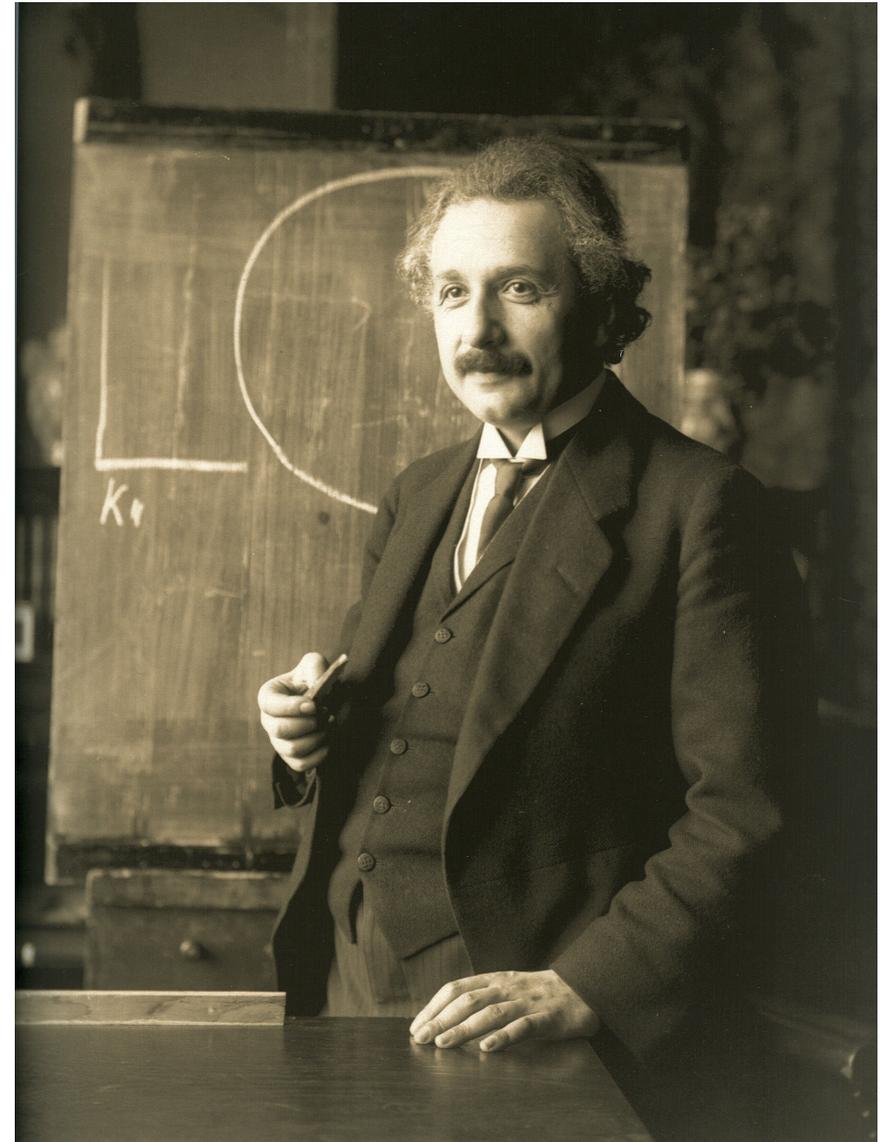


Si Einstein m'était conté

Regard sur la relativité
et le temps

Jeudi 31 janvier 2013
Gif-sur-Yvette

Thibault Damour (*IHÉS*)





- **EINSTEIN**

scientifique, mari, père, ami, amant, musicien, juif, sioniste, homme engagé, navigateur, ...

- **EINSTEIN et la joie de la pensée**

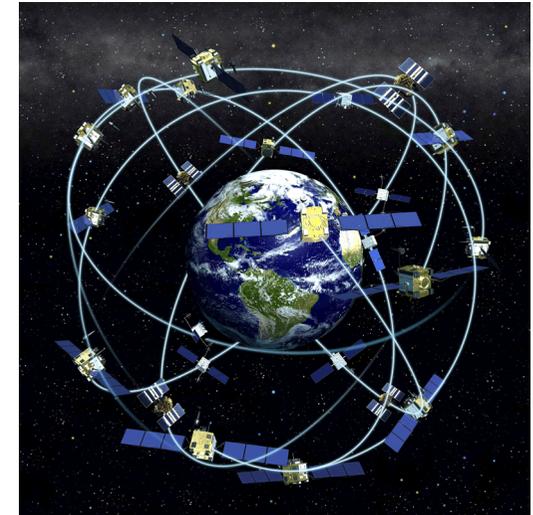
*« ce qui est essentiel dans l'existence d'un homme comme moi, c'est **ce** qu'il pense, et **comment** il comment il le pense, et non ce qu'il fait et ce qu'il éprouve »*

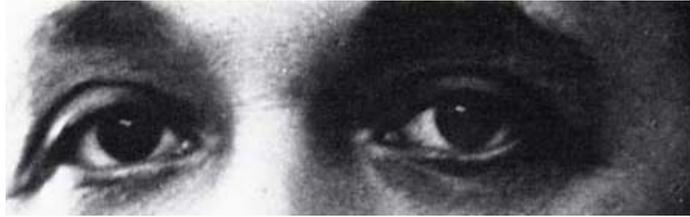
- Qu'a pensé Einstein ?
- Comment ses idées ont-elles bouleversé l'image du monde ?
- Conséquences philosophiques
- Impact dans la vie de tous les jours



EINSTEIN et LA VIE QUOTIDIENNE

- **LASER** (Einstein 1917 : « principe du laser ») :
CD, DVD, chirurgie, industrie, ...
- **EFFET PHOTOÉLECTRIQUE** (Einstein 1905, loi de l'effet photo électrique) :
Portes automatiques, ...
- **TOMOGRAPHIE PAR ÉMISSION DE POSITRONS** :
 $e^+ + e^- \rightarrow 2 \gamma$, $E = mc^2$ (Einstein 1905)
- **GPS** : Relativité Restreinte : - 5 ns/minute, cad - 1.5 m/mn
Relativité Générale : 32 ns/minute, cad + 10 m/mn
(Einstein 1915)





EINSTEIN et LA VIE QUOTIDIENNE

- électrons dans les tubes cathodiques TV :

$v \sim 1/3 c$ (Relativité Restreinte - Einstein 1905)

- TECHNOLOGIE QUANTIQUE OMNIPRÉSENTE :

Contribution fondamentales d'Einstein à la physique quantique :

1905, 1906, 1909, 1911, 1917, 1935 (cf Max Born : « Même si Einstein ... »).

En particulier : Einstein Podolsky Rosen → **intrication quantique** → sera peut être à la base de nombreuses nouvelles applications de la physique quantique.

...

Fabrication du fromage : Mouvement Brownien de particules colloïdales (Einstein 1905)

...

Muons et évolution :

Rayons cosmiques → $\pi \rightarrow \mu + \nu$, $\tau_\mu = 2\mu s$, $c\tau_\mu = 600m$: dilatation relativiste du temps cruciale pour que les muons puissent atteindre le sol (et éventuellement provoquer des mutations de l'ADN).



EINSTEIN

INSTAURATEUR DES TROIS RÉVOLUTIONS
DE LA PHYSIQUE FONDAMENTALE
DU 20^{ème} SIECLE

- Théorie quantique
- Relativité restreinte
- Relativité générale



sous-tendent
La technologie moderne



EINSTEIN

- VISIONNAIRE d'une unification de la description de la réalité
vision d'une grande actualité
- SCIENTIFIQUE intéressé par le contact, avec l'expérience, et les applications de la science
- SAVANT-PHILOSOPHE qui réfléchissait aux conséquences
philosophiques de la science
- SAVANT-ENGAGÉ qui réfléchissait aux conséquences
politiques et sociales de la science

ESPACE

TEMPS

MATIÈRE

FORCE

- DONNÉ A PRIORI

- GÉOMÉTRIE EUCLIDIENNE

- 3 DIMENSIONS

- REPOS ABSOLU

- DONNÉ A PRIORI

- CHRONOMÉTRIE EUCLIDIENNE

- 1 DIMENSION

- PASSE/PRESENT/FUTUR

- MASSE

- PERMANENCE

- 'ATOMES'

- PARTICULES ÉLÉMENTAIRES

l, q

- GRAVITATION

- ÉLECTROMAGNÉTISME

CHAMP

- INTERACTION 'FORTE'

- INTERACTION 'FAIBLE'

ESPACE

TEMPS

MATIÈRE

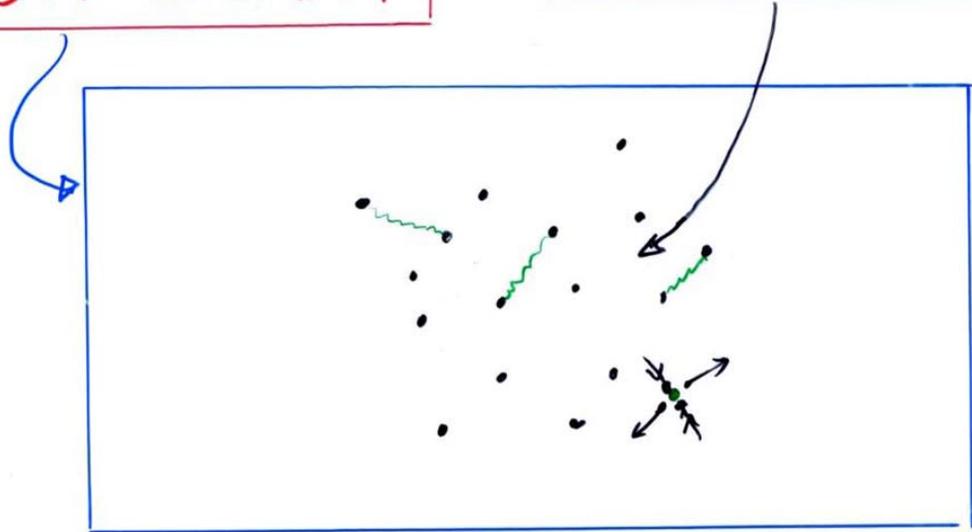
FORCE

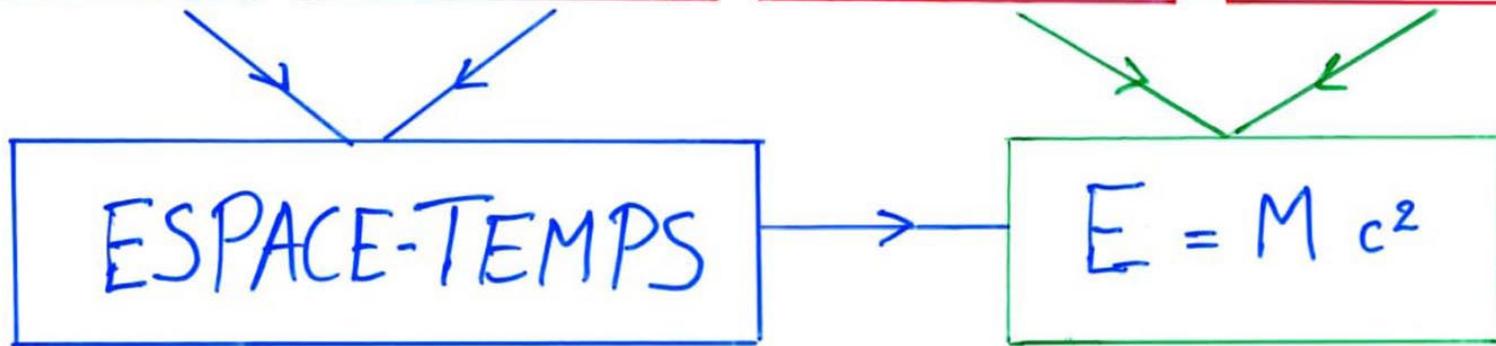
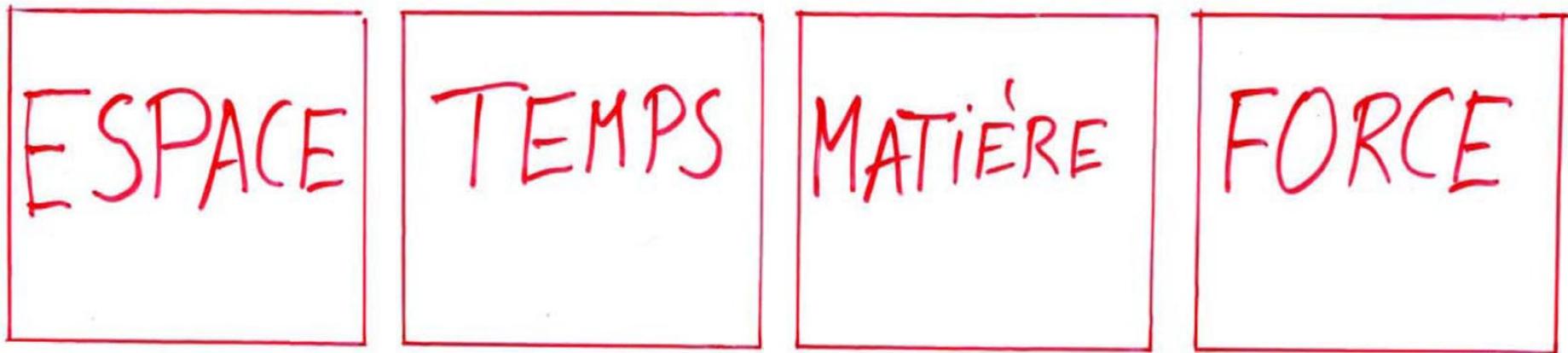
CADRES D'EXISTENCE
DE LA RÉALITÉ :

'ACTEURS' DE LA RÉALITÉ

CONTENANT

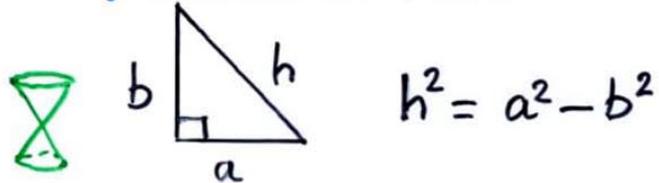
CONTENU





- DONNÉ A PRIORI
(RELATIVITÉ RESTREINTE)

- GÉOMÉTRIE PSEUDO-EUCLIDIENNE



- QUATRE DIMENSIONS

RELATIVITÉ RESTREINTE

1905



$$E = M c^2$$

ENERGIE

~

TRAVAIL

~

FORCE

MASSE

~

QUANTITE' DE MATIERE

~

SUBSTANCE PERENNE
(LA VOISIER)

$$E = M c^2$$

EINSTEIN :

LA MATIÈRE EST ÉPHÉMÈRE

MATIÈRE



RAYONNEMENT



E.G. BIG BANG

ESPACE

TEMPS

MATIÈRE

FORCE


$$E = hf$$

MATIÈRE \simeq LUMIÈRE : PHOTON (EINSTEIN 1905)

DE BROGLIE
1923

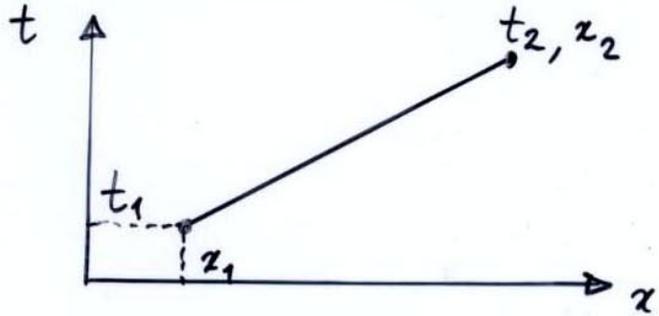
$$P = \frac{h}{\lambda}$$

$$E = hf$$

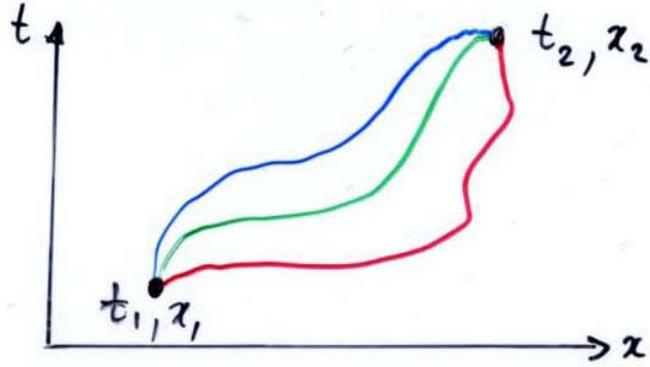
$$\text{PHASE} = \varphi^{\text{HISTOIRE}} = 2\pi \int_H dt f = \frac{2\pi}{h} \int_H dt (E_{\text{CINÉTIQUE}} - E_{\text{POTENTIÉLLE}})$$

↑ PHASE DE L'OSCILLATION DE 'L'AMPLITUDE D'EXISTENCE'

PARTICULE CLASSIQUE
HISTOIRE UNIQUE



PARTICULE QUANTIQUE

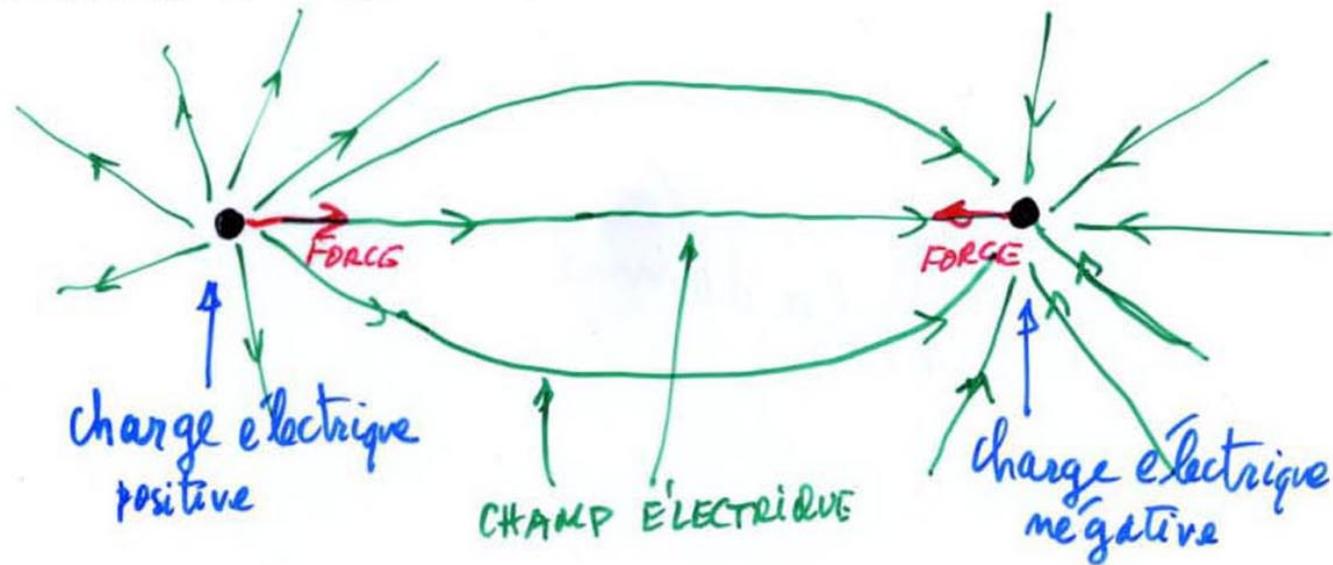


$$A = \sum_{\text{HISTOIRES } H} e^{i\varphi_H}$$

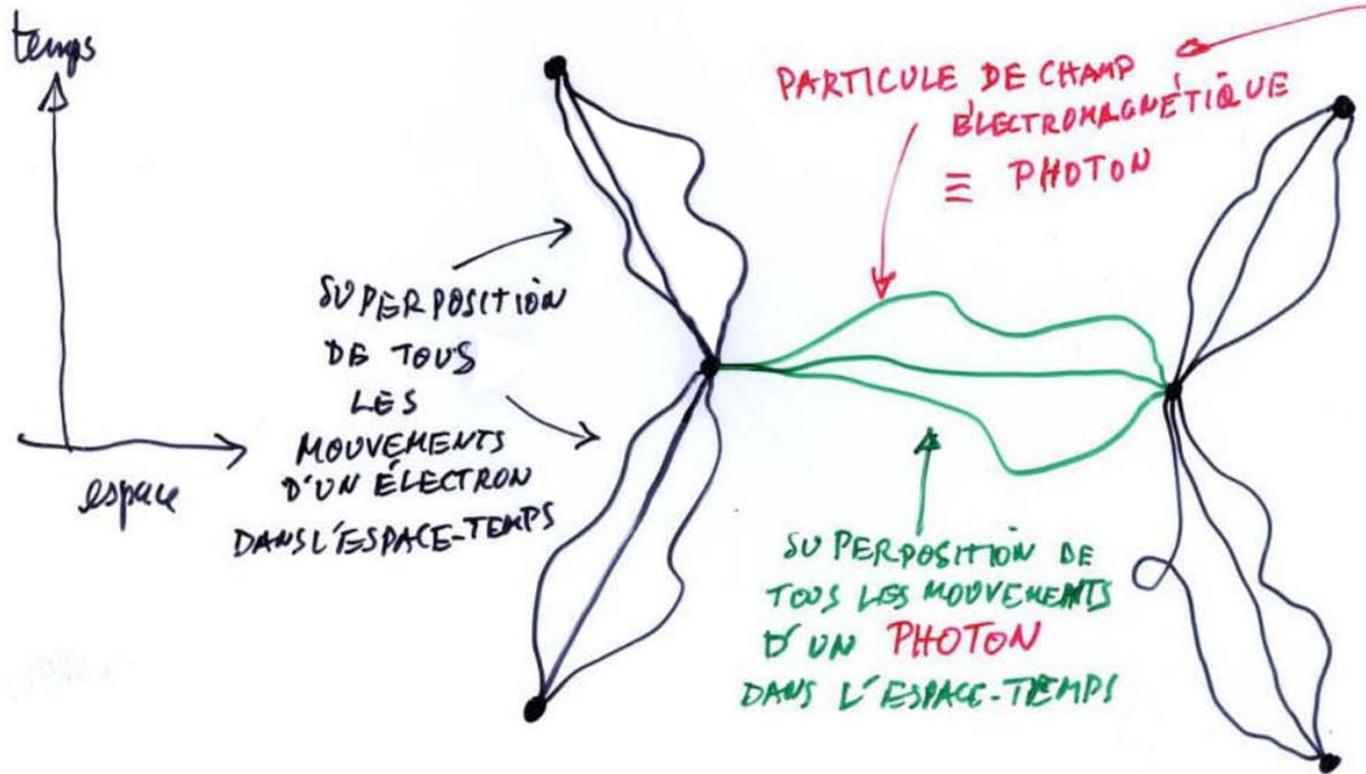
CHAMP QUANTIQUE

FORCE = CHAMP = PARTICULE = MATIÈRE

FORCE CLASSIQUE = CHAMP



FORCE QUANTIQUE = CHAMP QUANTIQUE = PARTICULE QUANTIQUE



FORCE QUANTIQUE \approx MATIÈRE QUANTIQUE
(INTERACTION) (PARTICULE)

ESPACE

TEMPS

MATIÈRE

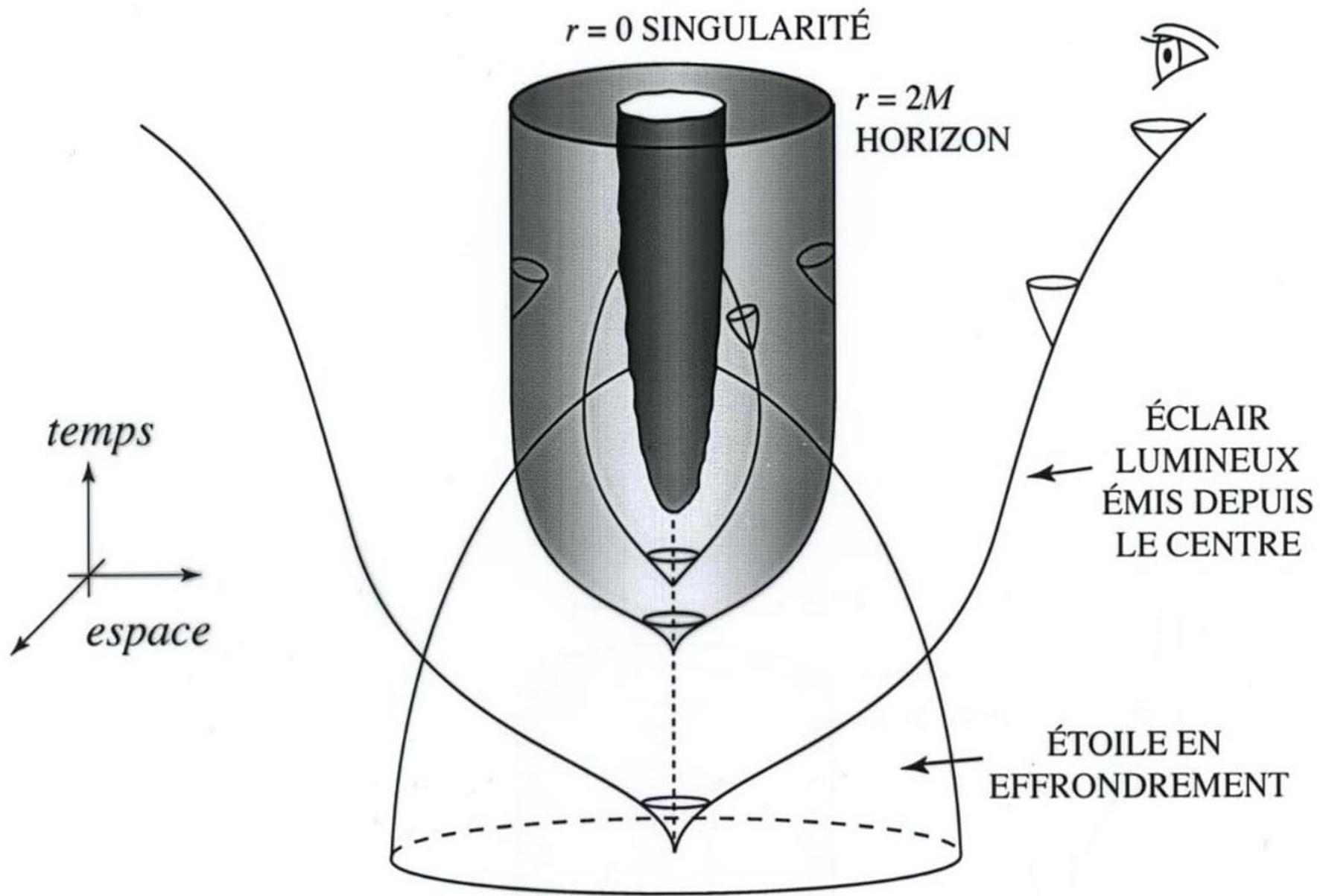
FORCE

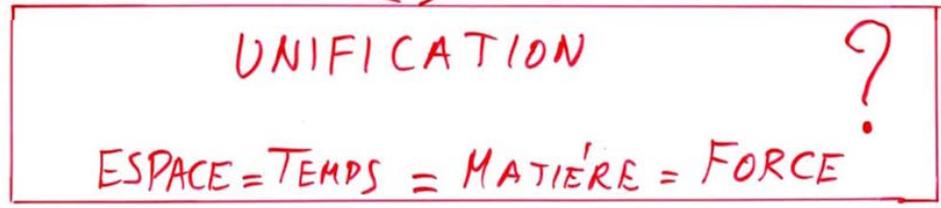
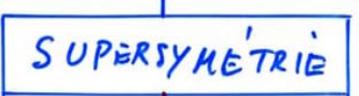
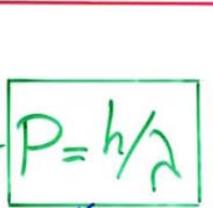
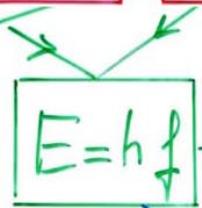
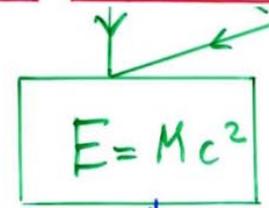
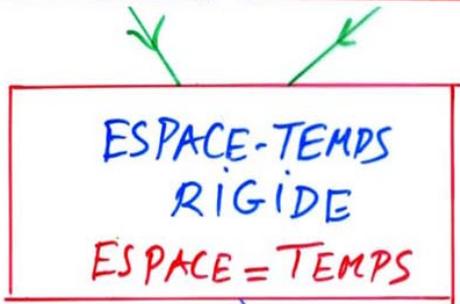
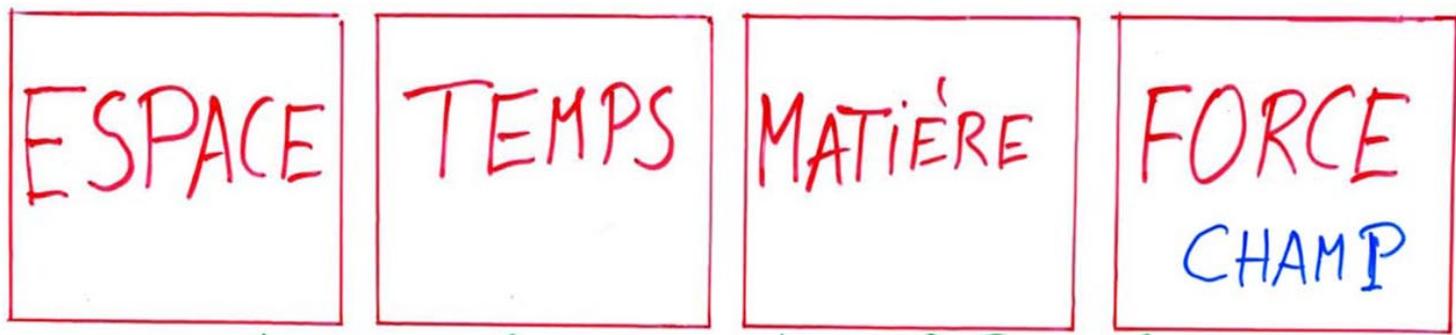
ESPACE-TEMPS
RIGIDE
(RELATIVITÉ RESTREINTE)

MATIÈRE-ÉNERGIE
 $E = M c^2$

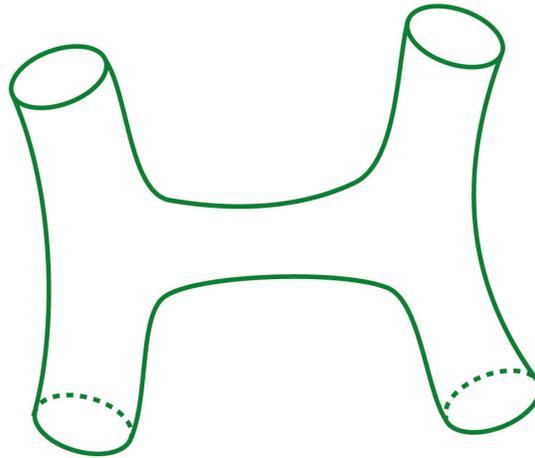
RELATIVITÉ
GÉNÉRALE

ESPACE-TEMPS ÉLASTIQUE
DÉFORMÉ
PAR LA MATIÈRE-ÉNERGIE
VIA LA FORCE GRAVITATIONNELLE





THÉORIE DES CORDES



CORDES = MATIÈRE = FORCES \ni GRAVITATION \approx ESPACE-TEMPS

CONTENANT = CONTENU

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 tôt 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.”

Jankélévitch (Quelque part dans l’inachevé, 1978) : “... même si le dernier corps céleste venait à disparaître dans la conflagration universelle, le temps continuerait à couler. L’homme ne serait plus là pour nommer les jours de la semaine et les mois de l’année ... ; il n’y aurait plus d’horloges pour compter le temps ... : mais la temporalité du temps survivrait à l’anéantissement de tous les calendriers et de toutes les horloges de l’univers.”

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.”

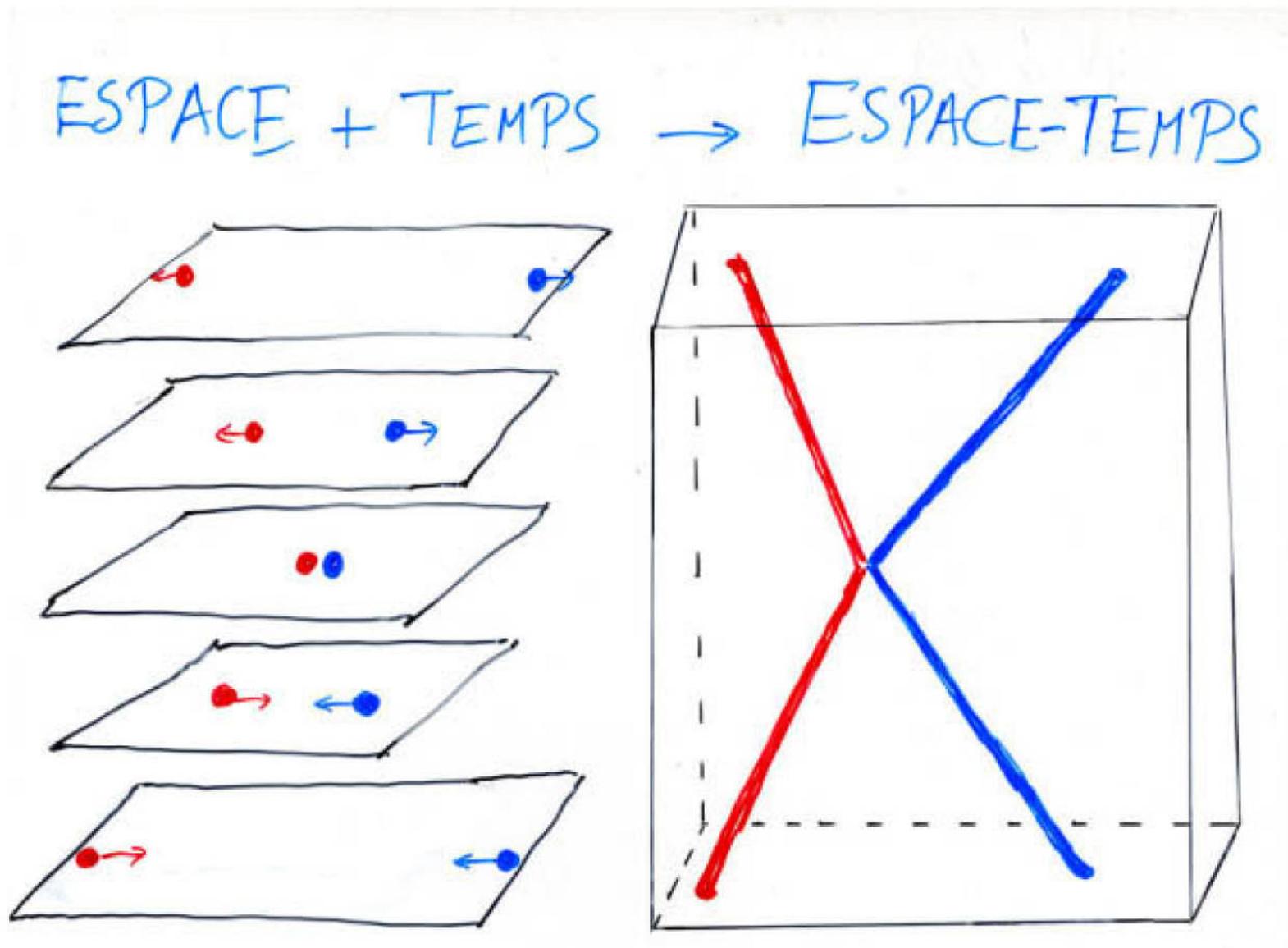
Conception habituelle du Temps

En résumé :

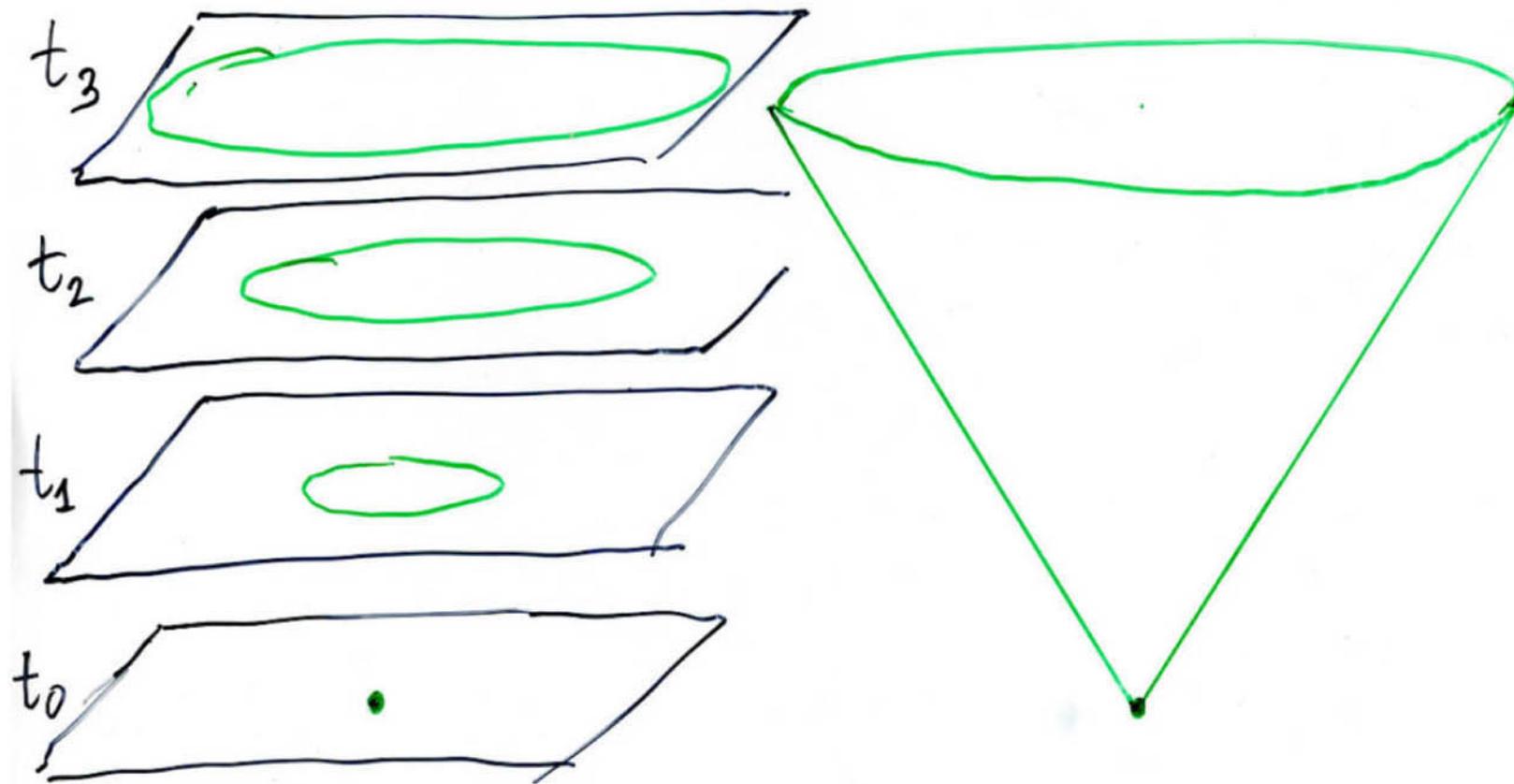
Le Temps est habituellement pensé comme quelque chose :

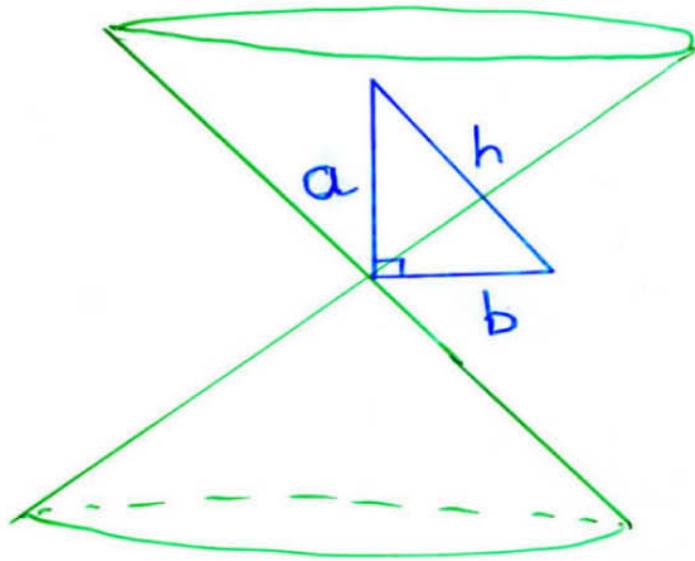
- (i) d'extérieur à l'univers matériel,
- (ii) de commun à toute la réalité,
- (iii) d'irréversible,
- (iv) qui "passe", ou "coule", en entraînant le "maintenant" du passé vers le futur.

Le bloc Espace-Temps



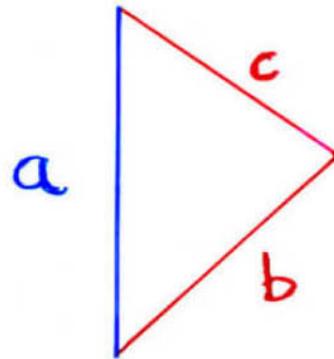
Le bloc Espace-Temps (II)





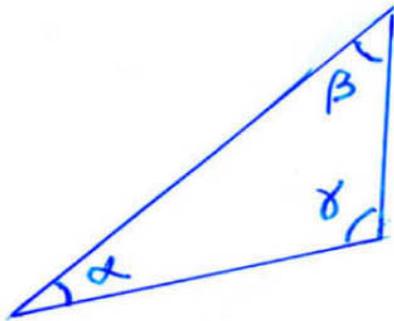
THÉORÈME DE PYTHAGORE-EINSTEIN

$$h^2 = a^2 - b^2$$



$$a > b + c$$

« PARADOXE DES
JUMEAUX »

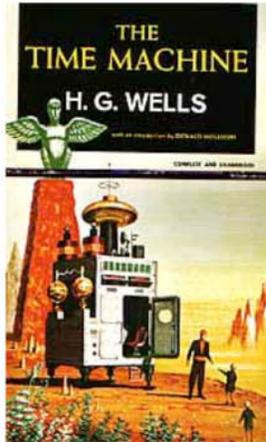


THÉORÈME DE THALÈS

$$\alpha + \beta + \gamma = \pi$$

Temps et Relativité Restreinte

Voyager dans le temps ?

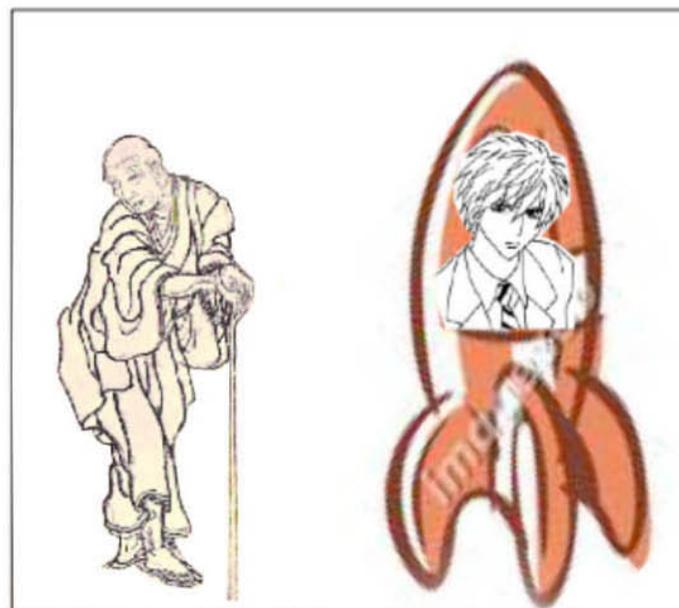
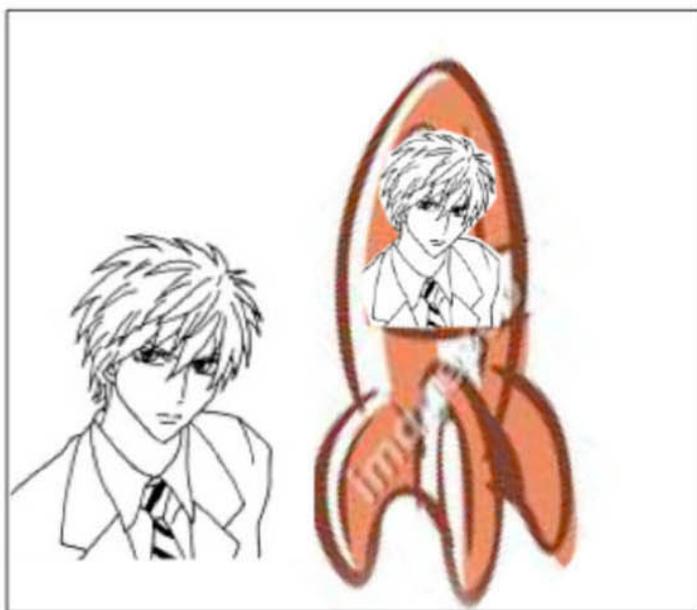
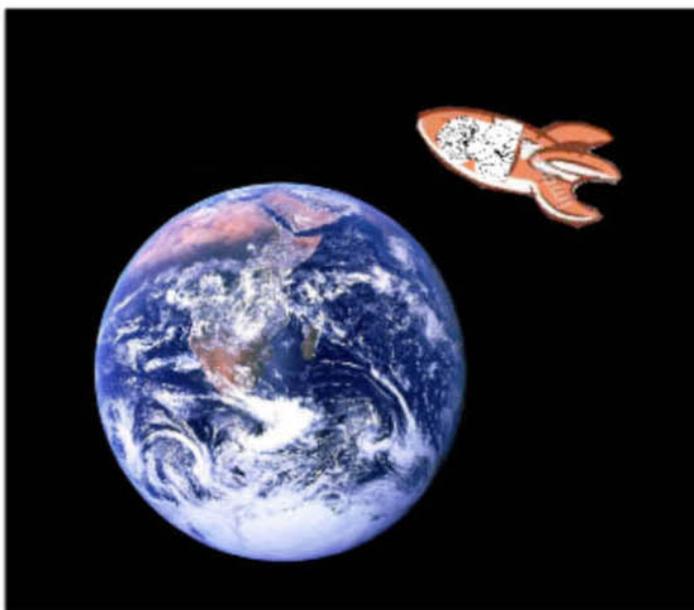


H.G. Wells
The Time Machine, 1895



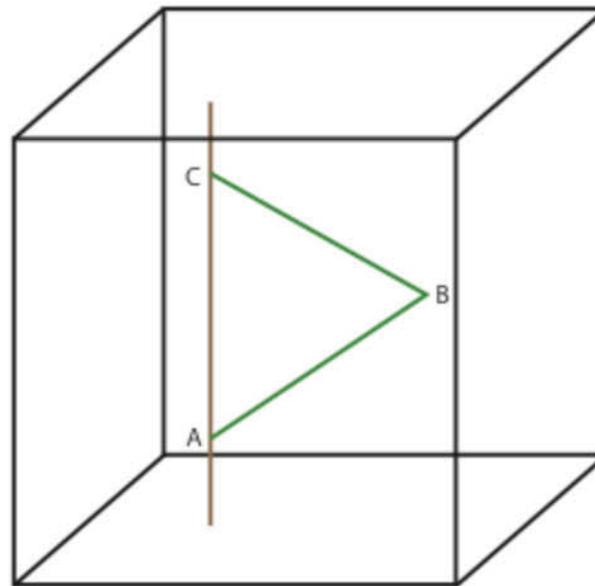
VOYAGE DANS LE FUTUR

Possible !

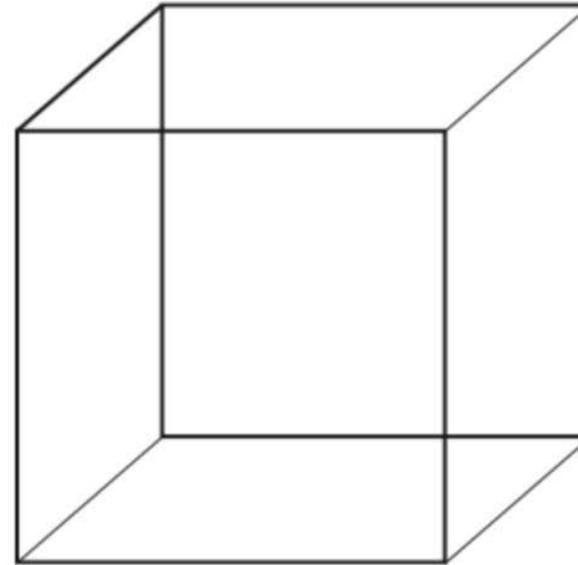
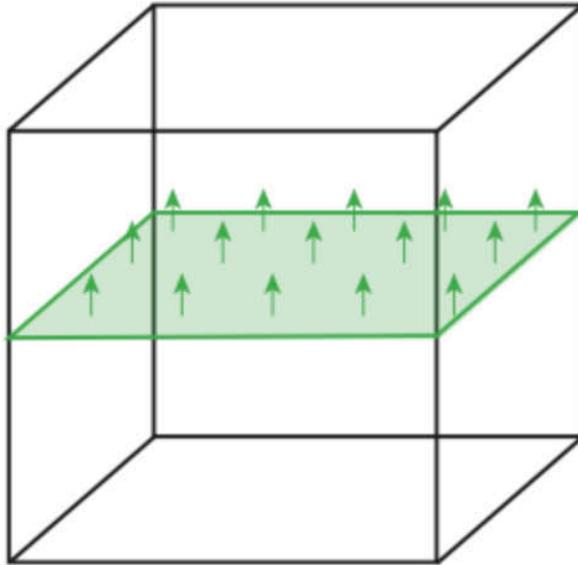


Temps et Relativité Restreinte

VOYAGE QUASI-INSTANTANÉ DANS LE FUTUR



Disparition du « présent »



Avril 1922 : Einstein à Paris

Débat Einstein - Bergson

« Le temps n'existe pas »

« seul l'instant présent, perçu
dans une mouvance éternelle
est réel »

Proust

« notre vrai moi est affranchi de l'ordre du temps »
et peut avoir accès à

« l'essence permanente et habituellement cachée des choses »

Décembre 1921 - lettre à A. de Guiche :

« Que j'aimerais vous parler d'Einstein ! On a beau m'écrire que
je dérive de lui, ou lui de moi, je ne comprends pas un seul mot à
ses théories, ne sachant pas l'algèbre. Et je doute pour sa part
qu'il ait lu mes romans. Nous avons paraît-il une manière
analogue de déformer le Temps. »

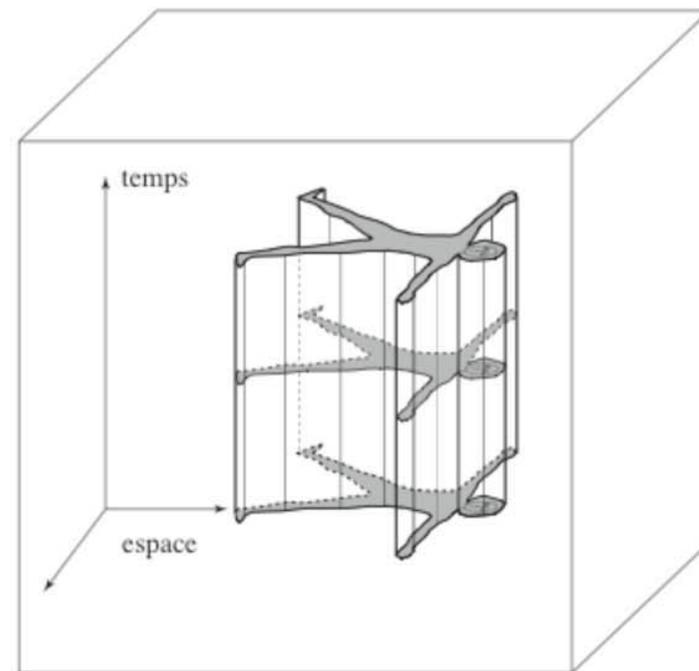
Le temps n'existe pas. (EINSTEIN.)



*— C'est sûrement du beau temps
qu'Einstein veut parler.*

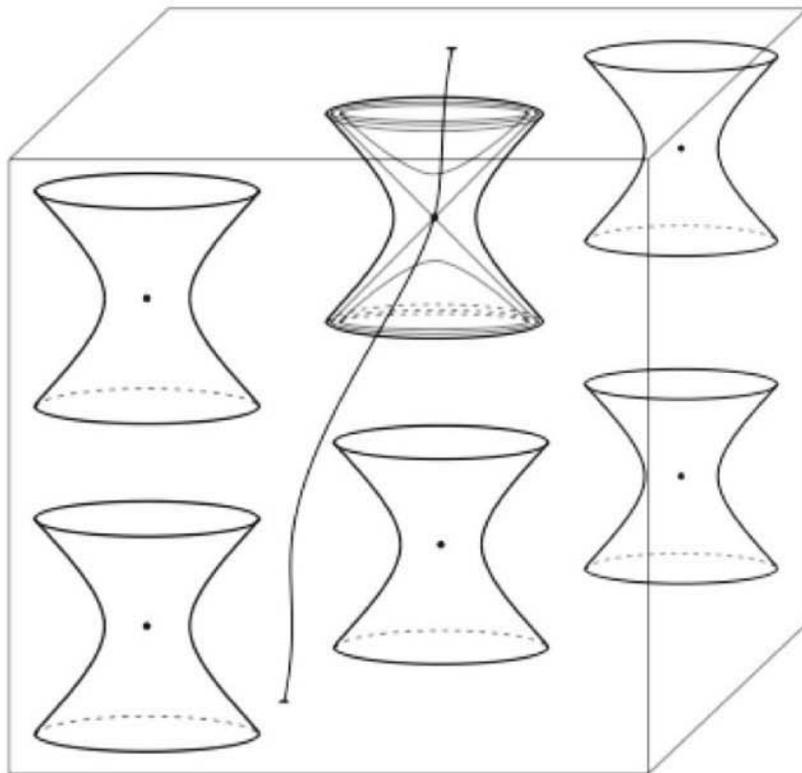
Proust : « Le temps retrouvé »

« ... comme si les hommes étaient juchés sur de vivantes échasses grandissant sans cesse, parfois plus hautes que des clochers, Et j'y décrirais les hommes, cela dût-il les faire ressembler à des êtres monstrueux, comme occupant dans le **Temps** une place autrement considérable que celle si restreinte qui leur est réservée dans l'**espace**, une place, au contraire, prolongée sans mesure, puisqu'ils touchent **simultanément, comme des géants, plongés dans les années**, à des époques vécues par eux, si distantes, -- entre lesquelles tant de jours sont venus se placer -- dans le **Temps**. »

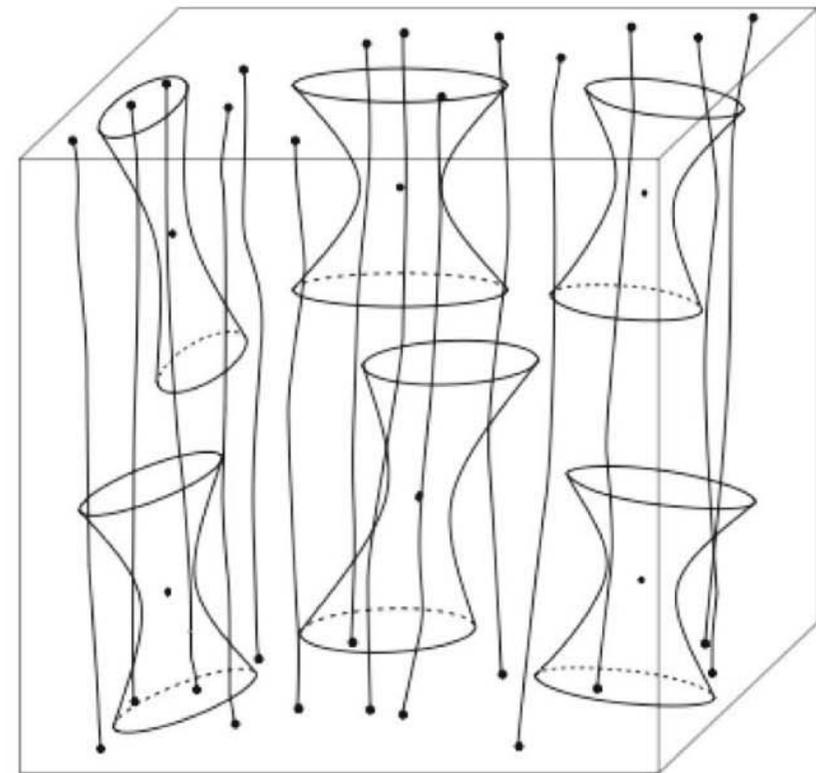


Espace-Temps élastique de la Relativité Générale

Relativité restreinte



Relativité générale



Le camembert du temps et de l'espace (Dali)



Temps et Relativité Générale

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 :

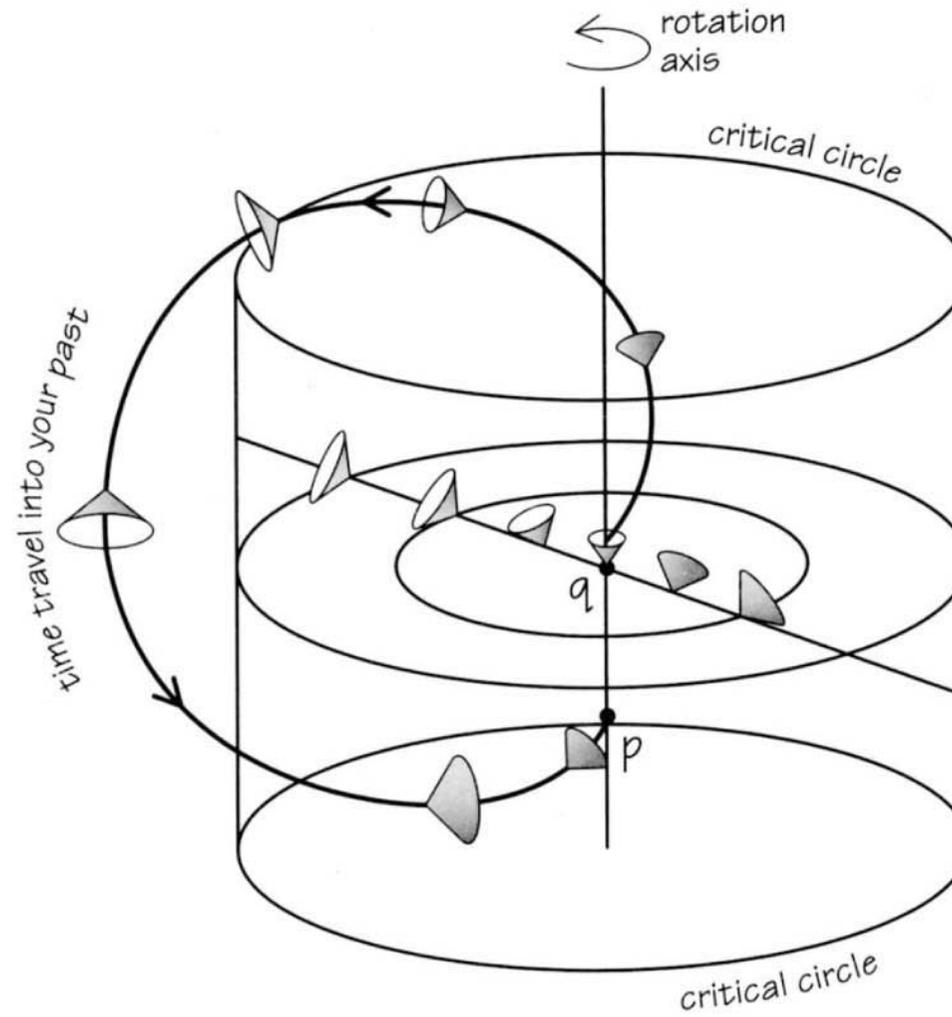
Univers de Gödel (1949)

Univers avec trous de vers

Univers de Gold (1962)

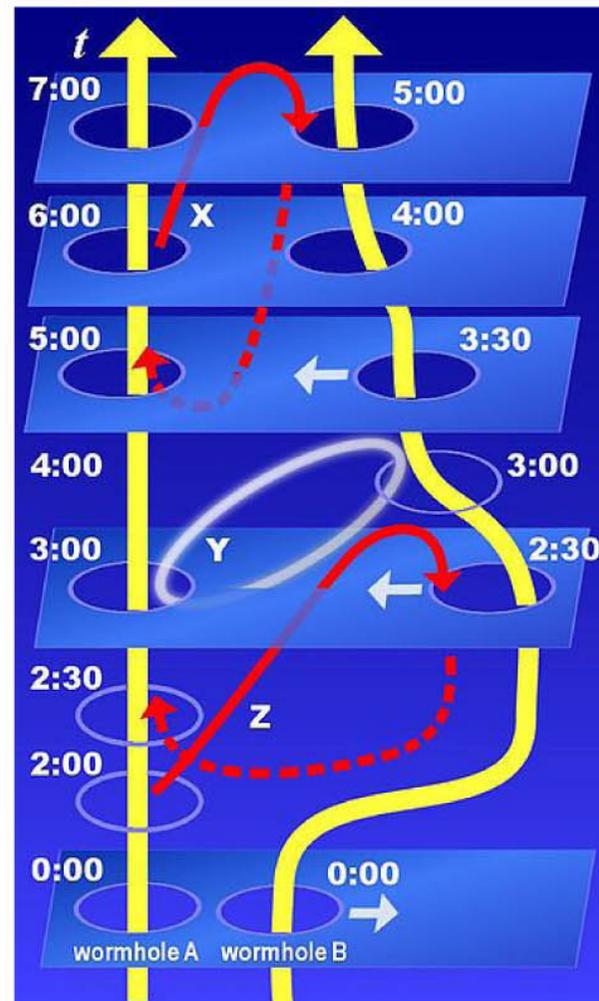
Temps et Relativité Générale

Univers de Gödel (1949)



Temps et Relativité Générale

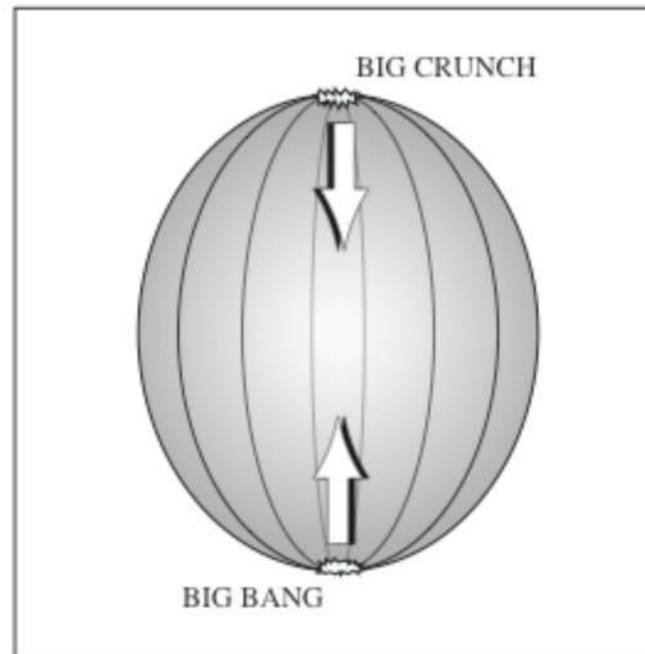
Univers avec trous de vers



Temps et Relativité Générale

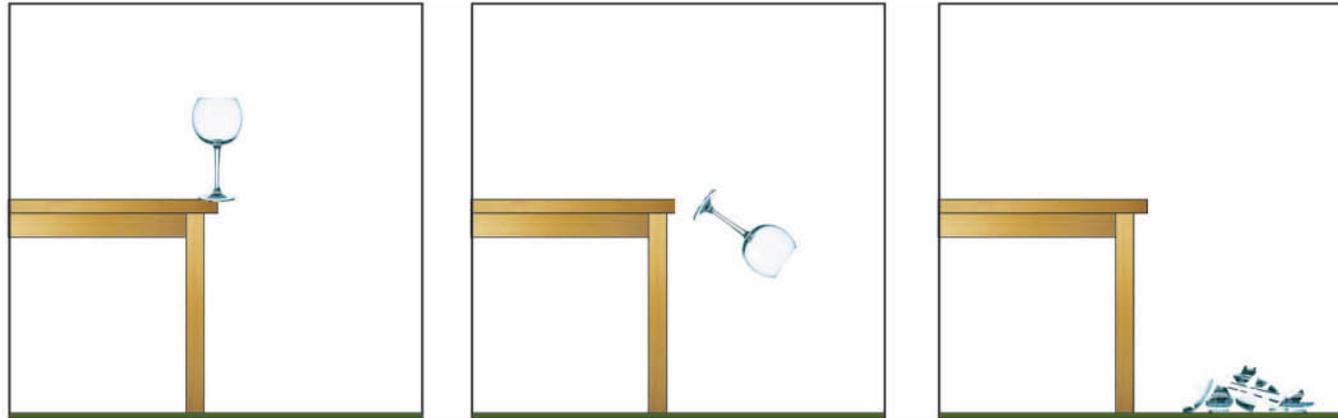
Univers de Gold (1962)

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



Temps et Irréversibilité

Seconde loi de la thermodynamique : $\frac{dS}{dt} \geq 0$



Origine de la seconde loi ?

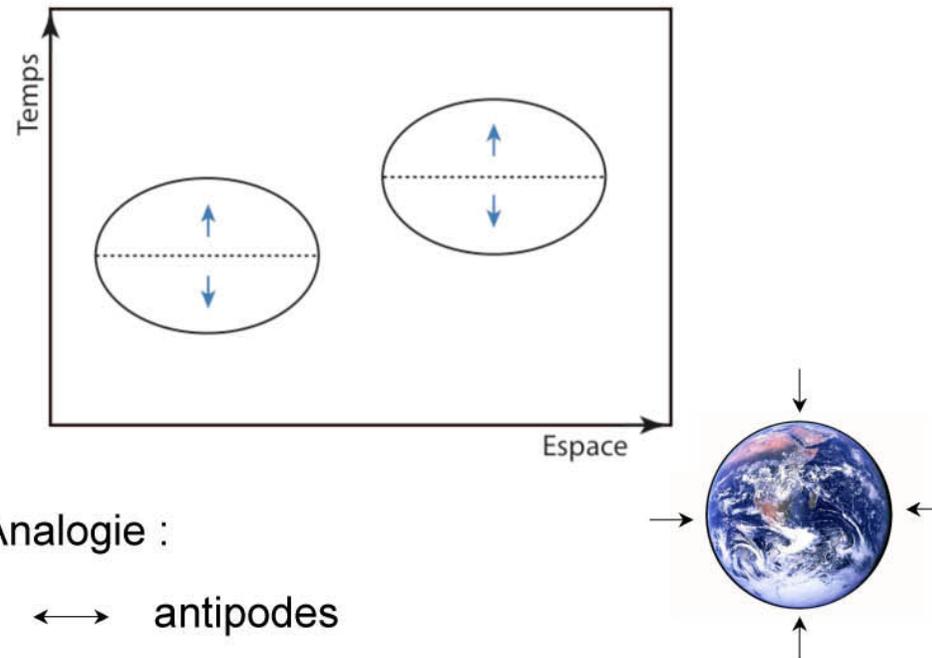
Les deux versions de l'“hypothèse A” de Boltzmann 1897 :

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

“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



“flux temporel” = phénomène illusoire émergent, induit localement par un gradient spatio-temporel d’entropie

Cosmologie et irréversibilité

Pourquoi tout le cosmos visible a-t-il “commencé” dans un état spécial impliquant la deuxième loi ? (Penrose)

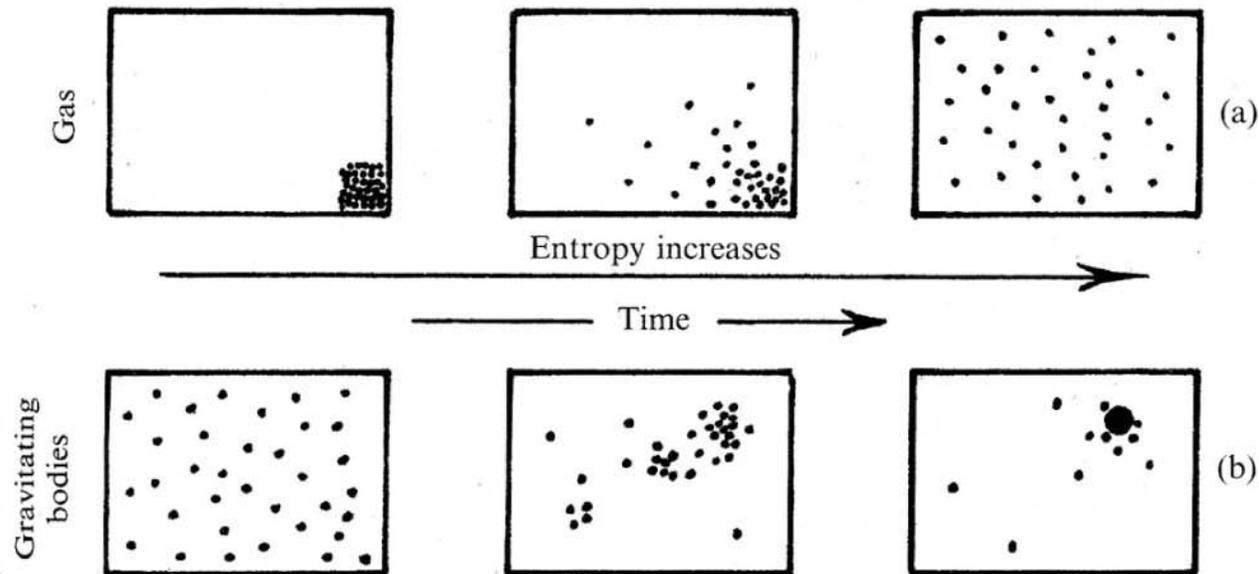


Fig. 27.10 Increasing entropy, with increasing time, left to right. (a) For gas in a box, initially all tucked in one corner, entropy increases as the gas starts to spread itself throughout the box, finally reaching the uniform state of thermal equilibrium. (b) With gravity, things tend to be the other 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.

Le Temps selon la Physique

- (i) le Temps n'est pas extérieur à l'univers matériel
- (ii) le Temps n'est pas commun à toute la réalité mais peut n'être défini que "localement"
- (iii) le Temps est fondamentalement réversible
- (iv) le "passage du Temps" est une illusion

Physique et Réalité

Kant : “On a admis jusqu’ici que toutes nos connaissances doivent se régler sur les objets, ... Que l’on cherche donc une fois si nous ne serions pas plus heureux dans les problèmes de la métaphysique, en supposant que les objets se règlent sur notre connaissance.”

Einstein : “La véritable difficulté tient à ce que la physique est une sorte de métaphysique : la physique décrit la “réalité”. Or, nous ne savons pas ce qu’est la réalité, nous ne la connaissons qu’à travers la description qu’en donne la physique !”

“prendre au sérieux” ce que nous suggère la physique ; cf. Einstein à Besso : “tu ne prends pas au sérieux la quadridimensionalité de la relativité ...”

“Pour nous, physiciens dans l’âme, la séparation entre passé, présent et avenir, ne garde que la valeur d’une illusion, si tenace soit-elle.”