

# Au-delà de l'entropie classique : L'évolution comme processus de création sous l'effet de la contrainte

## Beyond classical entropy: Evolution as a creative process under the effect of constraint

Claude P. Bruter<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Ancien Professeur du Département de Mathématiques de l'Université Paris 12, France, bruter@u-pec.fr

**RÉSUMÉ.** L'auteur revient sur les définitions classiques de la notion d'entropie dont il critique l'usage dans des situations inappropriées. Sous-jacente à cette notion est celle d'évolution pour laquelle sont proposées diverses caractérisations.

**ABSTRACT.** The author returns to the classic definitions of the notion of entropy, the use of which he criticizes in inappropriate situations. Underlying this notion is that of evolution for which various characterizations are proposed.

**MOTS-CLÉS.** Entropie, Ordre, Stabilité, Evolution, Mutation.

**KEYWORDS.** Entropy, Order, Stability, Evolution, Mutation.

### 1. Introduction<sup>1</sup>

Les propos présents s'inscrivent dans le cadre de l'observation faite sur un minuscule domaine de l'univers, notre terre et son environnement. On y observe un phénomène d'évolution, un phénomène créatif de nouveaux objets. On est amené à faire l'hypothèse que ce phénomène est universel, et l'on entend bien le décrire et le comprendre, notamment à l'aide de représentations mathématiques fiables. Les premiers travaux en ce sens ont porté sur un milieu physique simple d'accès, celui de molécules de gaz. L'évaluation de l'une de ses transformations possibles, de son évolution, a été exprimée à l'aide d'une fonction espérée non négative, croissante, appelée l'entropie. On a privilégié dans cette étude la variation des températures liée à des apports ou à des retraits de chaleur. On aurait pu s'intéresser uniquement aux variations de pression. Lorsqu'on accroît la pression à volume égal, un milieu constitué de molécules d'eau peut changer de phase : de gazeux où il se trouve sans structure véritable, il peut finir par devenir solide et autrement organisé en son intérieur. C'est sous l'angle de la pression exercée par son environnement que l'on va examiner l'évolution d'un milieu, et proposer des indicateurs numériques caractéristiques de cette évolution.

---

<sup>1</sup> La rédaction de cet article m'a été proposée par Alain le Méhauté. Il souhaitait voir traiter le thème « entropie et morphologie ». Je ne me suis senti aucunement capable d'aborder cette question de manière sérieuse. Il faut distinguer en effet la morphologie extérieure ou morphologie d'apparence de la bien complexe morphologie interne.

Non sans crainte, j'ai quand même accepté sa proposition. J'avais autrefois employé le terme entropie et proposé une définition pour ce terme dans des contextes assez différents des contextes classiques. La rédaction de l'article me donnait la possibilité d'essayer de justifier ou de reconsidérer cet emploi, également d'essayer de le rendre plus opérationnel en lui donnant une assise scientifique plus établie. J'entreprends donc ici ce voyage aventureux.

Par ailleurs, le chapitre VI de mon livre, « *Les Architectures du Feu, Considérations sur les Modèles* » [BRU 82], contient plusieurs pages (sous-chapitre 6.2, pages 138-151) consacrées à la notion d'entropie. Plusieurs distinctions de cette notion y sont introduites.

## 2. Le fond du problème: la notion classique d'entropie physique et ses limites

### 2.1. Petits rappels historiques

La notion d'entropie est née dans le cadre de l'observation du monde physique, à une époque où commençait à s'affirmer la notion d'évolution avec pour précurseurs entre autres, Buffon, Lamarck, Darwin. À cette époque, notamment sous l'effet de la révolution industrielle qu'apportait la construction des machines thermiques, l'on commençait à s'intéresser aux effets de la diffusion de la chaleur et de son utilisation, effets abordés sur le plan davantage pratique par Joule et Thompson, et sur le plan théorique par Daniel Bernoulli, Fourier et Carnot. Le terme diffusion est pris ici au sens large.

On essaie alors de mettre en forme des observations communes à l'échelle macroscopique qui se déroulent dans l'espace, mais aussi dans le temps. À propos du temps, je reviendrai plus loin sur la distinction à prendre en considération entre les phénomènes présents aux échelles microscopiques et aux échelles macroscopiques, liés à aux questions de l'évolution et de stabilité au cours de l'évolution. Selon l'observation courante et immémoriale, un apport de chaleur réchauffe un milieu froid comme la glace, le met en mouvement, il devient en effet petit à petit liquide, puis s'agitant davantage, devient gazeux et se répand dans un milieu plus étendu, moins dense. Il y a donc apparemment un sens naturel de l'évolution spatio-temporelle de certains milieux physiques, évolution dépendant des circonstances intérieures et environnementales, et que l'on voudrait essayer de préciser et de caractériser via une formalisation mathématique, voire d'en montrer la généralité.

Le milieu physique d'observation primaire a été le milieu gazeux. Il était le moins mal connu des milieux physiques, le plus étudié depuis le 17<sup>ème</sup> siècle (Mariotte-Boyle). Au dix-huitième siècle, les chimistes de l'époque, Priestley et Cavendish en Angleterre, Lavoisier en France entreprennent avec succès l'étude de la composition moléculaire de l'air: « *ce n'est qu'en 1780 qu'il établit expérimentalement, avec Laplace, dans un célèbre mémoire, que la chaleur n'est pas un fluide, mais le résultat de l'agitation de ce que les savants appellent déjà des molécules* » [LAP-LAV]. On reconnaît ici l'influence du traité de Daniel Bernoulli [BERN] *Hydrodynamica* (1738) où sont jetées les bases de la **théorie cinétique des gaz**. Bernoulli considérait déjà qu'« *un gaz consiste en un grand nombre de molécules bougeant dans toutes les directions et dont les impacts sur les parois du récipient constituent la pression du gaz. Il considérait aussi que la température n'est que le reflet de l'énergie cinétique des molécules du gaz.* ». C'est à propos de ce milieu de gaz parfait qu'en 1877 Boltzmann reprend la théorie atomique alors encore hypothétique. Il considère un domaine limité et isolé, peuplé d'atomes identiques, analogues à des petites sphères dures en mouvement. Il établit la « *non moins fameuse formule  $S = k \log W$  qui, par l'intermédiaire de la constante « de Boltzmann »,  $k$ , lie l'entropie  $S$  à la probabilité  $W$ . Boltzmann calculait  $W$  de façon combinatoire, en déterminant le nombre (appelé « permutabilité ») de manières possibles de réaliser tel état du système et en supposant que toutes les manières (appelées « complexions ») sont équiprobables...* » [EIN].

### 2.2. Quelques considérations critiques

#### 2.2.1. L'entropie à la Carnot

Avant d'en venir à l'examen des considérations à la Boltzmann, il convient sans doute de dire un mot sur la notion de chaleur. Par curiosité, quelles définitions en proposent deux dictionnaires, l'un récent (Le Robert), l'autre plus ancien (Le Quillet, 1946) ?

Le Robert emploie à deux reprises le terme « sensation » : « sensation résultant du contact avec un corps dans cet état », « État de l'air, de l'atmosphère qui donne à l'organisme une sensation de chaud ». Donc la chaleur est une sensation particulière qui advient en certaines circonstances. En quelle unité est évaluée cette sensation ? Plus loin, sont données, à titre scientifique, deux définitions dont celle-ci: « *grandeur physique qui représente cette énergie et ses modifications dans un système matériel* ». Cette définition rejoint celle donnée par le Quillet : « *forme de l'énergie, qui élève la*

*température des corps* ». On est assez proche de ce qu'en disent Einstein et Infeld de manière plus précise: « *la chaleur, conformément à cette image, n'est pas une forme spéciale d'énergie, différant de l'énergie mécanique; elle est exactement l'énergie cinétique du mouvement moléculaire.* » [EINa] En d'autres termes, la chaleur, en tant qu'énergie cinétique<sup>2</sup> ( $1/2 mv^2$ ), est l'une des modalités de l'énergie, une donnée physique consubstantielle à l'espace matériel, car elle est liée à cet universel qu'est le mouvement qui affecte avec plus ou moins d'intensité tous les objets physiques. Les masses et vitesses étant représentées par des nombres réels, les masses étant positives, la chaleur est représentée par une quantité positive. Cette définition de la quantité de chaleur  $Q$ , puisée dans mon vieux cours de physique:

$$Q = M(T - T_0)$$

$Q$  quantité de chaleur,  $M$  coefficient associé à la masse de l'objet,  $T_0$  température initiale,  $T$  température finale

est conforme aux précédentes puisque la température est définie comme valeur moyenne de l'énergie cinétique de particules en mouvement. Reste à savoir sur quelle portion d'espace spatio-temporel est définie cette valeur moyenne, de quelles particules parle-t-on, où sont-elles : quelle est la température du livre immobile posé devant moi, celle du milieu de la page 36 ? Remarquons également l'imprécision de cette formulation, imprécision car la variable temporelle n'apparaît pas explicitement dans la formule. Les lignes qui suivent immédiatement présenteront ce même défaut. Oublions le coefficient d'échelle  $M$ , et considérons la situation idéale suivante. Soit un transfert de chaleur entre  $A$  et  $B$ , du milieu parfaitement homogène et isolé  $A$  vers le milieu parfaitement homogène et isolé  $B$ , les températures  $T_A$  et  $T_B$  de ces deux milieux étant supposées bien définies. En donnant de sa chaleur à  $B$ , de manière supposée instantanée,  $A$  perd de son pouvoir calorifique,  $B$  par contre en gagne : la perte de  $A$ ,  $Q_{A \rightarrow B} = T_A - T_B$  est égale au gain de  $B$ . Cette quantité de chaleur sera également notée  $\delta Q_{AB}$ . Ce que nous dit, nous impose la réalité à travers l'affirmation «  $A$  donne de la chaleur à  $B$  » est que la température  $T_A$  est supérieure à la température  $T_B$ , autrement dit le rapport

$$\frac{T_A}{T_B}$$

est supérieur à 1, et donc

$$\frac{T_A - T_B}{T_B} = \frac{\delta Q_{AB}}{T_B} = \delta S \text{ est positif.}$$

C'est cette dernière quantité qui est qualifiée de variation d'entropie  $S$ . Un don d'énergie sous forme de chaleur, d'agitation moléculaire, est représenté par une augmentation d'un rapport numérique appelé entropie. En l'occurrence il s'agit d'un phénomène discret, mais que l'intuition physique tend à rendre continu, lorsqu'on est en présence notamment de ce qui paraît être un continuum homogène et spatialement très dense de particules en mouvement: on admet que  $\delta S$  peut devenir  $dS$ .  $dS$  conservant le caractère positif, la fonction  $S$ , l'entropie, est croissante.  $S$  est une fonction liée à des échanges de quelque chose appelée chaleur et dépendant des températures du milieu considéré avant et après échange. Pour être plus précis, cette fonction devrait également dépendre de la variable temporelle  $t$ . Notons qu'on ne dit rien ici sur l'état du milieu  $B$  après qu'il ait reçu  $Q$ .

<sup>2</sup> Puisque l'énergie cinétique est une fille voire une petite-fille des deux idées-mères que sont, par l'intermédiaire la vitesse, le changement et l'énergie, la chaleur et l'entropie n'ont donc pas été inscrites dans [BRU 21] dans la petite cohorte des idées-mères.

Les propriétés de cette fonction associée à cette expérience de pensée simpliste ont inspiré cette vision de l'évolution, une vision quelque peu romanesque voire romantique : comme celle du devenir de la lave rougeoyante émergeant des flancs du volcan, l'histoire de l'univers serait en partie celle associée à la production d'une phénoménale quantité de chaleur au sein d'un fourneau à la puissance titanesque, chaleur qui se déverserait petit à petit dans l'espace, et, le refroidissant, le structurerait en formes nouvelles. Frappé par un autre objet, un objet donné, simplement propulsé si sa structure interne n'est pas affectée par le choc, assimilant en son intérieur l'énergie reçue, devient peu ou prou modifié dans sa structure et par suite dans son comportement, des sauts d'électrons et bien d'autres mouvements subtils pouvant advenir en son intérieur : il y a évolution.

Cependant, si la plus ou moindre grande agitation des éléments, leur plus ou moins grande vitesse de mouvement est un phénomène universel, les échanges de chaleur qu'on peut leur attribuer sont loin d'être les seuls permettant d'expliquer les naissances et transformations des objets. On n'a pas besoin de thermodynamique pour décrire le mouvement de la terre autour du soleil, et, s'il faut certes prendre en compte les effets des ondes de chaleur (phonons) à l'extérieur et à l'intérieur des objets, le rôle des affinités et autres champs de forces (de nature essentiellement électrostatique et électrodynamique<sup>3</sup> est également essentiel en biochimie.

### 2.2.2. L'entropie à la Boltzmann

Revenons alors à ce premier examen d'un certain milieu gazeux, celui de Boltzmann. On est en présence de ces trois phénomènes du monde physique, éventuellement observés à ce niveau encore macroscopique ou hypothétiques:

- l'existence de particules identiques au sein d'un certain « espace naturel » non précisé, particules pouvant former un ensemble, un conglomerat plus ou moins dense, et occupant un volume éventuellement limité dans cet espace,
- une agitation possible de ces particules dans leur milieu, agitation engendrant une sensation de chaleur d'autant plus marquée que l'agitation est vive, une quantité de chaleur, une température, ou équivalent à cette quantité de chaleur, une quantité d'énergie cinétique, l'énergie cinétique globale étant la somme de l'énergie cinétique moyenne  $1/2mv^2$  de chaque particule.
- la possibilité pour ces particules de franchir l'enveloppe du volume qu'ils occupent, quitte à la briser, pour peupler un domaine plus étendu de l'espace naturel où ils seraient plus libres de se mouvoir.
- Sont en jeu ici,
- la présence de particules identiques qu'on pourrait par exemple caractériser par leur forme et leur masse communes,
- leur agitation évaluée par leur vitesse et leur énergie cinétique supposées communes,
- mais également les propriétés de l'espace qui les renferme, susceptible d'une sorte d'expansion.

On définit l'entropie, cette fois-ci, à partir de l'ensemble des configurations possibles que des molécules peuvent occuper dans un espace donné. C'est ici cette possibilité, cette potentialité de transformation du contenu de l'espace que l'on souhaite exprimer par le symbole et évaluer par le nombre  $S$  associé à la fonction dénommée l'entropie. Le symbole est celui de l'inégalité associé à une fonction croissante.

Ce modèle de l'évolution d'un milieu physique particulier est évidemment trop réducteur, ne serait-ce que par la prise en considération d'un milieu peuplé de particules absolument identiques. Il

---

<sup>3</sup> [https://fr.wikipedia.org/wiki/Champ\\_de\\_force\\_\(chimie\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Champ_de_force_(chimie))

s'agit naturellement d'un leurre. Il n'existe pas deux objets identiques dans la nature, c'est là une fiction de mathématicien. Une thermodynamique basée sur une telle hypothèse de départ est donc en toute rigueur inexacte. Elle donne alors seulement une certaine indication sur l'état d'un certain monde physique, à nuancer et à préciser selon les circonstances.

On avance bien sûr dans le réalisme quand on se réfère à l'observation de propriétés présentes en moyenne. On entre alors dans le cadre de l'entropie statistique, probabiliste. C'est le cadre plus sérieux dans lequel les physiciens comme Einstein travaillent: « *Einstein considérait que les justifications données par Boltzmann de cette équiprobabilité des « complexions » étaient soit arbitraires soit imparfaites. Aussi proposa-t-il d'adopter de nouvelles hypothèses moins artificielles... W n'était plus seulement une permutabilité; W représentait véritablement une probabilité - condition nécessaire à l'inversion du rapport entre la dynamique microscopique et la thermodynamique (macroscopique).* » [EIN] La difficulté pratique immédiate que l'on rencontre tient au fait, qu'en général en matière de probabilité, les tribus à partir desquelles on opère ne sont pas matériellement définies et accessibles. On pense par exemple ici aux fonctions de densité introduites en mécanique quantique. Par ailleurs, du point de vue physique, existent plusieurs types de statistique, comme par exemple celles de Bose-Einstein ou de Fermi-Dirac. À propos de l'emploi de la mécanique statistique, on notera l'observation critique de Costa de Beauregard [CDB]: la croissance de l'entropie évaluée dans ce cadre résulte d'un principe physique posé a priori, traduction de l'observation « courante ». Par ailleurs il est clair que l'appel à l'emploi des probabilités révèle nos difficultés à pénétrer dans la forêt des éléments qui participent à la création des états, des situations, au jeu de leurs interactions complexes. Par ailleurs également, dans les expériences de pensée, on fait l'impasse sur le *deus ex machina* qui intervient quand, par exemple, on ouvre une porte ou une valve pour permettre la diffusion d'un gaz d'une chambre pleine dans une autre que l'on suppose vide. Pour permettre cette diffusion, l'ouverture de la porte demande a priori une certaine énergie qui devrait être prise en compte. Le domaine physique que l'on considère n'est donc pas aussi isolé qu'il y paraît. Rappelons que ce que les physiciens appellent le second principe,  $\delta S > 0$ , n'est vrai que pour les systèmes isolés. Enfin, les manières dont les particules se répandent dans le milieu extérieur, interagissent, soit entre elles soit avec d'autres éléments contenus dans ce milieu, sont loin d'être toujours prises en considération. Les propriétés métriques (i.e. physiques) de l'espace, les vitesses locales des particules, leurs frottements, les manières de chocs et de diffractions possibles, voire leurs assemblages, voire leurs évanouissements, plus généralement les différents modes de diffusion des particules en fonction des propriétés diverses du milieu sont ignorés de la formulation initiale de l'entropie probabiliste.

Comme nous en sommes tous conscients, les conclusions qu'on tire souvent de nos formules proviennent des efforts intellectuels pour les rendre conformes à certains de nos a-priori de perception et de pensée, qu'ils se présentent sous la forme de convictions, de certitudes ou de rêveries et d'espérances, ou qu'ils résultent d'observations sérieuses. En conformité avec le souhait de parvenir à donner une représentation formelle acceptable du phénomène de l'évolution, initialement à travers entre autres des considérations basiques sur la flèche du temps, faire de l'entropie une quantité croissante semble être devenue en quelque sorte l'obsession de ce que l'on pourrait qualifier de manière très caricaturale d'idéologues. Sur ce plan, l'échec est patent. Deux exemples, dont voici le premier :

– la notion primitive d'entropie étant évidemment trop rudimentaire pour être réellement pertinente, Boltzmann lui-même, en collaboration avec Maxwell, a rapidement introduit une équation décrivant une dynamique gazeuse plus étudiée. On l'appelle l'équation H. On pourra



consulter l'article [9] le plus récent et très détaillé où l'on traite de cette équation non triviale<sup>4</sup>. Dans cette équation, la fonction  $f(x, t, v)$  représente la densité statistique de particules en position  $x$  à l'instant  $t$ , animées de la vitesse  $v$ . Un opérateur de collision  $Q(f, f)$  y décrit les fluctuations de vitesse résultant des interactions entre particules. Compte tenu des hypothèses raisonnables faites par les auteurs, l'entropie totale qu'ils utilisent est décroissante. Leur article fait suite à celui de Villani [VIL]. Villani reprend dans son introduction l'énoncé du problème posé par la flèche du temps, sur lequel il est temps d'ouvrir une parenthèse.

Comme le note Costa de Beauregard « L'irréversibilité du temps est postulée bien plus que déduite par les théories statistiques de la physique. » [CDB]. Sur la question de la flèche du temps, on pourra consulter l'article de wikipédia et celui d'Etienne Klein<sup>5</sup> où sont exposés les points de vue « classiques ». C'est d'un autre point de vue que je propose de reprendre ici le problème de la flèche temporelle en faisant appel au concept de stabilité. L'idée centrale est que toute chose évolue en s'efforçant d'acquiescer le maximum de stabilité spatio-temporelle. Peuvent être présentes des phases intermédiaires où la stabilité n'est pas atteinte, ne s'impose pas instantanément. Il en serait ainsi à un certain niveau microscopique où la position spatiale, l'état énergétique ne sont pas complètement stabilisés. Ce serait le fait de la mesure qui stabiliserait le phénomène. À ce niveau auquel nous nous plaçons, la réversibilité de certains phénomènes locaux serait alors possibles. Comme le traduit Schrödinger dans son équation et comme il le dit lui-même, il n'y a pas, dans notre langage, irréversibilité absolue des phénomènes par rapport à ce que nous désignons par temps - sur la définition macroscopique et sociologique du temps cf [BRU 21]. Mais au fur et à mesure de l'observation de l'évolution, et de notre vision en arrière-plan des phénomènes, les objets nouveaux qui apparaissent nous semblent de plus en plus rapidement stables dès leur naissance, ce qui contribue à induire en nous le sentiment, l'intuition de la présence d'un mécanisme général et irréversible d'évolution que nous nous traduisons intellectuellement et symboliquement par l'existence d'une flèche temporelle.

J'en reviens maintenant à Villani qui, dans son article, analyse en détail les travaux essentiellement des mathématiciens concernant toujours un milieu de type « gazeux », très proches des milieux hydrodynamique. On lira avec plaisir les paragraphes qu'il consacre aux paradoxes. Mais aux raffinements nécessaires et approfondis des mathématiciens, on peut parfois préférer les pénétrantes descriptions et représentations du comportement réel des milieux physiques. Ce qui permet d'introduire ce second exemple:

– Les définitions de l'entropie pour étudiants et qui en montrent la croissance, plus exactement la non décroissance, reposent sur des expériences de pensée. Or s'il y eut un expert en cette dernière matière, ce fut bien Einstein. Ses articles de 1902, 1903 et 1904 sur les fondements de la thermodynamique, publiés dans les *Annalen der Physik*, sont tout à fait remarquables. Ils témoignent de sa perspicacité, de ses capacités de compréhension et d'analyse des phénomènes physiques. Dans l'article de 1904, on peut lire la « raison » qu'il donne pour justifier la non décroissance de l'entropie. Voici l'extrait de l'article traduit dans [EIN] où sont introduits des réservoirs de chaleur, placés dans un milieu extérieur à température fixée.

---

<sup>4</sup> Cf par exemple ce qu'en disent les auteurs: : « Given our current understanding of the related hydrodynamic models, and the extra complexity of the Boltzmann equation, the question of well posedness appears to be completely out of reach ». Ils précisent en note: « Here, we mean unconditional well posedness far from equilibrium »

<sup>5</sup>[https://indico.in2p3.fr/event/10362/attachments/1527/1919/Article\\_causalite\\_et\\_fleche\\_du\\_temps\\_Etienne\\_Klein.pdf](https://indico.in2p3.fr/event/10362/attachments/1527/1919/Article_causalite_et_fleche_du_temps_Etienne_Klein.pdf)

Supposons maintenant que ces réservoirs soient mis en interaction avec une machine fonctionnant selon un processus cyclique au cours duquel il n'y a échange de chaleur ni entre les réservoirs de chaleur et le milieu extérieur ni entre le milieu extérieur et la machine. Notons  $E_1, E_2 \dots E_l$ , resp.  $S_1, S_2 \dots S_l$ , les énergies et entropies des systèmes au bout du processus considéré. L'état de l'ensemble des réservoirs, défini par ces valeurs, est affecté de la probabilité :

$$(b) \quad \mathbb{W}' = C_1 \cdot C_2 \dots C_l \exp \left[ \frac{1}{2\kappa} \left\{ \sum_1^l S' - \left( \sum_1^l E' \right) / T_0 \right\} \right],$$

Lors de ce processus, ni l'état du milieu extérieur ni celui de la machine n'ont été modifiés, puisque la machine accomplit un cycle.

Faisons maintenant l'hypothèse selon laquelle à des états de forte probabilité ne peuvent succéder des états de moindre probabilité; alors :

$$\mathbb{W}' \geq \mathbb{W}.$$

Mais, d'après le principe de conservation de l'énergie :

$$\sum_1^l E = \sum_1^l E'.$$

Si bien que les équations (a) et (b) conduisent à :

$$\sum S' \geq \sum S.$$

À travers celle d'états de probabilité, le réaliste Einstein est contraint de faire ici de la non-décroissance de l'entropie une hypothèse. Il n'invoque en aucune façon la présence d'un principe.

Chez les physiciens, un point de vue nuancé sur l'entropie, et qui date déjà d'une vingtaine d'années, est présenté ainsi par Penrose dans son *magnum opus* qui date déjà de 2004: « *Ma vision des choses quant au statut physique de l'entropie est la suivante : je ne la vois pas comme une notion « absolue » des théories physiques contemporaines, mais comme une notion très commode* » [PEN]. Très commode pour quoi faire ? Plus récemment, « *L'entropie de l'univers, usine à gaz* » titrent, ironiques, un couple de physiciens strasbourgeois (Le Monde du 30 Juin 2021): « *Si on envisage enfin l'Univers dans son ensemble, ce processus continu de fragmentation/concentration est toujours à l'œuvre, et l'on comprend pourquoi parler de l' « entropie de l'univers » pose énormément de questions: en évolution permanente selon cette dynamique sélective, il n'explorera jamais toutes les réalisations de ses possibles.* » [DRE] Admettons en effet que l'on définisse l'univers comme le domaine et l'ensemble des objets accessibles par nos moyens de détection, qui sont électromagnétiques. Contrairement au milieu gazeux enfermé, l'univers est un milieu ouvert, et l'entropie classique n'est définie que pour les milieux fermés. L'univers apparaît comme un milieu ouvert et structuré, et donc inhomogène; un milieu hautement structuré, et d'abord par la présence des champs de forces faibles, forts, électromagnétiques, de gravitation auxquels il faudrait ajouter les effets de l'hypothétique matière noire. Et dans ce milieu, on trouve ici pêle-mêle, des fermions, des bosons, des galaxies, des trous noirs, des étoiles de types divers, des planètes, etc, eux-mêmes bien structurés. Rien à voir avec un milieu gazeux constitué uniquement de molécules de morphologies et de vitesses voisines, et dont la température moyenne reflète le degré d'entre chocs et d'agitation aléatoire.

Dans l'ensemble, les exceptions sont toujours présentes, la communauté scientifique a pris du recul vis-à-vis de la pertinence de la notion d'entropie, entre autres chez les biologistes confrontés à la réversibilité locale de certaines réactions. Les approches théoriques de l'école de

Bruxelles (De Donder, Prigogine), dévolues à l'étude du comportement de milieux principalement chimiques en situation d'équilibre, n'ont pas convaincu [BRU 82]; elles restent sans descendance. Les équations stoechiométriques sont très élémentaires et ne rendent pas compte de la richesse de transformations nombreuses, complexes et subtiles qui interviennent simultanément dans les milieux biologiques. Les équations actuelles concernent des données quantitatives et non point les données morphologiques si essentielles dans la compréhension et dans la mise en œuvre des phénomènes. On commence seulement à appréhender la richesse des modes de passage de l'ADN aux acides aminés et aux protéines, et pour celles-ci, leurs structures, leurs assemblages et modes d'assemblages, leurs mutations (cf par exemple les articles cités dans les bibliographies de [CDB] [SCO]). Établir un bilan énergétique bien chiffré d'un assemblage particulier et de son évolution, où sont par exemple présentes des rotations plus ou moins lentes de bras moléculaires, est actuellement hors de notre portée. Tant que la compréhension induite par l'observation et l'expérience n'aura pas atteint un niveau suffisant, la création et la mise en œuvre de modèles pertinents restera illusoire. Un petit progrès récent sur le plan de la compréhension de l'évolution vient de l'observation, chez la souris, de la manière dont l'ADN, dans le milieu neuronal, se casse et se reconstitue<sup>6</sup>, sans doute différemment, après un choc extérieur [DNA]. Si cette observation nous ouvre une porte nouvelle de compréhension à approfondir sur la ou plutôt une manière dont se déploie l'évolution, les conditions de création, de mise en œuvre des transformations physiques et biochimiques locales associés à ce processus de modification épigénétique, de par leur variété et leur immensité, ne nous sont guère accessibles, et ne nous autorisent pas à proposer des représentations mathématiques, des modèles sérieux les décrivant avec une précision suffisante pour être prédictifs, et permettre de caractériser par un seul nombre l'évolution de tout l'univers.

De la conception un peu primitive de l'entropie que se faisaient les physiciens de la fin du 19<sup>ième</sup> et du siècle dernier, ont été tirées des conclusions qui n'ont plus beaucoup cours aujourd'hui, même si elles sont encore à tort très présentes sur internet. On rencontre ainsi plusieurs interprétations du terme entropie. Elles correspondent à des interrogations légitimes, à des manières plus ou moins premières de voir, sous un angle plus ou moins rudimentaire, certains aspects de l'évolution d'un monde physique, inspirés par l'examen du comportement de certains milieux gazeux. L'emploi de certaines de ces interprétations est abusif dans la mesure où l'on entend les généraliser à des situations, à des états bien différents. En l'occurrence on a extrapolé à partir d'expériences de pensée faites originellement sur un milieu physique simple aux propriétés décrites de manière plus ou moins réaliste et complète. Ainsi par exemple, l'emploi du terme *désordre*<sup>7</sup> est-il encore fréquemment employé, et souvent inapproprié, d'autant plus que l'on n'a pas de définition formelle et très générale de cette notion de désordre. Penrose lui-même reprend, cependant à sa manière, l'idée sous-jacente de désordre : « *Grosso modo* [l'italique est de lui], l'entropie est une mesure de la «désorganisation» d'un système » [PEN]. Le terme système n'est pas défini, pas davantage que celui de désorganisation. S'agit-il d'une désorganisation locale ou générale? Locale peut-être, où au moment d'un changement de phases, d'une rupture de symétrie, d'une bifurcation, apparaît une désorganisation nécessaire pour préparer une nouvelle organisation. Mais de l'exemple local en tirer une extrapolation générale, il y a là un pas que l'observation de la Nature interdit de franchir. Considérons le « système » du monde. La molécule, l'arbre, l'insecte, le mammifère, la fourmière qui en font partie ne sont-ils pas au contraire des objets apparus aux fil des temps, richement et admirablement organisés, de plus en plus organisés ?

En fait, derrière les notions de désordre ou de désorganisation est présente, sous-jacente, en arrière-plan, celle plus profonde de transformation. Il est d'ailleurs nécessaire de rappeler que

---

<sup>6</sup> On est en présence d'un déploiement de la mutation rapide standard. On retrouve ici les fondamentaux de la bifurcation qui s'accompagne d'une déstructuration rapide suivie d'une restructuration non moins rapide.

<sup>7</sup> On peut penser que l'emploi de ce terme provient de l'observation du morceau de glace bien organisé qui, chauffé, finit par se transformer en vapeur, un milieu gazeux sans organisation interne: présentement, l'apport de chaleur désorganise.



« transformation » est le sens original du terme entropie : « *l'entropie du corps, d'après le mot grec η τροπη une transformation. C'est à dessein que j'ai formé ce mot entropie* » écrit Clausius en 1875. Les questions concernent alors la description des transformations, celles des formes multiples de leurs origines possibles, celles de leurs devenir.

### 3. Au contraire de la désorganisation, l'évolution

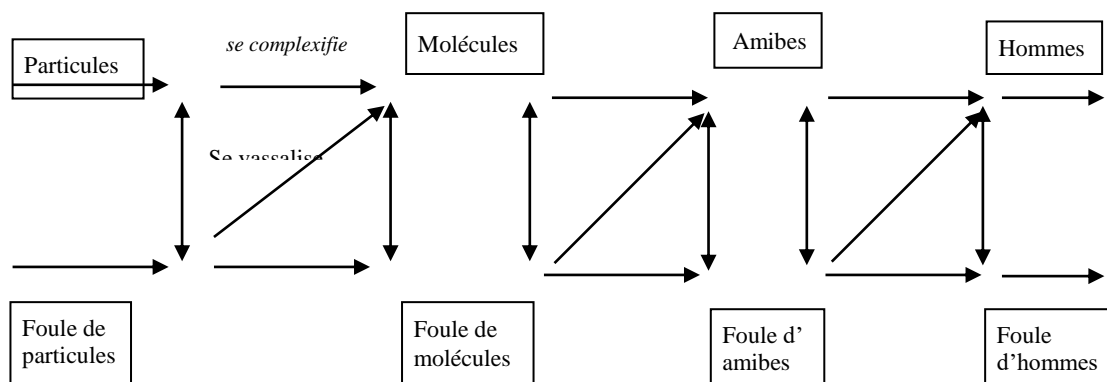
Aussi, plutôt qu'à la désorganisation apparente du monde, c'est, au contraire, à son organisation qu'il convient de s'attacher, sans doute vaudrait-il mieux dire à ses modes d'organisations. Ils sont multiples, de plus en plus nombreux, et heureusement, l'expansion observée du domaine spatial permet à chacun d'eux de trouver une niche au sein de laquelle il a la possibilité de se déployer et d'engendrer de nouvelles organisations. Parler de « désordre thermodynamique » comme je l'ai encore entendu tout récemment à l'intention d'enfants n'est pas acceptable. Certes, de multiples questions se posent, comme par exemple pourquoi et comment ces modes d'organisation se mettent en place, peut-on les caractériser ? Sont-ils propres à notre Terre ou bien se produisent-ils également en d'autres lieux de l'univers et sous quelles formes ? On reprend ici l'hypothèse commune que ce qu'il advient chez nous a pu et peut se produire ailleurs.

À la question du pourquoi, la réponse, surtout complète, nous échappe totalement puisqu'elle renvoie aux questions de l'existence et de l'origine de l'univers, du domaine spatial et des champs qu'il abrite. Et peut-être ces questions, au moins les plus primordiales d'entre elles, sont-elles en partie inconvenantes. Provenant de notre manie de questionner et de notre aveuglement associé à notre constitution, elles ne devraient pas probablement être posées, parce que nous sommes des éléments intrinsèquement constitutifs de ce monde. Seules quelques-unes de ses transformations parviennent à nous faire sens. De ce qu'il nous semble en savoir, cet univers se présenterait sous la forme irradiante d'une énorme capacité d'énergie, se déployant à travers un certain espace non borné a priori, mais un espace élastique en quelque sorte, une élasticité caractérisée, en partie, par un tenseur local de ce qu'on nomme une énergie (on ne sait pas bien sûr si, physiquement, le phénomène de gravitation s'étend uniformément jusqu'à l'infini). La notion centrale sous-jacente donc est celle d'expansion ou encore de dilatation, une dilatation présente presque partout, et sans doute rarement linéaire.

Dans un milieu confiné, les mouvements sont restreints. Les constituants de ce milieu sont plus ou moins, et de diverses façons, collés les uns aux autres ne serait-ce par la présence des champs dans lesquels ils baignent. Ils peuvent avoir la possibilité de s'agglomérer plus intimement en fonction de propriétés spécifiques qu'ils partagent avec quelques-uns seulement de leurs voisins ou des membres de toute la communauté, enfermée dans l'espace volumique qui leur est en quelque sorte attribué. Mais que ce volume vienne à s'élargir, alors apparaissent des possibilités d'écartement les uns des autres, de mouvements, de déplacements de chacun des constituants. Ils peuvent alors se lier de manière peut-être inattendue avec certains de leurs congénères, avec quelques-uns d'entre eux nouvellement apparus pour former de nouvelles entités.

Ce que, à mon sens, sous-entend ou plutôt traduit l'expression du second principe de la thermodynamique est « simplement » cette possibilité d'ouverture à des programmes de création d'organisations nouvelles. Elle est dépendante non seulement des capacités énergétiques des constituants, de leurs caractéristiques propres, mais aussi de cette possibilité d'acquérir ou de se plonger dans un espace plus large, également d'une sorte de capacité élastique de l'espace à s'étendre. À l'heure actuelle, quelle que soit l'échelle à laquelle nous regardons les phénomènes, on observe des mouvements et donc des transformations dont nombre apparaissent plus ou moins cycliques, parfois localement erratiques comme celles des molécules d'hydrogène dans une portion de notre milieu aérien, alors que d'autres sont conséquences d'explosions qui éjectent leurs constituants à travers tout l'espace, alors que d'autres encore se dirigent vers des attracteurs situés à des distances finies, ont donc un caractère local, ou bien au contraire pourraient se diriger vers des

attracteurs à des distances potentiellement infinies: on pourrait, après tout, considérer l'expansion de notre univers connu comme l'effet d'attractions vers des domaines encore inconnus qui envelopperaient plus ou moins localement notre univers. Celui-ci est soumis à des transformations internes plus ou moins intenses et de différents types. L'entropie classique se veut être une caractérisation numérique et synthétique de transformations internes de certains de domaines élémentaires et particuliers du monde, présentant des caractères d'homogénéité, c'est une de leurs caractéristique importante. Mais notre monde ne se réduit pas à ces constituants. Il possède une structure interne en évolution, en partie caractérisée par la présence de sous-objets dont on commence, en quelques rares cas et approximativement, à reconstituer l'agencement. On trouvera dans la référence [SAR] un exemple d'essai de reconstitution partielle d'une phylogénie. On découvre rapidement l'étendue des difficultés que l'on rencontre pour rendre compte de manière assez complète et satisfaisante de cette phylogénie: le rôle et l'importance des multiples mutations (par exemple [SCO]) dont les causes sont multiples, les non moins nombreux facteurs épigénétiques qui affectent l'évolution ne nous sont pas ou plus accessibles, ils ne peuvent être guère pris en compte. Le schéma ci-dessous est donc une très grossière et fort restreinte représentation, symbolique en quelque sorte, de deux des grands mécanismes de l'évolution:



Que sous-entend le terme « se complexifie » ? Il se rapporte à des changements de constitution et de fonctionnement provenant d'une auto-adaptation aux manifestations de l'environnement interne comme externe, accompagnés ou non de chaînes de restructurations locales et de mutations internes. Le verbe « se vassalise » concerne deux phénomènes:

- un phénomène de création d'une structure sociale à partir d'éléments d'une même famille. On part d'un ensemble d'éléments relativement homogènes, de même constitution structurale, ce sera au départ, des particules élémentaires, des molécules de gaz, des colonies cellulaires, d'êtres vivants, qui se structurent en sociétés plus ou moins organisées,
- et qui servent également de réservoir et de source d'« énergie » nécessaire à la stabilité des objets plus avancés qu'eux-mêmes dans l'évolution. Ici le terme « énergie » doit être pris dans un sens large. Ce peut être une énergie primaire, comme celle libérée par un gaz qui brûle, mais ce peut être aussi une énergie plus élaborée comme une molécule organique, le contenu d'un aliment, voire une société bactérienne comme celle que l'on trouve dans le microbiote, et qui se trouve intégrée au sein d'un objet plus avancé dans l'évolution et plus complexe.

#### 4. Caractériser l'évolution : suggestions élémentaires

L'évolution semble être un phénomène inscrit dans l'intimité de la nature. On en trouve la trace au niveau le plus profond de la physique actuelle à travers la présence de la violation des deux

symétries dites CP (C pour charge, P pour symétrie miroir), à travers également la présence de la chilarité<sup>8</sup>. À l'échelle humaine, observons par exemple le mouvement suivi par nos démarches intellectuelles: les représentations qu'elles établissent ont tendance à être les plus simples à leur origine, à s'élargir et à devenir de plus en plus riches et complexes au fil du temps. C'est par la présence de champs physiques que semble se structurer le contenu premier de l'univers. Comment, de manière même approchée, on le sait fort peu. Le regard sur la carte ciel donne évidemment l'impression d'un certain désordre dans la distribution de son contenu matériel. Cette apparence et appellation de désordre traduisent notre incompetence à établir la manière dont s'est constitué et se développe l'univers. Une description statistique à la Boltzmann Shannon d'un environnement planétaire comme celle introduite dans [KIP] n'apporte aucune lueur sur le mode physique de construction de cet environnement.

Notre terre, avec bien sûr son atmosphère constitutive, occupe également un domaine ouvert. Les divers rayonnements qu'elle reçoit, son mouvement propre et celui de nombre de ses éléments qui résultent de la gravitation, contribuent à maintenir et à enrichir son potentiel calorifique. Celui-ci est d'abord défini de manière interne par la nature, la quantité et le mouvement des composants matériels de la planète - dont on fait grand cas aujourd'hui. Ce potentiel calorifique et son emploi ne sont pas les seules données et raisons à l'origine de l'évolution de notre planète et de la totalité de son contenu, plus ou moins animé. Parmi d'autres, et notamment les actions diverses des milieux animés, les subtils phénomènes électromagnétiques y occupent une place centrale à travers les créations chimiques et biochimiques.

Pour essayer de comprendre le mode d'évolution de cette entité planétaire, pour introduire des caractéristiques numériques qui se raccordent plus ou moins à la notion d'entropie à la Boltzmann, nous allons porter l'attention sur la notion générale d'interaction et sur les effets de ces interactions. Soit un ensemble  $O_t = \{O_{1t}, O_{2t}, \dots, O_{Nt}\}$  de  $N$  objets appelés « collègues », et deux objets  $O_{it}$  et  $O_{jt}$  de cet ensemble en interaction. On pourra considérer ici chacun de ces objets comme participant à l'environnement de tous les autres. Par l'intermédiaire des champs dont ils sont porteurs,  $O_{it}$  exerce au plus  $f_{ijt}$  actions différentes sur  $O_{jt}$ ,  $O_{jt}$  exerce au plus  $f_{jit}$  actions différentes sur  $O_{it}$ . Ces nombres  $f_{ijt}$  sont en général importants, notamment dans les milieux biologiques. Notons par  $\{N\}$  l'ensemble des entiers  $\{1, 2, \dots, N\}$  et par  $\{N/i\}$  l'ensemble précédent d'où  $i$  a été supprimé.

- $O_i$  exerce donc au plus  $\sum_{k \in \{N/i\}} f_{ikt} = A(O_{it})$  actions sur l'ensemble de ses collègues.
- Il « subit », de la part de ses collègues, l'action  $\sum_{k \in \{N/i\}} f_{kit} = A'(O_{it})$ .

L'ensemble des interactions entre collègues est donc borné supérieurement par

$$\sum_{i \in \{N\}} A(O_{it}) = \sum_{i \in \{N\}} A'(O_{it}) = A(N)$$

Dans la réalité, il se peut qu'il n'y ait aucune interaction entre deux objets, mais aussi que ce nombre d'interactions soit largement positif. Faisons l'hypothèse a minima qu'existe au moins une interaction entre deux objets quelconques, de sorte que l'ensemble des interactions est borné inférieurement par  $N(N-1)$ . Cet ensemble d'objets est considéré à l'instant  $t$ . Interrogeons-nous sur les effets du jeu des interactions sur le devenir de l'ensemble.

---

<sup>8</sup> Cette violation de symétries est une manière de décrire le fait, de rendre compte du fait qu'il y a davantage de matière que d'anti-matière. Une irréversibilité est ainsi inscrite dans l'évolution du monde physique. De la même façon la chilarité indique la présence de dissymétries au sein de molécules par exemple qui entraînent des changements de comportements lors de certaines réactions.

*Remarque préalable:* On peut donner à ces actions une manière d'interprétation physique. On peut concevoir  $A(O_{it})$  comme une forme de *pression* qu'exerce cet objet sur ses voisins, sur son environnement,  $A'(O_{it})$  comme la pression à laquelle il est soumis de la part de cet environnement. L'expression énergétique de ces actions à travers l'évaluation du travail associé à ces « pressions »,  $P(O_{it})$  et  $P'(O_{it})$ , en donnerait une mesure numérique.

L'observation, l'expérience, montrent qu'une pression a tendance à induire des transformations internes caractérisées d'abord, en des durées  $\Delta t$  plus ou moins rapides, par la seule désolidérisation plus ou moins forte d'assemblages, leur remodelisation éventuelle, la création possible d'assemblages nouveaux. Ce sont là des questions de stabilité locale au sein de l'objet dont la potentialité de présence est caractérisée par sa stabilité globale. Ces transformations internes peuvent conduire à des suppressions plus ou moins grandes de capacités d'action, ou au contraire à l'apparition de nouvelles capacités de cette nature.

Soit  $\alpha_{ijt} = \{\dots, \alpha_{ijgt}, \dots\}$  l'ensemble de taille  $m_{ijt}$  de ces assemblages de l'objet  $O_{it}$  modifiés pendant la durée  $\Delta t$  par l'objet  $O_{jt}$ .  $\alpha_{it}$  désigne la réunion des ensembles précédents quand  $j$  parcourt  $\{N/i\}$ , sa taille est au plus égale à

$$\sum_j m_{ijt} = m_{it}$$

On distingue dans  $\alpha_{it}$  trois parties, formant une partition de cet ensemble:  $\alpha_{it}(1)$ , de taille  $m_{jt1}$ , contient les assemblages désolidarisés,  $\alpha_{it}(2)$ , de taille  $m_{jt2}$ , contient les assemblages restructurés,  $\alpha_{it}(3)$ , de taille  $m_{jt3}$ , les assemblages nouvellement créés. On notera, dans la réalité biochimique et surtout biologique, que ce sont des chaînes d'assemblages qui se mettent en place, dont nous mesurons encore mal les longueurs (euphémisme, elles apparaissent de plus en plus importantes au fur et à mesure qu'on affine l'observation). Lorsque les processus de modifications d'assemblages ont pris fin, l'objet  $O_{it}$  est devenu l'objet  $O_{it+\Delta t} = O_{it}$ . Les modifications opérées sur  $O_{it}$  sont fonction des actions provenant de son environnement. Autrement dit

$$m_{it} = (A'(O_{it}))$$

est un nombre de taille élevé. Il en sera donc de même de l'ensemble des modifications qui affectent la population  $O_t$ ,  $\sum_i m_{it} = m_t$ . Le logarithme de  $m_t$ ,  $\text{Log } m_t$ , joue ici le rôle de la fonction de Boltzmann. Son intégrale par rapport à la variable temporelle est un indicateur d'évolution temporelle de la population.

Il convient ici d'introduire ici le principe de stabilité [BRU 21], un principe heuristique, selon lequel « *tout objet s'efforce de maintenir sa stabilité à travers l'espace-temps* »<sup>9</sup>. Il s'agit moins d'un principe que d'un fait d'observation. Il omet volontairement, dans sa formulation générale, de préciser, de définir la notion de stabilité, et d'envisager les éléments qui favorisent ou au contraire peuvent affaiblir cette stabilité. Et parmi ces facteurs, l'environnement occupe une place majeure.

La stabilité  $\sigma(O)$  d'un objet  $O$  est fonction des pressions exercées sur lui-même par son environnement, mais aussi des pressions qu'il exerce lui-même. On écrira ici :

$$\square(O_{it}) = \pi(A'(O_{it}), A(O_{it}))$$

En vertu du principe de stabilité, il semble raisonnable d'estimer qu'en général, la stabilité de l'objet  $O_{it}$ , ( $O_{it}$ ), de par l'accroissement de ses possibilités d'action, est au moins égale à celle de

---

<sup>9</sup> Je remercie le reviewer d'avoir fait ici le lien de cet énoncé général avec celui que La Chatelier avait énoncé en 1884: «*Si on tend à modifier les conditions d'un système en équilibre, il réagit de façon à s'opposer partiellement aux changements qu'on lui impose jusqu'à l'établissement d'un nouvel état d'équilibre.*»



l'objet  $O_{it}$ ,  $\sigma(O_{it})$  : la variation de stabilité  $\Delta\sigma_{t,t+\Delta t}(O_{it}) = \sigma(O_{it'}) - \sigma(O_{it})$  est alors non négative. L'expérience montre que les situations au cours desquelles les restructurations et destructions locales finissent par ruiner la stabilité de l'ensemble sont plutôt rares, mais présentent alors un caractère dramatique sinon tragique. Il est clair qu'aborder le traitement probabiliste et statistique de toutes ces considérations est actuellement hors de portée. Alors comment parvenir à donner des indicateurs permettant d'évaluer, de mesurer cette évolution ?

#### 4.1. Une remarque importante: la dualité au sein de la nature<sup>10</sup>

Dans la définition des objets qui apparaît dans [BRU 82], deux de leurs propriétés, indissociables, méritent ici d'être soulignées :

– la première, à laquelle on est habitué d'abord par la vue pour les plus accessibles et communs d'entre eux, est celle de leur matérialité. Les objets, considérés sous ce premier angle, seront parfois appelés des « *corpuscules* ».

– la seconde de leurs propriétés à laquelle d'ordinaire on ne prête pas assez attention, est celle d'avoir une influence sur leur environnement, dans un autre langage plus physicien d'exercer des forces sur certains des objets présents dans leur environnement, en bref d'être source de champs de forces. Assimilés aux champs de forces qu'ils génèrent et à la propagation de ces forces, la ou les manières dont elles se propagent, ils pourront, vus sous cet angle, parfois être appelés « *ondes* ».

Parler d'une dualité au sein de la nature est une autre manière, un peu moins détaillée, de rappeler cette double propriété intrinsèque des objets d'être à la fois « ondes et corpuscules ». Se pose alors naturellement la question de l'évolution de ce tandem. Quelle est la relation entre la composition ou encore la complexité du corpuscule et la multiplicité et l'étendue des champs d'action qui lui sont attachés - le cas extrême serait celui du photon de masse nulle, une excitation singulière du champ électromagnétique, associée à ce champ d'étendue infinie ? Y aurait-il une loi de conservation sinon d'évolution assez bien respectée ?

#### 4.2. Sur l'évolution des « *corpuscules* »

##### 4.2.1. Caractérisation moléculaire

La réponse à la question posée en introduction aux paragraphes indicés 4 repose bien sûr principalement sur la connaissance de la phylogénie des objets, sur celle de leur constitution, en d'autres termes sur la façon dont la structure et les fonctions des objets se sont mises en place, et donc également sur la connaissance de leurs effets sur leur entourage. Cette dernière est en général ignorée, son accès est par ailleurs très difficile. Pour établir une telle phylogénie, une des premières démarches intellectuelles consiste à essayer d'établir une classification, une taxonomie des objets de la nature - qui, du point de vue pratique, rencontre de fort grandes difficultés (voir par exemple [SEP]). On possède déjà une classification de particules (et antiparticules) élémentaires<sup>11</sup>, mais on ignore totalement les raisons et les manières physiques qui ont conduit à cette classification.

Le niveau suivant est celui des éléments dits simples, commencer par l'hydrogène puis l'hélium. Le tableau de Mendeleev en offre une première classification à partir du contenu de leurs couches

---

<sup>10</sup> Dans le chapitre 3 de leur livre [EINa], Einstein et Infeld ont consacré un paragraphe sur le thème « champ et matière ». « Nous avons deux réalités, [écrivent-ils]: *la matière et le champ*. [italiques des auteurs]... Il n'y a pas de sens à considérer la matière et le champ comme deux qualités totalement différentes l'une de l'autre.... ».

<sup>11</sup> Elle établit trois générations de quarks et de leptons, en même temps que l'inventaire des « particules » médiatrices des forces qui accompagnent leurs interactions (le photon pour l'électromagnétisme, les particules  $W^-$ ,  $Z^0$ ,  $W^+$  pour la force d'interaction faible, les 8 gluons pour la force d'interaction forte), puis le boson de Higgs qui casse la brisure symétrie de la force d'interaction faible.

électroniques. À nouveau, nos connaissances « généalogiques » sur les composants de ce tableau sont pratiquement inexistantes. Elle se limitent à savoir que certains atomes sont nés dans le creuset infernal de certaines étoiles. Sur le plan des mécanismes physiques, il n’y a pas par exemple, à ma connaissance, de travaux de nature thermodynamique les concernant, c’est-à-dire se rapportant à l’« agitation », à l’énergie cinétique présente au sein des couches électroniques. Cette classification des éléments simples est par ailleurs souvent incomplète, elle ignore ainsi le cyanogène, et notamment par exemple les niveaux excités, les isotopes, les isobares, les formes allotropiques. Dès que l’on quitte le petit royaume de ces éléments, on est en présence de molécules, un champ d’une immense étendue, dont la nature elle-même n’a pas encore employé toutes les potentialités. Là encore, nos connaissances généalogiques sont actuellement très minimes, euphémisme. Par exemple, on dispose d’une liste de molécules constitutives de l’ADN fabriquées par la nature en milieu prébiotique. On trouve dans les planètes de notre système solaire, voire dans l’espace intergalactique, de très nombreuses molécules organiques. Peut-être nous ignorerons toujours quand, où et de quelles façons sont-elles nées, les conditions dans lesquelles elles ont pu s’assembler.

Etant donné les difficultés que nous rencontrons à établir des classifications au sein desquelles sont d’ailleurs présentes de nombreuses boucles rétroactives, seule, en *se plaçant sur le plan pratique, une classification très rudimentaire, tout à fait primaire et approximative des objets, pourrait être accessible*. Elle pourrait par exemple reposer simplement sur la phylogénie, en principe définie à un instant précis, des *types d’atomes et de molécules* (TAM) différents présents dans les objets, une phylogénie établie en correspondance avec celle des objets. Le dénombrement viendrait dans un second temps, nécessitant sans doute la création de nouvelles fonctions, comme celle d’exponentielles d’exponentielles et de logs de logs. C’est le chemin que nous allons suivre.

Vu sous l’angle évolutif, l’ensemble des types d’atomes et de molécules des objets a pour structure un treillis  $\mathcal{T}_{TAM}$ , on l’appellera le *treillis moléculaire de l’évolution*. La racine de ce treillis est constituée par les éléments du sous-ensemble des éléments simples. Ce treillis est censé décrire la phylogénie des molécules, une tâche évidemment impossible à l’heure actuelle. Ce treillis doit normalement, comme toutes les variables qui vont apparaître, être indexée par la variable temporelle: elle restera, ici, sous-entendue, paraîtra en clair si nécessaire. Soit l’objet  $O_j$  et  $\tau_j$  le nombre de types d’atomes et de molécules que contient cet objet.

*Définitions* : On appellera  $\tau_j$  l’*indicateur pondéral primaire d’évolution* de l’objet  $O_j$  et de la famille à laquelle il appartient - on conviendra de dire que *deux objets  $O_i$  et  $O_j$  appartiennent à la même famille* s’ils possèdent le même nombre de types d’atomes et de molécules,  $\tau_j = \tau_i$  et partagent le même sous-treillis ( $\mathcal{T}_{TAM,i} = \mathcal{T}_{TAM,j}$ ) du treillis  $\mathcal{T}_{TAM}$ .

Supposons établi l’inventaire  $I(O_j)$  des types d’atomes et molécules contenus dans  $O_j$ . Cet inventaire s’obtient notamment après l’examen du contenu des grandes familles de molécules présentes dans les corpuscules, comme en particulier les protéines et les hormones. L’inventaire permet de dresser des listes complètes des types d’atomes et de molécules distincts formant les sommets du sous-treillis  $\mathcal{T}_{TAM,j}$ . Soit

$$L(\square_j) = \{l_1(\square_j), \dots, l_k(\square_j), \dots\}$$

une telle liste de longueur  $l^1(\tau_j)$ , l’indice  $k$  désigne un type de molécules particulier. La manière dont cette liste est établie dépend de l’ordre dans lequel on présente le contenu du treillis, mais sa longueur  $l^1(\tau_j)$  indépendante de cet ordre.

*Définitions*: On appellera  $l^1(\tau_j)$  l’*indicateur lexical d’ordre 1* (ou *premier* voire *primaire*) *d’évolution* de l’objet  $O_j$  et de la famille à laquelle il appartient. Si  $O_i$  et  $O_j$  sont deux objets n’appartenant pas à la même famille mais de sorte le sous treillis  $\mathcal{T}_j$  est strictement contenu dans le sous treillis  $\mathcal{T}_i$ , alors  $\tau_j < \tau_i$ ,  $l^1(\tau_j) < l^1(\tau_i)$  : on conviendra de dire que l’objet  $O_i$  est *plus évolué* que l’objet  $O_j$ .

On peut raffiner et élargir à souhait cette nomenclature primaire par l'introduction d'indicateurs secondaires, en prenant par exemple en compte les groupes de symétrie, ou la seule présence d'un type particulier de molécules (comme les protéines, les neurohormones, ou le nombre de bases du DNA et ses structures actives ou redondantes, le rôle des transposons<sup>12</sup>). On pourra également restreindre l'examen du contenu en TAM soit à des complexes moléculaires particuliers constitutifs des objets, soit également de manière un peu plus globale, aux différentes phases (solides (comme les os), liquides (comme le sang), gazeuses)<sup>13</sup>, en lesquels se trouvent certains de ces complexes constitutifs et fonctionnels, ils font partie de la description, de la définition des objets, définition donnée dans [BRU 21].

Des connaissances plus précises sur les dates et les modalités d'apparition des objets permettraient bien sûr de mieux reconstituer la phylogénie et d'en déduire de nouveaux indicateurs relatifs aux évolutions locales de certains caractères des objets, éventuellement paramétrées par des données environnementales. Les progrès en ce sens (cf par exemple la note 7) autorisent un certain optimisme.

#### 4.2.2. Caractérisation fonctionnelle par la capacité d'action

Les quantités de chaleur absorbées ont tendance à induire des mouvements, des possibilités de mouvements, une fois des seuils locaux franchis. Elles peuvent, alors, par exemple, favoriser des liaisons électrostatiques. Cette chaleur peut donc conduire à des transformations immédiates des objets, et induire ainsi, éventuellement, des transformations nouvelles de l'environnement de ces objets. La capacité d'action sur l'environnement de l'objet  $O_j$ ,  $K(O_j)$ , est ainsi, pour partie, fonction de la quantité de chaleur qu'il reçoit, de la température nouvelle qu'il acquière, mais aussi de la quantité de chaleur  $q(O_j)$  qu'il rayonne. Seul, un sous-ensemble de familles d'objets  $\sigma_q(O_j)$ , de taille  $\kappa_q(O_j)$ , est modifié par cette chaleur. Mais enfin, la chaleur n'est pas, elle seule, à l'origine des mouvements divers que l'on peut observer. De manière générale, une force engendre une transformation. Ce peut être une transformation de position (par rotation et translation), de forme apparente, de structure interne.

Plus généralement, on note  $\mathbf{F}(O_j) = \{\dots, f_\lambda(O_j), \dots\}$  l'ensemble de forces distinctes ou plutôt des champs de forces que l'objet  $O_j$  peut, a priori, exercer sur son environnement interne comme externe. L'indice  $\lambda$  appartient un ensemble de taille  $\mathbf{M}(O_j)$ .

*Définitions:* On appellera  $\mathbf{M}(O_j)$  la *capacité d'action a priori* de l'objet  $O_j$  son environnement.

Si  $\kappa_\lambda(O_j)$  désigne la taille de l'ensemble des familles d'objets susceptibles d'être sensibles et modifiés par l'effet de la force  $f_\lambda(O_j)$ , alors

$$K(O_j) = \sum_{\lambda \in \mathbf{M}(O_j)} \kappa_\lambda(O_j)$$

représente la *capacité effective d'action* de l'objet  $O_j$  sur son environnement. On dira que l'objet  $O_j$  est *plus évolué* que l'objet  $O_i$  si

$$K(O_j) > K(O_i)$$

<sup>12</sup>Altae-Tran *et al.* show that three distinct transposon-encoded proteins, IscB, IsrB, and TnpB, are naturally occurring, reprogrammable RNA-guided DNA nucleases (see the Perspective by Rousset and Sorek). In addition to identifying diverse guide-encoding mechanisms, the authors elucidate the evolutionary relationship between IsrB, IscB, and CRISPR-Cas9. Overall, these newly characterized systems, called OMEGA (for obligate mobile element-guided activity) systems, are found in all domains of life and may be harnessed for biotechnology development. —DJ

*Science*, abj6856, this issue p. 57; see also abm2239, p. 37

<sup>13</sup> cf l'Annexe de [BRU 21]

On appellera *environnement accessible* de l'objet  $O_j$ ,  $A(O_j)$ , le domaine spatio-temporel au sein duquel s'exerce l'ensemble  $F(O_j)$  des forces issues de  $O_j$ , et *domaine d'action de la force*  $f_\lambda(O_j)$ , le domaine spatio-temporel  $A_\lambda(O_j)$  sur lequel elle s'exerce. L'environnement accessible est donc la réunion de ces domaines d'action. On notera par  $W(A_\lambda(O_j))$  l'ensemble des objets potentiellement touchés par la force  $f_\lambda(O_j)$ . Si  $O_i$  est l'un de ces objets, on dira qu'il est une *cible* de  $O_j$  pour la force  $f_\lambda(O_j)$ .

À partir de celles que l'on vient de définir, d'autres données peuvent être prises en considération et élaborées. Mais il convient au préalable de faire l'inventaire des différentes forces qu'un objet est susceptible d'exercer, ainsi que de leurs médiateurs. On peut aussi prendre en considération leurs effets. Étant donné le très grand nombre de forces associées à chaque objet, afin de faciliter la description des forces qui en quelque sorte le constituent, on admettra cette

*Règle réductrice* : Si l'objet  $O_j$  est plus évolué que l'objet  $O_i$ , alors  $F(O_i)$  est contenu dans  $F(O_j)$ .

*Définition*: On appellera le complémentaire de  $F(O_i)$  dans  $F(O_j)$ ,

$$(O_{i,j}) = F(O_j) - F(O_i)$$

*l'évolué des forces de  $O_j$  par rapport à celles de  $O_i$  - soit par abus de langage, l'évolué de  $O_j$  par rapport à  $O_i$ .*

Dresser, pour chaque objet, l'inventaire des forces (des champs de forces), à supposer qu'il soit entièrement réalisable, est un travail de titan ... et dresser cet inventaire n'est nullement suffisant: il faut également pour chaque force, dans le contexte de l'objet où elle est présente, préciser son domaine d'action et en donner l'évaluation quantitative maximale. Plaçons-nous à l'instant  $t$ . De  $t$  à  $t + \Delta t$  l'objet  $O_j$  exerce, avec supposée la même intensité, la force  $f_\lambda(O_j)$  sur l'objet  $O_i$ . L'objet  $O_j$  déploie l'énergie, notée

$$E_{t, t+\Delta t}(f_\lambda(O_j), O_i) .$$

Elle est supposée ici conduire en totalité à la transformation de l'objet  $O_i$ .

#### 4.2.2.1. Complément sur l'inventaire des propriétés des objets

À terme, toute force a pour effet de produire un changement. Les principaux changements sont ceux de la position spatiale, de la vitesse et de l'accélération de changement. Ils affectent, avec plus ou moins de vigueur, la totalité des constituants des objets, éventuellement leur structure, leur potentialité énergétique propre. On trouvera la description de quelques-unes de ces transformations spatiales dans [BRU 21]. La question de la définition et de la reconnaissance des champs de forces et de leur contenu n'est évidemment pas simple, euphémisme, ne serait-ce que parce qu'elle est liée à la définition même des objets, à leurs propriétés. Il convient ici d'introduire à leur propos cette remarque complémentaire.

On considère à titre d'exemple deux types d'objet, un objet équestre, le cheval, et, observé en deux périodes de son évolution, un objet humain désigné respectivement par les symboles  $O_{hn}$  et  $O_{hs}$  (l'indice n pour néandertal, s pour « sapiens »). Parmi les transformations spatiales que ces objets peuvent exercer figurent celles qui sont des transports purs, seulement prises en considération dans ce qui suit. On examine donc le transport de nos deux objets précédents d'un point A vers un point B, en lequel se situe un objet O. Le point A est sur terre. Le point B peut être sur terre, proche et noté  $B_{1p}$  ou très distant et noté  $B_{1d}$ , ou bien sur une mer et noté  $B_2$ , ou bien dans l'espace et noté  $B_3$ . Supposons que O soit un aliment, plus généralement une source d'énergie. Il exerce une force d'attraction sur les protagonistes, qui à leur tour vont déployer une certaine énergie pour l'atteindre. Cette énergie comprend plusieurs composantes, en particulier une *énergie de conception* et une *énergie de réalisation physique* affectée au déplacement proprement dit. Pour se déplacer sont mis en œuvre des objets physiques sous la forme d'outils physiques de déplacements. Certains sont



connexes aux êtres, comme par exemple les jambes, ou non. Outils non connexes éventuels : le cheval après sa domestication, les bateaux, vélos, voitures, avion, fusées. Pour se déplacer ont été également mis en œuvres des objets mentaux associés, non point ici la conception des outils de déplacements, mais à la connaissance des propriétés des outils physiques et des modes potentiels de leur emploi.

*De manière générale, on considèrera comme faisant partie de l'objet  $O$ , a priori et donc de manière potentielle, tout objet sur lequel l'objet  $O$  peut exercer des forces lui permettant de maintenir ou d'accroître sa stabilité spatio-temporelle.*

Ainsi, dans l'exemple choisi, cheval, patins à glace ou à roulette, jusqu'aux fusées sont considérés comme faisant partie du corps de l'homme moderne.

#### 4.2.2.2. Une première application à la caractérisation fonctionnelle

Cet exemple illustre une propriété de l'ensemble  $K(O(t))$ <sup>14</sup> qui décrit les sous-objets faisant partie de la constitution l'objet  $O(t)$ , ensemble au sein desquels on devra distinguer les sous-objets proprement physico-chimiques et fonctionnels, et les sous-objets mentaux.

*Définition* : On appellera *degré de connexité physique* de l'objet  $O$ ,  $c(K(O(t)))$ , le *nombre de sous-objets physiques connexes formant une partition de  $K(O(t))$ .*

Il est clair ici, selon ce critère, que le cheval est moins évolué que l'homme de Néandertal, lequel est moins évolué que l'homo sapiens. Si l'aliment est sur terre, à distance assez proche de l'animal et de l'homme, et si l'un comme font la course pour l'obtenir, le cheval pourrait bien arriver en premier. Être le plus évolué n'est pas forcément être, en l'occurrence, le plus gagnant. On conviendra alors de dire que :

**Définition** : À l'instant  $t$ , l'objet  $O_j(t)$  est *potentiellement plus évolué* qu'un objet  $O_i(t)$  si

$$c(K(O_j(t))) > c(K(O_i(t)))$$

### 4.3. Brèves considérations sur les objets mentaux

Il est bien sûr une différence entre l'homo sapiens du XVe siècle et celui des jours présents: seul le second possède la maîtrise de la bicyclette et a été vacciné contre la variole. Ce constat trivial amène à prendre en considération la famille des objets mentaux qui peuplent le monde  $\mathfrak{M}$  de la connaissance et du savoir.

Etant donné un objet quelconque  $O$ , on notera  $K_{\mathfrak{M}(O)}$  l'ensemble  $\mathfrak{M}(O)$  des objets mentaux de  $O$  : ils forment un sous-ensemble de  $K(O)$ , l'ensemble des sous-objets de  $O$ . Nous allons nous restreindre ici au monde  $\mathfrak{M}_{(h)}$  partagé en ces continents que sont les diverses disciplines qui occupent l'esprit des hommes. Tous les objets mentaux humains ont leur souche dans ces continents. Ils réagissent les uns envers les autres avec plus ou moins d'intensité et plus ou moins de simultanéité. La structure de ce monde peut être approximativement représentée par un treillis  $\mathcal{T}_{\mathfrak{M}(h)}$  : biologistes, linguistes, historiens, psychologues entre autres s'efforcent de le décrire, notamment à l'aide de l'incarnation physique lorsqu'elle existe de ces objets mentaux. Parmi les plus récentes de ces incarnations figure tout un ensemble de découvertes et travaux scientifiques, de réalisations

<sup>14</sup> On ne confondra pas la lettre  $K$  associée à la définition d'une capacité d'action et la lettre  $K$  associée à la description de l'ensemble des sous-objets.

artistiques. On note par  $\mathcal{T}_{\mathfrak{m}(h)}(O_i)$  la restriction de  $\mathcal{T}_{\mathfrak{m}(h)}$  pour l'objet  $O_i$ , ici un individu particulier. On dira naturellement que :

**Définition** :  $O_j$  est *potentiellement plus évolué* que  $O_i$  si  $\mathcal{T}_{\mathfrak{m}(h)}(O_j) \supseteq \mathcal{T}_{\mathfrak{m}(h)}(O_i)$ .

#### 4.4. Caractères généraux de l'évolution

Faute entre autres de données statistiques et numériques bien établies, ne sont introduites ici que des considérations d'ordre général. La présentation est faite dans un cadre discret, que l'on pourra toujours lisser en l'inscrivant dans le cadre différentiel. Les considérations qui suivent s'inscrivent dans le cadre de l'introduction du paragraphe 4.

Soit  $D_t$  un domaine de l'espace à l'intérieur duquel se trouvent des objets d'une famille donnée. Davantage est importante la densité d'occupation du domaine, plus grande est la possibilité d'interactions diverses. On suppose connues les causes et les modalités de leurs réalisations. Par souci de simplicité et de clarté, on se limite à la considération d'une fraction de la population globale qui pratique un seul type de d'interaction, pour lequel les causes et les modalités sont bien définies. Soit  $\tau(D_t)$  le nombre d'objets constituant cette fraction à la date  $t$ . Joue un rôle certain dans son évolution la densité de présence, d'occupation du domaine :

$$\delta(D_t) = \tau(D_t) / D_t$$

On suppose que le taux d'interaction ne dépend que de la taille de la population, ou, ce qui revient au même de sa densité. On note par  $\mathbf{u}(t) = f(\tau(D_t))$  ce taux d'interaction.

Par ces interactions, aux facettes a priori multiples, peuvent naître d'autres objets de la même famille sous forme individuelle ou plus généralement collective. Le taux d'évolution de la population considérée à la date  $t$ ,  $\eta(t) = g(\mathbf{u}(t))$ , est ainsi fonction du taux d'interaction - et donc la densité spatiale - mais aussi du « volume »  $E(t)$  de ressources énergétiques appropriées, nécessaires au maintien spatio-temporel de la population, et de facteurs environnementaux  $\varphi(t)$  :

$$\eta(t) = g(f(\tau(D_t)), E(t), \varphi(t))$$

Bien des hypothèses sont plausibles, définissant les principales propriétés des fonctions  $f$  et  $g$ . Elles peuvent traduire :

- des croissances, souvent explosives en leurs débuts
- ou bien des décroissances, très lentes ou soudainement brusques, suivies alors d'extinction.

Par ailleurs, sous l'influence de la présence des données environnementales  $\varphi(t)$ , par effets de mutations en général très rapides, des propriétés nouvelles par rapport aux celles qui existaient dans la population précédente peuvent apparaître. Ces mutations, qui apparaissent en des sous-objets, dépendent de leur stabilité interne. Elles peuvent être sans conséquence, on les dira muettes; elles peuvent être délétères, on les dira létales. On fait l'hypothèse que certaines de ces mutations s'accomplissent pour répondre à des défis nouveaux posés par l'environnement, ont pour conséquence un accroissement de la stabilité de l'objet en présence de cet environnement, et, pour la plupart d'entre elles, finissent par s'inscrire dans la mémoire génomique. On les appellera les *mutations stabilisatrices* ou *bénéfiques*. Elles contribuent à diversifier la population, ainsi qu'à introduire des modalités d'action nouvelles, donc de nouveaux champs de forces potentiels. Si  $\mu(t)$  est le taux de mutations bénéfiques pour la population d'objets considérée, le nombre d'objets ayant muté est  $\mu(t)\tau(D_t)$ . Si l'accomplissement d'une mutation dure  $\Delta t$  et apporte à chaque mutant  $O_k(t)$  un supplément potentiel de  $\chi_k(t)$  champs de forces,  $\chi_k(t)$  est évidemment supérieur ou égal à 1, sa capacité d'action, initialement égale à ( $O_k(t)$ ), devient

$$(O_k(t+\Delta t)) = (O_k(t)) + \chi_k(t).$$

Cette nouvelle capacité d'action pourra servir en partie à créer de nouveaux sous-objets connexes ou non avec les précédents. Leur présence nouvelle peut déboucher sur un agrandissement du domaine initial. Les considérations précédentes valent pour les objets mentaux. Décrire une mutation au niveau biochimique par exemple, n'a rien de simple. Elle s'accomplit pendant une certaine durée que l'on appellera la *maturation* de la mutation, s'accompagne entre autres de réorganisations morphologiques. Le mode de création des mutations dans l'espace mental déploie celui qui apparaît au niveau biochimique. La confrontation, l'assemblage de plusieurs idées déjà présentes, soutenus par une activité biophysique et biochimique intense et complexe, s'accomplissent au cours d'une durée évidemment supérieure à celle d'une seule mutation biochimique. Ce n'est qu'en fin de cette durée de maturation que peut s'affirmer, se stabiliser un nouvel agencement, une nouvelle structuration des idées précédentes, la mise en place d'un nouveau regard sur l'arrière-plan précédent, se présentant sous la forme d'une idée, d'une conception nouvelle.

## 5. Conclusion

On sait que tout objet s'efforce de préserver sa stabilité spatio-temporelle. Cette stabilité est mise à l'épreuve en présence de contraintes environnementales quelle qu'en soit la nature. Leur présence peut engendrer des déstabilisations locales : les objets s'efforcent d'y répondre, de manière plus ou moins rapide, par des modifications internes auxquelles on peut donner le nom générique de mutations, et qui appellent en général des comportements et des agissements différents, voire nouveaux.

La capacité d'action des objets, introduite en 4.2.2, est l'un des paramètres associés à l'évaluation de leur stabilité. Selon le contenu du paragraphe précédent, cette capacité devrait croître avec l'évolution. Elle se comporte comme l'entropie première des physiciens.

Elargissant le champ de ses possibilités d'action, l'objet peut introduire de nouvelles contraintes sur les objets qui l'entourent, et par là induire en eux de nouvelles mutations. Et ainsi, de fil en aiguille, peut s'étendre le champ de l'évolution. La dénomination « capacité d'action » n'est peut-être pas en l'occurrence la plus appropriée, car manquent les références énergétiques associées au terme action et qui devraient ressortir. Affirmer une capacité d'agir sous-entend être assuré d'avoir la possibilité d'agir, en d'autre terme d'avoir la liberté d'agir.

Avec ces explications, peut-être mes collègues physiciens me pardonneront-ils d'avoir élargi le sens du terme entropie et de l'avoir employé dans cette définition (cf : [BRU 21], page 92)

*Définition 8.1:* We call *freedom or entropies* of  $A$  in relation to force  $f$ , the object's capacity  $l$  for resistance when it is subjected to the action of  $f$ .

## Bibliographie

[BERN] BERNOULLI, Daniel [https://fr.wikipedia.org/wiki/Daniel\\_Bernoulli](https://fr.wikipedia.org/wiki/Daniel_Bernoulli)

[BRU 82] BRUTER C.P., *Les Architectures du Feu, Considérations sur les Modèles*, Flammarion, Paris, 1982.

[BRU 21] BRUTER C.P., *The Principle of Stability within the Pantheon of Mother Ideas*, Newcastle upon Tyne, Cambridge Scholars Publishing, 2021.

[CAR] CARPENTIER M. CHOMILLER J., Analyses of displacements resulting from a point mutation in proteins. *Journal of Structural Biology*, 211, 2020.

[CDB] COSTA DE BEAUREGARD O., *Le Second Principe de la Science et du Temps*, Editions du Seuil, Paris, 1963.

[DRE] DRENCKHAN W., FARAGO J., L'entropie de l'univers, *Le Monde*, 21 Juin 2021.

- [EIN] EINSTEIN A., *Œuvres choisies, 1 Quanta*, Editions du Seuil-CNRS, Paris, 1989.
- [EINa] EINSTEIN A., INFELD L., *L'évolution des idées en physique*, Flammarion, Paris, 1983.
- [IMB] IMBERT C., SILVESTRE L., Regularity for Boltzmann equation conditional to macroscopic bounds. *EMS Surveys. Math. Sci.*, 7, p.117-172, 2020.
- [KIP] KIPPING D., Do planets remember how they formed ? *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Volume 473, Issue 1, January 2018.
- [LAP-LAV] LAPLACE-LAVOISIER Mémoire sur la chaleur, *Mémoires de l'Académie des sciences*, 1780, p. 355.
- [PEN] PENROSE R., *À la découverte des lois de l'Univers*, Odile Jacob, Paris 2007.
- [FRE] FRÉDÉRIC R., Mode d'évolution et taxonomie au sein du genre *Aeromonas* : Que nous apprend l'étude de la diversité génétique et génomique. Thèse Montpellier, 2012.
- [SAR] SARROPOULOS ,I. + 12 auteurs, Developmental and evolutionary dynamics of cis-regulatory elements in mouse cerebellar cells *Science*, Vol 373, Issue 6558, 27 Aug 2021.
- [SEP] SEPLYARSKIY V. B. (+ 35 auteurs) Population sequencing data reveal a compendium of mutational processes in the human germ line *Science*, Vol 373, Issue 6558, pp. 1030-1035, 27 Aug 2021.
- [SCO] SCOTT R.T., KRISTY O., TSAI LH., Profiling DNA break sites and transcriptional changes in response to contextual fear learning, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0249691>
- [VIL] VILLANI C., (Ir)réversibilité et entropie, Séminaire Poincaré XV, Le Temps 17 – 75, 2010.