

Le temps (5)

Flèche du temps & causalité

Notions utilisées :

1. Introduction
- 2-3. Structure de la matière
4. Les ondes
7. Mécanique classique
8. Relativité restreinte
9. Relativité générale
10. Mécanique quantique
12. Phénomènes quantiques 2
15. Thermodynamique
25. Au-delà de la physique actuelle
42. Temps (nature, 1)



Pour une meilleure compréhension,
certaines explications pourront être
légèrement simplifiées/tronquées

Images : Wikipédia sauf mention contraire

- Arthur Eddington, 1928
- Fait partie des **problèmes non résolus de la physique**

- Le temps semble **toujours s'écouler dans le même sens** (contrairement à l'espace-temps de Minkowski, qui ne fait pas de différence entre passé et futur)

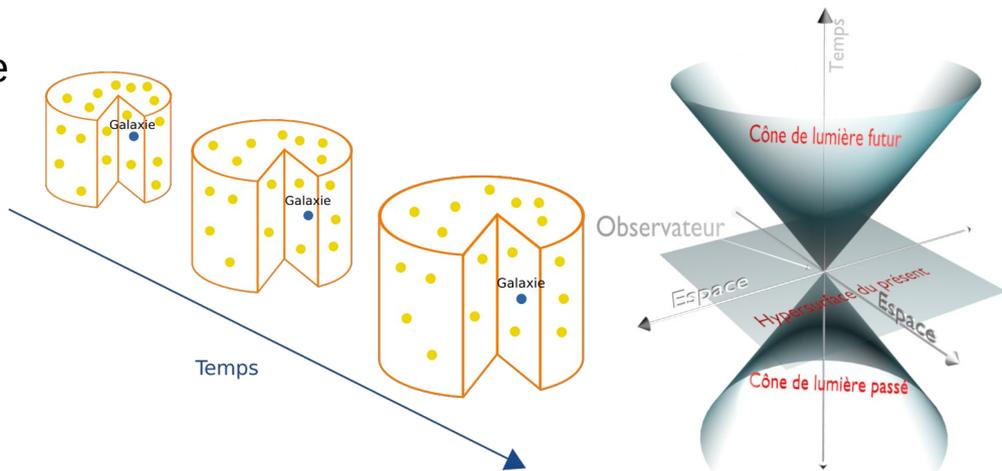
- En thermodynamique :

- Un système évolue spontanément **vers un état d'équilibre thermique homogène**, c'est-à-dire d'entropie plus grande → **indifférent à ce qui l'entoure = désordre maximal**
- La mesure de l'entropie d'un système (fermé) à 2 instants permet de savoir lequel précède l'autre
- Si beaucoup de mesures rapprochées, on voit une succession d'états allant dans une seule direction (comme on sait le faire avec une série de photos)



La flèche du temps

- En cosmologie
 - Sens de l'expansion de l'Univers
- Pour les ondes
 - Les ondes sont émises vers l'extérieur d'une source



Deuxième principe : thermodynamique et entropie



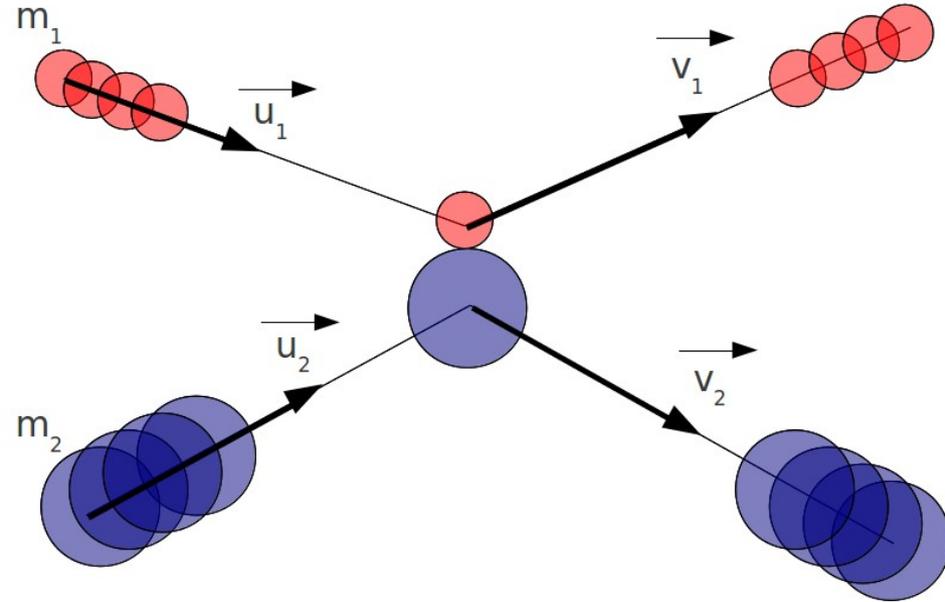
- 40 ans après Sadi Carnot, Rudolf Clausius énonce le 2^{ème} principe en créant la notion d'**entropie** : Il existe une **fonction d'état extensive S** (« entropie ») telle que

$$dS = \frac{\delta Q}{T} = dS_{\text{échangée}} + dS_{\text{créée}} \quad \text{avec} \quad dS_{\text{créée}} \geq 0$$

- Interprétation : **l'entropie mesure le « désordre » d'un système**
- Autre formulation :
 - « Toute transformation d'un système thermodynamique s'effectue avec **augmentation de l'entropie globale** (du système et du milieu extérieur). On dit alors qu'il y a **création d'entropie**. »
 - L'entropie d'un système **peut diminuer** mais cela signifie que **l'entropie du milieu extérieur augmente de façon plus importante**, le **bilan entropique global étant positif** (ou nul si la transformation est réversible)

Microscopique vs. macroscopique

- Au **niveau microscopique**, les lois de la physique sont **généralement réversibles**
- On pourrait donc, en principe, **remonter le temps au niveau microscopique**
- Mais les particules ont tendance à aller vers des configurations **de plus en plus désordonnées** (**homogénéisation** des températures et des concentrations)
- La réversibilité n'est donc que « locale dans le temps » : **plus le temps est long, plus un processus est irréversible**



Interprétation microscopique de l'entropie

- La définition microscopique de l'entropie est **similaire à celle d'une information**
- Entropie d'un système liée au **nombre d'états accessibles**
 - Plus il y a d'états accessibles, plus l'entropie est grande
- Entropie (de Shannon) d'un message liée à la **probabilité** des informations qui le composent
 - Moins le message est **prévisible**, plus son entropie est grande

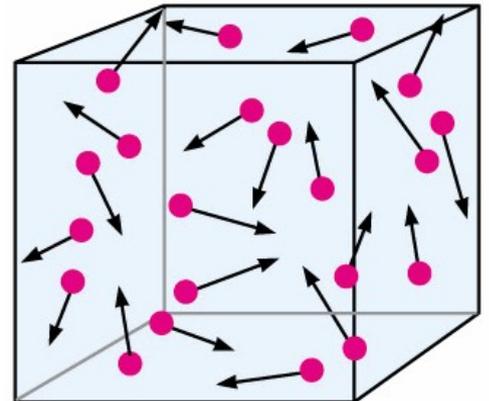
$$S = -k_B \sum_k p_k \cdot \ln p_k$$

$$H = - \sum_k p_k \cdot \log_2 p_k$$

p_k = probabilité d'occurrence du k-ième micro-état
(=configuration de tous les éléments microscopiques)

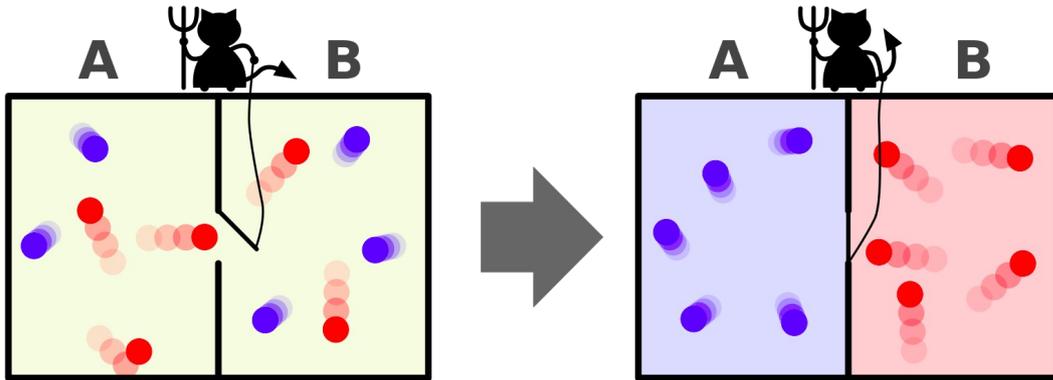
Du réversible à l'irréversible

- « L'origine microscopique de la création d'entropie, et donc de l'**irréversibilité**, vient de la **perte de corrélation entre les particules** à la suite des collisions.
- En effet, deux particules qui « viennent » de subir une collision repartent avec des **mouvements corrélés** par la conservation de l'énergie totale et de la quantité de mouvement.
- Cette corrélation diminue au cours du temps (et des collisions suivantes) jusqu'à devenir **nulle** : au bout d'un certain temps caractéristique du système, **les mouvements deviennent totalement décorrélés**. C'est l'hypothèse du **chaos moléculaire**.
- On relie donc l'**irréversibilité macroscopique** des transformations réelles à une description de la matière en terme de **collisions de particules** (molécules, atomes, ..). »
- **On peut également interpréter en termes de perte d'information avec le temps**
- **Un ensemble de processus microscopiquement réversibles se traduit par un comportement macroscopique irréversible = paradoxe de Loschmidt**



L'expérience du démon de Maxwell

- Expérience de pensée publiée en 1871, qui serait en **désaccord avec le deuxième principe et donc la flèche du temps !**



- Boîte avec **2 compartiments séparés par une trappe**, qu'un « démon » peut ouvrir **sans dépense d'énergie** quand une particule « intéressante » s'en approche
- État final : particules plus rapides à droite et plus lentes à gauche :
 - → B est plus chaud que A
 - **Le flux de chaleur remonte le gradient de température !**
 - = **baisse de l'entropie et donc retour dans le passé !**

Mais il faut prendre en compte la nécessité d'**acquérir de l'information** sur le système et la **relation entre information et entropie...**

Remonter le temps ?

- 1928 : équation de Dirac $(i \gamma^\mu \partial_\mu - m) \psi = 0$

Problème : elle aboutit à des solutions d'énergie négative !

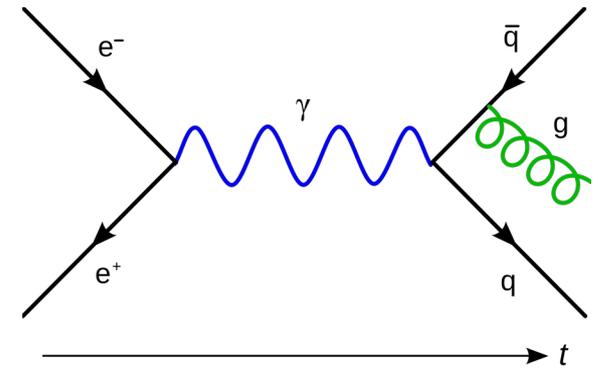
- 1941 : E. Stückelberg propose une interprétation du **posit(r)on** comme un **électron remontant le temps**

- Feynman, The theory of positrons » (1949)

- Dans cette solution [de l'équation de Dirac], les « états d'énergie négative » apparaissent sous une forme que l'on peut représenter, comme le fait Stückelberg, dans l'espace-temps comme **des ondes s'éloignant du potentiel externe en remontant le temps**.
Expérimentalement, une telle onde correspond à un positron qui s'approche du potentiel et annihile l'électron.

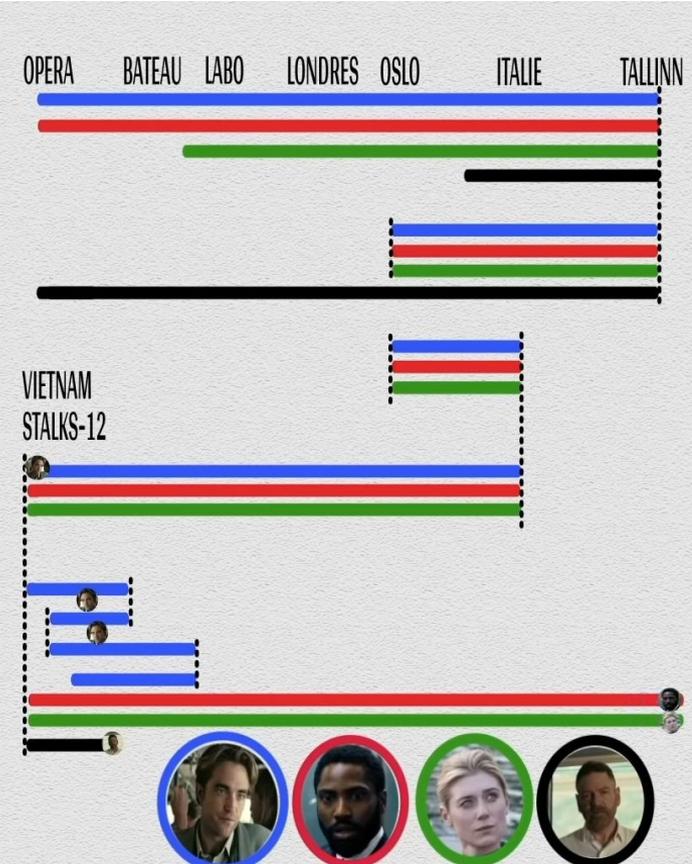
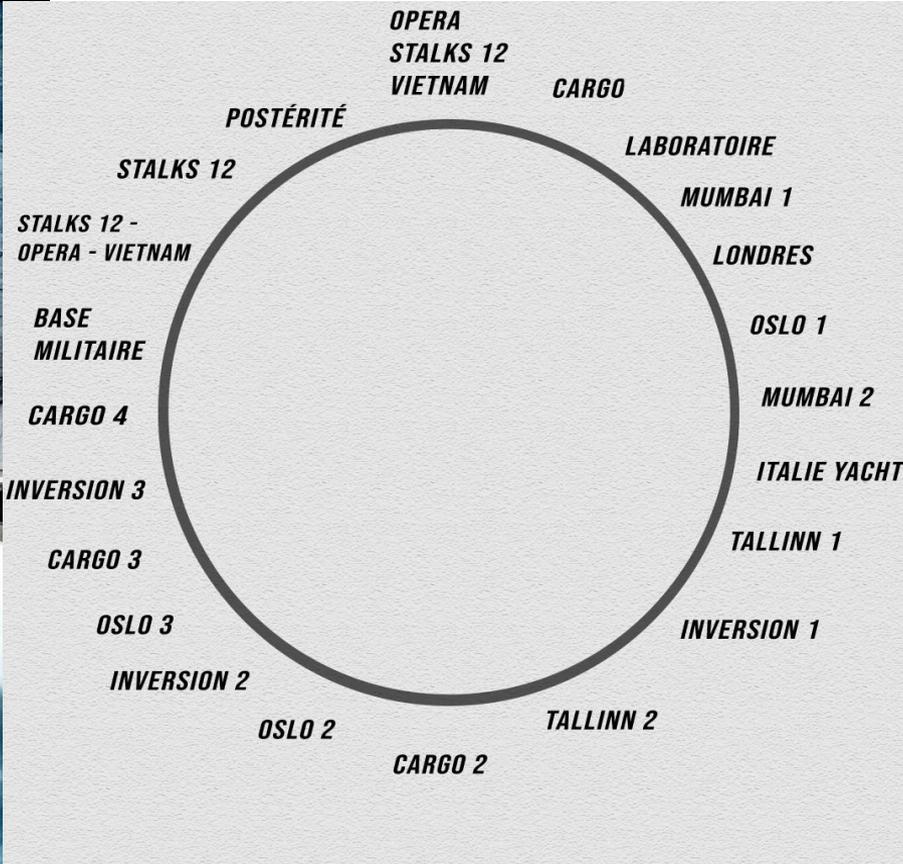
- Feynman, discours du PNP 1965 :

- Mais une étape importante, physiquement nouvelle, était liée à la **mer d'énergie négative de Dirac**, qui m'a causé tant de difficultés logiques. J'étais si confus que je me suis souvenu de la vieille idée de Wheeler selon laquelle **le posit(r)on était, peut-être, l'électron remontant le temps**.
- Par conséquent [...], j'ai simplement supposé que, pendant un certain temps, nous pouvions remonter le temps, et j'ai regardé quels termes j'obtenais en inversant les variables temporelles. **Ces termes étaient les mêmes que ceux obtenus par d'autres personnes lorsqu'elles posaient le problème d'une manière plus compliquée.**



- **Diagramme de Feynman d'une annihilation e^+/e^- avec création de paire quark/anti-quark et émission d'un gluon par l'anti-quark**
- Le posit(r)on est représenté comme **remontant le temps** (flèche de droite à gauche)

Il s'agit d'interprétations mathématiques de phénomènes physiques, qui ne sont pas nécessairement une description de ce qui se passe



- Dans le film, il est possible d'inverser « son » cours du temps
- Pour mieux comprendre : [youtube.com/watch?v=dIzhcM3KmDE](https://www.youtube.com/watch?v=dIzhcM3KmDE)

SYMÉTRIE CPT ET RÉVERSIBILITÉ DU TEMPS

<https://pixabay.com/videos/mandala-kaleidoscope-circular-216171/>



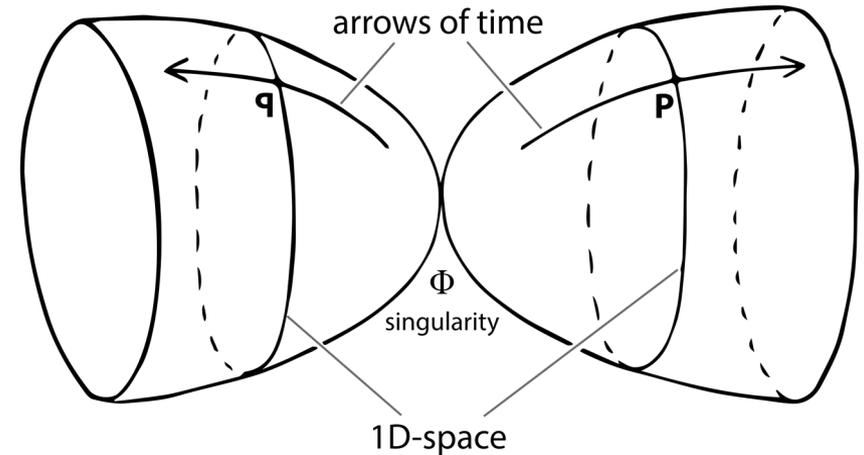
La symétrie CPT (1)

- **Hypothèse fondamentale en physique**
 - Étroitement liée à l'**invariance de Lorentz**
 - Remise en cause de la symétrie CPT
 - remise en cause de l'invariance de Lorentz et donc relativité !
- Symétrie des lois physiques lorsque l'on inverse simultanément :
 - la charge (C) : particule/anti-particule
 - la parité (P) : miroir
 - le temps (T)
- → un univers miroir du nôtre aurait **la même évolution** : à chaque instant, on pourrait transformer l'un en l'autre par symétrie CPT
 - Les particules sont remplacées par leur anti-particule
 - Tous les objets ont une position et une vitesse symétriques par rapport à un plan imaginaire (P)
 - Le sens d'écoulement du temps est inversé



Univers jumeaux de Sakharov

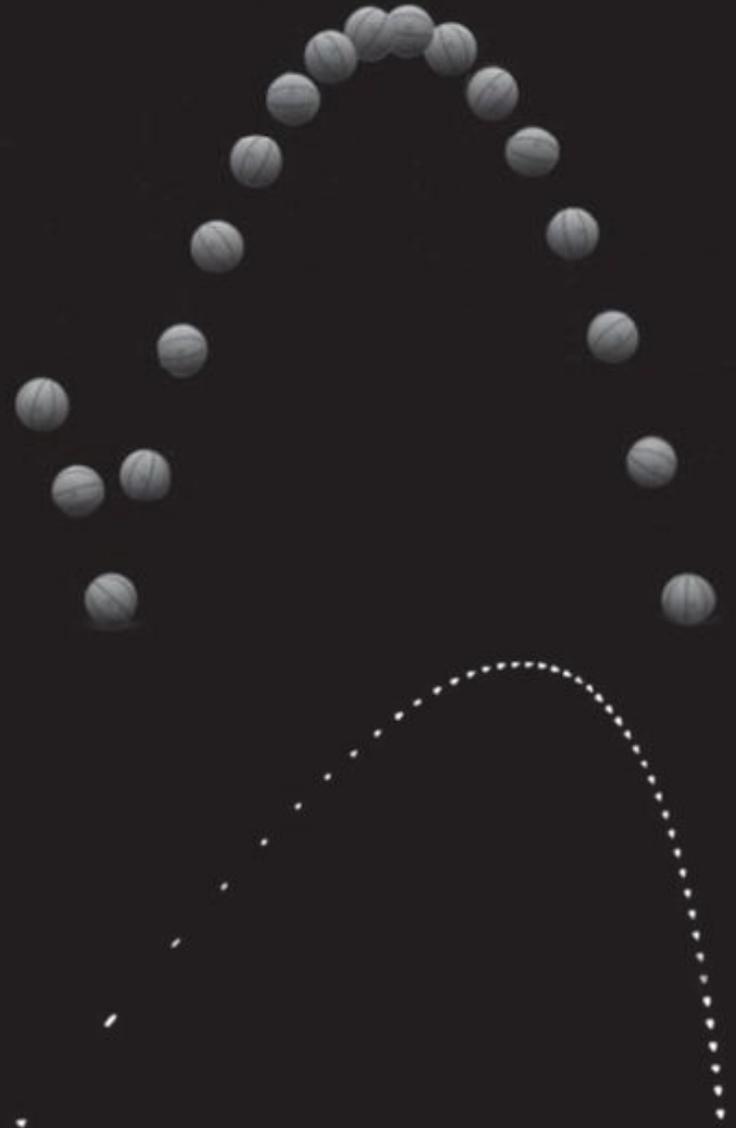
- Sakharov propose une **théorie des univers jumeaux à flèche du temps inversée** (« **symétrie T** ») – 1967
 - (Problème de l'asymétrie matière-antimatière)
- Ils partagent une **singularité** à $t=0$
- Hypothèse : l'entropie augmente quand on avance dans le temps >0 , ainsi que lorsque l'on recule dans le temps <0
- Interactions théoriquement possibles entre ces univers



Le modèle Janus (Jean-Pierre Petit) s'inscrit dans l'ensemble des **théories bimétriques** (deux métriques au lieu d'une en RG)

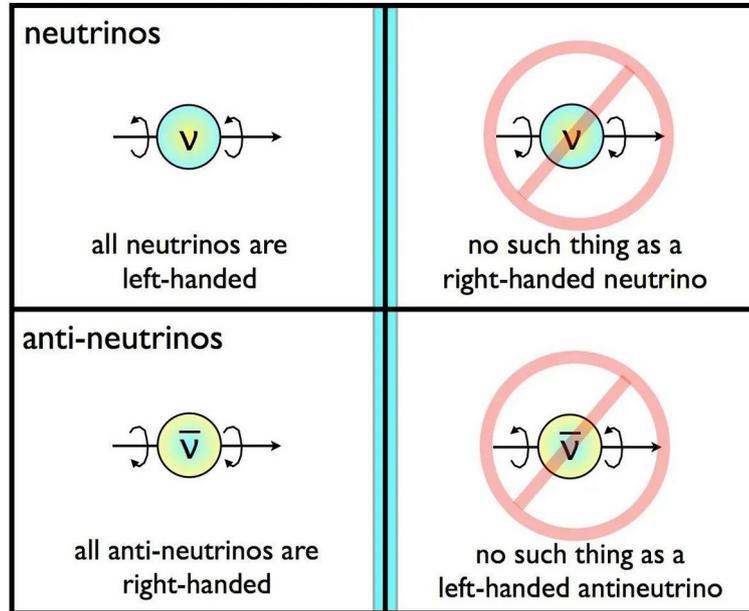
La symétrie CPT (2)

- La plupart des interactions respectent **séparément** C, P et T
 - Ex : trajectoire parabolique d'une particule dans un champ de gravité (**sans frottements**)
 - Contre-ex : volant de badminton (**avec frottements**)
- Toute violation de symétrie entraîne une violation de la symétrie « complémentaire »
 - Ex : violation de CP (combinaison de C & P) → violation de T

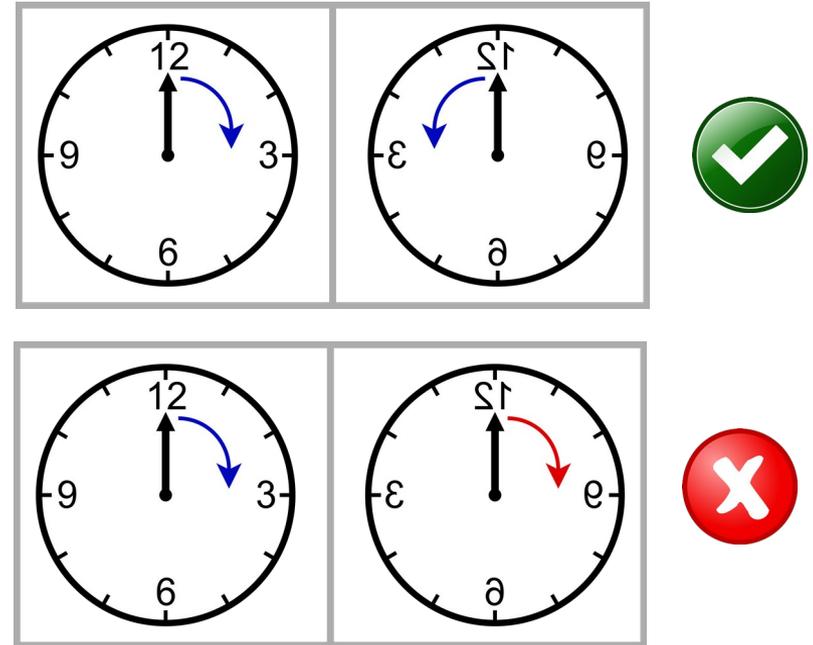


Brisures de symétries (1)

- **Violation de C** (particules/anti-particules)
 - Ex : neutrinos gauches / antineutrinos droits (spin $\pm 1/2$) = **chiralité**
 - Et soupçons d'**oscillations** différentes

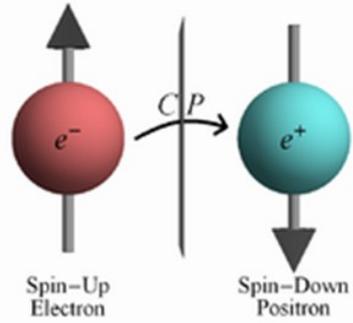


- **Violation de P** : $(x, y, z) \rightarrow (-x, -y, -z)$
 - Par l'interaction faible (gravitation, QED et QCD respectent) : 1956



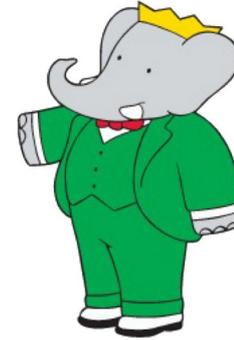
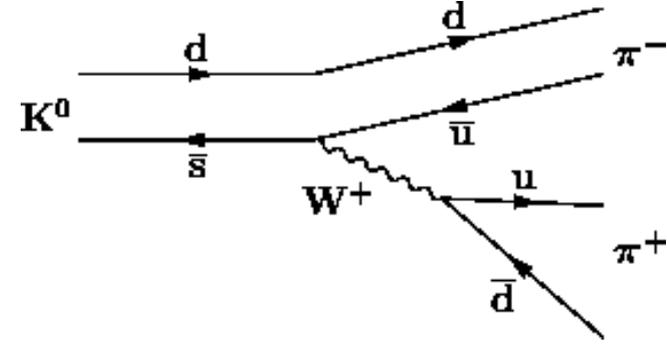
Brisures de symétries (2)

- Symétrie CP : charge + parité

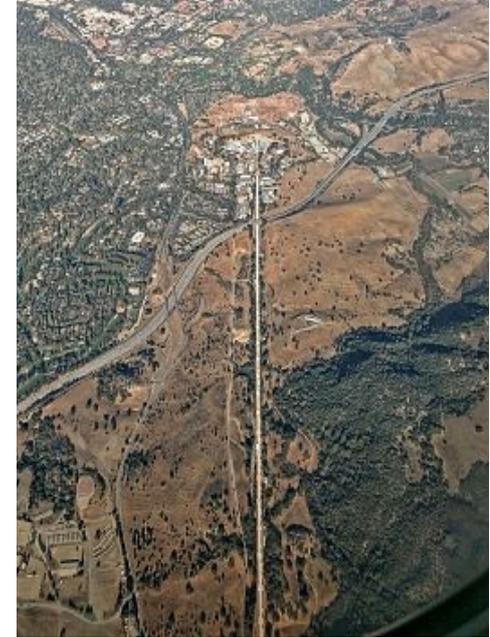


None counterclockwise meson decays, emits electron north	P clockwise meson decays, emits electron north
C counterclockwise anti-meson decays, emits positron north	CP clockwise anti-meson decays, emits positron north

- **Violation de la symétrie CP**
- Désintégration de kaons neutres K^0 ($d\bar{s}$)
 - Cronin et Fitch (1964) → PNP 1980



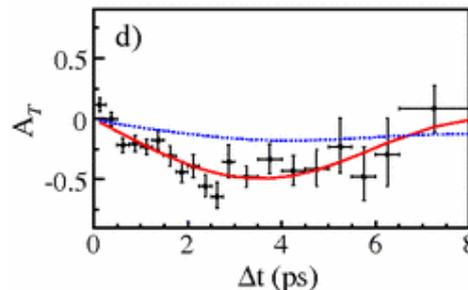
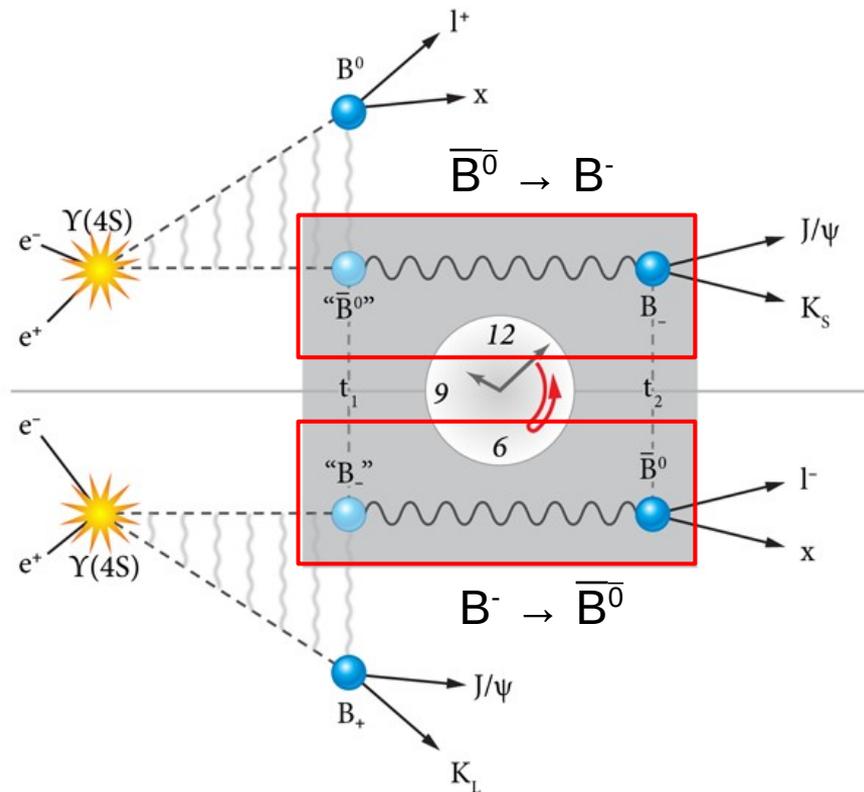
Expérience « Babar »
(pour b/\bar{b}), menée au
SLAC, Stanford



Si violation de CP (faible : $\sim 3\%$),
violation (« équivalente ») de T pour
maintenir la symétrie CPT ?

Violation de T ?

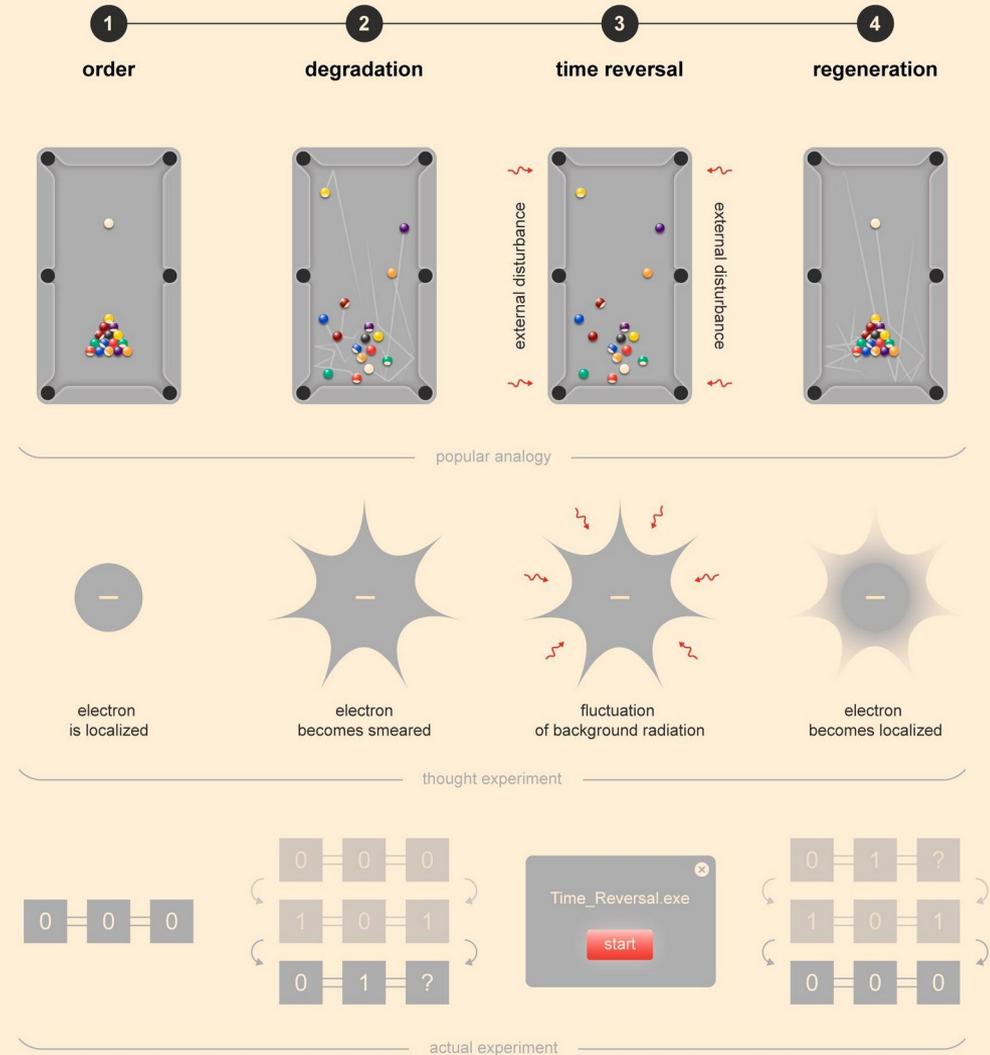
- Lois de la physique **pas parfaitement symétriques** si $t \rightarrow -t$?
- Mesure directe (expérience délicate à mettre en place) :
 - On utilise l'**intrication quantique**
 - Avec des **particules instables** se désintégrant par des processus impliquant la **force faible**
- Particule « upsilon 4S » \rightarrow 2 mésons B, qui offrent **2 réactions symétriques par renversement du temps**
- **Violation de T observée à 14σ** (précision extraordinaire : min = 5σ)
- Mais ... mesurée en 2012, l'année de découverte du boson de Higgs...



Ajustements **avec** ou **sans** hypothèse de la violation de T

Renversement du temps

- En 2019, des chercheurs ont **inversé la flèche du temps pour des qubits** d'un ordinateur quantique
- Équivalent à
 - **inverser** un coup au billard
 - une **relocalisation** d'un électron
 - = extrêmement improbable !
- Taux de réussite : 85 % pour 2 qubits



Causalité

- **Causalité** = relation de la cause à l'effet
- En physique, **principe de causalité** : « la cause précède l'effet »
 - Connexe de la notion de **déterminisme** : les mêmes causes produisent les mêmes effets



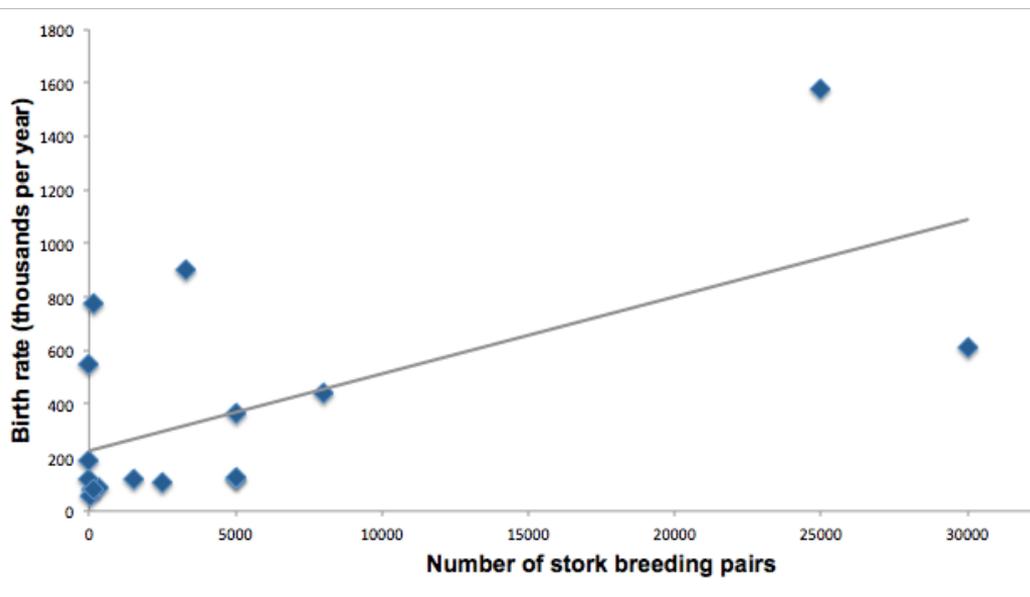
Ne pas confondre

- **Causalité-corrélation**

- Causalité : un phénomène en entraîne un autre
- Corrélation : les évolutions de deux phénomènes sont liées (positivement ou négativement)
→ existence d'une **troisième variable qui est la cause**

- Exemples :

- « **Effet cigogne** » : ce sont bien les cigognes qui apportent les bébés (population / taille du territoire)
- Plus on mange de glaces, plus on a de coups de soleil (soleil)

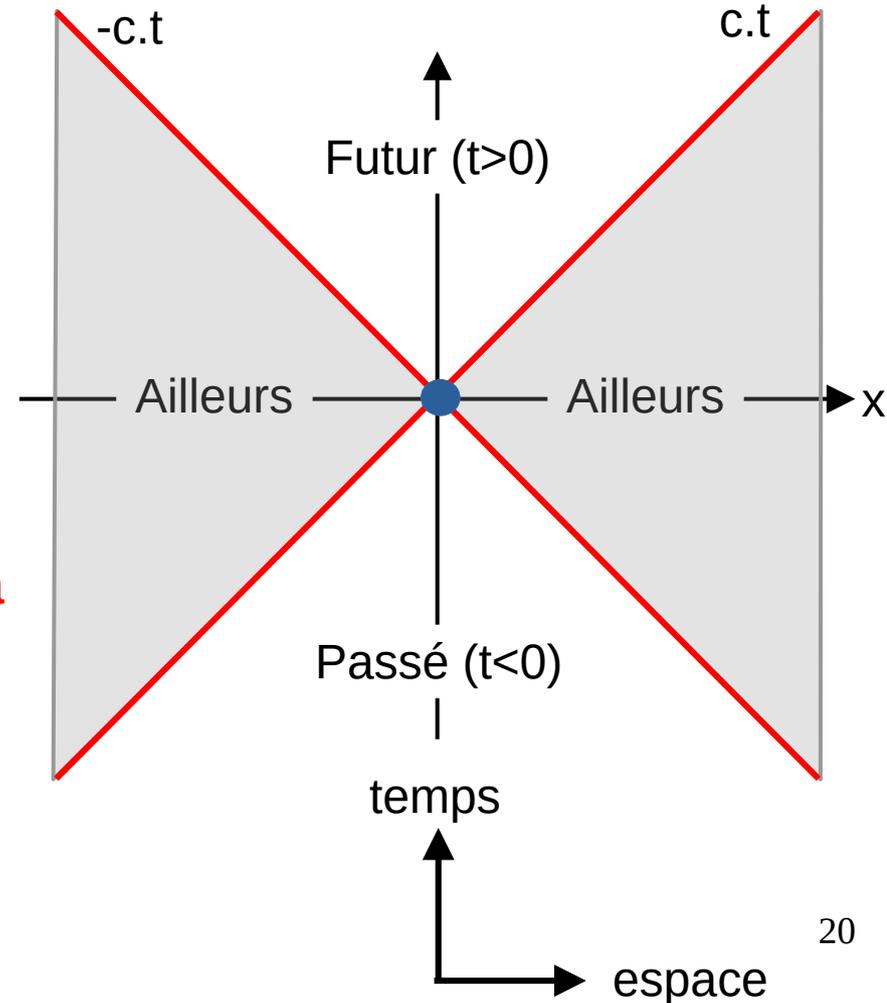


- **Causalité-localité**

- **Causalité** : suppose une interaction entre 2 systèmes, qui ne peut se propager plus vite que c
- **Localité** : idée qu'un système ne peut être influencé que par son voisinage

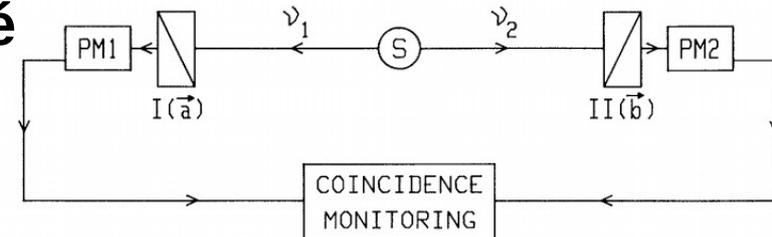
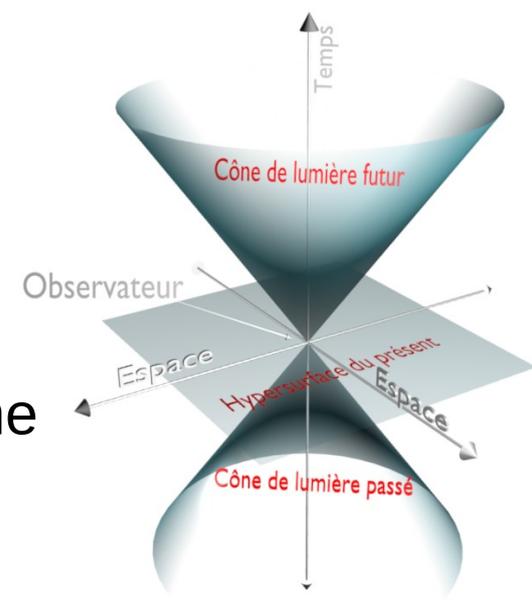
Représentation de l'espace-temps

- L'origine est l'**état actuel** (position/temps)
- Les droites rouges représentent un déplacement à la vitesse de la lumière
 - « **Cône de lumière** »
 - Délimitent 3 zones : **passé**, **futur**, « **ailleurs** »
 - $v < c$ donc **on ne peut pas sortir du cône futur-passé**
 - **Nous ne sommes pas causalement liés à l'ailleurs**
 - Un lien causal supposerait une **transmission d'information plus rapide que c**
- Ici représenté en 1+1 dimensions
 - Simplification de 3+1 dimensions



Le « paradoxe » EPR

- **Expérience de pensée** publiée 1935 par Einstein-Podolsky-Rosen :
 - Si deux particules P1 et P2 sont intriquées (= leurs états sont liés), la mesure de l'état de P1 nous informe **instantanément** (et **sans mesure**) de l'état de P2
- Problème : P2 peut, à l'instant de la mesure, se trouver **aussi loin qu'on le veut** de P1
 - Donc P2 ne peut pas être « informée » de l'état dans lequel se trouvait P1 après la mesure
 - = problème de causalité, elle se trouve dans l'« **ailleurs** » de P1
- L'expérience d'A. Aspect (1982, PNP 2022) tranchera ce débat :
 - il faut **abandonner l'hypothèse de localité**
 - il existe des « **influences** » instantanées à distance



Plus vite que la lumière ??

Non ! L'intrication quantique est parfaitement compatible avec la relativité



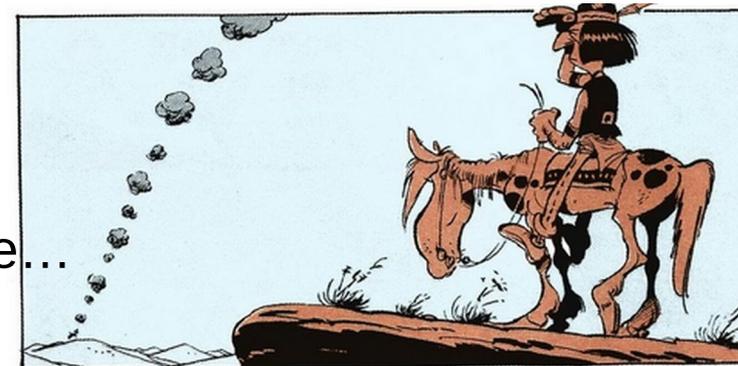
- **Théorème de non-communication :**

- En raison du caractère **indéterministe** de la physique quantique, il est impossible de **transmettre de l'information** à un autre observateur **par un système intriqué**
- Même l'**information que je mesure** ma partie du système ne peut être transmise car l'autre doit regarder sa partie du système pour vérifier, mais **est-ce une vérification ou une mesure ?** D'ailleurs, étais-je vraiment le premier à mesurer ma partie du système ??

- **Il est impossible de communiquer de l'information plus vite que la lumière**

- Pour vérifier, il faut s'appeler et utiliser un signal « classique » qui voyage moins vite que la lumière...

L'intrication ne respecte pas le principe de localité mais elle respecte la causalité



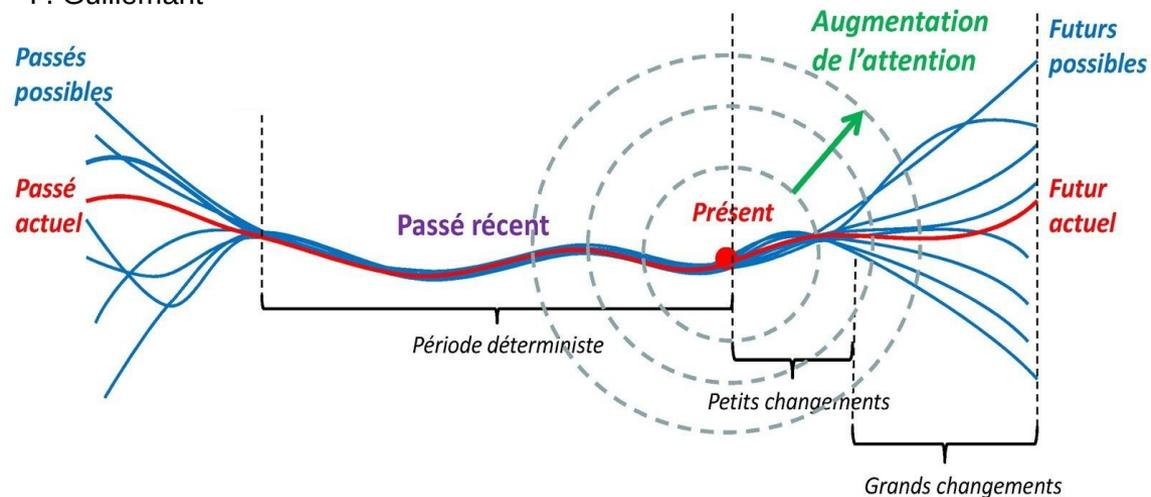
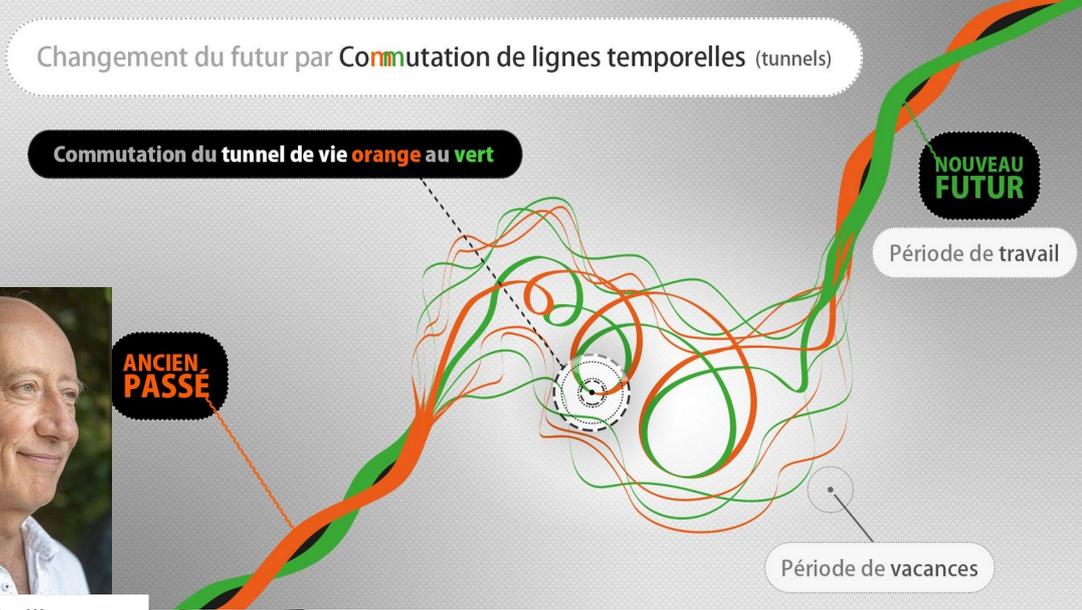
Lucky Luke, Morris et Goscinny

Double causalité

- **Rétro-causalité** : l'effet peut-il chronologiquement précéder la cause ?
- **Non-déterminisme** → le futur peut changer
 - Plusieurs futurs (et passés !) sont possibles
 - → « **Commutations de lignes temporelles** »
- « [...] ma théorie dit que le futur se restructure et qu'un nouveau futur (déjà créé) se potentialise, en recevant plus de probabilités d'exister. Il provoque alors des coïncidences. [...] le retour dans le passé est « néguentropique », c'est-à-dire créateur d'ordre, par opposition à la causalité, qui est entropique, créatrice de désordre. Ainsi, la rétrocausalité crée de l'ordre ; elle a tendance à associer ce qui va ensemble, en créant des synchronicités. »
- **Coïncidences** : « ce qui n'est pas déterminé par le passé est déterminé par le futur »
- **Synchronicités** : « nos intentions causent des effets dans le futur qui rétroagissent dans le présent »



P. Guillemant



La théorie de l'Univers-bloc

Einstein : « Pour nous, physiciens dans l'âme, cette séparation entre passé, présent et avenir ne garde que la valeur d'une illusion, si tenace soit-elle »

3 METAPHYSICS OF TIME

- Conception du temps dans laquelle l'Univers entier évolue dans un espace-temps où **tous les événements (passés, présents et futurs) existent de la même façon**

- Le passé est encore là, le futur est déjà là :
= « **éternalisme** » ≠ **présentisme** :
le « sentier est déjà là » et je le parcours
→ déterminisme, libre arbitre ?

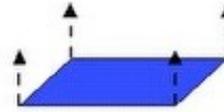
- Si l'espace existe de toute éternité, alors l'espace-temps existe de toute éternité...

- Le temps passe comme le paysage défile

- Le temps n'existe pas objectivement

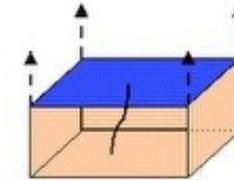
- → lié à la conscience
- Notre conception mêle **éternalisme** (« un futur arrive ») et **présentisme** (« il n'est pas complètement déterminé »)

Presentism
"Nowism"



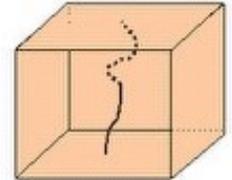
The Present

Possibilism
"The Tree Model"



Past & Present

Eternalism
"The Block Universe"



Past, Present, & Future

Thibault Damour : « [La RG] nous dit qu'il faut voir les choses dans l'espace-temps qui est un bloc. Le futur existe autant que le passé et le présent. »

Mais l'univers-bloc est peu compatible avec l'indéterminisme de la physique quantique (présentiste), sauf à introduire la rétrocausalité...