



C.I.E.H. 2017

L'univers a-t-il les mêmes lois à toutes les échelles ?

Les lois de la physique sont-elles vraiment universelles ?

Jean-Francis Loiseau

Professeur émérite à l'Université de Pau et des Pays de l'Adour

I. Questions préalables

Une mer d'huile est-elle une bonne approximation d'un plan ?



- vue d' un avion volant à 9000 mètres d'altitude...
- vue d'un matelas pneumatique flottant à sa surface...

Quelle est la longueur de la côte de la Bretagne ?



- Doit-on prendre en compte les rives des fleuves ?
- Celles de leurs affluents ?
- Celles des affluents des affluents ? etc...

Quelle est la surface d'un nuage ou d'un arbre ?

On imagine bien le VOLUME d'un nuage
(comme celui d'un édredon...)
... mais sa SURFACE ?

Cependant, un objet microscopique traversant un nuage voit
simplement la densité de molécules d'eau
augmenter plus ou moins vite, puis diminuer.
La frontière est FLOUE

Pour un arbre (sans les feuilles pour simplifier !),
on obtient son volume en divisant sa masse (mesurable)
par la masse volumique du bois (connue).

Mais pour la surface, il faut prendre en compte
toutes les branches, brindilles et brindillettes !

Où sont les limites de mon corps ?

À partir de quelle limite les molécules d'air que j'inspire
sont-elles dans mon corps ?

Le noyau de cerise que j'ai avalé par mégarde
et rejeté par la suite,
a-t-il séjourné quelques jours dans mon corps ?

*Si oui, le lion qui saute à travers un cerceau
a séjourné quelques fractions de seconde dans le cerceau.*

Vue au microscope électronique, la surface de la peau
ne ressemble-t-elle pas à celle d'un nuage ?
... À cette échelle, elle est tout aussi floue.

Sa couleur fait-elle partie d'un objet ?

La couleur d'un objet est liée à la façon dont il renvoie la lumière qui l'éclaire ...

... Et s'il n'y a pas de lumière ?
(« *la nuit tous les chats sont gris* »)

L'écran blanc sur lequel je projette une diapo
est-il encore blanc ?

Un atome isolé a-t-il une couleur ?

Réponse : ON NE LE VOIT PAS

La notion de **COULEUR** n'est applicable **qu'à** un objet macroscopique ...

c'est une **propriété statistique**
COMME LA TEMPÉRATURE

COULEUR et TEMPÉRATURE

Sont des données « évidentes » à notre échelle,
Mais elles ne sont pas définies à l'échelle de l'atome

II. Ordres de grandeur

Du plus grand au plus petit

Taille de l'univers observable :

10 milliards d'années-lumière $\approx 10^{26}$ m

(en fait, 3 fois plus car il est en expansion depuis le Big Bang)

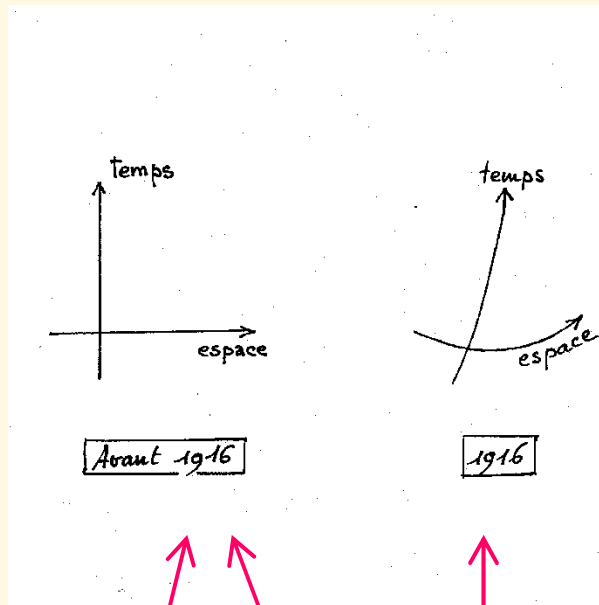
Échelle de Planck :

(au-dessous de laquelle les aspects quantiques
sont tels que "notre physique" ne s'applique plus) 10^{-35} m

Entre les deux : **61 ordres de grandeur** décimaux

Vers l'infiniment grand ...

Le relais de la physique
classique (newtonienne)
est pris par la
RELATIVITÉ GÉNÉRALE



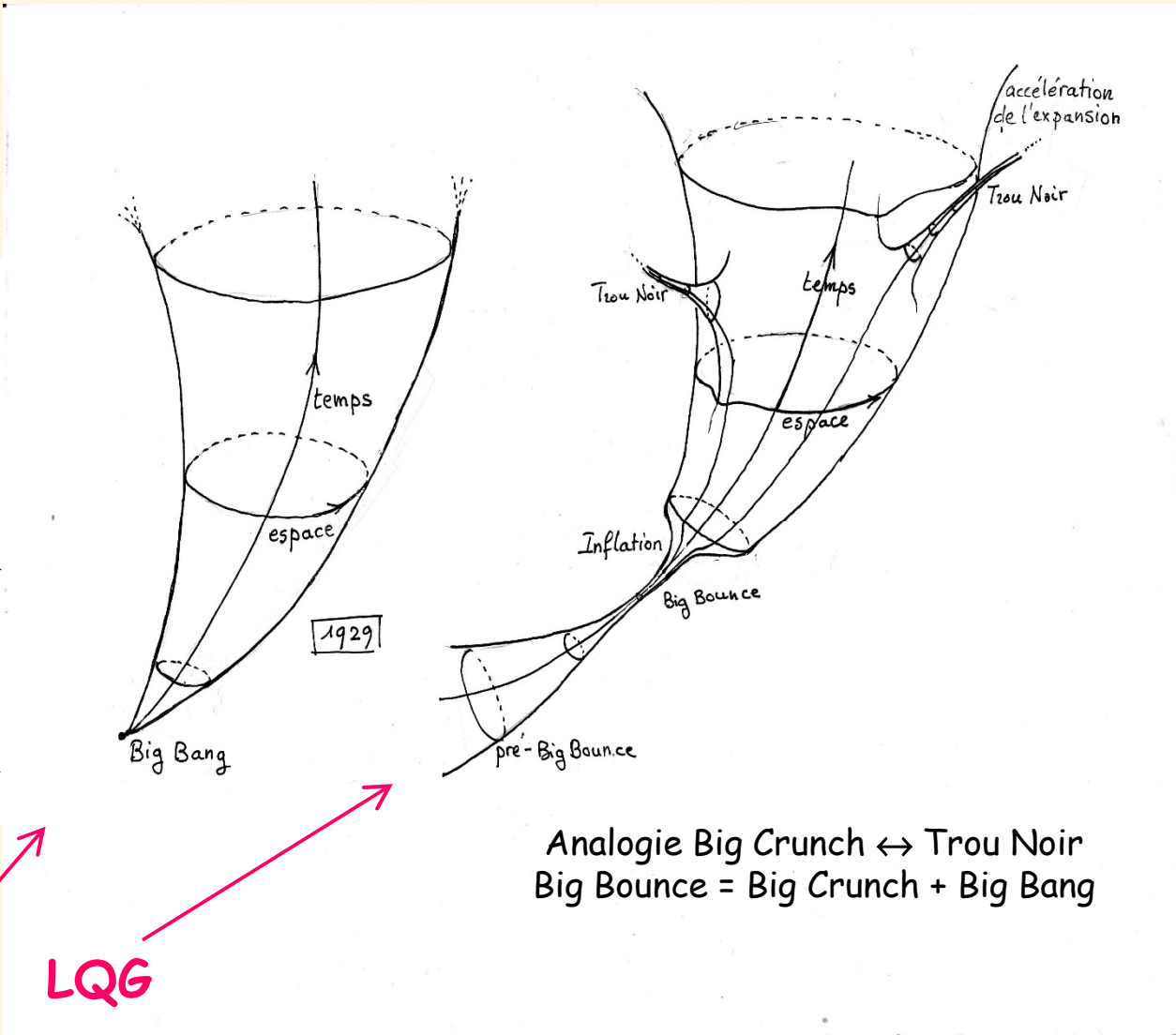
GU

RR

RG

LQG

J F Loiseau



Analogie Big Crunch ↔ Trou Noir
Big Bounce = Big Crunch + Big Bang

CIEH 2017

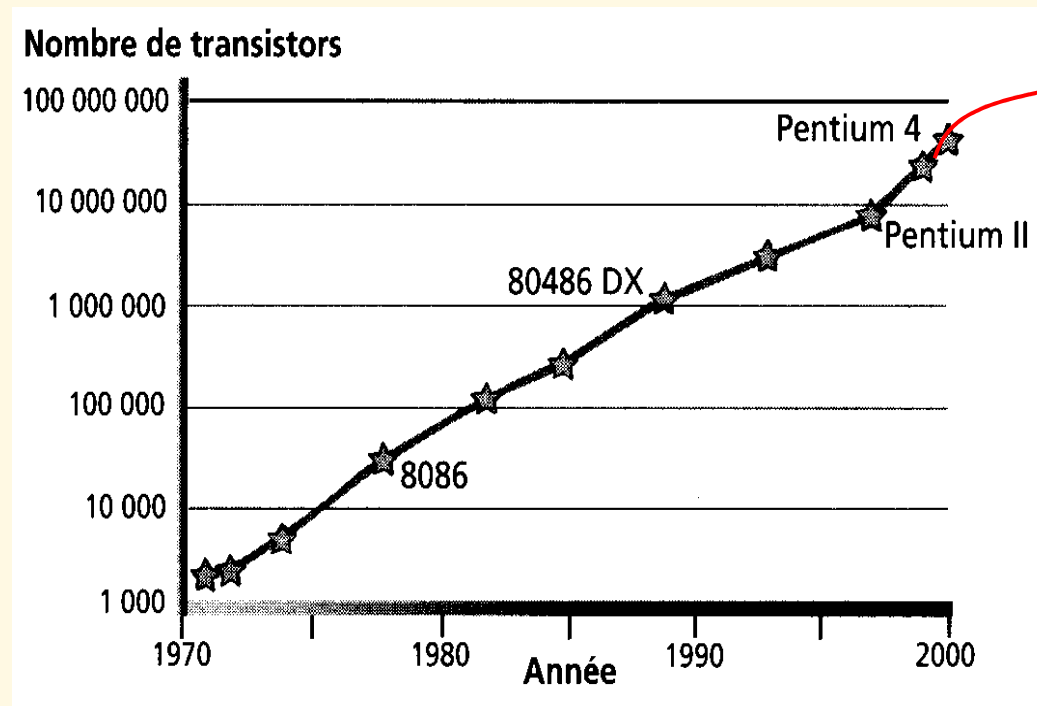
11



... et vers l'infiniment petit

Taille (ordre de grandeur en m)	Objets	Force dominante	Domaine	Approche
$1 \rightarrow 10^{-3}$	Objets usuels	Gravitation	MACROSC.	CLASSIQUE Top Bottom ↓
$10^{-4} \rightarrow 10^{-5}$	MEMS	Tension Superficielle Force de Van der Waals	MICROSC.	
$10^{-6} \rightarrow 10^{-7}$ [micromètres]	Composants électroniques			
10^{-8} [nanomètres]	Nanoparticules	Effet Casimir	MESOSC.	Transition class./quant.
$10^{-9} \rightarrow 10^{-10}$ [angströms]	Atomes et Molécules	Forces de Coulomb	NANOSC. Physique atomique	QUANTIQUE Bottom Up ↑
$10^{-11} \rightarrow 10^{-13}$	?			
$< 10^{-14}$ [femtomètres]	Noyaux	Forces nucléaires	Physique nucléaire	

Loi de Moore



Par extrapolation, la loi aurait été mise en défaut vers 2015
car les composants seraient devenus plus petits que des molécules...
Mais il y a un aplatissement de la courbe à partir de 2005



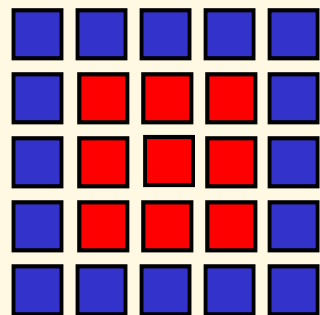
LIMITE QUANTIQUE



Il faut "inventer autre chose" : ordinateur quantique ?

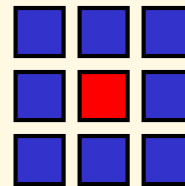
Surface et Volume

- À l'échelle macroscopique, le nombre d'atome en surface est très petit devant celui des atomes du cœur.
- Plus un objet est petit plus le rapport surface/cœur augmente



En 2D : volume $\rightarrow$ surface et surface $\rightarrow$ périmètre

$$\text{périmètre/cœur} = 16/9 \approx 1,778$$



$$\text{périmètre/cœur} = 8/1 = 8,000$$

- Dans le « cœur » d'un solide («in the bulk »), les atomes n'ont de liens (physiques ou chimiques) qu'avec des atomes du solide lui-même.
- A la surface d'un solide, les atomes ont des liens avec l'extérieur du solide (environnement) , ils peuvent aussi créer entre eux des liaisons d'un autre type que dans le cœur
(par exemple : réticulation de surface d'un polymère)

III. FRACTALES...

... l'infiniment complexe

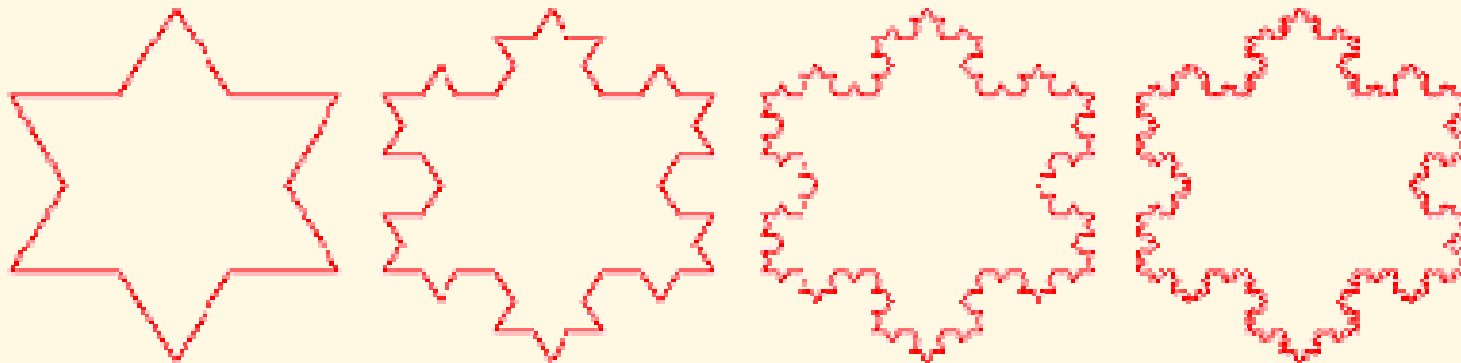
Objets fractals de dimension 1



← Benoît Mandelbrot

"Flocon de neige" de Von Koch :
Courbe de longueur infinie limitant une surface finie.

Chaque fois qu'on réduit d'un facteur **3** la longueur de la règle, on multiplie par **4** le nombre de fois où l'on doit l'appliquer le long de la figure. Sa dimension de Hausdorff-Besicovitch est égale à **$\ln 4 / \ln 3 = 1,26...$** **Presque tous les objets fractals ont des dimensions non entières.**



Extraits d'un dossier de Futura- Sciences [<http://www.futura-sciences.com>]

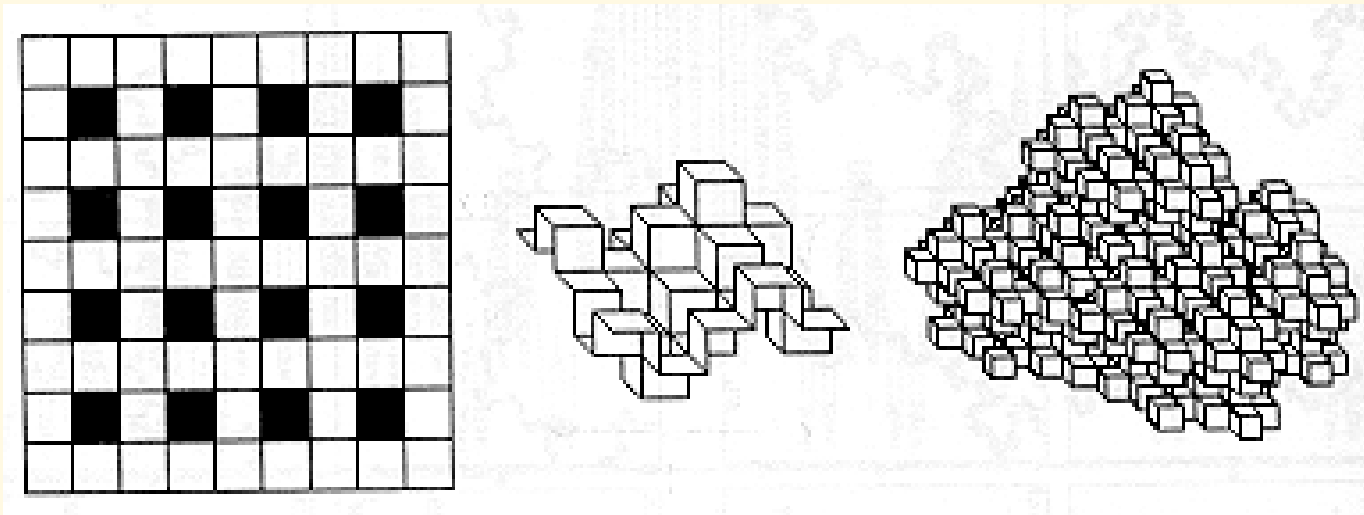
Mesure d'un objet fractal



La côte de la Bretagne et la surface d'un arbre
sont (à la limite) des objets fractals.



Objets fractals de dimension 2



- En pliant le motif de gauche on obtient la surface du milieu.
- En reproduisant (à l'échelle $1/9$) le motif de gauche sur chaque carré de la surface et en le repliant de la même manière, on obtient la surface de droite.
- En recommençant encore et encore, on tend vers une surface fractale infiniment repliée sur elle-même, qui semble occuper complètement un volume (dimension 3) mais sa dimension (au sens de Hausdorff-Besicovich) est comprise entre 2 et 3.

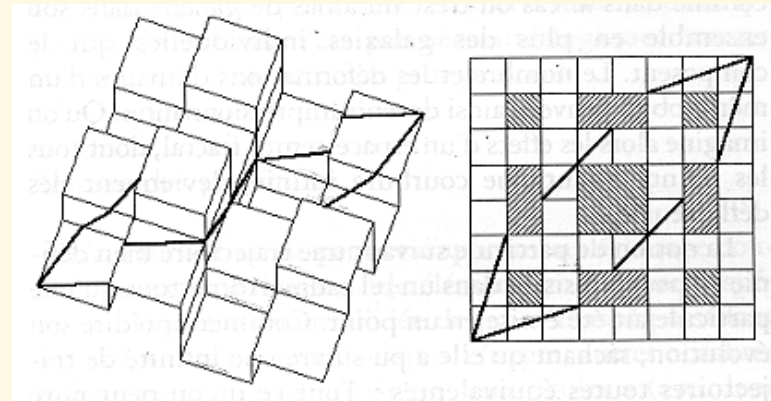
Géodésiques fractales

On appelle GEODESIQUE d'une surface le plus court chemin pour aller d'un point de cette surface à un autre.

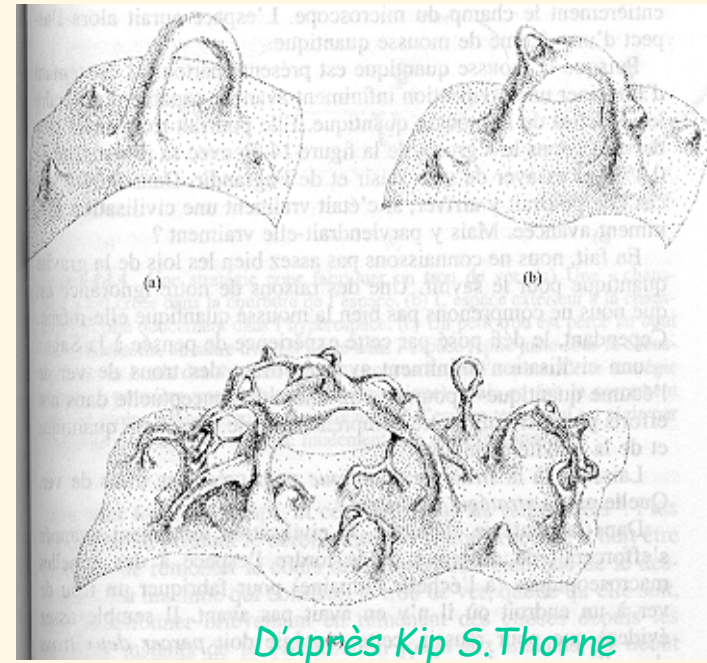
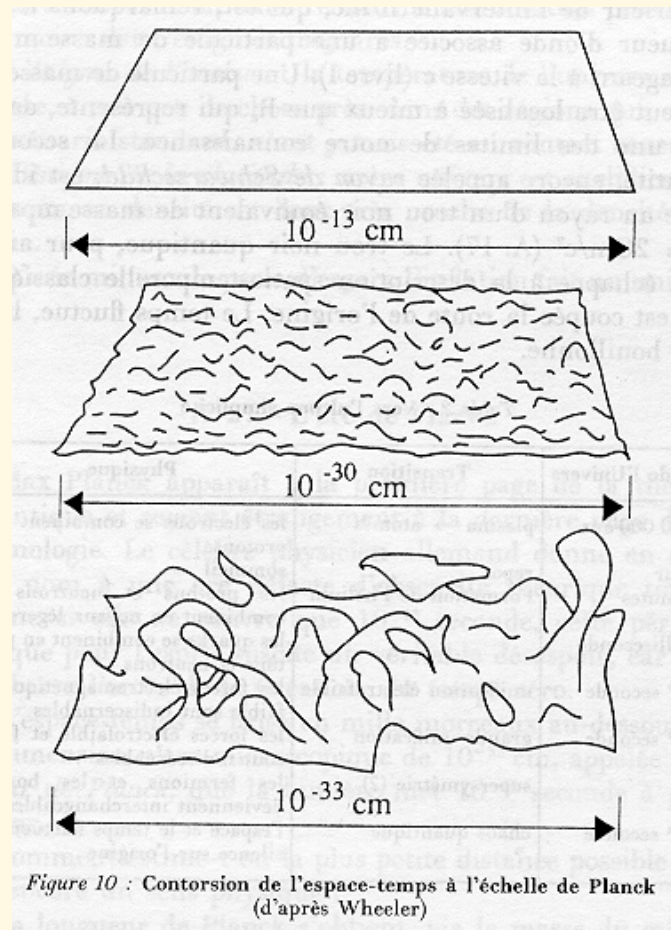


Quel est le plus court chemin pour aller d'un point à un autre de la surface de l'eau (qui bouge) sans quitter cette surface ?

Même question pour la fractale obtenue en reproduisant pour chaque cube le motif ci-contre.

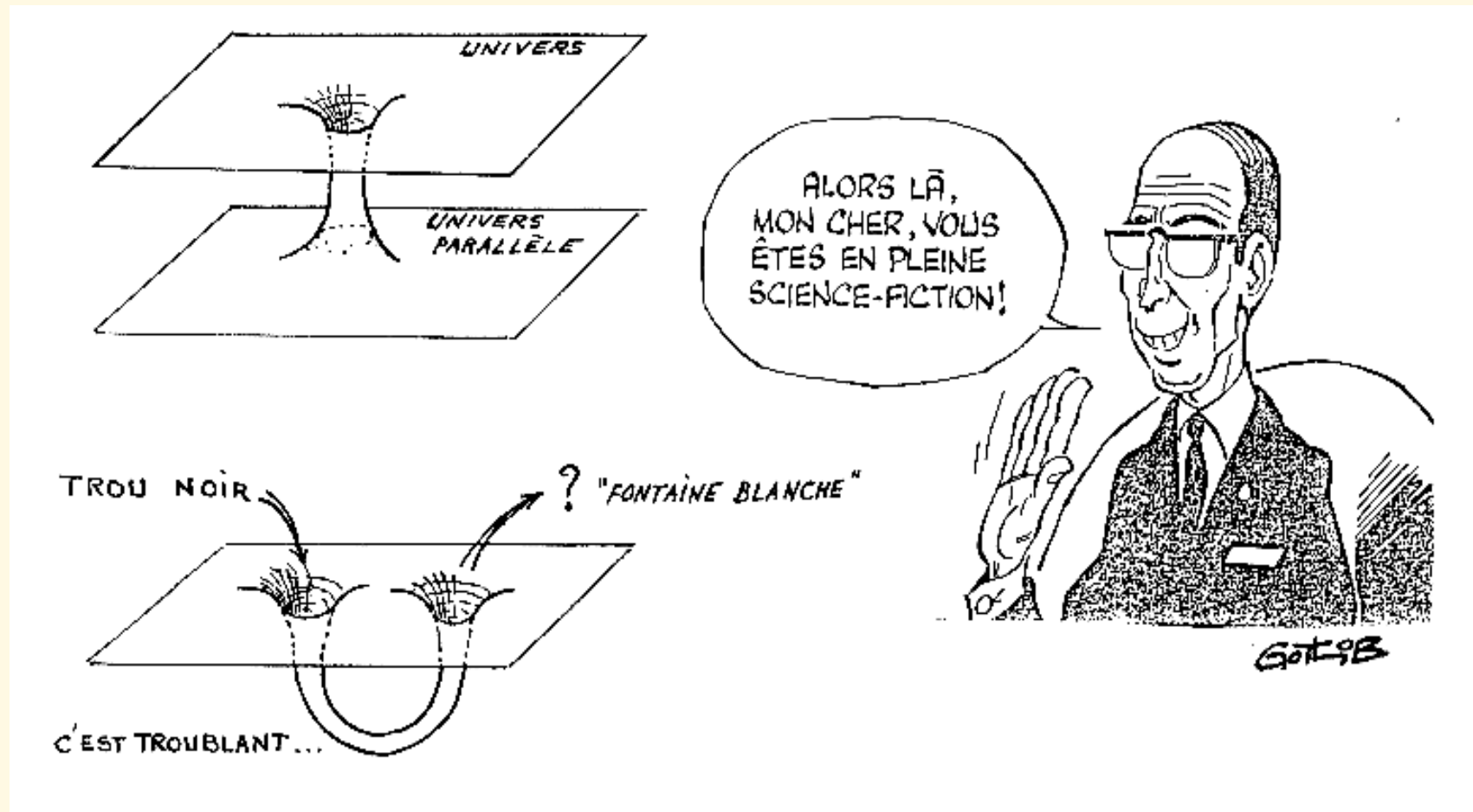


Mousse quantique et "trous de vers"



En raison des fluctuations quantiques, plus l'échelle d'observation est petite, moins l'espace-temps est lisse ...
En-deçà de 10^{-35} m ou 10^{-43} s (échelle de Planck), la physique ne peut rien dire tant que Relativité Générale et Mécanique Quantique n'auront pas été réconciliées.

Holà ! Holà ! Holà!



IV. Un ensemble unique de lois pour l'univers dans son ensemble ?



Dimensions "enroulées"

EXEMPLE :

Vu de loin, un fil tendu est à une dimension.

Vu de près, c'est un cylindre :

sa surface a 2 dimensions, dont une "enroulée".

Des modèles topologiques dérivés de ceux de

Théodore Kaluza et Oscar Klein

(début du XX^e siècle)

permettent d'imaginer la gravitation agissant sur plus de dimensions
que les autres interactions

(c'est pourquoi elle est plus faible dans "notre" monde)

Vivons-nous sur une (3+1)-brane (**brane = membrane à une seule face**)
d'un espace à 10+1 dimensions ?

C'est une des versions de la théories des super-cordes

Révolutions

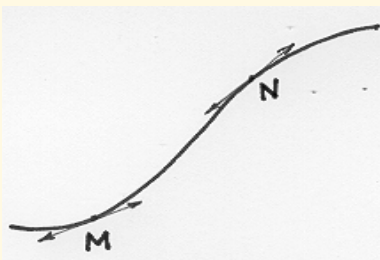
La révolution débutée par Copernic, poursuivie par Tycho Brahé, Kepler, Galilée et achevée par Newton 150 ans plus tard, a détrôné la théorie aristotélicienne. Pendant les XVIII^e et XIX^e siècles, les lois de la physique et de la cosmologie étaient restées dans le cadre newtonien.

Le début du XX^e siècle apporte une deuxième grande révolution. Cependant cette révolution ne remplace une théorie par une autre, mais par **deux autres** : la Relativité Générale et la Physique Quantique.

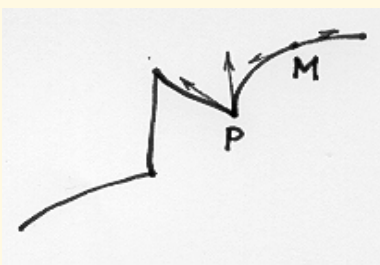
- La **Relativité Générale** est une théorie de la Gravitation, qui s'applique bien à grande échelle et permet à la cosmologie de traiter le problème des trous Noirs et celui du Big Bang "à grande échelle" .
- La **Physique Quantique** s'applique à l'échelle subatomique et permet de mettre sur pied le modèle standard des particules élémentaires

Cependant, ces deux théories sont incompatibles dans les conditions qui régnaient aux "premiers instants" de l'univers (échelle de Planck)

Abandon de la différentiabilité



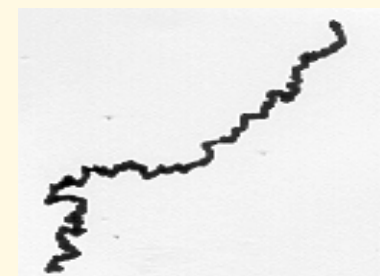
En tout point (M, N, ...) la courbe admet une tangente. C'est une *variété différentiable* (à 1 dimension)



Aux *points anguleux* (P par exemple), la courbe n'admet pas de tangente mais deux demi-tangentes. La variété n'est différentiable qu'entre ces points.



Les points anguleux sont très nombreux. La variété n'est différentiable que sur de très petits sous-ensembles



A la limite, tous les points sont anguleux. La variété est *non-différentiable*, elle n'admet de tangente en aucun point.

Implications quantiques

Selon la **Relativité Générale**,
les masses suivent le plus court chemin pour aller d'un point à un autre
C'est à dire : les lignes de temps sont des géodésiques de l'espace-temps.

A l'échelle quantique, **l'espace-temps n'est pas différentiable.**

⇓
Il y a une infinité de géodésiques reliant
deux points de l'espace-temps. Chacune a
une certaine probabilité d'être empruntée.

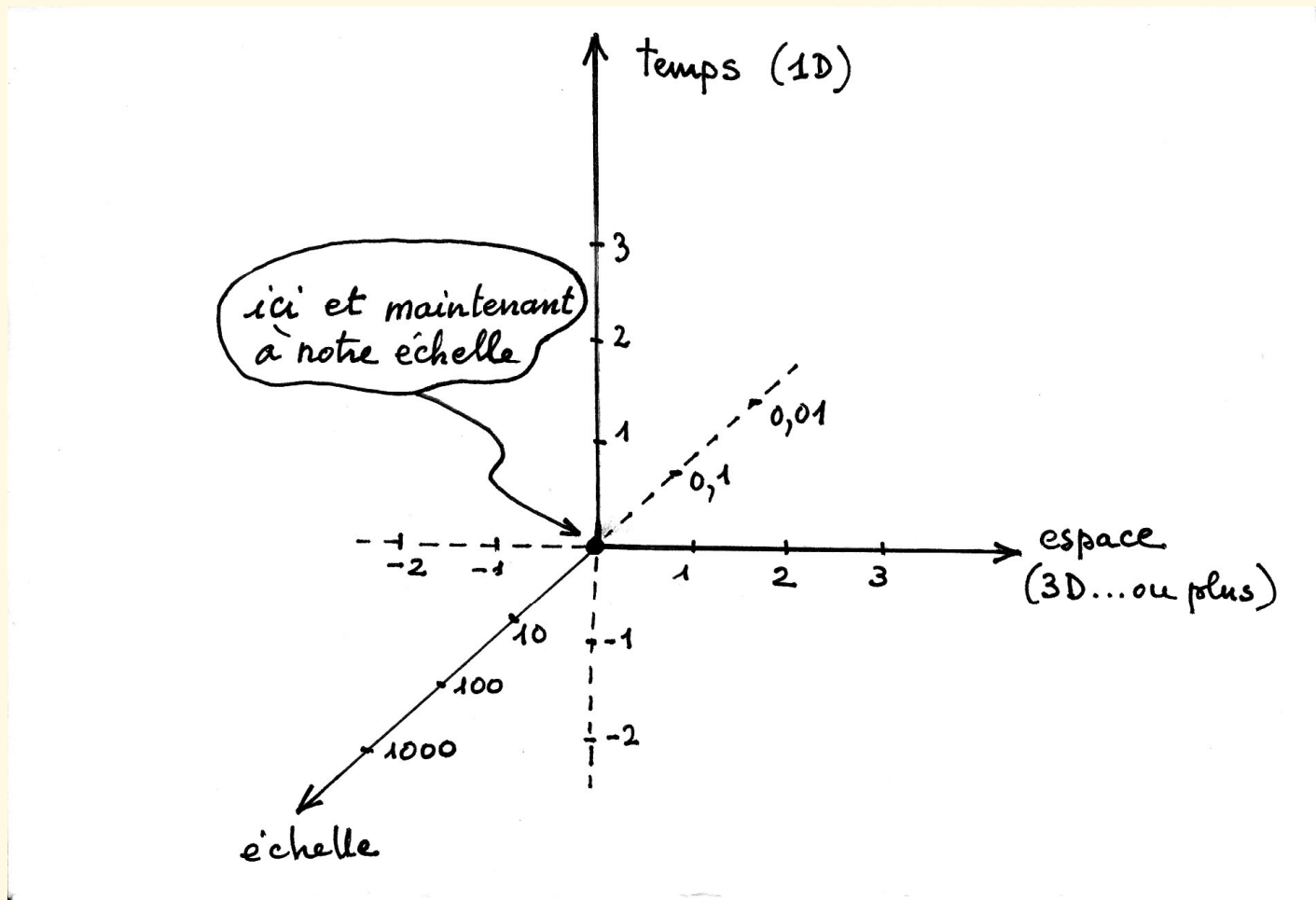


Laurent Nottale



Avec la **Relativité d'Échelle**,
on retrouve ainsi l'aspect probabiliste de la physique quantique.
Relativité Générale et Physique Quantique sont réconciliables.

Espace-Temps-Échelle





Le "mur de Planck"

nom	dimension	formule	valeur approchée (système SI)
Longueur de Planck L_P	(L)	$l_P = \sqrt{\frac{G\hbar}{c^3}}$	$1.616 \times 10^{-35} \text{ m}$
Masse de Planck	(M)	$m_P = \sqrt{c\hbar/G}$	$2.177 \times 10^{-8} \text{ kg}$
Durée de Planck T_P	(T)	$t_P = \frac{l_P}{c} = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^5}}$	$5.391 \times 10^{-44} \text{ s}$
Température de Planck	(θ)	$T_P = \frac{m_P c^2}{k} = \frac{\sqrt{c^5 \hbar / G}}{k}$	$1.415 \times 10^{32} \text{ K}$
Charge de Planck	(Q)	$q_P = \sqrt{c\hbar 4\pi\epsilon_0}$	$1.875 \times 10^{-18} \text{ C}$
Énergie de Planck	(ML^2T^{-2})	$E_P = F_P l_P = c^2 \sqrt{\frac{c\hbar}{G}}$	$10^{19} \text{ GeV} = 1.956 \times 10^9 \text{ J}$

2000 mégajoules par particule !

Abandon de la continuité ?

Les théories de gravitation quantique, et en particulier la **gravitation quantique à boucles** (*Loop Quantum Gravity : LQG*) développée par Ashtekar, Rovelli, Smolin et Bojowald, conduisent à une **quantification de l'espace et du temps** :

les longueurs ne peuvent être que des multiples de L_p
et les durées des multiples de T_p .

⇒ La question des géodésiques et des trajectoires, ainsi que la topologie, doivent être revues.

Le problème du temps

Carlo Rovelli $\Rightarrow$ La mesure du temps est liée à la notion de retour périodique qui est arbitraire
(Exemple : Galilée, le pouls et le pendule ...)

$\Rightarrow$ On ne peut pas de façon absolue parler des événements successifs $A(t)$, $B(t)$, $C(t)$,
... mais seulement de $A(B)$, $B(C)$, $C(A)$, etc...

Il n'y a pas des quantités qui évoluent dans le temps,
mais des quantités qui évoluent l'une par rapport à l'autre.

Le temps se "construit", avec l'espace,
à partir du contenu de l'univers (quanta d'espace-temps).

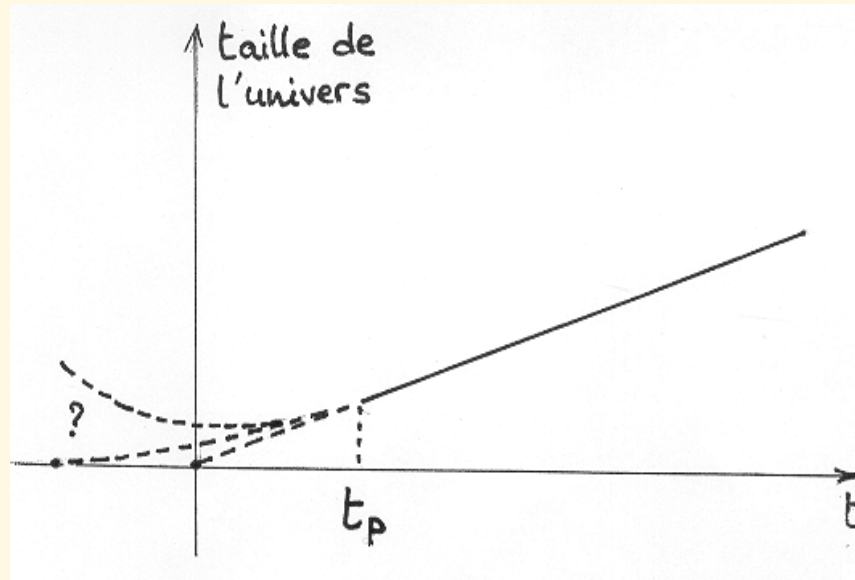
Julian Barbour est encore plus drastique : le temps n'existe pas !

C'est une illusion liée aux relations entre les constituants de l'univers.

Marc Lachièze-Rey arrive aux mêmes conclusions à partir des implications logiques de la Relativité (Restreinte ou Générale).

Lee Smolin est récemment arrivé à une nouvelle conception et à une réhabilitation du temps.

Y a-t-il une "origine du temps" ?

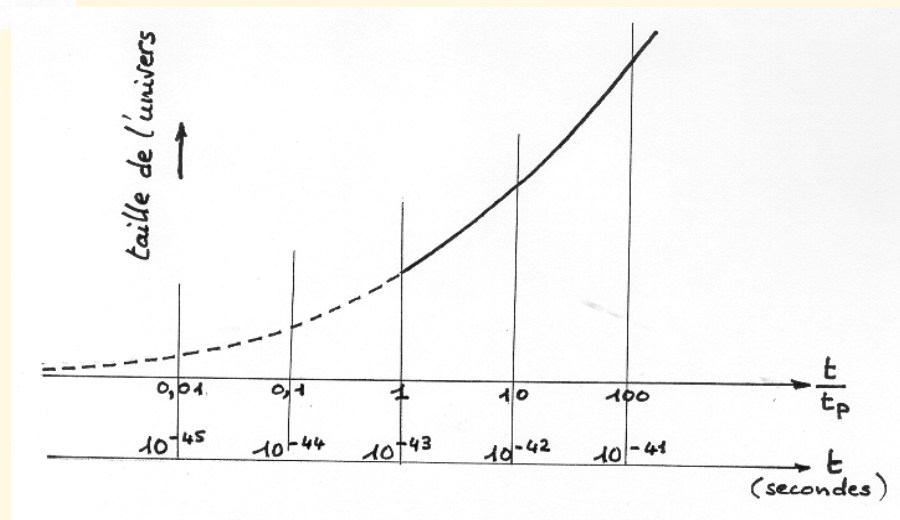


En-deçà du "temps de Planck"
($t_p = 10^{-43}$ seconde)
on ne peut qu'extrapoler :
*La singularité (origine du temps)
n'existe peut-être pas*

← Échelle linéaire

Exemple de singularité
rejetée à l'infini dans le passé

← Échelle logarithmique



V. Une théorie cosmologique issue de la LQG

L'univers est-il "rebondissant" ?

La **Gravitation Quantique à Boucles** prévoit que non seulement les grandeurs physiques sont quantifiées, c'est-à-dire discontinues (paquet de taille minimale = quantum)

mais aussi l'espace-temps lui-même : "**quanta d'espace-temps**"

La densité d'énergie que peut contenir un quantum d'espace-temps n'est pas infinie.

Si la densité augmente trop, la gravitation devient répulsive.

L'Univers actuel serait issu de la contraction d'une phase antérieure, poussée jusqu'au point où la gravitation devient répulsive et entraîne l' "inflation primordiale" .

L'instant où sa taille est minimale n'est pas une véritable singularité

Le Big Bang ne serait-il donc que la conséquence d'un Big Crunch ?

Références : *Pour la Science*, fév. 2004, juin 2004, janv. 2009

Lee Smolin a poussé cette hypothèse jusqu'à ses conséquences ultimes :
l'Evolution Cosmologique (cosmologie "darwinienne")



Evolution cosmologique (1)

Ce qui se produit pour le Big Bang (singularité "dans le passé") peut aussi se produire pour un Trou Noir (singularité "dans le futur"), la singularité étant remplacée par une "dans le passé" débouchant sur une Fontaine Blanche qui serait un nouvel univers, "fils" du nôtre.

2 postulats :

- 1) Les effets quantiques interdisent les singularités et ont pour conséquence un "rebond".
- 2) Ce rebond est un nouvel univers pour lequel les paramètres (constantes universelles, masses des particules) sont peu différents. Il s'agit de "mutations".

Conséquence : seuls les univers conduisant à un Big Crunch ou contenant des Trous Noirs engendrent de nouveaux univers.

N.B.: Un Big Crunch n'est au fond qu'un unique Trou Noir Global ...

Pour qu'il y ait des Trous Noirs en grand nombre (et pas seulement un unique Big Crunch), il faut des étoiles massives en quantité, ce qui ne se produit que pour un domaine très restreint des paramètres.



Évolution cosmologique (2)

Quel que soit l'univers "premier", les "mutations" font varier les paramètres de façon aléatoire, mais par petites variations (comme les mutations génétiques dans l'évolution biologique)

Lorsque les paramètres entrent dans le domaine de valeurs permettant la naissance d'étoiles suffisamment massives pour s'effondrer ensuite en Trous Noirs, un grand nombre d'univers-fils sont engendrés, avec "essai" de nombreux paramètres voisins.

Ces univers sont sélectionnés car, contenant du carbone, ils favorisent l'existence de Trous Noirs. Mais le carbone favorise aussi l'apparition de la vie, puis de la conscience (par évolution biologique).

Les étoiles, les molécules complexes, la vie, la conscience, etc... sont les produits d'une complexité croissante favorisée par une évolution cosmique assez semblable à l'évolution biologique.

Le moteur de l'évolution cosmologique est l'augmentation de la probabilité des trous noirs, la vie n'est qu'une "retombée"

Le temps n'est pas la toile de fond de cette évolution cosmique, c'est ce processus évolutif qui le crée. Il s'agit d'un processus thermodynamiques **hors-équilibre**, dont l'énergie est fournie, en dernière analyse, par l'effondrement gravitationnel.

John GRIBBIN - *Le chaos, la complexité et l'émergence de la vie* - Flammarion (2004)

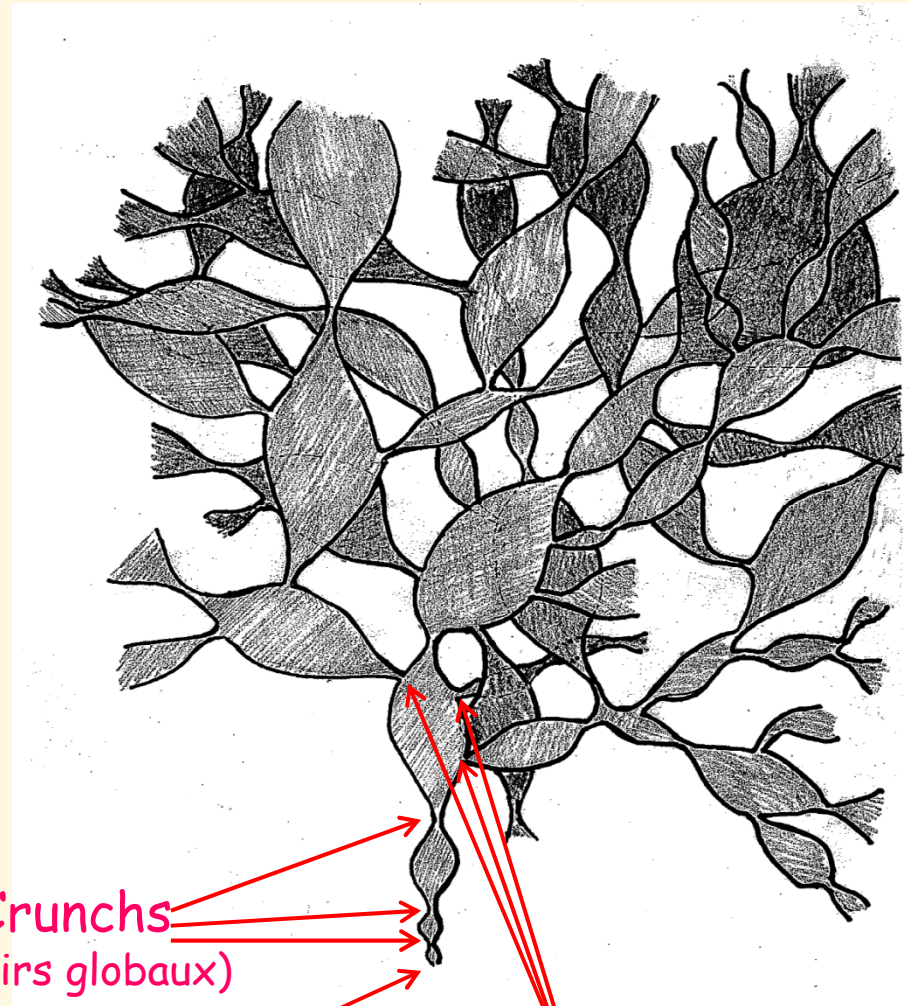


Evolution cosmologique (3)

Essai de représentation
de l'évolution cosmologique
selon *Lee Smolin*



Trou Noir (local ou global)
=
Mort d'une étoile et
Naissance d'un univers



Big Crunches
(trous noirs globaux)

Univers "premier"

Premiers Trous Noirs
(locaux)

QUELQUES CONCLUSIONS (provisaires)

Certaines notions ne sont pas définies à toutes les échelles.
Ex. COULEUR, TEMPÉRATURE, SPIN ...

Même une notion définie à toutes les échelles
telle que la GRAVITATION,
ne s'y exprime peut-être pas par les même lois,
En outre, le temps et l'espace peuvent être quantifiés

Toutes les dimensions de l'ESPACE-TEMPS
... ou de l'ESPACE-TEMPS-ÉCHELLE
n'ont peut-être pas la même extension

Suivant la taille de l'univers (et elle change au cours du temps),
la gravitation et les phénomènes quantiques
peuvent s'ignorer ou au contraire être intimement liés

Bibliographie sommaire

OUVRAGES :

John GRIBBIN - *Le chaos, la complexité et l'émergence de la vie* - Flammarion (2004)
Jean PERDIJON - *Les grandes idées de la physique* - Dunod (2002)
Philip et Phylis MORRISON et al. - *Les puissances de dix* - Belin (2003)
Jean-Pierre LUMINET et Marc LACHIEZE-REY - *De l'infini* - Dunod (2016)
Jean-Pierre LUMINET - *Le destin de l'Univers* - Fayard (2006) / Coll. Folio, Gallimard (2010)
Roger PENROSE - *À la découverte des lois de l'Univers* - Odile Jacob (2007)
Lee SMOLIN - *Rien ne va plus en Physique* - Dunod (2007)
Marc LACHIEZE-REY - *Au-delà de l'espace et du temps* - Ed. Le Pommier (2008)
Carlo ROVELLI - *Qu'est-ce que le temps ? Qu'est-ce que l'espace ?* - Bernard Gilson (2008)
Etienne KLEIN - *Discours sur l'origine de l'univers* - Flammarion NBS (2010)
Marc LACHIEZE-REY - *Voyager dans le temps : la physique moderne et la temporalité* - Seuil (2013)
Lee SMOLIN - *La renaissance du temps* - Dunod (2014)

Pour les anglophones :

Roger PENROSE - *Faith, Faith and Fantasy* - Princeton et University Press (2016)
Lee SMOLIN - *The Life of the Cosmos* - Phoenix [London] (1997)
Per BAK - *How nature works* - Oxford University Press (1997)
Julian BARBOUR - *The End of Time* - Phoenix [London] (1999)
Lee SMOLIN - *Three Roads to Quantum Gravity* - Basic Books (Perseus) (2001)
Roberto MANGABEIRA UNGER and Lee SMOLIN - *The Singular Universe and the Reality of Time* - Cambridge University Press (2014)