

GROUPE ÉMERGENCE

*CONFÉRENCE
du 2 octobre 2023*

Michel Galiana-Mingot



Richard Feynman, à propos de la théorie du tout :

« S'il s'avère qu'une loi simple et ultime explique tout, ainsi soit-il. Ce sera bien agréable de la découvrir.

S'il apparaît qu'il (le monde) est fait comme un oignon avec des millions de couches et que nous nous épuisons à les observer toutes l'une après l'autre, alors il en sera ainsi.

Quoi qu'il en soit, ce sera sa nature et il se révélera tel qu'il est. »

Un monde ainsi stratifié se révèle bien plus intéressant que s'il obéissait uniquement à quelques lois d'airain.

C'est L'UNIVERS MILLEFEUILLE

Contenu de la conférence :

- I. UN PÉRIPLE DANS LES ÉCHELLES**
- II. LA PHYSIQUE À LA PEINE**
- III. LE HASARD CONTRAINT ET L'AUTO-ORGANISATION**
- IV. UN 4E PRINCIPE DE LA THERMODYNAMIQUE**
- V. LA DÉCOHÉRENCE QUANTIQUE**
- VI. COMBINATOIRE ET AUTO-ASSEMBLAGE**
- CONCLUSION SUR L'AVENIR DE LA SCIENCE**

I. UN PÉRIPLE DANS LES ÉCHELLES

Notre champ de vision

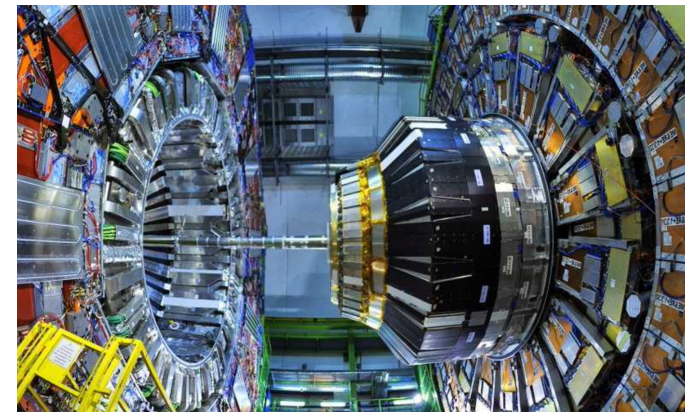
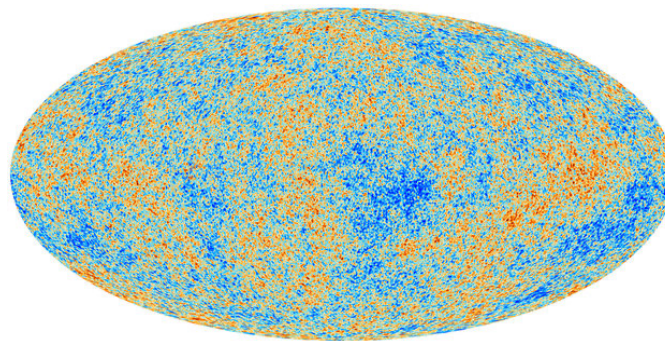
<u>À l'œil nu :</u>	de 10^{-4} m à 10^4 m	(8 ordres de g.)
<u>Avec nos instruments :</u>	de 10^{-19} m à 10^{26} m	(45 o. de g.)
	<i>(résolution du LHC / distance de la « photographie du BB »)</i>	
<u>Maximum théorique :</u>	de 10^{-35} m à 10^{26} m	(61 ordres de g.)
	<i>(limite de Planck, horizon cosmologique)</i>	

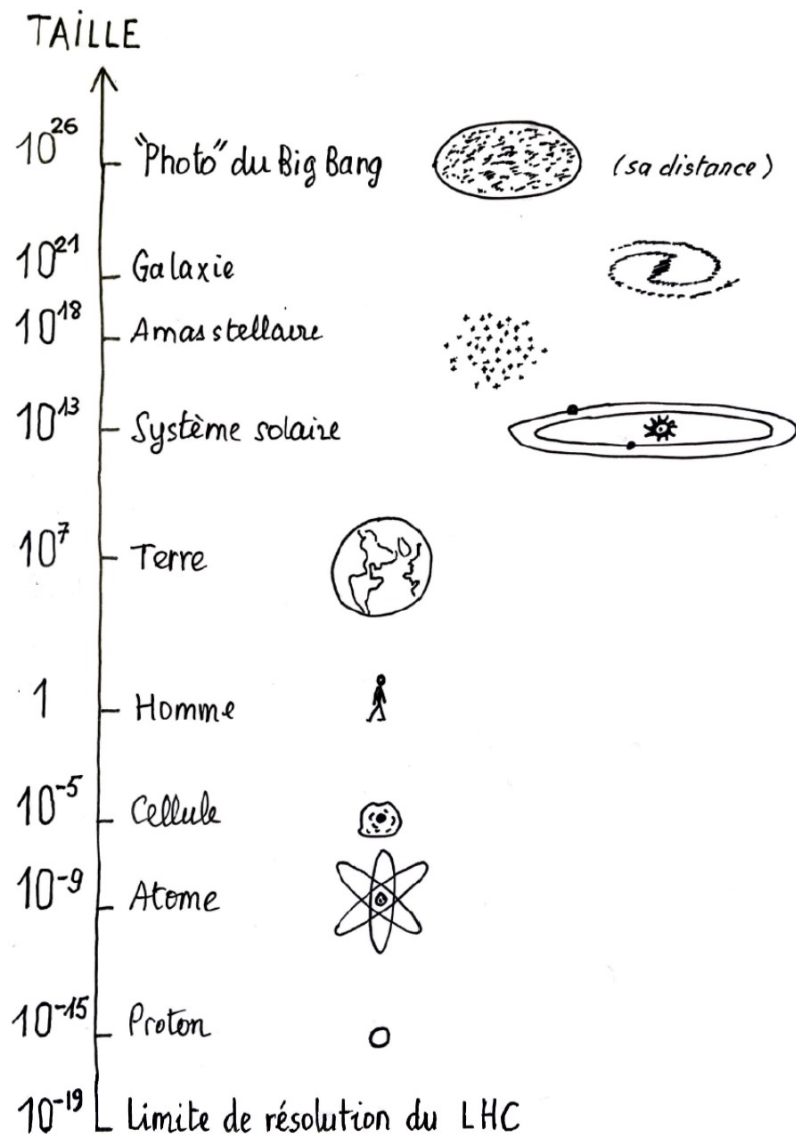
La limite maximum est *observationnelle* : horizon cosmologique

La limite minimum (Planck) est *épistémologique*

Aucune des deux ne peut être
considérée comme une limite
de l'Univers

Il peut couvrir une plage infinie





L'Univers est fractal

1. Toutes les échelles sont **densément remplies** par des objets ou des phénomènes
2. Toute structure tend à se **fractionner** dans les niveaux inférieurs

3. On observe des **similarités** entre objets de dimensions très différentes

L'homme se trouve à peu près au milieu (nos télescopes sont aussi performants que nos microscopes !)

On observe simplement un trou entre le noyau atomique et le plus petit atome (4 ordres de grandeur)

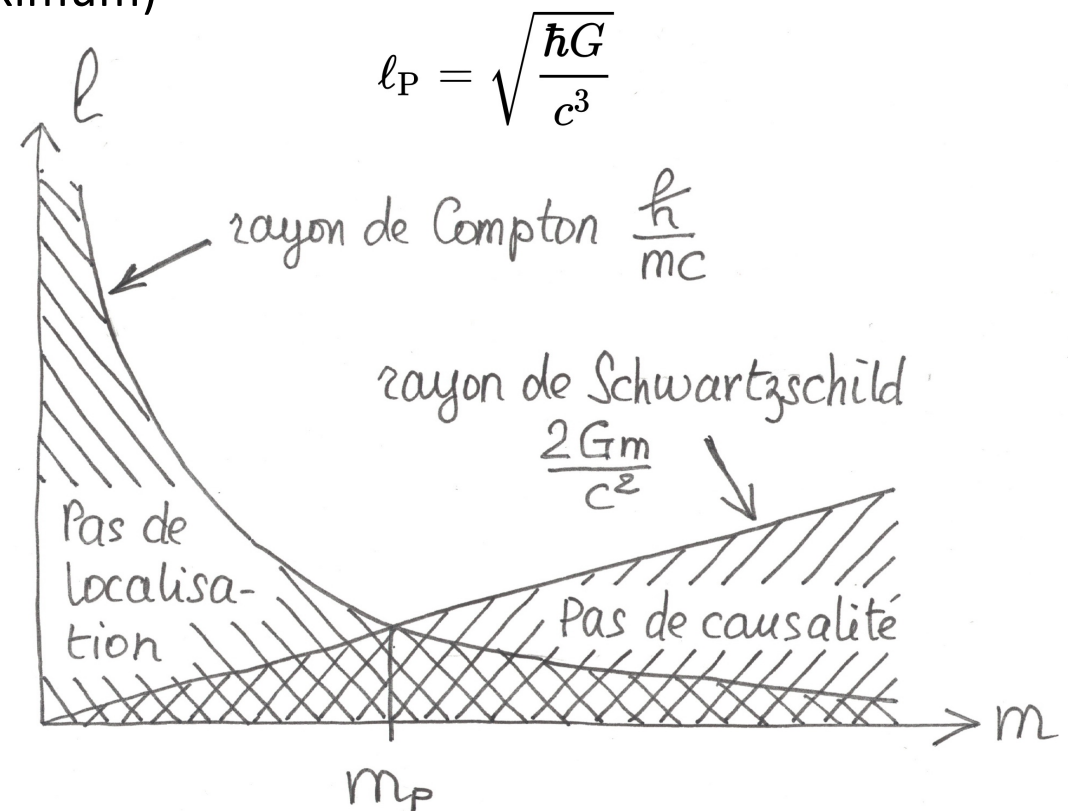
Il serait intéressant de faire la même analyse sur les *temps caractéristiques* des phénomènes

La longueur de Planck n'est pas une longueur minimum « physique »

Il existe une longueur minimum en MQ (liée au quantum) et une autre en RG (liée au trou noir, qui représente une densité maximum)

En combinant les deux, on obtient la
longueur de Planck

C'est une limite *épistémologique* liée à deux théories qui, de surcroît, sont notoirement incompatibles (une continue / l'autre discontinue ; une locale / l'autre non ; une déterministe / l'autre probabiliste, etc.)



Le principe d'équivalence des échelles

L'Univers descend peut-être indéfiniment dans les petites dimensions ainsi que dans les grandes (pourquoi la fête s'interromprait-elle à une certaine échelle ?)



Principe d'équivalence des échelles :

« dans l'Univers, il n'existe aucune échelle jouant un rôle privilégié »

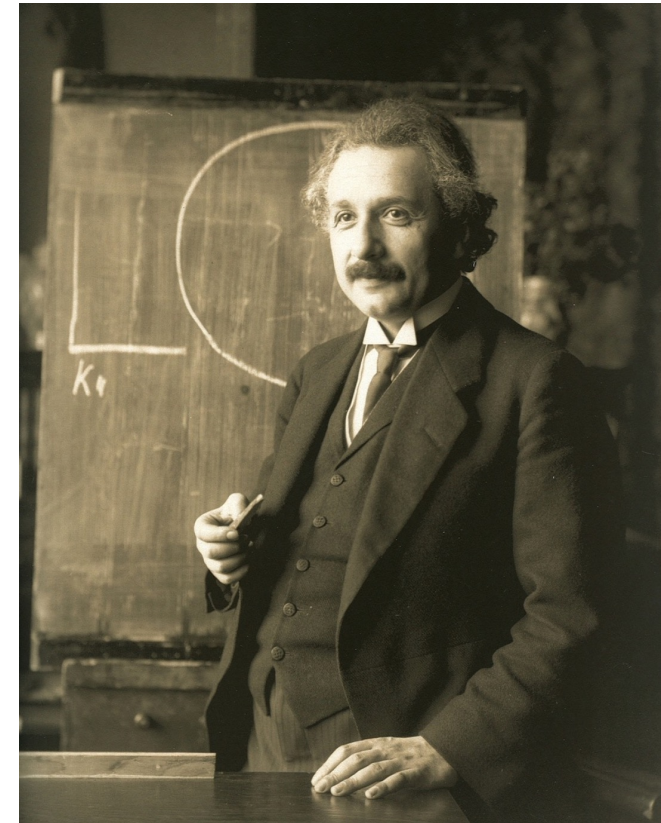
(c'est l'esprit du principe cosmologique d'Einstein)

II. LA PHYSIQUE À LA PEINE

« S'intéresser aux êtres vivants est le meilleur moyen de ressentir à quel point la physique reste primitive. » A. Einstein

Les faiblesses de la physique face aux systèmes complexes :

1. Les limites inhérentes aux théories classiques et les mythes dans lesquels elles se sont souvent enfermées
2. Leur difficulté à appréhender les phénomènes émergents (réductionnisme)
3. Le fait que toute théorie soit valide au sein d'un domaine limité, jamais à toutes les échelles
4. Le rôle primordial des contraintes et du hasard dans la nature



Les mythes de la physique

<u>Le mythe Pythagoricien</u>	Ex. du problème à trois corps Ex. de Max Tegmark : l'Univers <i>ontologiquement mathématique</i>
<u>Le mythe newtonien</u>	Conditions aux limites fluctuantes, conditions initiales floutées par la dépendance du chemin, intégration rarement possible
<u>Le mythe laplacien</u>	Le déterminisme
<u>Le biais de sélection</u>	K. Popper : la physique s'est intéressée « plus aux horloges qu'aux nuages »
<u>Le mythe réductionniste</u>	Ex. d'émergence : l'être vivant

Le paradoxe du réductionnisme : Si la méthode réductionniste est fertile, c'est précisément parce que les phénomènes émergents créent des niveaux partiellement autonomes (particules, atomes, molécules, cellules, etc.). Dès lors, on peut étudier un niveau à partir de celui du dessous sans être obligé de descendre au niveau des particules élémentaires

L'incertitude s'est invitée en force dans les sciences

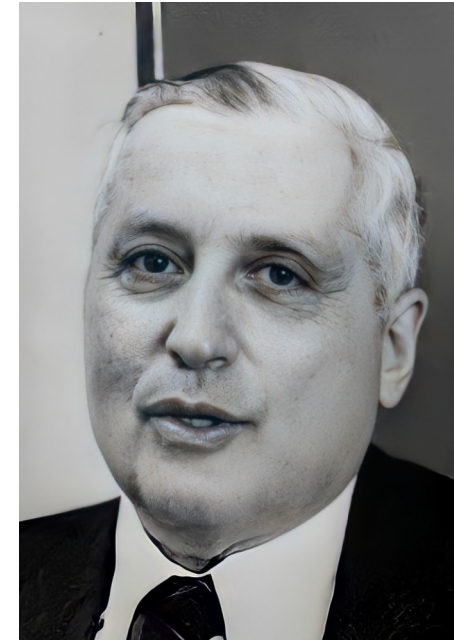
Le monde selon G. Lemaître : « *Il ne s'agit pas du déroulement, du décodage d'un enregistrement ; il s'agit d'une chanson dont chaque note est nouvelle et imprévisible. **Le monde se fait, et il se fait au hasard.*** »



1. Les *systèmes non-intégrables*, ou *chaotiques* de Poincaré
2. Le *principe d'incertitude* d'Heisenberg
3. Le *théorème d'incomplétude* de Gödel
4. Le *chaos déterministe* de Lorenz et la *sensibilité aux conditions initiales*
5. Le *problème du cadre* en IA (et par extension, le *ceteris paribus* en physique)
6. La faillite du modèle *un gène – une protéine – un caractère* et du soi-disant *programme génétique*

III. LE HASARD CONTRAINT ET L'AUTO-ORGANISATION

« Pour les systèmes instables, les lois de la nature expriment ce qui est possible et non ce qui est certain. » Ilya Prigogine

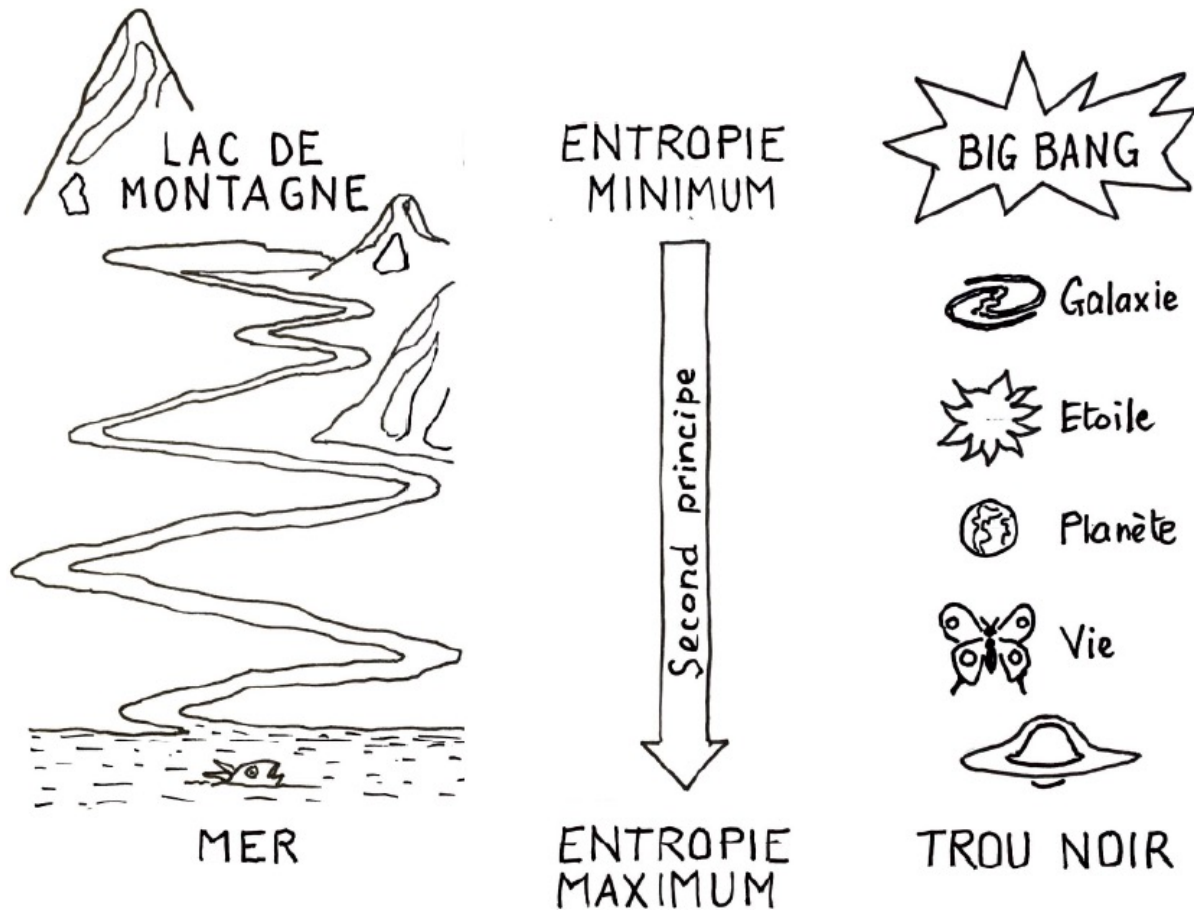


Vision traditionnelle : les phénomènes sont provoqués par les **forces efficaces** (Aristote), elles-mêmes issues des lois de la nature (Galilée, Newton)

Nouvelle vision :

- Les lois régissant les forces se limitent à des **symétries** s'appliquant universellement à tous les phénomènes (*symétrie lorentzienne, $U(1)$, $SU(2)$, $SU(3)$; théorème de Noether*)
- Ce qui détermine les phénomènes, se sont les **contraintes** que rencontrent les forces lorsqu'elles cherchent à s'exercer (*dépendance du contexte et du chemin*) Ex. de la formation du Système solaire

Ce n'est pas l'énergie qui anime l'Univers, mais sa transformation vers l'entropie maximum

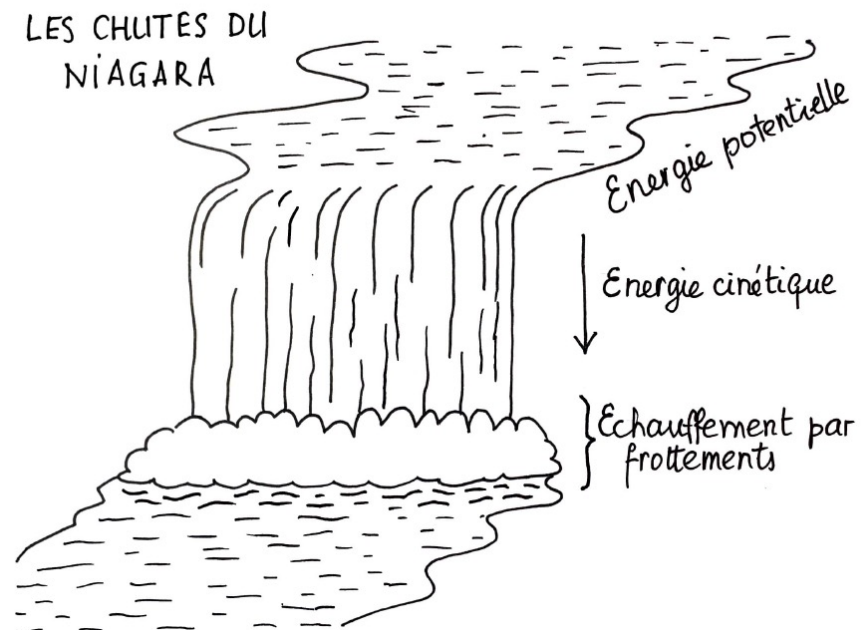


Le second principe n'est pas celui de la dégradation universelle

Il est d'abord celui qui drive l'auto-organisation et qui structure l'Univers

À très long terme, il détruira ce qu'il a organisé

L'énergie ne travaille que si elle rencontre des contraintes

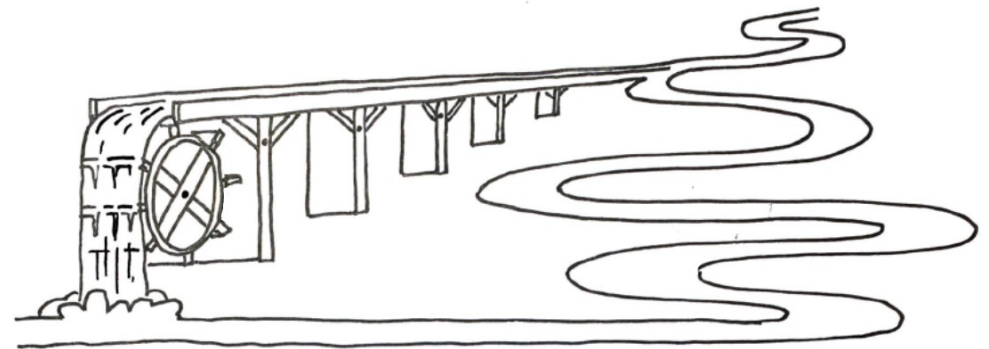


Les Grecs ont eu l'idée d'interposer des contraintes dans la chute de l'eau

La chute du Niagara ne produit rien : un peu de chaleur

Un feu de forêt non plus : de la chaleur, du CO_2 et de la vapeur d'eau

Un univers sans contraintes s'effondrerait directement du BB aux trous noirs



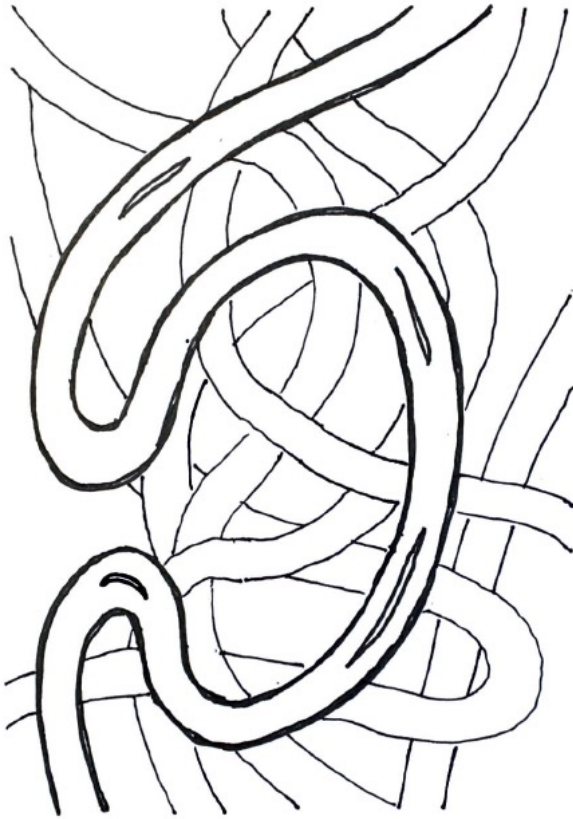
Le monde est animé par le hasard « contraint »

Quatre types de contraintes :

1. Les lois fondamentales de la physique s'imposent comme des **symétries** et forment des *gradients*
2. Les contraintes de l'environnement (*context dependent constraints*)
3. Les contraintes que le système engendre lui-même
4. En particulier, la *causalité descendante*

On considère que les *causes efficientes* se résument aux **4 forces**, alors que les **contraintes** représentent une causalité plus forte et plus productrice

Nous emploierons le terme *contrainte* dans le sens d'une causalité



Le lit du Mississippi

Un système se piège dans les contraintes qu'il engendre lui-même

Ex. : au départ la rivière suit les reliefs (contraintes dépendantes du contexte. Mais elle contribue elle-même à creuser le lit qui la contraindra

Qu'est-ce qui forme le lit de la rivière ? : la rivière

Qu'est-ce qui détermine le parcours de la rivière ? : son lit !

J. Wheeler à propos de la RG :

Qu'est-ce qui courbe l'espace-temps ? : les masses

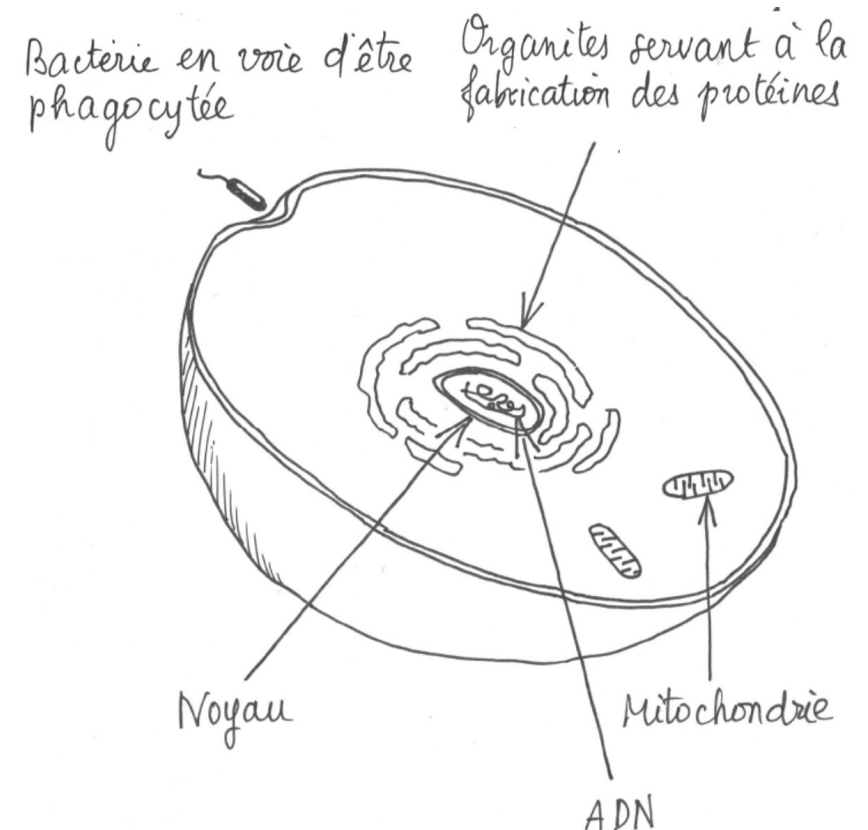
Qu'est-ce qui guide le déplacement des masses ? : la courbure !

L'exemple de la cellule eucaryote

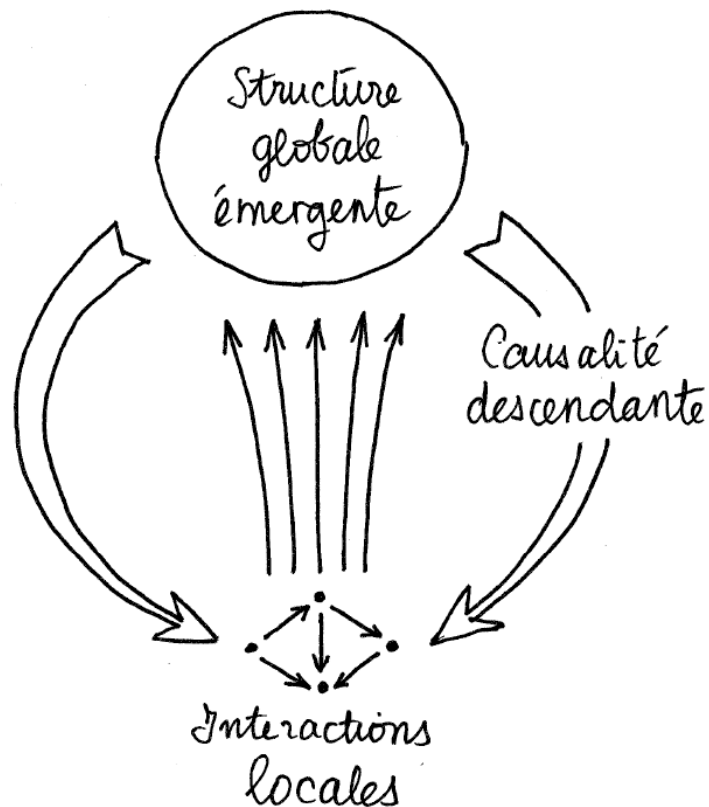
La cellule peut se définir par un immense labyrinthe de contraintes engendrées par elle-même (*fermeture causale*) :

- mécaniques : une énorme surface de membranes : paroi, noyau, organelles, cytosquelette...
- chimiques et électriques : les nombreuses *protéines de transport* qui leurs sont attachées
- catalytiques : 7 000 enzymes déterminent les 5 000 réactions du métabolisme

L'astrophysicien Éric Chaisson a mesuré que *par gramme de matière*, la cellule est traversée par un flux d'énergie libre 10 000 fois supérieur à celui du Soleil



La causalité descendante est-elle ontologique ?

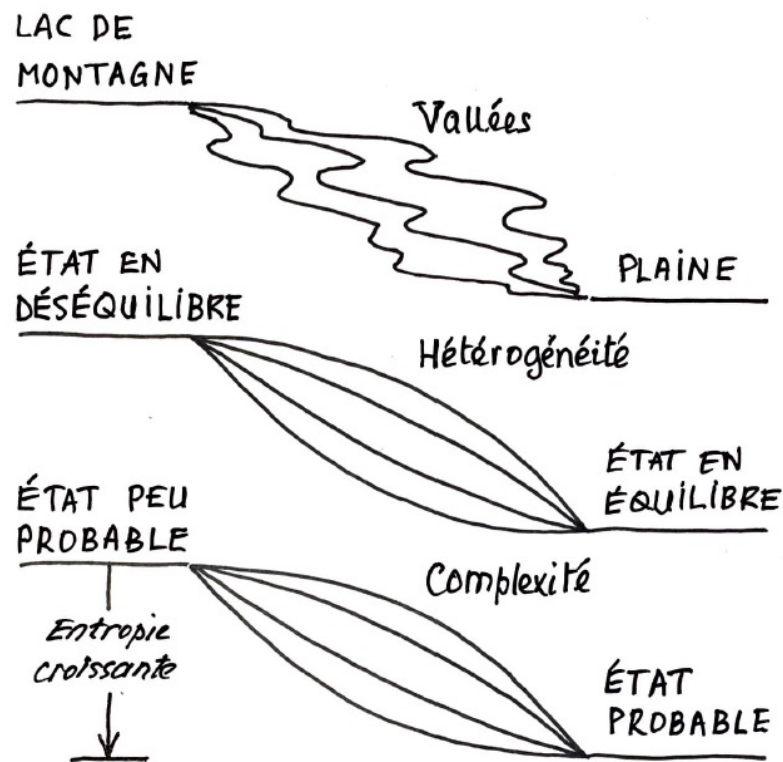


Dans les phénomènes émergents, on considère généralement que :

- le phénomène crée des *propriétés émergentes* mais non des *causalités descendantes*
- la seule causalité reconnue comme ontologique est *montante*

Si l'on considère les **contraintes** comme causes efficientes au même titre que les 4 *forces*, alors **la causalité descendante est ontologique**

IV. UN 4^E PRINCIPE DE LA THERMODYNAMIQUE

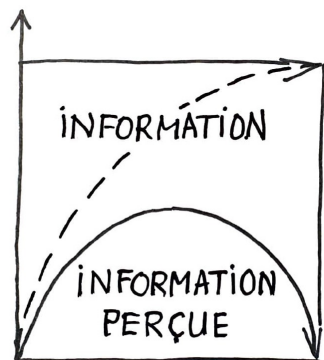
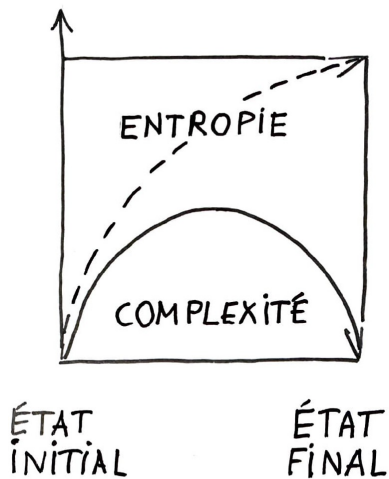


Au XIX^e siècle, **Herbert Spencer** a eu l'intuition que :

1. La complexité se développait quand un état déséquilibré évoluait vers l'équilibre
2. L'hétérogénéité croissait puis décroissait

Dans cet esprit, l'astrophysicien **Sean Carroll** conçoit une expérience de simulation numérique : observer comment deux liquides se mélangent et mesurer l'entropie et l'information perçue (d'après *complexité de Kolmogorov*)

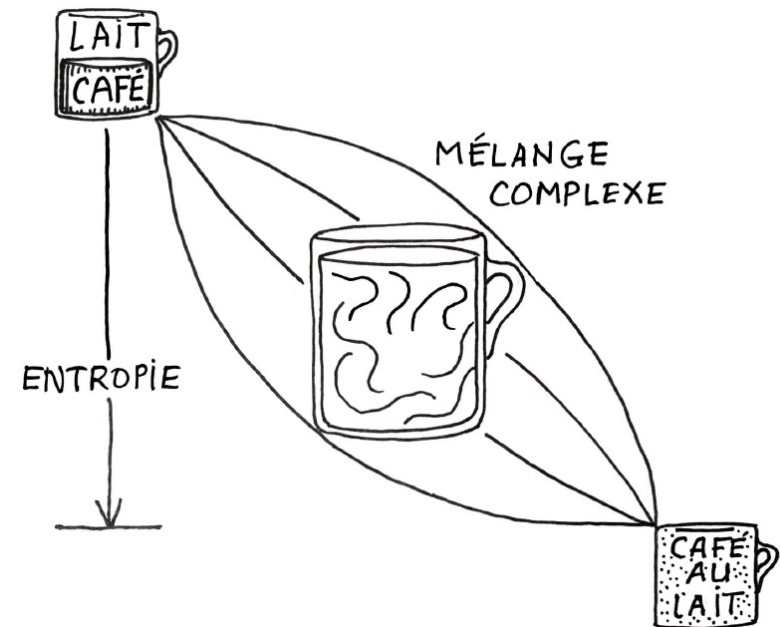
L'automate de la tasse de café de Sean Carroll



L'expérience montre
que l'information perçue
croît puis décroît
Le 2^e principe est le « grand
bâtitteur du monde »
(avant de tout détruire)

Le « 4^e principe de la
thermodynamique » :

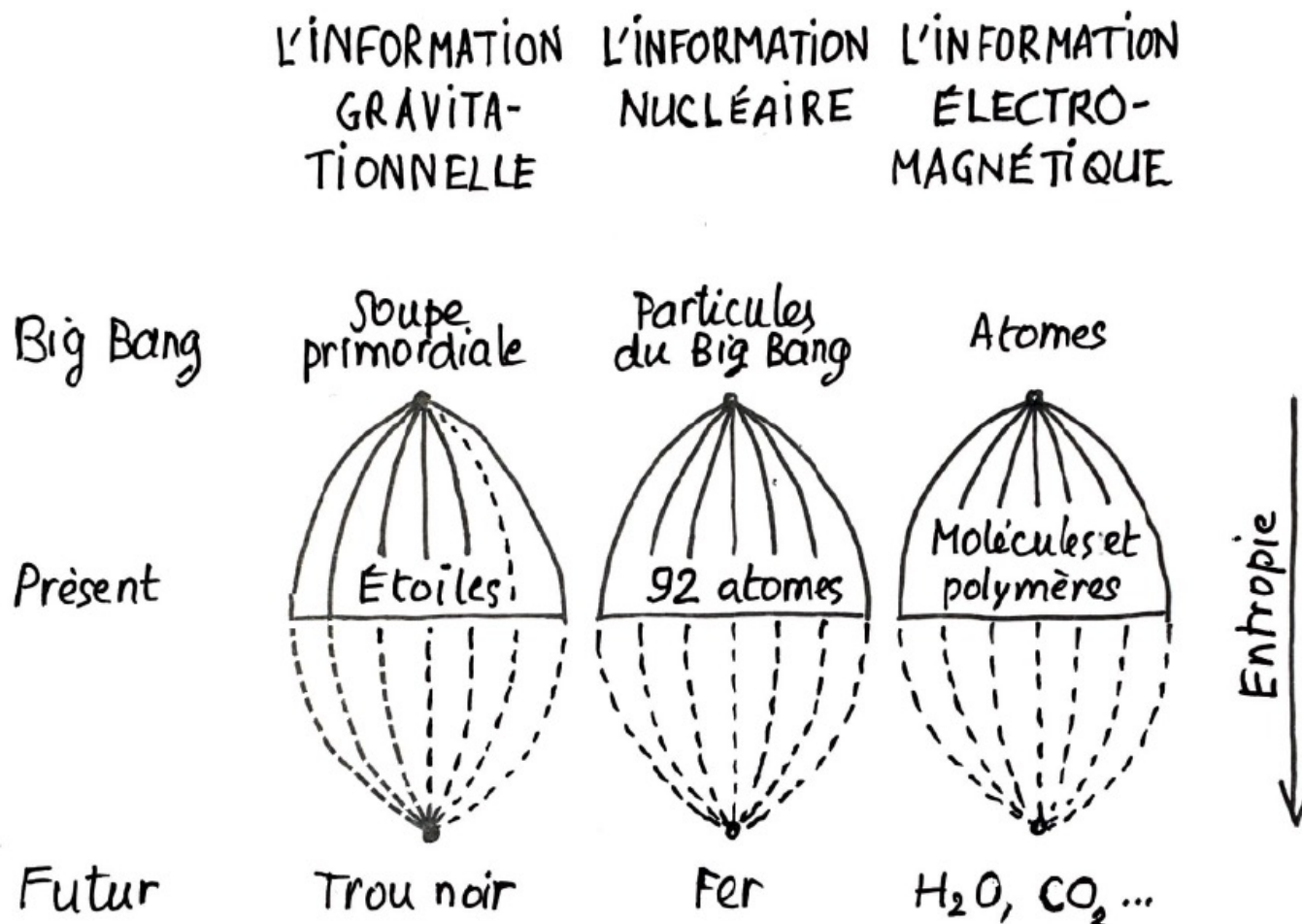
*Tout système traversé par un flux d'énergie entre un état peu
entropique et un autre plus entropique, tend à s'auto-organiser.*

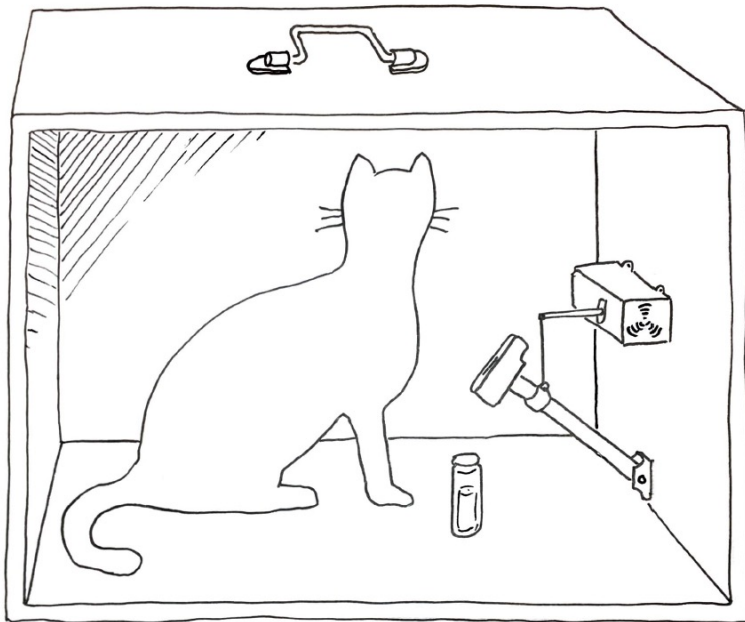


*Comment l'Univers crée
l'information, selon
Hubert Reeves*

Les quatre forces créent
de l'information quand
l'entropie augmente, puis
l'information disparaîtra

L'humanité est apparue
dans l'Univers au bon
moment !





V. LA DÉCOHÉRENCE QUANTIQUE

Un phénomène émergent

Cette transition de phase fait passer de l'état quantique (flou, superposé, intriqué) à l'état classique (déterminé, univoque)

Elle apporte de l'eau au moulin de l'école de *Copenhague* : il existe bien deux mondes, microscopique et macroscopique, obéissant à des règles très différentes

Interprétation du problème de la mesure : il faut accepter la discontinuité de la fonction d'onde lors de la mesure (vs mondes multiples, ou variables cachées)

Interprétation du Chat de Schrödinger : 1. Le chat est dans un monde, la particule dans l'autre. 2. La frontière entre les deux est floue (un nombre statistique d'interactions)

VI. COMBINATOIRE ET AUTO-ASSEMBLAGE

De la décohérence quantique, naît un monde simple et intelligible :

1. La séparabilité : il est fait d'objets bien définis et distincts, par exemple des atomes, des molécules, des cristaux, etc., et non d'un nuage ou d'une soupe indifférenciée
2. La localité : ces objets se disposent clairement dans un espace
3. La temporalité : il est possible de définir un temps et d'y voir se dérouler les phénomènes dans un ordre non ambigu
4. La flèche du temps : naît du 2^e principe

(Ces caractéristiques sont fausses dans le monde microscopique quantique)

Elles permettent de décrire le monde par une **combinatoire** et expliquent que le
« livre de l'Univers soit écrit en langage mathématique »

L'Univers se structure par niveaux hiérarchisés comme le langage

LES 4 LEGO DE LA MATIÈRE

1er Lego : **les particules** (12 pièces)

2e Lego : **les atomes** (92 pièces)

3e Lego : **les molécules minérales** (2 000 pièces)

4e Lego : **les macromolécules** (infinité de pièces)
(*protéines, ARN, etc.*)

LA STRUCTURE DU LANGAGE

10 formes utilisées par les lettres

96 caractères sur un clavier de PC

2 000 mots usuels

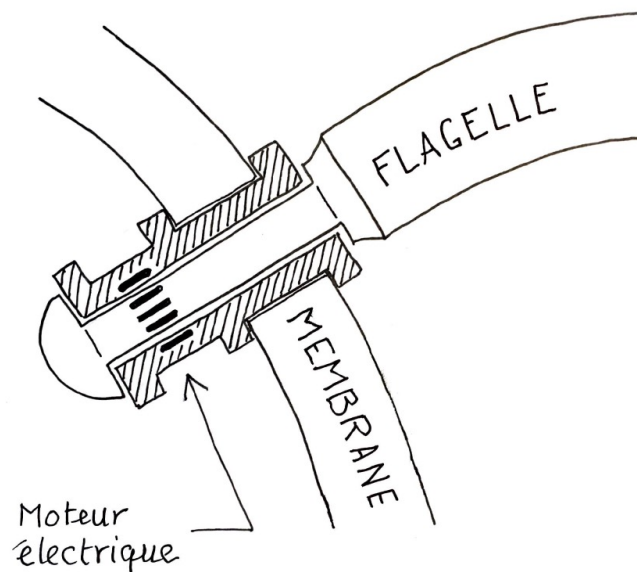
Une infinité de textes

L'auto-assemblage dans le monde du vivant : « la recette de cuisine est écrite dans les ingrédients »



Sydney Brenner observée l'auto-assemblage des 959 cellules du ver *Caenorhabditis elegans* (toujours dans le même ordre)

Le flagelle d'une bactérie naît de l'auto-assemblage de 40 protéines. La force efficiente à l'origine de cet assemblage est ... le hasard (l'agitation thermique)



La cellule humaine se démonte entièrement et se réassemble sur un cycle de 3 semaines (tout sauf l'ADN)
L'organisation est potentiellement présente dans le substrat (elle provient de l'information génétique)

CONCLUSION

Quelques évolutions souhaitables pour les sciences

1. Développement des sciences de la complexité, des notions d'émergence et de *contraintes causes efficientes*

Plus de simulation numérique, plus d'empirisme (vs les illusoires *théories du tout*). Utilisation de l'IA.

2. Pour dépasser le mythe newtonien :

- Théories *relationnelles* vs *dépendantes du cadre* (e.g. *théorie de la gravité quantique en boucles*). Besoin d'avancées en mathématiques.
- Étude des discontinuités plutôt que des variétés continues et dérivables (e.g. *théorie des bifurcations, théorie des catastrophes* de René Thom)

3. Dans le sillage d'I. Prigogine : étude des *systèmes ouverts éloignés de l'équilibre*
4. Nouvelles théories liées aux échelles (e.g. Laurent Notalle, *renormalisation*)
5. En MQ : clarification de la transition de phase entre monde microscopique et macroscopique, et de ses conséquences épistémologiques

* *

*

« La science a exploré le microcosme
et le macrocosme... La frontière
inexplorée est la
complexité. »

Heinz R. Pagels

Michel Galiana-Mingot

m.galiana@mgm-ec.fr

<https://mgm-ec.fr/livre-univers-millefeuille>

