

LA PHYSIQUE ET LE TEMPS

Gilles Henri, professeur d'astrophysique à
l'Université Joseph Fourier

MESURES PHYSIQUES DU TEMPS

Mesure du temps se fait par l'enregistrement de phénomènes périodiques :

- astronomiques (lunes, saisons, années)
- oscillateurs naturels (coeur..), ou artificiels (pendule, oscillateurs à quartz, horloge atomique...)

problème central pour de nombreuses activités humaines (rituels, organisation sociale, navigation, GPS..)



LE TEMPS DE NEWTON

- Cadre spatio-temporel «absolu» dans lequel se déroulent des évènements, dont l'existence est postulée indépendamment de l'observateur
- Echelle de temps «dynamique» fixée par l'invariance (supposée) des lois physiques, permettant de réaliser des étalons de temps (horloges astronomiques, biologiques, mécaniques, atomiques ...), qui définissent l'écoulement du temps, la notion de simultanéité «du monde» avec l'horloge étant «intuitive».

RELATIVITÉ GALILÉENNE

- La physique classique va postuler l'existence de «cadres de références» rigides, munis d'un temps universel, appelé *référentiels*.
- Une classe particulière de référentiels est celle dans laquelle un mobile, sans influence extérieure, a un mouvement rectiligne uniforme (à vitesse constante)
-> *référentiels galiléens*
- Tous les référentiels galiléens sont en translation rectiligne uniforme les uns par rapport aux autres, aucun n'est «immobile» ou «en mouvement» absolu, mais tous peuvent se considérer indifféremment comme tels-> *relativité du mouvement*.

REMARQUE SUR LA RELATIVITÉ D'ESPACE

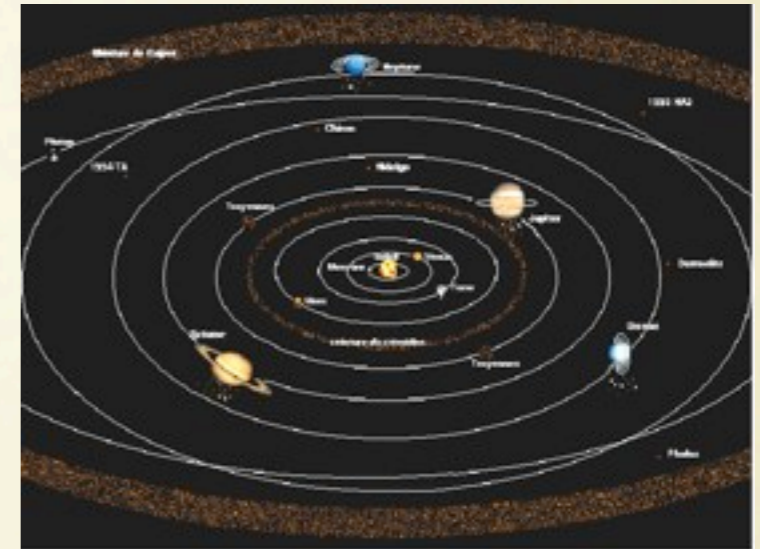
Un voyageur dans le TGV frappe sa tablette de deux façons :

- A : avec deux doigts simultanément
- B : avec un doigt au même endroit, deux fois de suite

Ces évènements ont-ils lieu «en même temps» ? «au même endroit» ?



Copyright : SNCF - CA

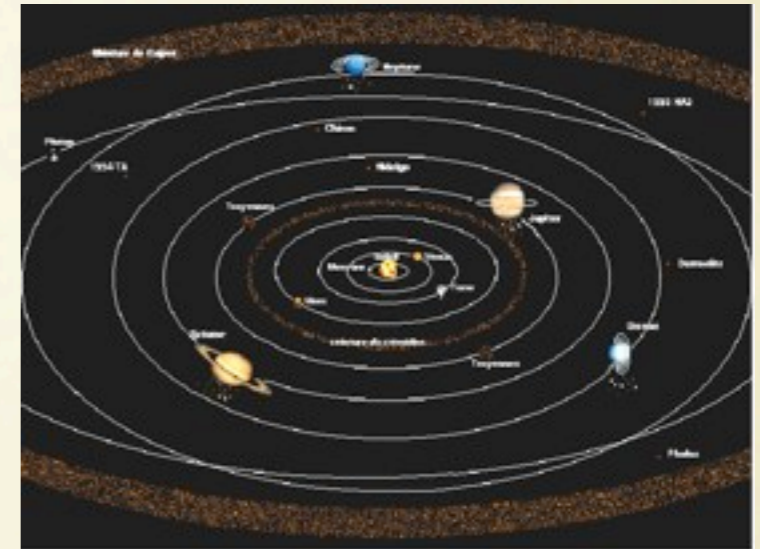


	Au même endroit ?	En même temps ?
A		
B		

	Au même endroit ?	En même temps ?
A		
B		

	Au même endroit ?	En même temps ?
A		
B		

A : deux doigts «en même temps»
 B : un doigt «au même endroit»



	Au même endroit ?	En même temps ?
A	NON	OUI
B	OUI	NON

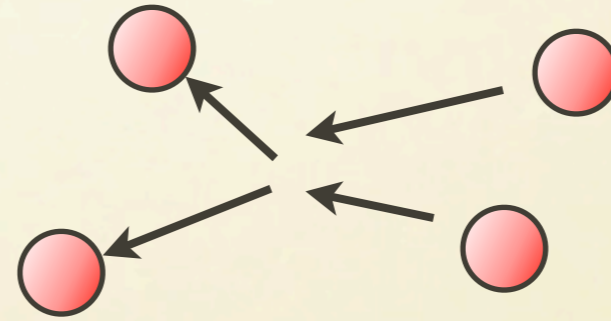
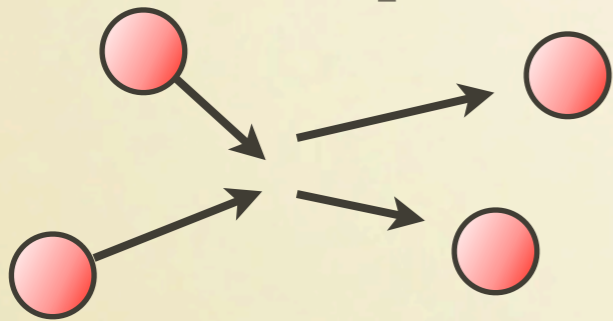
	Au même endroit ?	En même temps ?
A	NON	OUI
B	NON	NON

	Au même endroit ?	En même temps ?
A	NON	OUI
B	NON	NON

Différents observateurs sont d'accord sur la notion de **simultanéité**
 mais pas sur la notion de **colocation**
 ni donc sur la notion de **vitesse**

RÉVERSIBILITÉ

- Toutes les équations de la physique classique sont *réversibles*. Les équations gardent la même forme si on change formellement t par $-t$
- Tous les processus physiques peuvent donc aussi bien se produire dans un sens que dans l'autre, en inversant toutes les vitesses des particules.



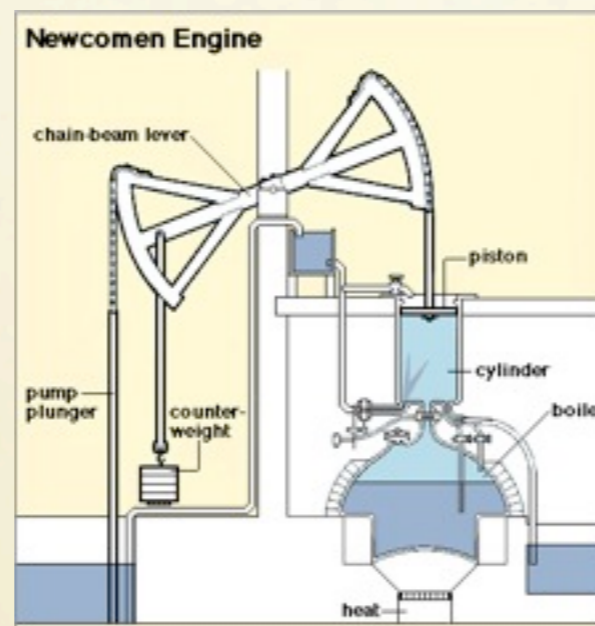
- Force magnétique ? semble apparemment violer la symétrie spatiale et temporelle (Bonhomme d'Ampère), mais pas si on change aussi le signe de **B**

LA THERMODYNAMIQUE; OU L'IRRUPTION DE L'IRREVERSIBLE

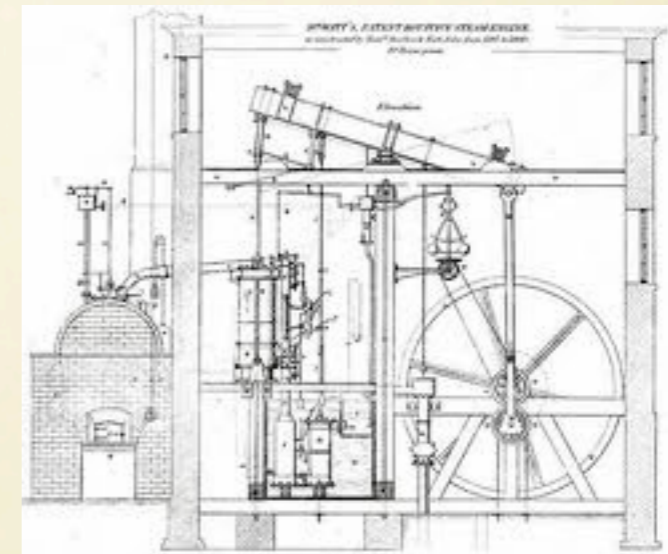
- Au départ : une science de «bricoleurs» : les inventeurs de la machine à vapeur



Denis Papin



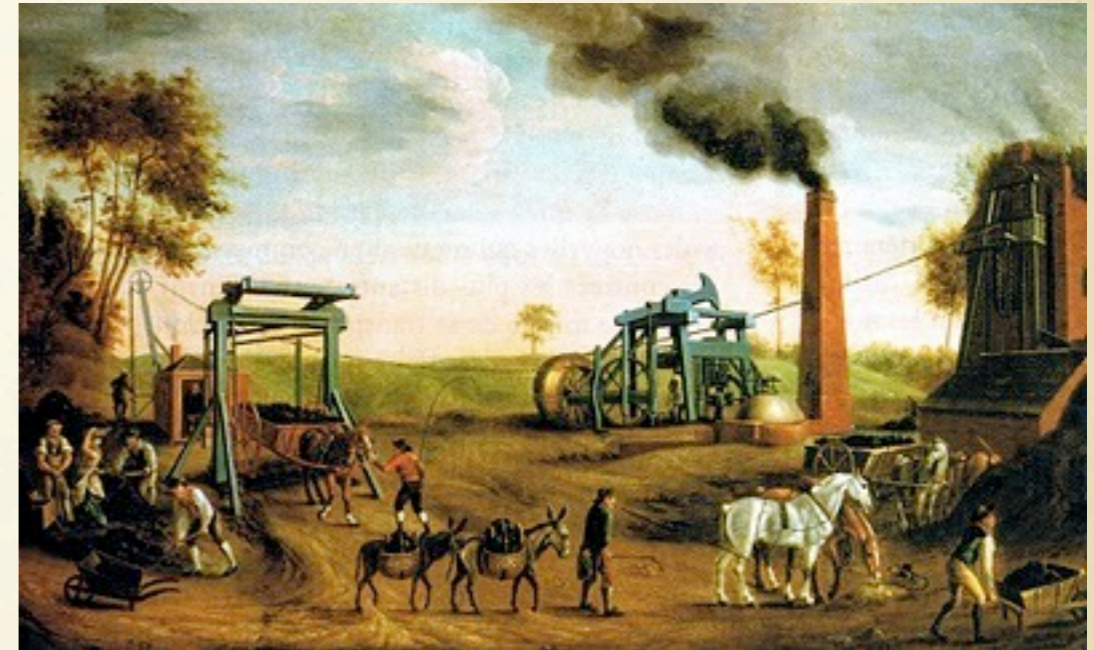
Machine de
Newcomen



Machine de Watt

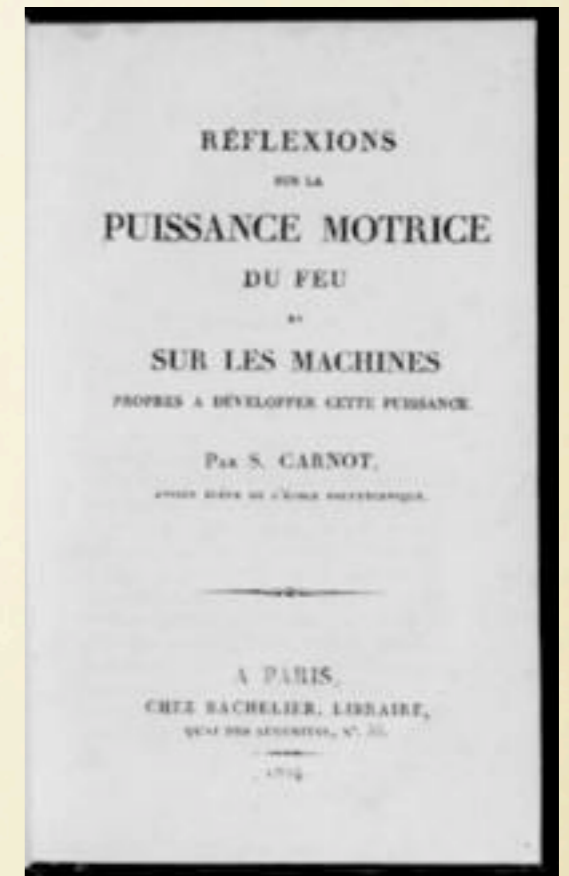
DÉVELOPPEMENT INDUSTRIEL DE L'ANGLETERRE DU XVIIIÈME SIÈCLE

- Utilisation du charbon de terre pour remplacer le bois de chauffage (déforestation due à une croissance démographique importante)
- Nécessité de creuser des mines -> pompage de l'eau des nappes phréatiques



- Machines à vapeur marchent au charbon -> utilisent une partie de la ressource -> course au rendement !
- Amélioration du rendement (Watt) -> question théorique : y a-t-il une quantité minimale de charbon à brûler pour pomper une tonne d'eau ?
- La physique classique n'a strictement aucune réponse à cette question !!! En fait elle n'a pas compris ce qu'était la chaleur

- Problème du rendement des machines thermiques mis au concours par les grandes académies scientifiques
- Mémoire fondateur de Sadi Carnot: **Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance.**
- Montre que la conversion travail \leftrightarrow chaleur est asymétrique : travail \rightarrow chaleur à 100 % est possible, **l'inverse est impossible.**
- Une partie de la chaleur venant d'une source «chaude» est forcément «perdue» dans une source froide , et le rendement maximal (travail/chaleur) est limité par **le rendement de Carnot**
- $r_c = 1 - T_1/T_2 < 1$
- Machines idéales «réversibles» $r = r_c$
- Machines réelles «irréversibles» $r < r_c$
- Equation de la chaleur (J. Fourier) également irréversible



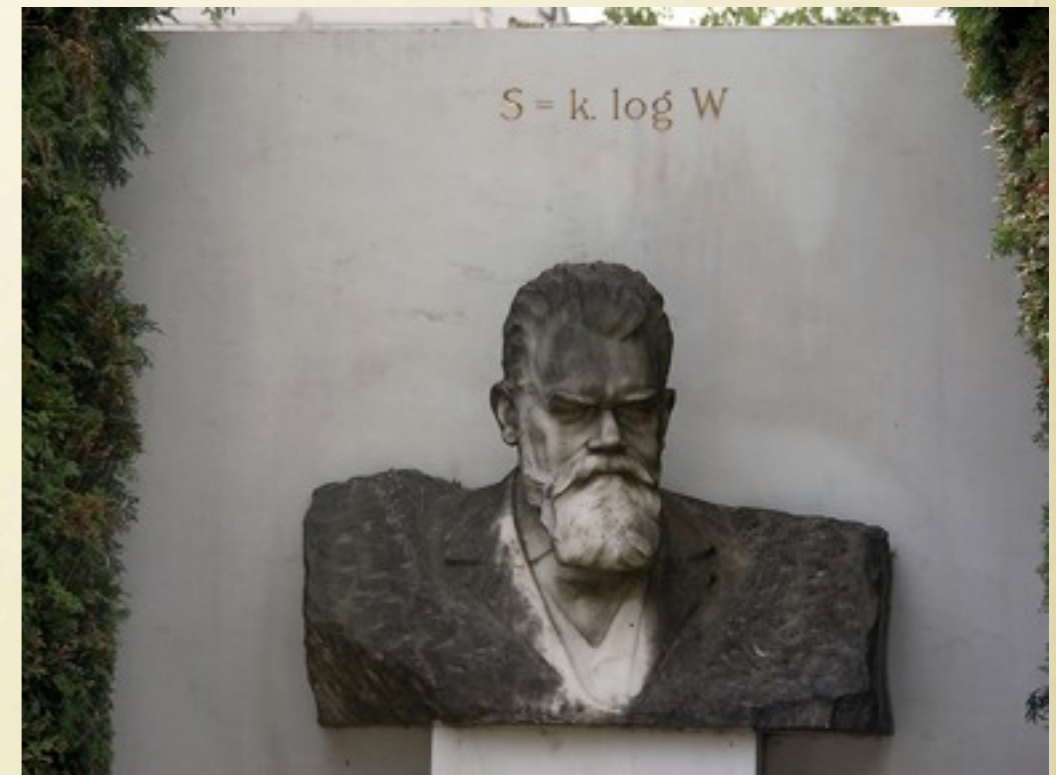
NAISSANCE DE L'ENTROPIE

Notion introduite par Clausius en 1850 : introduit une nouvelle grandeur (différente de l'énergie), qu'il appelle ENTROPIE , S , associée (mais pas égale) à l'échange de chaleur.

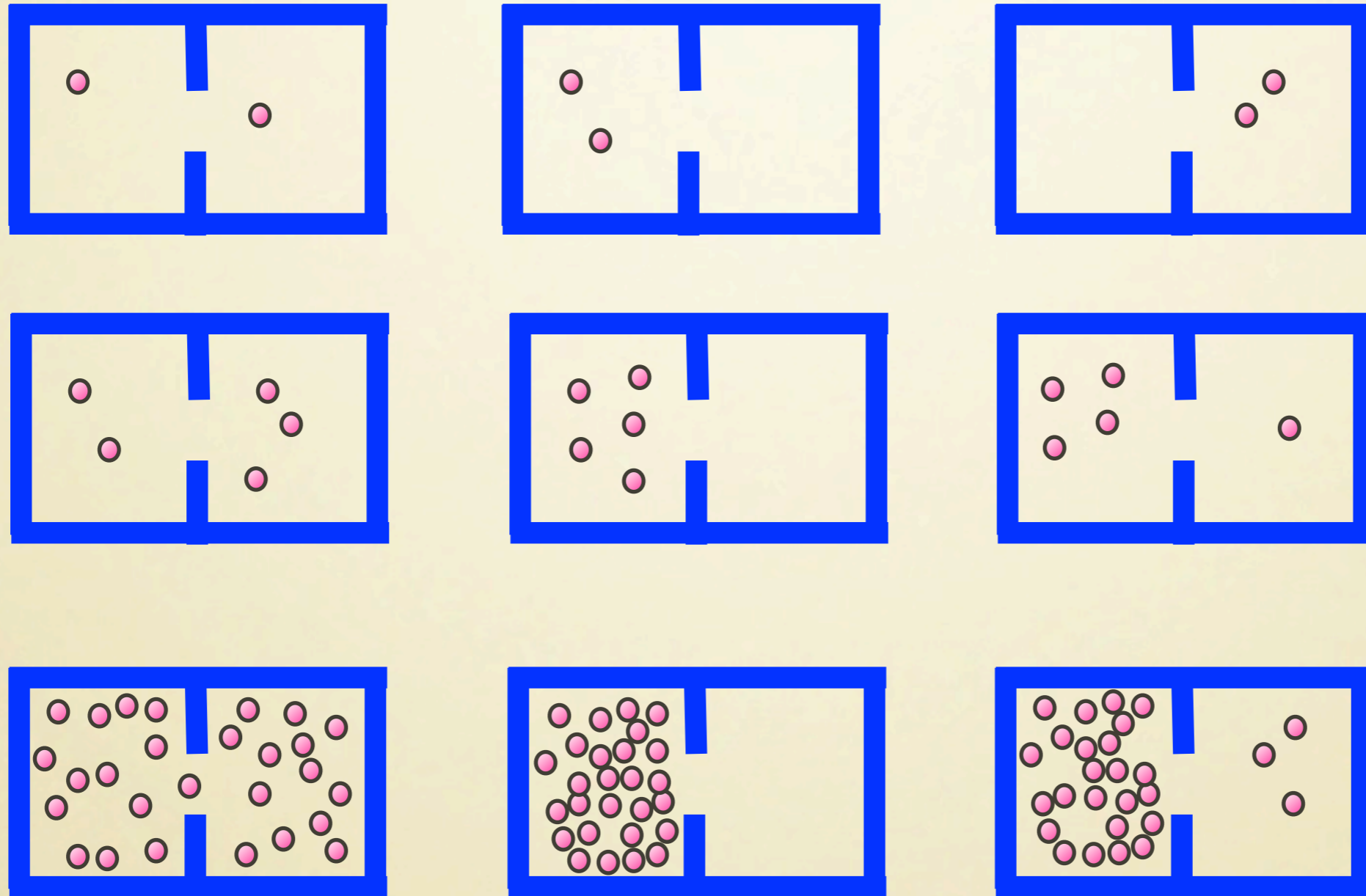
Permet de classer les transformations :
pour un système isolé , l'entropie ne peut qu'augmenter, jamais diminuer.

Une diminution de l'entropie d'un système non isolé doit se «payer» par une augmentation supérieure à l'extérieur :
«L'entropie de l'Univers augmente»

- L'entropie s'applique à tous les systèmes macroscopiques -> à tous les processus physiques et chimiques connus.
- S oriente la «flèche du temps» : deux états de l'Univers peuvent être classés temporellement suivant leur entropie croissante.
- interprétation statistique de Boltzmann : l'entropie mesure le nombre de configurations microscopiques possible W , pour un état macroscopique donné.
- L'entropie mesure le «désordre» d'un système, chaleur «moins ordonnée» que les autres formes d'énergie.



- Peut-on ordonner temporellement ces trois états, le système étant supposé isolé, sans interaction avec l'extérieur ?

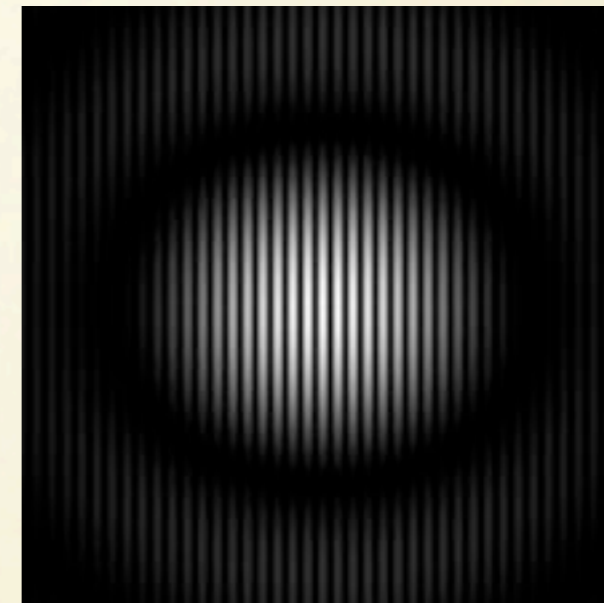
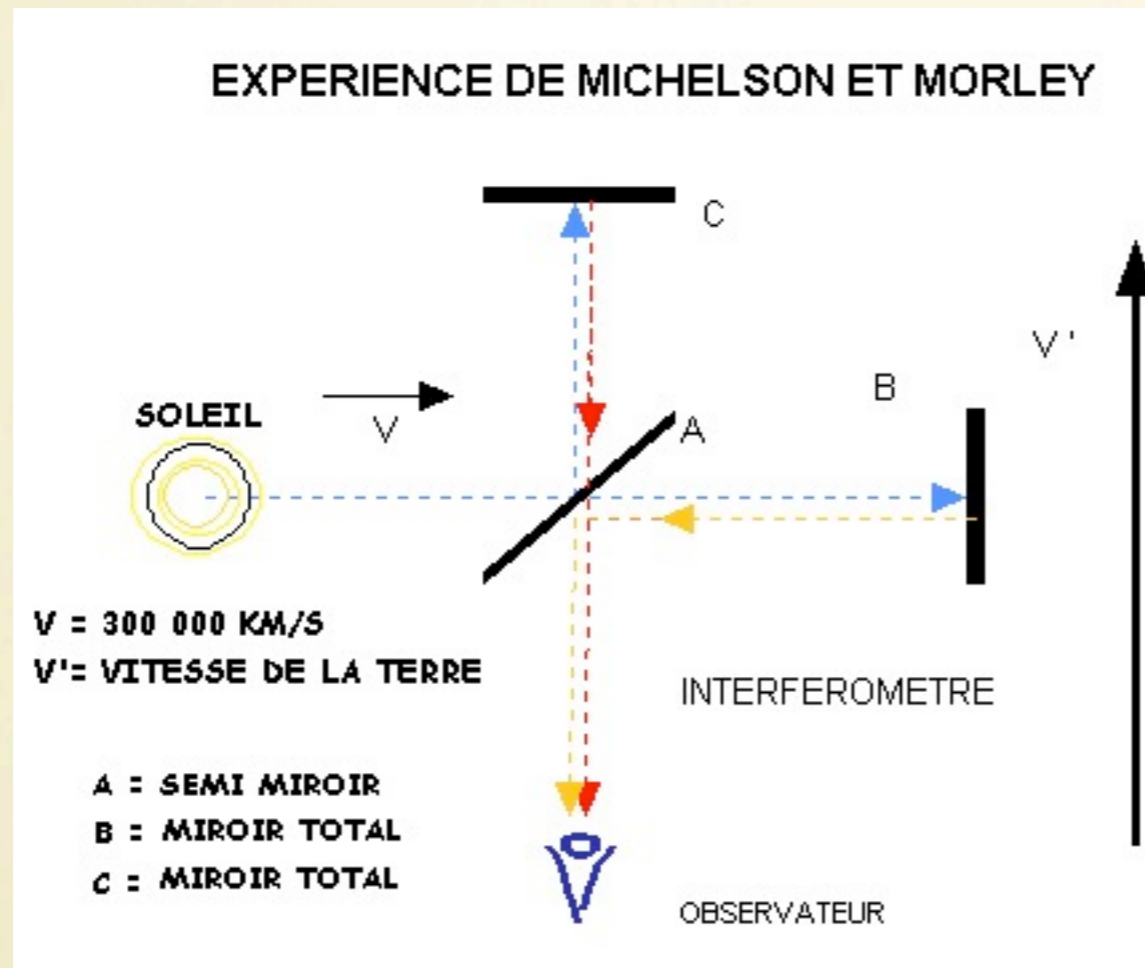


Seul le troisième système peut constituer une «horloge» à peu près fiable !

- Violations apparentes (êtres vivants? démon de Maxwell ?) résolues par la prise en compte de l'environnement, ou des processus physiques nécessaires à la cognition : **l'acquisition d'information nécessite une production d'entropie à l'extérieur (je pense, donc je mange !)**
- Structures ne peuvent s'organiser que si elles sont placées dans un «bain» dissipatif, produisant de l'entropie (**structures dissipatives**, I. Prigogine)
- La «mémoire» du temps implique forcément des systèmes complexes, **le temps «microscopique» ne peut pas être enregistré. Seul le temps «macroscopique» le peut, par des processus augmentant l'entropie de l'Univers.**

THÉORIE DE LA RELATIVITÉ

- En physique galiléenne, la vitesse étant relative : pas de vitesse absolue dans la nature
- Théorie de Maxwell fait apparaître une «vitesse» c des ondes électromagnétiques, assimilée numériquement à celle de la lumière.
- Loi d'addition des vitesses $\rightarrow c$ ne peut pas être valable dans tous les référentiels galiléens
 \rightarrow seulement dans un particulier ? «l'éther» ?
- déplacement par rapport à l'éther devrait se manifester par une variation de la vitesse de la lumière (cf aberration des étoiles).



Tentative de mesurer le mouvement de la Terre par rapport à l'éther : on devrait voir des «franges d'interférences» se déplaçant suivant la position des bras
 Résultat **NEGATIF** : la vitesse de la lumière est constante dans toutes les directions et en tout temps !

La loi de composition des vitesses n'est plus valable pour la lumière !

Premières explications par l'effet d'un «vent d'éther» perturbant les horloges et les règles : temps «ralenti» et longueurs «contractées» quand on se déplace par rapport à l'éther

Violation de l'équivalence des référentiels galiléens .. mais les effets du «vent d'éther» assurent curieusement l'invariance de c !

Poincaré montre que les transformations prennent la même forme quand on va de n'importe quel référentiel à n'importe quel autre (structure mathématique de «groupe») -> détermination pratique de l'éther impossible !

THÉORIE D'EINSTEIN (1905)

- Abandonne l'éther et postule une transformation entre référentiels différente de celle de Galilée, mais concernant n'importe quel passage d'un RG à un autre RG (rétablit l'équivalence entre tous les RG)
- Point clé : abandon du caractère «absolu» du temps, et de la simultanéité :
- 2 évènements «simultanés» pour un observateur ne le seront plus pour un autre observateur en mouvement par rapport au premier !



Deux éclairs vus «simultanément» par O ne seront pas vus simultanément par O' , et réciproquement
Aucune expérience ne peut trancher sur qui a raison !

- Transformations de l'espace et du temps différentes, en passant d'un référentiel galiléen à un autre, avec un mouvement relatif v :

$$\begin{cases} x' = x - vt \\ y' = y \\ z' = z \\ t' = t \end{cases}$$

$$\begin{cases} x' = \gamma(x - vt) \\ y' = y \\ z' = z \\ t' = \gamma(t - vx/c^2) \end{cases}$$

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

γ mesure le «caractère relativiste du mouvement»

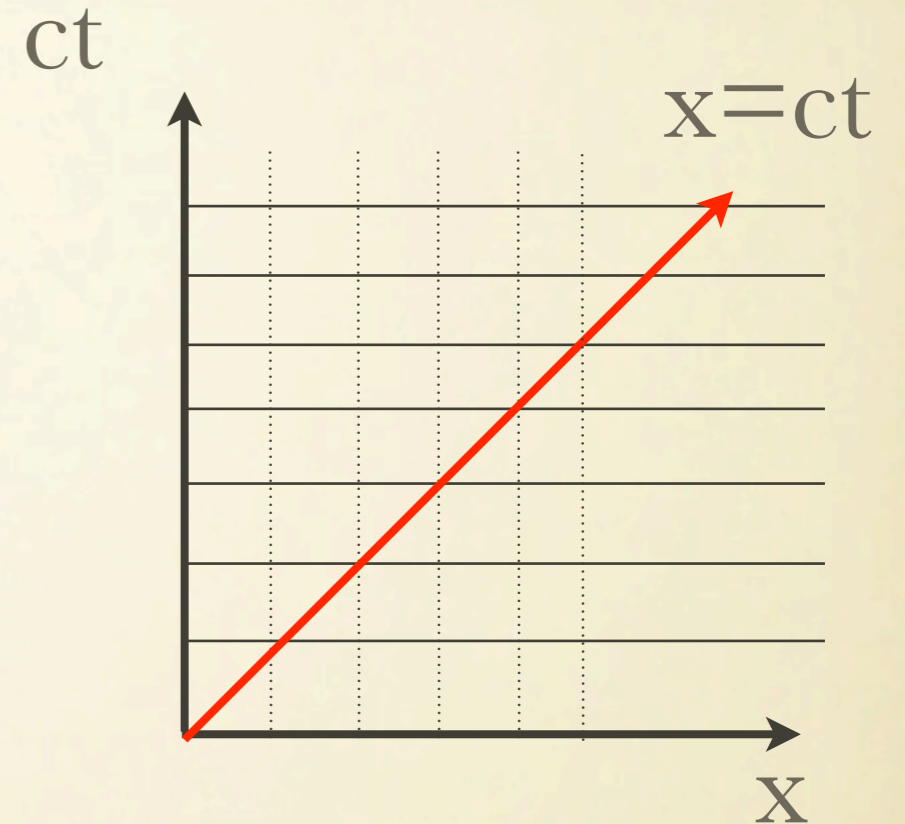
Galilée/Newton

Lorentz/Einstein

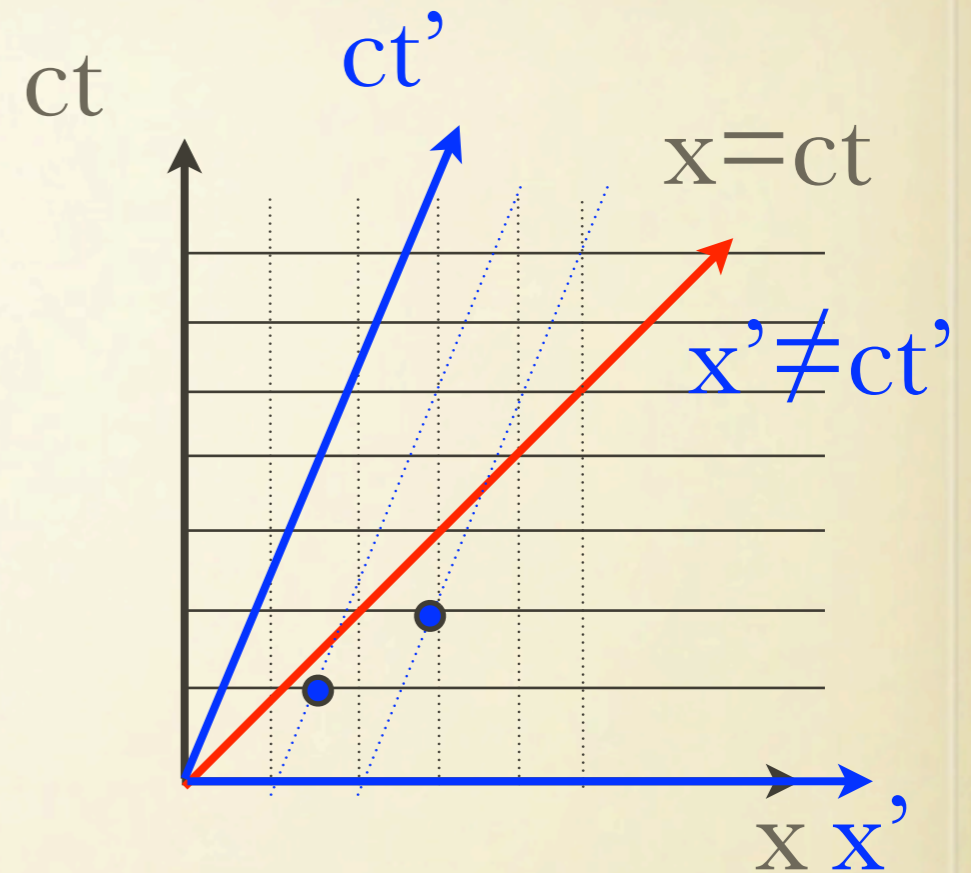
Conséquences

- Invariance de c
- Impossibilité d'avoir $v > c$
- Equivalence masse énergie ($E = mc^2$)
- Non invariance de la simultanéité et de la «durée» entre deux évènements : «dilatation» du temps et «contraction» des longueurs .

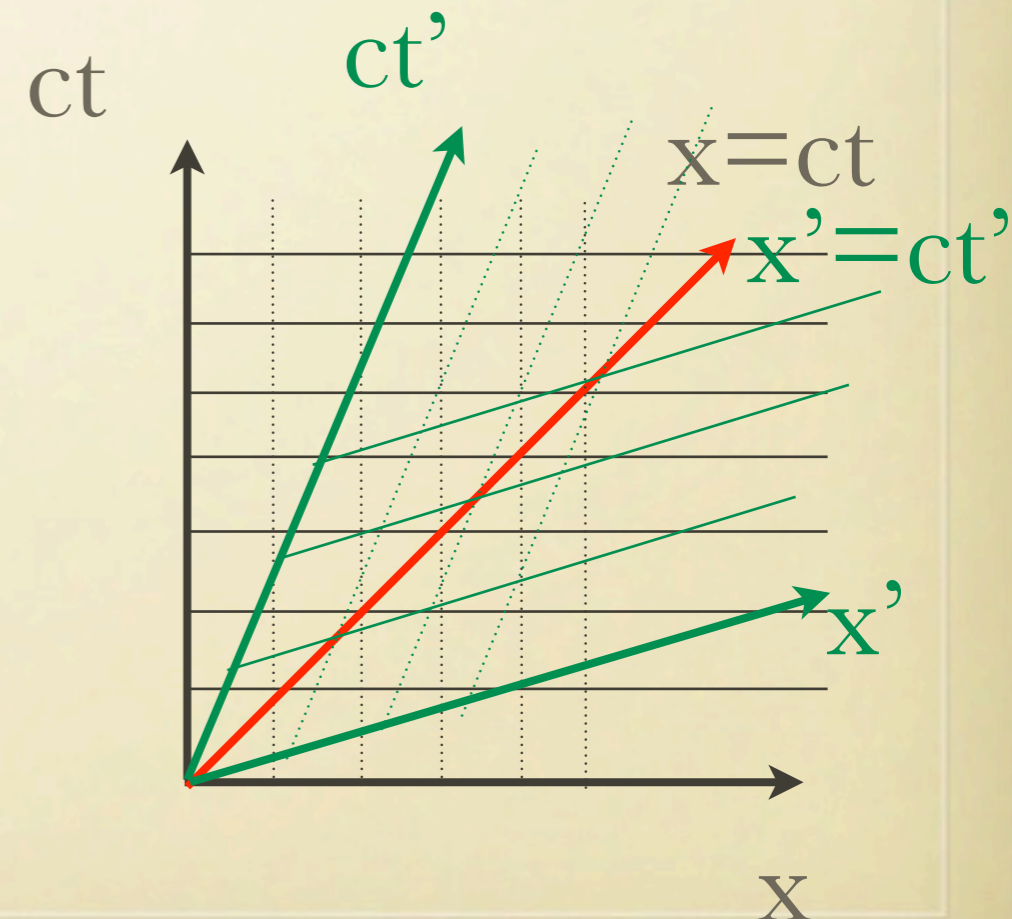
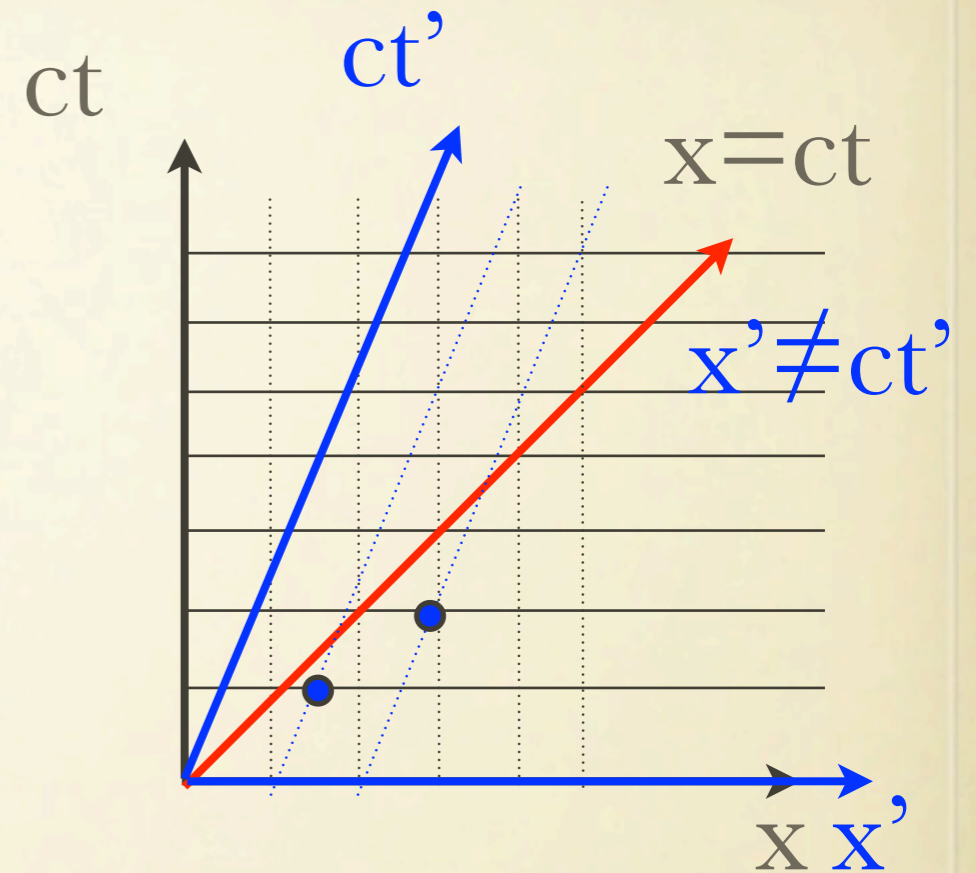
- Attention aux contresens !
- le temps ne s'écoule pas «universellement» plus lentement pour l'un, que pour l'autre : ce sont juste les «plans de simultanéité» qui sont différents.
- Suivant le cas, les intervalles de temps peuvent être plus courts OU plus longs, pour A, ou pour B.
- Mais les évènements ayant lieu **AU MEME ENDROIT** pour A semble s'écouler plus lentement pour B , **et réciproquement** : le «temps propre» (pour l'observateur «au repos» voyant 2 évènements au même endroit) est un minimum absolu.



- Attention aux contresens !
- le temps ne s'écoule pas «universellement» plus lentement pour l'un, que pour l'autre : ce sont juste les «plans de simultanéité» qui sont différents.
- Suivant le cas, les intervalles de temps peuvent être plus courts OU plus longs, pour A, ou pour B.
- Mais les évènements ayant lieu **AU MEME ENDROIT** pour A semble s'écouler plus lentement pour B , **et réciproquement** : le «temps propre» (pour l'observateur «au repos» voyant 2 évènements au même endroit) est un minimum absolu.



- Attention aux contresens !
- le temps ne s'écoule pas «universellement» plus lentement pour l'un, que pour l'autre : ce sont juste les «plans de simultanéité» qui sont différents.
- Suivant le cas, les intervalles de temps peuvent être plus courts OU plus longs, pour A, ou pour B.
- Mais les évènements ayant lieu AU MEME ENDROIT pour A semble s'écouler plus lentement pour B , **et réciproquement** : le «temps propre» (pour l'observateur «au repos» voyant 2 évènements au même endroit) est un minimum absolu.



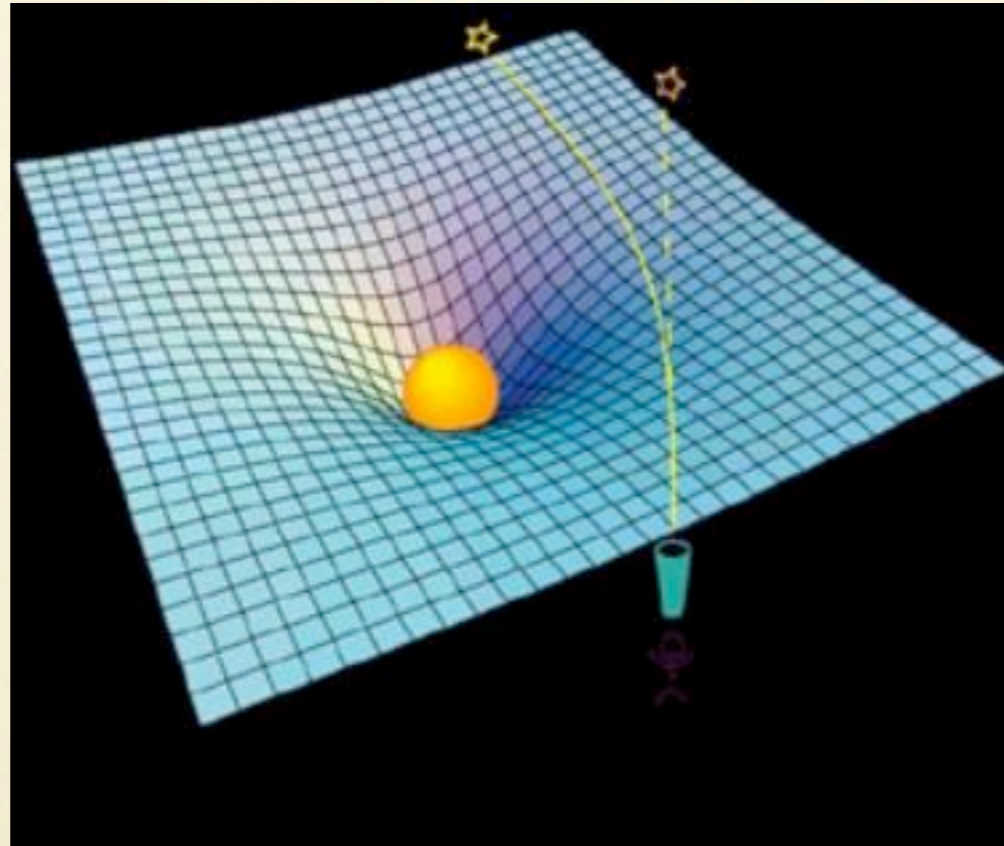
PARADOXE DES JUMEAUX DE LANGEVIN

- 2 jumeaux initialement sur Terre, de même âge
- Un fait un voyage aller-retour à une vitesse très proche de c (grand γ , par exemple 10)
- Si l'aller-retour dure 20 ans pour le jumeau sur Terre, le jumeau voyageur n'a vieilli que de $20/\gamma = 2$ ans !
- paradoxal parce que la situation paraît symétrique, pourquoi l'un vieillit-il plus vite que l'autre ?
- En fait le jumeau voyageur n'est pas dans un référentiel «galiléen», il subit une accélération analogue à un «champ de pesanteur» g .

RELATIVITÉ «GÉNÉRALE»

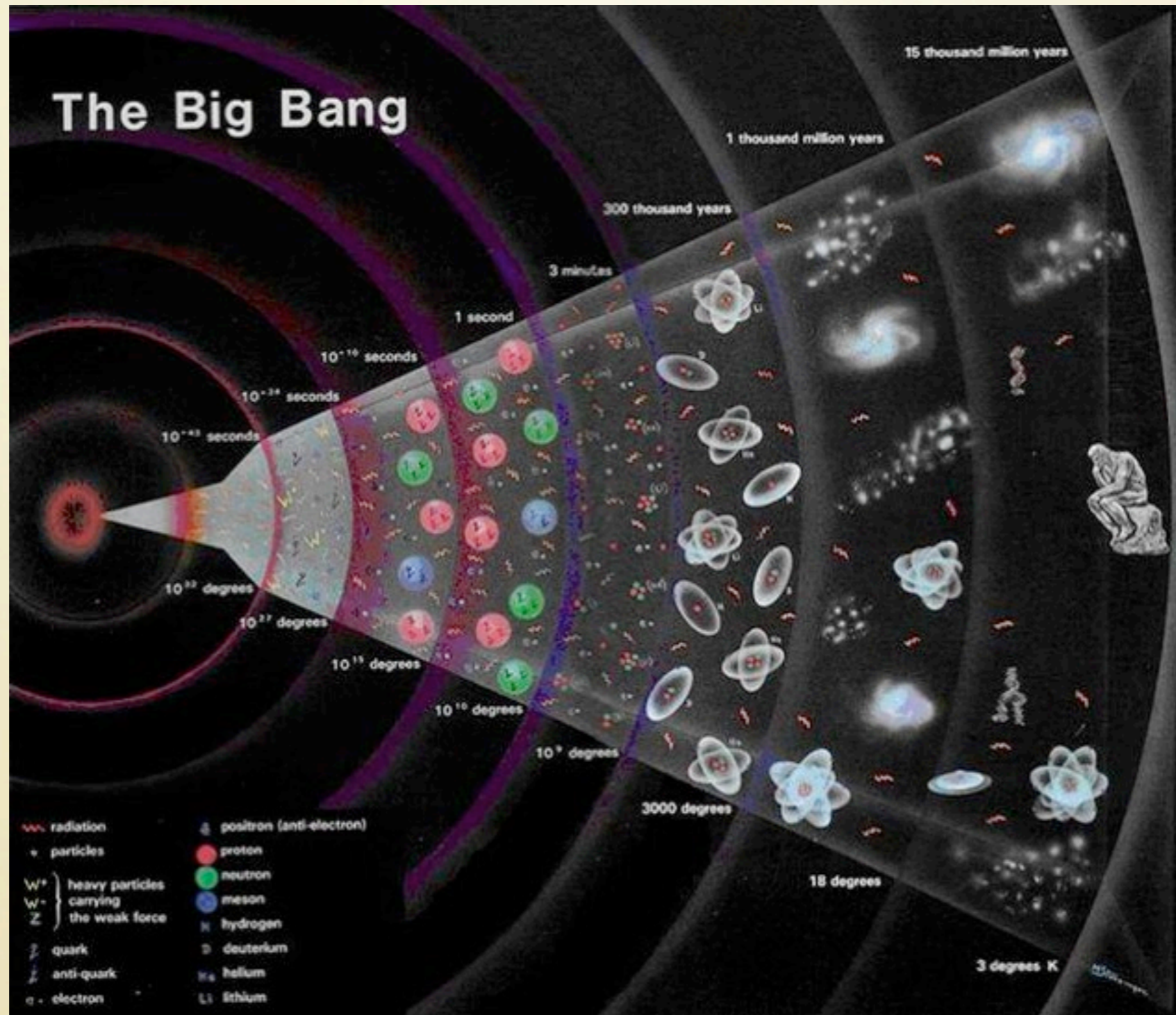
- Elaborée par Einstein dans les années 1910
- Incorpore la gravitation et les référentiels accélérés (non galiléens), qui n'étaient pas proprement traités dans la relativité «restreinte»
- Le temps apparaît comme une sorte de «longueur d'un trajet personnel», et non comme une «altitude», chaque observateur mesure son «temps propre», dépendant de sa vitesse et du champ gravitationnel subi.
- Rend encore plus incertain la notion de temps : la simultanéité devient non seulement «relative», mais parfois impossible à définir de manière univoque !

GRAVITATION = «COURBURE DE L'ESPACE-TEMPS



- Certaines régions de l'espace temps deviennent déconnectées causalement des autres («horizons»)
- Apparition de «singularités» où l'espace-temps «disparaît» (trous noirs, Big Bang).

L'UNIVERS DEVIENT «HISTORIQUE»



NOMBREUSES QUESTIONS EN SUSPENS ...

Jusqu'où peut-on remonter dans le temps ?

«Mur de Planck» pour $t < T_{\text{planck}} = 10^{-43}\text{s}$
(en fait, problèmes bien avant ...)

Qu'y a-t-il «avant» (et cela a-t-il un sens ?)

Origine de l'état initial (entropie très basse !)

Les lois physiques que nous connaissons sont-elles «nécessaires» ou «contingentes» ?

ET LA «GRAVITATION QUANTIQUE» ?

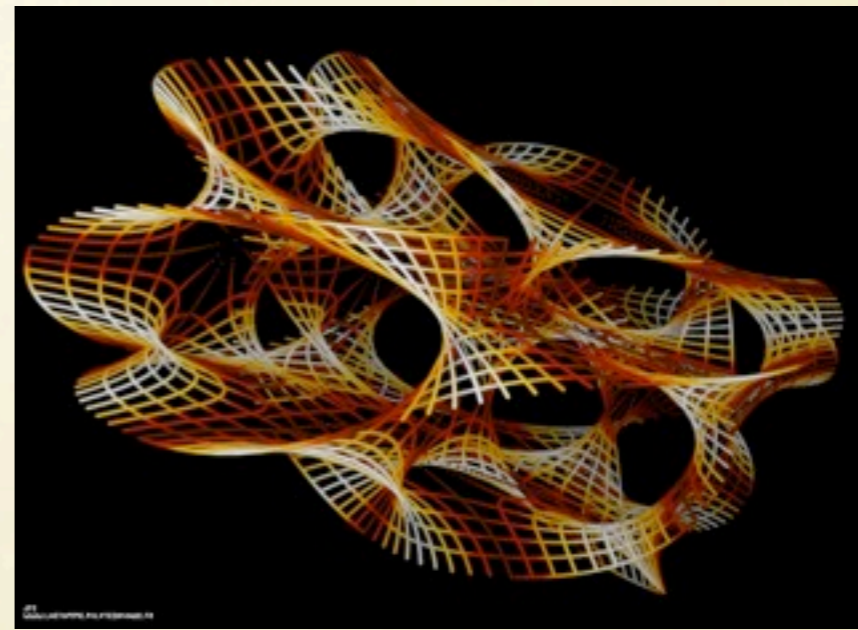
- La mécanique quantique introduit une indétermination des quantités physiques (position, vitesse, énergie, etc ... des particules)
- Elle se place néanmoins dans un cadre d'espace-temps «classique» (ou relativité restreinte)
- très difficile à concilier avec la relativité générale - c'est le cadre de l'espace-temps lui même qui devient «flou».

LES «UNITÉS DE PLANCK»

- 3 grandeurs fondamentales : masse, longueur, temps
- 3 «constantes physiques» : G (constante de gravitation, c (vitesse de la lumière), h (constante de Planck, ou $\hbar = h/2\pi$)
- 3 grandeurs :
 - Masse de Planck $(c\hbar/G)^{1/2} = 2.10^{-5} \text{ g}$
 - Longueur de Planck $(G\hbar/c^3)^{1/2} = 1,6. 10^{-35} \text{ m}$
 - Temps de Planck $(G\hbar/c^5)^{1/2} = 5. 10^{-44} \text{ s}$

DES THÉORIES VERTIGINEUSES

- Théories encore au stade de conjectures : supercordes? gravité à boucles ?
- mondes étranges, avec dimensions supplémentaires, «membranes» de l'espace temps, «multiunivers»... le «temps» classique n'a plus d'existence naturelle, c'est une propriété «émergente» ... ne serait-il plus qu'une illusion ?
- Multitude d'Univers possibles, de propriétés physiques différentes.. qu'est ce qui a sélectionné le nôtre ? (principe anthropique ?) On est encore loin d'avoir la réponse à ces questions... !



Représentation d'une «variété de Calabi-Yau»,
représentant la structure d'un «point» de l'espace
temps habituel en théorie des supercordes