps est possible

$\Rightarrow$  Le Futur “existe déjà”

Voyager dans le temps ?



H.G. Wells  
The Time Machine, 1895

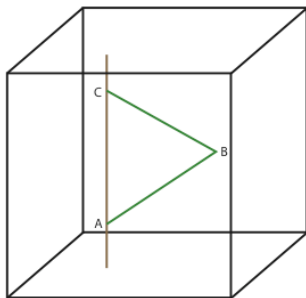


**VOYAGE DANS LE FUTUR**

**Possible !**



## VOYAGE QUASI-INSTANTANÉ DANS LE FUTUR



La vulgarisation scientifique a tendance, quand elle parle de cosmologie relativiste, et notamment du big bang, à utiliser un langage qui suggère que la Relativité Générale réintroduit la notion de *flux temporel*, que la Relativité Restreinte avait abolie. Au contraire, la variété infinie des cosmos einsteiniens possibles fournit des exemples frappants de “mondes” où l’irréalité du flux temporel devient palpable.

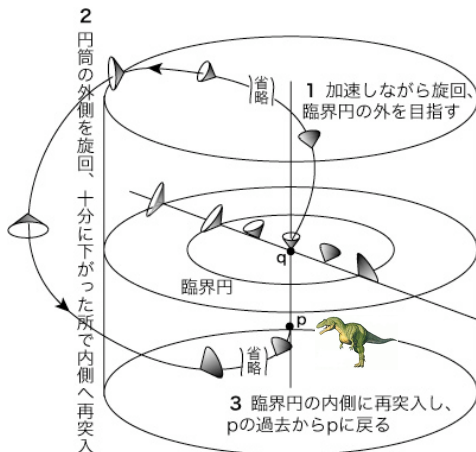
Exemples :

Univers de Gödel (1949)

Univers avec trous de vers

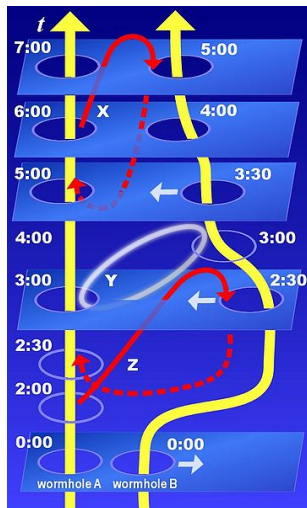
Univers de Gold (1962)

Gödel 1949 : Voyager dans le passé



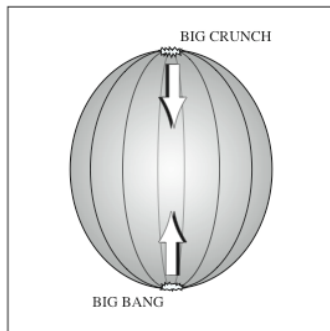
# Temps et Relativité Générale

## Univers avec trous de vers



## Univers de Gold (1962)

Un cosmos possible où le temps ne  
« s'écoule » pas partout dans le même sens



# “L’Univers de Boltzmann” et l’Origine de l’Irréversibilité

Quelle est l’origine de la deuxième loi :  $dS/dt \geq 0$ ?

Boltzmann (1872) pensait avoir prouvé  $dS/dt \geq 0$  à partir d’une hypothèse sur le nombre de collisions (locales) dans un gaz (“Stosszahlansatz”).

Objections de Kelvin, Maxwell, Loschmidt (ca. 1876), à propos de la réversibilité de la dynamique moléculaire, puis de Zermelo (1896), à propos du théorème de récurrence de Poincaré (1890).

Boltzmann (1897) propose deux versions différentes d’une solution radicale à la question de l’origine de  $dS/dt \geq 0$ .

# “L’Univers de Boltzmann” et l’Origine de l’Irréversibilité

“The second law will be explained mechanically by means of assumption  $A$  (which is of course unprovable) that the universe, considered as a mechanical system – or at least a very large part of it which surrounds us – started from a very improbable state, and is still in an improbable state.”

L’“hypothèse  $A$ ” de Boltzmann se décline en deux versions :

- ▶ hypothèse  $A^{\text{globale}}$  : L’Univers *entier* a commencé dans un état très improbable, et se trouve toujours dans un état improbable.
- ▶ hypothèse  $A^{\text{locale}}$  : seule la *région locale* (mais assez grande) de l’Univers autour de nous se trouve à présent dans un état improbable.

# “L’Univers de Boltzmann” et l’Origine de l’Irréversibilité

Boltzmann (1897) propose une “image” pour justifier l’hypothèse  $A^{\text{locale}}$  :

“However, one may suppose that the eons during which this improbable state lasts, and the distance from here to Sirius, are minute compared to the age and size of the universe. There must then be in the universe, which is in thermal equilibrium as a whole and therefore dead, here and there relatively small regions of the size of our galaxy (which we call worlds), which during the relatively short time of eons deviate significantly from thermal equilibrium. Among these worlds the state probability increases as often as it decreases. For the universe as a whole the two directions of time are indistinguishable, just as in space there is no up and down. . . .



# “L’Univers de Boltzmann” et l’Origine de l’Irréversibilité

... However, just as at a certain place on the earth’s surface we can call “down” the direction towards the centre of the earth, so a living being that finds itself in such a world at a certain period of time can define the time direction as going from the less probable to more probable states (the former will be the “past” and the latter the “future”) and by virtue of this definition he will find that this small region, isolated from the rest of the universe, is “initially” always in an improbable state. This viewpoint seems to me to be the only way in which one can understand the validity of the second law and the heat death of each individual world without invoking an unidirectional change of the entire universe from a definite initial state to a final state. ...

# “L’Univers de Boltzmann” et l’Origine de l’Irréversibilité

... The objection that it is uneconomical and hence senseless to imagine such a large part of the universe as being dead in order to explain why a small part is living – this objection I consider invalid. I remember only too well a person who absolutely refused to believe that the sun could be 20 million miles from the earth, on the grounds that it is inconceivable that there could be so much space filled only with aether and so little with life.”

# “L’Univers de Boltzmann” et l’Origine de l’Irréversibilité

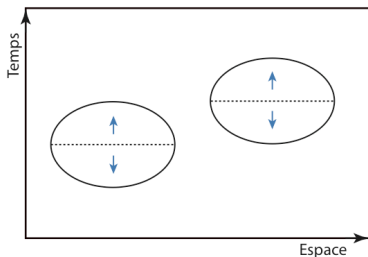
Autrement dit, ce texte visionnaire de Boltzmann propose de :

- ▶ considérer notre univers visible comme une *fluctuation entropique* (localisée dans l’espace et le temps) au milieu d’un univers infini (ou beaucoup plus grand), globalement à l’équilibre thermique
- ▶ faire appel à une forme du Principe Anthropique: alors que, globalement, “la mort de la chaleur” règne, la vie ne peut exister que dans des oasis locales où l’entropie a fluctué bien en dessous de sa valeur normale
- ▶ considérer le “flux temporel” comme un *phénomène illusoire émergent*, induit localement par la valeur du gradient spatio-temporel de l’entropie.

# “L’Univers de Boltzmann” et l’Origine de l’Irréversibilité

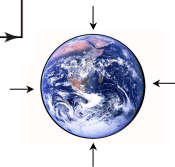
Boltzmann 1897

Pluralité de « mondes » éphémères où le « temps »  
( S ) « semble » s’écouler dans des sens variés



Analogie :

antichrones  $\longleftrightarrow$  antipodes



# “L’Univers de Boltzmann” et l’Origine de l’Irréversibilité

Le scénario de “fluctuation anthropique” de Boltzmann a été discuté (et rejeté) par plusieurs physiciens (Landau-Lifchitz, Feynman), mais il est devenu tout à fait d’actualité en cosmologie moderne.

L’argument de Landau-Lifchitz, et Feynman, est que, comme  $p \propto \exp(-S)$ , on ne devrait observer qu’une fluctuation beaucoup plus minimale que celle observée :

# “L’Univers de Boltzmann” et l’Origine de l’Irréversibilité

(Landau-Lifchitz, 1938) : “This argument is, however, quite false, since there would be an enormously greater probability of a smaller fluctuation for which there existed for instance only a single observer, without the myriads of stars prepared for him, and in any case it would be sufficient for the possibility of observing the universe to have this deviation from equilibrium in a volume of only  $10^{55}$  c.c. (containing the sun and nearest stars).”

Très récemment (Dyson, Kleban, Susskind 2002, Albrecht, Sorbo 2004) l’argument d’une probabilité plus grande pour avoir un seul observateur, ou même un éphémère “cerveau de Boltzmann” désincarné a été vivement débattu dans le cadre du “Multivers”.

# Boltzmann Brains (Albrecht, Sorbo 2004)



# Origine de l'irréversibilité ?

(Landau-Lifchitz, 1959) : “The answer is to be sought in the general theory of relativity. The point is that when we consider large regions of the system, the gravitational fields which they contain begin to become important. According to the general theory of relativity, the latter represent simply changes in the space time metric which is described by the metric tensor  $g_{ik}$ . In the study of the statistical properties of bodies, the metrical properties of space time can, in a certain sense, be regarded as the “external conditions” in which these bodies are situated. The assumption that after a long enough interval of time a closed system must eventually reach a state of equilibrium depends obviously on the external conditions remaining constant. But the metric tensor  $g_{ik}$  is, generally speaking, a function not only of the co-ordinates but of the time as well, so that the “external conditions” are by no means constant. . . .



# Origine de l'irréversibilité ?

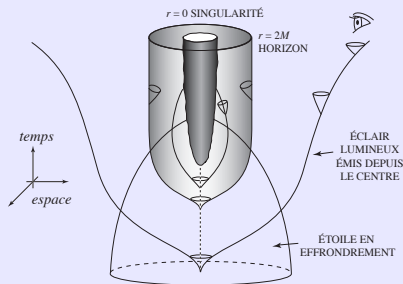
... It is important to note with this that the gravitational field cannot itself be counted as part of the closed system because in that case the conservation laws, which, as we have seen, are the very foundation of statistics, would become simply identities. As a result of this, in the general theory of relativity the universe as a whole must be regarded not as a closed system, but as one which is in a variable gravitational field. In this case the application of the law of increase of entropy does not imply the necessity of statistical equilibrium.”

Mais, ils suggèrent aussi que la dissymétrie temporelle de la Mécanique Quantique (à la Copenhague) doit jouer un rôle essentiel.

# Gravitation et Irréversibilité (I)

- ▶ Irréversibilité dans la physique des Trous Noirs (Christodoulou, Christodoulou-Ruffini, Bekenstein, Hawking, Damour, ...)

La “surface du trou noir” est analogue à une bulle (ou membrane) visqueuse et conductrice de l'électricité (Damour 1978),



satisfaisant une équation de Navier-Stokes avec une viscosité de cisaillement  $\eta = 1/16\pi$ , une équation d'Ohm avec une résistivité surfacique  $\rho = 4\pi = 377$  ohm, et une équation d'évolution pour l'entropie  $s = dA/(4G\hbar)$  d'un élément de surface du type de la 2<sup>ème</sup> loi

$$\frac{ds}{dt} - \tau \frac{d^2s}{dt^2} = \frac{dA}{T} [2\eta \sigma_{AB} \sigma^{AB} + \zeta\theta^2 + \rho(K - \sigma_{HV})^2]$$

⇒ l'entropie totale du trou noir (Bekenstein, 1972; Hawking, 1974) ne peut qu'augmenter

$$S_{BH} = \frac{A}{4G\hbar}$$

- ▶ origine de l'irréversibilité : définition d'un trou noir
- ▶ origine statistique de  $S_{BH}$  ? (voir Séminaire Poincaré 6 décembre 2003)

Expansion de l'Univers

G. Lemaître 1931, "Hypothèse de l'atome primitif"

## **"The Beginning of the World from the Point of View of Quantum Theory.**

Sir Arthur Eddington states that, philosophically, the notion of a beginning of the present order of Nature is repugnant to him. I would rather be inclined to think that the present state of quantum theory suggests a beginning of the world very different from the present order of Nature. Thermodynamical principles from the point of view of quantum theory may be stated as follows: (1) Energy of constant total amount is distributed in discrete quanta. (2) The number of distinct quanta is ever increasing. If we go back in the course of time we must find fewer and fewer quanta, until we find all the energy of the universe packed in a few or even in a unique quantum. . . .

## Gravitation et Irréversibilité (II)

Now, in atomic processes, the notions of space and time are no more than statistical notions; they fade out when applied to individual phenomena involving but a small number of quanta. If the world has begun with a single quantum, the notions of space and time would altogether fail to have any meaning at the beginning; they would only begin to have a sensible meaning when the original quantum had been divided into a sufficient number of quanta. If this suggestion is correct, the beginning of the world happened a little before the beginning of space and time. I think that such a beginning of the world is far enough from the present order of Nature to be not at all repugnant.

[. . .] we could conceive the beginning of the universe in the form of a unique atom, the atomic weight of which is the total mass of the universe. This highly unstable atom would divide in smaller and smaller atoms by a kind of super-radio-active process. Some remnant of this process might, according to Sir James Jeans's idea, foster the heat of the stars until our low atomic number atoms allowed life to be possible."

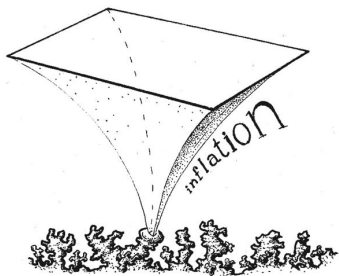
# Cosmologie primordiale et la deuxième loi

## Paradigme de l'inflation chaotique (et éternelle)

Paradigme de l'inflation chaotique (et éternelle)

Linde (1983, 1986); Vilenkin (1983); ...

$$\mathcal{L} = \mathcal{R} - \frac{1}{2} (\partial\varphi)^2 - \frac{1}{2} m^2 \varphi^2$$

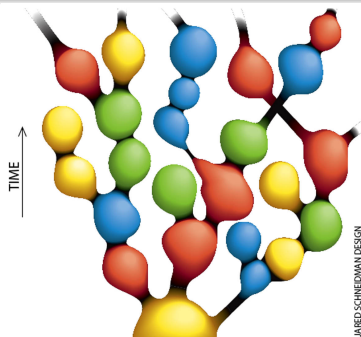


**Fig. 28.6** One of the underlying motivations of inflation is that an exponential expansion scale of perhaps  $10^{50}$  (say between times  $10^{-35}$  s and  $10^{-32}$  s) might serve to 'iron out' a generic initial state, so as to provide an essentially uniform, spatially flat, post-inflation universe.

# Cosmologie primordiale et la deuxième loi

## Paradigme de l'inflation chaotique (et éternelle)

D'après : *The Self-Reproducing Inflationary Universe*, Andrei Linde



SELF-REPRODUCING COSMOS appears as an extended branching of inflationary bubbles. Changes in color represent "mutations" in the laws of physics from parent universes. The properties of space in each bubble do not depend on the time when the bubble formed. In this sense, the universe as a whole may be stationary, even though the interior of each bubble can be described by the big bang theory.

# Cosmologie primordiale et la deuxième loi

## Paradigme de l'inflation chaotique (et éternelle)

### Caractère générique de l'inflation

Belinsky, Khalatnikov, Grishchuk, Zeldovich ; Kofman, Linde, Starobinsky

- attracteur
- nécessité d'introduire un cut-off

$$\lambda \gtrsim \ell_P \equiv \sqrt{\hbar G}$$

⇒ effet de “repassage” sur  $\lambda \gtrsim \ell_P$

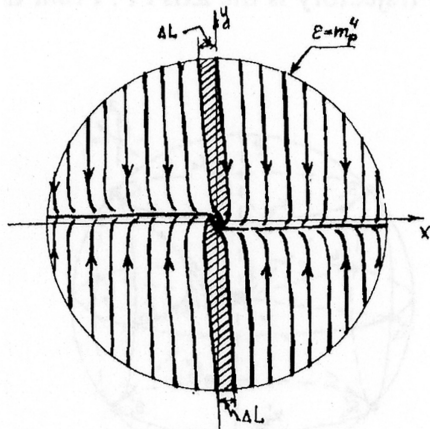


# Cosmologie primordiale et la deuxième loi

## Paradigme de l'inflation chaotique (et éternelle)

Caractère générique de l'inflation

*Belinsky et al., 1985*

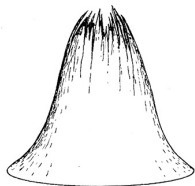


# Objections de réversibilité

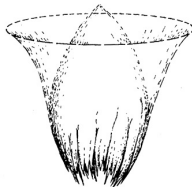
Penrose ; Hollands, Wald



(a)



(b)



(c)

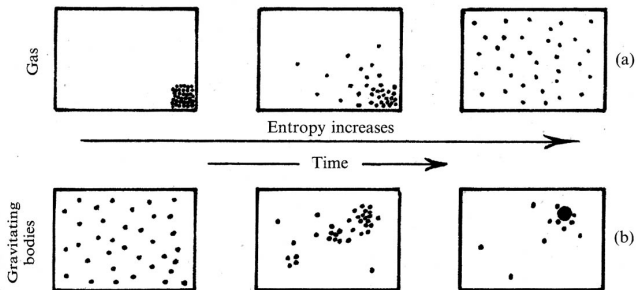


(d)

D'après : *The Road to Reality*, Penrose

# Paradigmes de conditions “initiales” spéciales

## Penrose : hypothèse sur la courbure de Weyl



**Fig. 27.10** Increasing entropy, with increasing time, left to right. (a) For gas in a box, initially all tucked in one corner, entropy increases as the gas starts to spread itself throughout the box, finally reaching the uniform state of thermal equilibrium. (b) With gravity, things tend to be the other way about. An initial uniformly spread system of gravitating bodies represents a relatively low entropy, and clumping tends to occur as the entropy increases. Finally, there is a vast increase in entropy as a black hole forms, swallowing most of the material.

# Paradigmes de conditions “initiales” spéciales

Hawking, Hartle :  $\psi(g, \dots)$  = analogue de l'état du vide en théorie quantique des champs (en approche Euclidienne).

$T$ -symétrique  $\Rightarrow$  Univers de Gold ?

Hawking, 1985 ; mais Page, 1985

# Paradigmes utilisant l'effet tunnel

Vilenkin : “tunnelling from nothing”

D'après : *Many Worlds in One*, Vilenkin

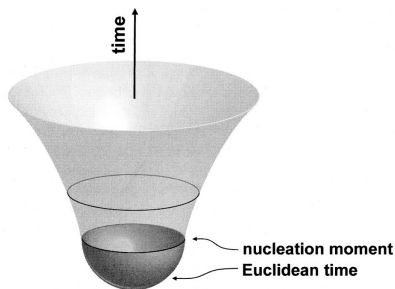


Figure 17.2. A spacetime diagram of the universe tunneling from nothing.

Nothing.”<sup>1</sup> Before submitting it to a journal, I made a day trip to Princeton University, to discuss these ideas with Malcolm Perry, a well-known expert on the quantum theory of gravitation. After an hour at the blackboard, Malcolm said, “Well, maybe this is not so crazy . . . How come I have not thought of it myself?” What better compliment can you get from a fellow physicist!

THE UNIVERSE AS A QUANTUM FLUCTUATION

# Paradigmes utilisant l'effet tunnel

Garriga, Vilenkin; Carroll, Chen [Figure d'après : “*Spontaneous inflation from cold de Sitter space*”, Carroll, Chen, 2004]

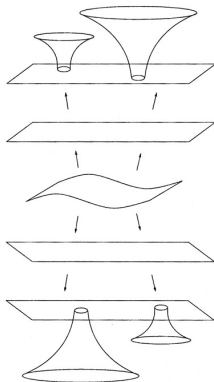


Figure 9: The ultra-large-scale structure of the universe. Starting from a generic state, it can be evolved both forward and backward in time, as it approaches an empty de Sitter configuration. Eventually, fluctuations lead to the onset of inflation in the far past and far future of the starting slice. The arrow of time is reversed in these two regimes.

# En forme de conclusion

- ▶ Le “passage du temps” est une illusion liée à la deuxième loi
- ▶ L'irréversibilité remonte au big bang, mais son origine reste obscure
- ▶ Le mécanisme de l'inflation (“repassage”) a sans doute joué un rôle important
- ▶ ? cut-off des états à  $\lambda \gtrsim \ell_P$  ?  
⇒ violation de la conservation du nombre d'états (i.e. version quantique de Liouville)
- ▶ En présence de gravité, la mesure de Liouville (pour systèmes spatialement compacts) n'est pas finie  
⇒ violation du théorème de récurrence de Poincaré
- ▶  $S_{BH} = A/(4G\hbar)$  est une indication précieuse, mais son extension en cosmologie (e.g.  $dS$ ) est obscure
- ▶ La “dé-émergence” de l'espace à un big bang / big crunch reste à explorer ( $E_{10}$  ?)