L'ignorance de l'observateur

Entropie, théorie de l'information et temps statistique

Roger F. Cozien
Groupement de Gendarmerie Départementale de la Ville de Paris
12 rue de Béarn
75003 Paris
E-mail : roger_cozien@yahoo.fr

Le temps efface tout, sauf le temps ;
Le temps arrange tout, sauf le passé.

On ne peut changer le passé, on peut juste le dépasser.

Ne te plains pas du temps qui passe, cela te laisse encore moins de temps !

1 Introduction

Si l'on ne peut répondre facilement à la question de la nature du temps, il n'est pas non plus aisé de répondre quant à l'utilité du temps, ni à ses effets, sa couleur ou son goût. Pourtant nous n'arrêtons pas d'en discourir et d'y faire référence, tant entre scientifiques qu'entre hommes du monde. Le domaine des sciences physiques est un grand consommateur de temps. Il ne s'agit pas du temps passé à chercher, mais du concept «*temps*». La physique use du temps dans un nombre important de ses formalismes, mais également dans sa réflexion de fond sur la nature des phénomènes qu'elle veut décrire. La physique comme les autres domaines de la pensée humaine, scientifique ou non, a buté sur cet obstacle colossale de la caractérisation du temps.

Dans un premier *temps*, la physique a contourné l'obstacle en rendant ce concept accessoire à d'autres plus faciles à décrire. Ainsi, en mécanique, peut-on entendre le physicien dire «que le temps est conçu pour faciliter le mouvement». De fait le temps est devenu en mécanique classique une variable mathématiquement comme les autres. En fait, cette variable est celle qui est surtout utilisée pour la dérivation. Ainsi, le mouvement mécanique s'exprime-t-il par la consommation d'une quantité de temps.

La relativité restreinte d'Einstein a bouleversé, voire révolutionné, la vision des physiciens, et des scientifiques en général, sur la nature du *temps* et sur son imbrication avec les trois autres dimensions d'espace. Cette théorie a ouvert la porte à la quantification du temps et en particulier au concept de distribution du temps sur les autres dimensions. Einstein est allé loin dans son développement théorique puisqu'il énonce que tous les objets de l'univers se déplacent à la même vitesse, celle de la lumière. En fait, la vitesse dont il s'agit est composée d'une vitesse spatiale (celle à laquelle nous sommes classiquement habitués) et d'une vitesse temporelle. Les développements sont riches ; nombreux et complexes.

Pourtant, aussi bien en mécanique classique qu'en mécanique relativiste nous acceptons tacitement que le temps s'écoule de la même façon dans l'univers et surtout, nous attribuons un sens à cet écoulement. Or, dans les formalismes «des» mécaniques rien ne donne le sens de cet écoulement et surtout, s'il est insensé d'imaginer que l'on puisse changer son sens, il faut donc chercher ailleurs les pistes permettant d'attribuer une «*flèche*» au temps.

Se sont la thermodynamique, et son développement le plus moderne : la théorie de l'information de Shannon, qui vont nous fournir des éléments de réflexion, voire de réponse. Je tiens à poser tous les précautions préalables nécessaires, tant l'entreprise est ardue et vaste. Pour l'heure, aucune théorie ne rend compte de la nature profonde du temps,et donc ne répond à la question de la flèche du temps.

2 Une petite histoire d'entropie

Il me semble que le concept même de «flèche du temps» est éminemment humain. En effet, nous ne savons pas dire ce qu'est le temps mais, en tant qu'êtres vivants nous en sentons les effets, et en tant qu'êtres doués de raison nous posons des questions sur la cause des effets observés. En particulier, lorsque vous observez un vase qui se casse, les lois de la mécanique n'interdisent pas d'envisager que par un mouvement inverse le vase se reconstitue. Or, nous n'observons jamais une telle réparation. Plus généralement, à toute *dégradation* nous n'observons jamais l'opération inverse spontanée : une réparation spontanée. De fait, nous associons fortement le concept de temps à celui de dégradation. La question se pose donc de savoir si observer un jour un vase qui se reconstituerait spontanément serait équivalent à remonter le temps ?

Ces questions ne se sont pas spontanément posées aux physiciens. De fait, la construction de leur réponse a paradoxalement été décorrélée de ces mêmes questions. Au 19*ième* siècle les physiciens Clausius et Kelvin (entre autres) ont formalisé les échanges d'énergie opérant dans les machines à vapeur. Il apparu alors nécessaire de définir une nouvelle grandeur nommée ***entropie***, notée S, et initialement définie comme : $\frac{Q}{T}$. Ainsi, au départ, il ne s'agissait pas de répondre à des questions sur la flèche du temps, mais bien plus de comprendre le fonctionnement des machines à vapeurs. Il n'a été question du temps que bien plus tard lorsqu'il a fallu réinterpréter la théorie.

2.1 Justification de l'approche statistique

Vauclair précise que dans le cadre des sciences physiques, ce qu'est un *système physique*, et ce qu'il faut entendre par un système physique *isolé* [12]. Un *système physique* est un ensemble de corps matériels que l'on souhaite étudier, et dont on veut **prévoir** l'évolution dans le temps et l'espace. L'abstraction nécessaire à l'étude des systèmes physiques pousse à limiter, par la pensée, ce système à l'intérieur d'une surface fermée. Donc, toute autre chose externe à cette surface est appelée le *milieu extérieur* du système. Ainsi, un système est dit isolé lorsqu'il ne peut rien changer avec l'extérieur, ni matière, ni énergie. L'auteur, précise que si une telle définition est *pratique* dans les études formelles, son réalisme ordinaire est contestable. Historiquement, c'est la *mécanique* qui a été la première science physique. Dans le formalisme de la mécanique classique, tout élément d'un système est parfaitement connu gr,ce à la relation fondamentale de la dynamique :

$$m\times \vec{a}= \sum \vec{F} \tag{1}$$

où m est la masse, a l'accélération et F une force.

Ainsi, lorsque la position et la vitesse d'un système est connue à l'instant t_0, la relation précédente nous permet-elle de les déduire à l'instant t :

$$(\vec{r},\vec{v})_{t_0} \xrightarrow{\sum \vec{F}} (\vec{r},\vec{v})_t \tag{2}$$

C'est ce que l'on appelle l'approche **déterministe**. Dans ces conditions, la connaissance de l'état du système permet, non seulement de prévoir l'avenir, mais aussi de reconstituer le passé. Les lois de la mécanique sont dites *symétriques par rapport au temps*, ou *réversibles.*

Jusqu'à la seconde moitié du dix-neuvième siècle, les physiciens n'étudiaient quasi-exclusivement que les phénomènes directement perceptibles par les sens humains, et que la mécanique classique pouvait expliciter. Même lorque l'apparition d'appareils de plus en plus sophistiqués et sensibles a permis d'explorer des phénomènes comme l'electricité ou la lumière, il ne s'agissait que d'un transfert des sens humains vers ces machines qui étaient vues comme leur extension. De plus, jusqu'à cette époque, les physiciens qui commencaient à étudier les particules, dissociaient complètement leurs résultats de ceux de la physique des phénomènes sensibles ou assimilés.

L'idée maîtresse de la physique statistique est celle que L. Boltzmann developpa en son temps, à savoir comprendre les propriétés **macroscopiques** des corps, à l'échelle courante, par la compréhension des propriétés de leurs constituants [6], tels les atomes, les molécules, les ions ... C'est donc, la réaffirmation et la confirmation de l'*hypothèse atomique* qui a permis le changement de point de vue. Au début, cette hypothèse n'était envisagée que comme un artifice méthodologique : *tout se passe comme si* de nombreux éléments,nommés atomes, ... Le vingtième siècle, grâce au perfectionnement des moyens d'investigation de la matière, a confirmé l'hypothèse qui est devenue la *théorie atomique.* La conséquence de cela, c'est que la physique des phénomènes macroscopiques semble condamnée à perdre son caractère fondamental. Car la théorie atomique définit l'état macroscopique comme une conséquence de la dynamique microscopique. Cependant, il faut être prudent, et modérer cette définition, puisque le thème le plus résistant de la physique moderne est la réunion de la théorie quantique et de la théorie de la relativité générale, cette dernière étant la théorie de la gravitation la plus aboutie dont nous disposons. De nombreux et brillants physiciens ont tenté, et tentent encore de *quantifier* la gravitation, mais sans succès probant. Et il semble que la théorie quantique devra également faire des concessions.

Fondamentalement et historiquement, c'est le nombre d'Avogadro : $N_A = 6,02 \times 10^{23}$, qui le premier a dressé les contours de ce qui est microscopique de ce qui est macroscopique.

Ce nombre est extraordinairement grand, mais il offre l'avantage d'une nette séparation entre les ordres de grandeur des domaines, tant microscopiques, que macroscopiques. Après avoir déterminé les ordres de grandeur, un problème bien plus difficile apparaît, à savoir le passage du microscopique au macroscopique. C'est-à-dire, comment la dynamique des élements constitutifs du système produit les qualités macroscopiques du même système. Or, la formalisation de ces lois macroscopiques, ne fait jamais intervenir les éléments consitutifs. Ainsi, Diu & al. dans [6] affirment que «le passage du microscopique au macroscopique se présente comme hautement non trivial».

Il existe plusieurs voies pour tenter de résoudre ce problème difficile et de grande actualité. Une des façons les plus abouties et les plus usitées tire partie du fait que l'on sait au moins que le passage du *micro* vers le *macro* met en jeu des nombres extrêmement grands. De plus, ces très grands nombres sont à mettre en opposition avec le nombre extrêment restreint que la physique macroscopique utilise pour caractériser un système : volume, pression, température, indice de réfraction, ... Ainsi, le physicien caractériserait tout aussi bien $1mm^3$ d'un gaz comme l'air par la position et l'état de chaque molécule de ce gaz dans une enceinte, soit environ 3×10^{16} positions, qu'en utilisant la pression, le volume, la température, ...

Ainsi, l'existence de ces grands nombres a-t-elle rapidement suggéré l'utilisation de méthodes probabilistes. Car de toute évidence, si $1mm^3$ de gaz nécessite une telle quantité de nombres, les caractéristiques macroscopiques que nous mesurons ne peuvent-être que grossière. C'est à dire qu'il s'agit en fait de *moyennes* faites sur des grandeurs mesurant certaines propriétés d'un grand nombre d'objets. C'est à ces méthodes reliant le microscopique au macroscopique que s'intéresse la physique statistique. Diu & al. précisent qu'il ne faut pas être «déçu» qu'il faille se contenter de probabilités [6]. Il ne faut pas associer à cette approche une quelconque impression d'approximatif ou d'imcomplet. La loi des grands nombres permet d'obtenir aussi bien des descriptions exactes que des prédictions précises sur l'état et la dynamique macroscopique du système étudié. C'est certainement le point le plus fondamental de l'approche statistique : **probabilité n'implique en aucun cas imprécision**. Citons Léon Rosenfeld lorsqu'il dit «Probabilité ne veut pas dire hasard sans règle, mais juste l'inverse : ce qu'il y a de réglé dans le hasard. Une loi statistique est avant tout une loi, l'expression d'une régularité, un instrument de prévision».

2.2 Entropie, néguentropie et comportement probable

Pour être plus spécifique sur l'approche statistique, il faut comprendre le rôle central de la grandeur nommée *entropie*. L'histoire de l'entropie illustre un phénomène courant dans l'histoire de la physique : cette science, tout au long de son évolution, s'est souvent appuyée sur des formalismes, et autres développements théoriques, *a priori* très différents. Pourtant, au final, tout ces formalismes se sont trouvés intimement liés pour rendre compte des mêmes phénomènes observés [12]. Le concept d'entropie a été initialement introduit pour quantifier le deuxième principe de la thermodynamique. Et donc, afin de pouvoir mathématiquement manipuler le caractère irréversible de certaines transformations physiques. Cette grandeur a été ré-introduite dans la théorie de l'information de Shannon, à partir de constatations initiales différentes, et pour manipuler un concept différent de celui de l'irréversibilité. Cependant, la ressemblance mathématique entre l'entropie en thermodynamique statistique, dite aussi «microcanonique», et celle de la théorie de Shannon, est si frappante que les physiciens n'ont pu s'empécher d'envisager cette grandeur comme explicative dans de nombreux phénomènes différents, dans leurs effets comme dans leurs natures [10][12][3][**?**][4].

À l'origine, les deux physiciens Clausius et Kelvin, énoncèrent deux assertions issues de leurs observations, à savoir respectivement : «un processus spontané dont le seul résultat final est le transfert net de chaleur d'un corps de température donnée à un corps plus chaud est impossible» et «un processus spontané dont le seul résultat final est la transformation en travail d'une certaine quantité de chaleur prise d'une source de température uniforme est impossible». Autrement dit, il n'est pas possible de produire du travail sans flux de chaleur, et on ne peut pas concevoir un flux de chaleur sans différence de température. En 1850, Clausius démontra que le rapport $\frac{Q}{T}$ ne peut que croître ou rester constant. C'est ce rapport, désignant à l'époque une nouvelle grandeur, qu'il nomma *entropie*. Fondamentalement et littéralement, Clausius la définit comme une **mesure de la quantité d'énergie d'un système qui peut être convertie en travail**[1]. Dès le départ, l'entropie apparaît aux physiciens comme une grandeur inédite et d'un nouveau type car, elle ne peut pas s'exprimer à partir des grandeurs physiques fondamentales : la longueur, la durée et la masse. Contrairement à la vulgarisation tardive qui a été faite de ce terme, nous voyons, que dans les premières heures de l'histoire de l'entropie il n'est pas question d'ordre et de désordre, mais de pures préoccupations thermodynamiques, en particulier celles des machines thermiques.

Boltzmann s'appuya sur l'idée que l'augmentation de l'entropie pouvait se concevoir comme une *dégradation* macroscopique de l'énergie. Il mit cette dégradation en relation avec l'état microscopique du système. Se faisant, sa démonstration n'avait comme validité que les systèmes, dont le meilleur exemple est un gaz parfait. Comme il était question de répartition d'un grand nombre de particules, il introduisit le terme de «désordre microscopique». À l'époque, cette vision fût très mal accueillie ! Surtout parce que l'on ne pouvait envisager que l'énergie puisse se *dégrader*. Or, pour Clausius et Boltzmann, une énergie n'est pas universellement dégradée, par contre elle n'est pas utilisable, «récupérable» pour la transformer en travail, (sous entendu travail utile, au contraire de la chaleur), en l'état du système. C'est pour expliquer ce concept que Boltzmann parla de «désordre microscopique». Étonnamment, la mémoire scientifique collective n'en a retenue que la composante **désordre**, en oblitérant le contexte historique et intellectuel.

Ainsi, fondamentalement et macroscopiquement parlant, l'entropie est-elle la mesure, à un moment donné, de la part de l'énergie d'un système que l'on peut transformer en travail. Ce n'est qu'en adoptant une approche microscopique que Boltzmann y relia le nombre Ω de complexions microscopiques qui produisent le même état macroscopique. Il définit alors S l'entropie statistique d'un système tel que :

$$S = k_B \ln \Omega \tag{3}$$

où $k_B = 1,38 \times 10^{-23} J.K^{-1}$ est la constante de Boltzmann. Dans l'approche microscopique le concept de dégradation de l'énergie devient plus clair. En effet, le rapport entre états possibles et états accessibles à un moment donné, illustre qu'un système ne peut instantanément passer de n'importe quel état à n'importe quel autre. Lorsque le nombre d'états accessibles tend vers le nombre d'états possibles, l'énergie se dégrade et ce faisant, le système tend vers son état d'équilibre. Ainsi, *a contrario*, lorsque le nombre d'états accessibles est petit devant

[1]Plus l'entropie est élevée, moins l'énergie est «récupérable» sous forme de travail.

le nombre d'états possibles, l'énergie est dans une forme utilisable. Nous pourrions dire métaphoriquement, que le système est *encore plein de toutes ses possibilités.* Lorsque rien ne vient contrarier l'évolution naturelle, le système tend vers son état de plus forte entropie, et également le plus probable. Par contre, une intervention extérieure pourrait vouloir exploiter ces *possibilités.*

Depuis les travaux de Boltzmann la définition de l'entropie statistique a évolué, gr,ce en particulier aux apports de la théorie de Shannon qui est une théorie statistique de la communication. Dans cette théorie, l'information **apportée par un événement** l de probabilité P_l , est de la forme :

$$I_l = -k \ln P_l \tag{4}$$

où k est une constante. Si par contre l'événement l n'est pas encore survenu, et qu'il n'est donc que potentiel, alors l'information que sa survenue apportera *potentiellement* est de la forme :

$$I_l = -k P_l \ln P_l \tag{5}$$

Lorsque l'on parle d'entropie physique, et que l'on considère une *collection* d'états accessibles, cela implique que le positionnement du système sur un de ces états est comme la survenue d'un événement. Celui-ci nous apporte d'autant plus d'information qu'il était peu probable, et que donc l'entropie statistique est élevée. En effet, dans l'entropie de Boltzmann, toutes les possibilités de réalisation de toutes les complexions sont consédérées comme équiprobables, ainsi, plus le nombre de complexions augmente, moins la réalisation d'une parmi toutes les autres apporte de l'information.

Brillouin reprend une remarque de P.G. Tait sur le fait que la sémantique associée à l'entropie statistique ne rend pas assez compte du principe de Kelvin sur la *dégradation de l'énergie.* Ainsi, Brillouin pose $N = -S$ et réaffirme l'importance du concept de «néguentropie». Cette grandeur représente, d'une part, l'aptitude sur système à fournir une énergie noble, tel le travail, et d'autre part, une entité dont la déperdition est appelée *dissipation.* Un système isolé possède donc une *néguentropie* s'il est capable de fournir un travail. En règle générale, ceci est possible lorsque le système est composé de parties, distinguables les unes des autres parce qu'il existe une grandeur dont les valeurs dans les différentes parties sont différentes. C'est le cas par exemple de la chaleur qui, lorsqu'elle a des valeurs différentes dans des parties différentes d'un système, permet la transformation de ces différences en travail mécanique. Une autre particularité importante de la néguentropie, est sa faculté à être dégradée par n'importe quel processus irréversible. Cette quantité de néguentropie est alors dite «dissipée».

Si l'on se place de nouveau dans le contexte de la théorie de Shannon, alors, nous pouvons considérer tous les événements l possibles dans le système étudié. Dans le cadre de cette théorie on peut définir une quantité S représentant toute l'information que pourrait potentiellement apporter le système à l'extérieur, si l'on était capable de distinguer la survenue de chaque événement. Alors, S serait de la forme :

$$S = -k \sum_l P_l \ln P_l \tag{6}$$

Or, il est imposible de distinguer *a priori* les événements entre eux. Ainsi, S représente bien plus le «manque d'information actuel sur le système» [12], et possède toutes les propriétés de l'entropie statistique. Si l'on pose $k = k_B$ dans l'équation 6, et si tous les événements l sont équiprobables, alors nous retrouvons l'entropie statistique de Boltzmann. Cette dernière devenant alors un cas particulier de la forme plus générale de Shannon. Il faut donc considérer que l'entropie est une mesure de la quantité d'information que l'observation du système est capable de nous apporter. Ainsi, nous pouvons dire, que l'entropie mesure notre ignorance relativement à l'état du système. Cette approche place l'observateur au premier plan. Il s'agit bien sûr, d'un observateur *générique* qui symbolise la réalisation de la mesure. Or, la pratique de la physique statistique montre qu'il est possible dans certains cas de réaliser expérimentalement de telles mesures et d'en faire une lecture directe, et que dans d'autres cas, seules des expériences «par la pensée», et donc un exercice intellectuel et heuristique, permet d'évaluer S. Ainsi, l'utilisation et la généralisation du concept d'entropie, montre que la frontière entre une pratique expérimentale et une approche purement formelle d'un même domaine scientifique, n'est pas si clairement établie.

2.3 Ergodicité et irréversibilité

Nous avons justifié l'approche statistique par les ordres de grandeur mis en jeu. Le meilleur exemple en est le nombre d'Avogadro. En résumé, nous avons substitué une mesure précise sur chacun des très nombreux constituants du système, par une mesure moyenne dans le temps et sur un petit nombre de constituants du système. Agir ainsi est la conséquence d'une hypothèse forte, dite *hypothèse ergodique*. La physique statistique dans son ensemble repose sur l'approbation de cette hypothèse : «la moyenne dans le temps d'une variable caractéristique d'un système peut être assimilée à la moyenne instantanée prise sur tous les états possibles du système, pondérée par la probabilité que le système se trouve effectivement dans chacun de ces états [12]. En tout état de cause, la réalisation d'une moyenne instantanée, tel qu'énoncé dans le second membre de l'hypothèse, se révèle très nettement plus difficile à réaliser, qu'une mesure moyenne dans le temps et sur une seule variable caractéristique.

Les systèmes où une telle substitution est possible, sont naturellement nommés *systèmes ergodiques*. Montrer qu'un système est ergodique n'est pas une chose simple. Nous savons que d'autres propriétés, comme la propriété dite de *mélange*, implique l'ergodicité. Malheureusement, la démonstration n'est pas non plus aisée. La propriété d'ergodicité étant cependant formellement nécessaire à l'approche statistique, il est possible de constituer un *faisceau de présomptions* sur sa validité. Ce qui est intéressant, c'est que ces présomptions sont de nature qualitative. En effet, nous aurons tendance à présumer qu'un système est ergodique, lorsque ses éléments constitutifs sont en interaction : l'action d'un élément α à l'instant t produira un événement l, qui amènera un élément β à produire un événement m, à l'instant $t + \delta t$, qui sans l n'aurait pas été produit, ou au moins, pas à l'instant $t + \delta t$. Nous sommes là dans une perspective exclusivement microscopique, puisque les éléments du système vont jouer tout à tour les rôles d'émetteur et de récepteur d'événements, au sens de la théorie de Shannon. Un événement produit par α apportera une certaine quantité d'information à β, dans une proportion exclusivement relative à la connaissance qu'à β du système, et des événements que α pourrait produire. Le terme de «connaissance» est cependant trop connoté, et ne convient en fait qu'aux systèmes où les éléments peuvent «avoir de la connaissance». Dans le cas de particules, il faut leurs substituer l'«état» dans lequel se trouve β au moment où il observe, ou subit, l. Notons, que le modèle de «gaz parfait», où il n'y a pas interactions entre les éléments, n'est pas un système ergodique. Cependant, le phénomène d'interaction est si important et profond, qu'il rend le système ergodique.

Indubitablement, c'est un processus de communication que nous avons décrit entre α et β. Ce qui nous indiquerait que la formalisme de la théorie de Shannon s'applique totalement. Une autre critère qualitatif présumant de l'ergodicité d'un système, réside dans l'existence d'un état hors de l'équilibre et d'un état d'équilibre. De plus, on doit observer une tendance naturelle du système à tendre vers l'état d'équilibre, qui est d'un point de vue statistique, l'état le plus probable, ou état de plus forte entropie *statistique*. C'est typiquement ce qui se passe systématiquement dans les phénomènes critiques auto-organisés.

D'autres auteurs illustrent l'ergodicité en utilisant un autre point du vue, mais qui reste tout aussi qualitatif : un système est ergodique s'il peut passer de n'importe lequel de ses états à n'importe quel autre, de façon continue. C'est-à-dire, que quel que soient deux états, parmi tous les états accessibles au système, il existe toujours un chemin, fait d'une suite d'autres états accessibles, reliant l'état de départ et l'état d'arrivée. Il s'agit en fait d'une formulation plus imagée de la propriété de mélange. Cette propriété énonce qu'avec le temps, le système tend à parcourir la totalité de son espace des phases. Cette propriété est également une autre façon de dire qu'un système doté de cette propriété tendra toujours vers l'état d'équilibre lorsqu'il en est éloigné. En général, on considère que le parcours de ce chemin se fait en suivant un processus markovien. C'est-à-dire que la raison pour laquelle le système passe de l'état l à l'état m, est entièrement contenue dans l. Dans un processus markovien, le système perd la mémoire de son histoire au fur et à mesure qu'il change d'état.

Plus qu'un processus markovien, nous pourrions parler d'un approximation de type markovien. Car, hormis les cas simples, rien ne permet de montrer qu'un système perd la mémoire de son histoire. Assimiler un processus d'évolution à une évolution markovienne est une facilité, tant intellectuelle que formelle. Il ne faut d'ailleurs pas confondre processus markovien et ergodicité. En effet, par définition, un processus markovien est irréversible. Or, un processus peut parfaitement être ergodique et parfaitement réversible. Pourtant, la question de la réversibilité est souvent posée avec celle de l'ergodicité. Parce qu'en générale, la propriété de mélange, qui est certainement la propriété qui nous renseigne le plus sur les qualités d'un système, est synonyme d'irréversibilité.

La question de l'irréversibilité du processus d'évolution d'un système est une question «hautement non-triviale», et sa réponse implique des restrictions importantes sur la connaissance que l'on peut espérer obtenir sur le système. Vauclair cite dans [12] (pp. 197-200), deux exemples où la propriété de mélange est vérifiée : le «sirop de fraise dans le verre de lait», et la «transformation du boulanger». L'auteur indique que les deux transformations sont physiquement irréversibles. Pourtant la deuxième ne l'est pas formellement. Car, contrairement à la première, dans la «transformation du boulanger», il n'y a pas de phénomène de *diffusion*. L'auteur indique clairement que l'irréversibilité de la «transformation du boulanger» vient de l'impossibilité *physique* de connaître l'état instantané du système avec une précision infinie. L'erreur, aussi petite soit-elle, que l'on commettra sur l'état instantané, provoquera une divergence sensible avec la trajectoire réelle, si l'on tente de remonter l'histoire du système.

Lorsqu'il y a diffusion, l'irréversibilité est plus profonde. Dans le cadre précis de l'informatique et du calcul sur un ordinateur, nous savons que C.H. Bennett a montré que tout calcul est formellement réversible [8][1]. Cette démonstration illustre parfaitement la séparation entre l'approche mathématique et l'approche physique de l'irréversibilité. Si l'on montre que tout calcul est réversible, c'est sans tenir compte des moyens informatiques colosaux qu'il faudra déployer pour assurer cette totale réversibilité, et sans compter l'énergie considérable que cette opération mobilisera. Indiscutablement, l'irréversibilité physique a un coût qu'il faut payer immédiatement en énergie dissipée. Lorsque l'on ne peut pas s'offrir cette dépense, il faut accepter de ne pas avoir une connaissance parfaite de l'état instantané du système[2].

Au delà de ces restrictions, certes sévères, il faut se féliciter d'une grande cohérence sémantique entre les différents concepts manipulés par la physique statistique. De plus, tous ces concepts portent en eux une autre différence essentielle entre l'approche mathématique et l'approche physique : l'**observateur**. En physique, le courant des «positivistes», contrairement aux «réalistes» affirme qu'il n'y a pas de réalité physique qui ne soit pas celle de l'observateur. L'entropie est soit une mesure de l'information que peut obtenir un observateur via une mesure, sur l'état instantané du système, soit, quand cela a un sens, une mesure de la quantité d'énergie transformable en travail. L'irréversibilité physique, elle, est entièrement contenue dans le prix que l'observateur veut bien ou peut payer pour augmenter sa connaissance **historique** du système. À ce sujet, B. d'Espagnat dans [5], (pp.618-619), dit qu'en tant que «réaliste», il ne peut se satisfaire de la définition actuelle du concept d'objet macroscopique. Cependant, il dit aussi, que «les tentatives de définition les plus sérieuses font référence à l'irréversibilité, mais celle-ci n'est elle-même comprise qu'à partir de considérations de mécanique statistique qui renvoient aux limites des capacités d'observation des êtres humains...».

Enfin, l'hypothèse ergodique a une place particulière, puisqu'elle fait le lien entre le côté *instantané* de l'entropie, et le côté *historique* de l'irréversibilité. Mieux, elle permet de substituer l'un à l'autre, facilitant grandement le travail de l'observateur expérimentateur. En effet, expérimentalement, il est toujours préférable de manipuler une seule variable explicative et ses moyennes temporelles.

3 Qui a tiré la flèche du temps ?

Revenons donc à notre question première : pourquoi parle-t-on de *flèche* du temps ? Sous-entendu, pourquoi donne-t-on une orientation au temps ? Il existe nécessairement une question corollaire : si le temps à une orientation, pourquoi pouvons-nous aller que dans un seul sens ? Pour répondre à notre première question, et aux autres, nous avons introduit et explicité le concept fondamental de l'entropie, en particulier l'entropie statistique de Boltzmann. De plus, nous avons expliqué qu'une interprétation moderne de la théorie thermodynamique de Boltzmann réside dans la théorie de l'information de Shannon, où l'entropie informationnelle renforce le rôle central de l'entropie thermodynamique, mais également, celui de l'observateur.

Il est donc devenu essentiel de définir qui est cet observateur, et qu'elles sont ses propriétés. Les physiciens ont depuis les travaux de Brillouin [2] répondu à cette question difficile.

[2]Cette corrélation entre l'énergie dépensée et le niveau de connaissance que l'on peut avoir du système est également visible dans la course aux hautes énergies en physique des particules. Où, si le problème n'est pas de vaincre l'irréversibilité physique, il faut différentiellement dépenser de plus en plus d'énergie pour accéder à des niveaux de précision de plus en plus élevés sur la matière, et ainsi se rapprocher des limites fixées par les inégalités d'Heisenberg [7] (pp. 80-81).

Retenons ici que l'on peut qualifier d'observateur tout processus réalisant une «*mesure*» [4]. Il ne s'agit pas exclusivement d'êtres intelligents, ou même vivants. Ce concept de mesure est intimement lié à celui d'entropie et d'information. En effet, il désigne les flux croisés d'entropie et d'information (de néguentropie dans le vocable de Brillouin) qui se créent dès qu'un système n'est plus isolé, autrement dit, dès qu'un système échange de la matière ou de l'énergie avec un autre système, qui peut être son environnement.

S'il fallait résumer le pensée de Brillouin, nous pouvons dire que l'unique façon (dans notre physique) d'obtenir de l'information sur toute chose, est de réaliser une mesure. Autrement dit, il faut pour l'observateur accoupler à l'objet étudié un «*instrument de mesure*». Dans tous les cas, l'instrument de mesure voit son entropie augmenter, pendant que l'observateur reçoit le flux d'information (néguentropie). Brillouin démontra que le gain d'entropie de l'instrument de mesure est supérieur au gain d'information de l'observateur. C'est ainsi que Brillouin rédigea son «principe de Carnot généralisé», et il le formalisa de la façon suivante :

$$\Delta(S - I) >>> 0 \tag{7}$$

Il est essentiel de comprendre que lorsque l'on dit que l'entropie de l'instrument de mesure augmente, c'est d'une part relatif à l'observateur considéré, et que d'autre part que c'est l'ignorance de l'observateur sur l'état microscopique de l'instrument qui augmente. Ceci lie intimement entropie statistique et entropie informationnelle de Shannon : l'entropie est équivalente à de l'ignorance, celle de l'observateur et à la quantité d'énergie qu'il devra dégrader pour lever tout ou partie de cette ignorance. De par ce principe fondamental, Brillouin introduit un *sens* à un processus naturel, il indique que ce sens est unique. Un autre physicien, Szilard a repris ces éléments pour les appliquer aux «êtres intelligents» [11]. Il indique que la particularité des êtres intelligents, et généralement des êtres vivants (à quelques nuances près), est qu'ils sont leur propre instrument de mesure du fait même qu'ils sont capables de raisonner. Le fait que les êtres vivants et intelligents ne sont jamais isolés, mais perpétuellement couplés à un environnement ou d'autres êtres vivants, implique de fait des flux d'entropie. De plus, dans ce cas la captation d'information sur l'environnement et les inférences «intellectuelles» qui y sont associées sont similaires à une succession de mesures. Ainsi, si l'esprit qui habite chaque être intelligent voit sa néguentropie augmenter, tout ce qui se trouve entre cet «esprit» et l'objet de la mesure, voit son entropie augmenter. Ce processus est irréversible et inexorable. C'est là que se trouvent les «*effets du temps*» que nous ressentons tous.

Mais cette réponse limitée aux être intelligents n'est pas entièrement satisfaisante, car sinon cela signifierait que le temps n'a de sens et d'emprise que pour les seuls êtres intelligents, voire vivants. Ceci dit, la question de l'existence du temps si aucune intelligence n'existait dans l'univers n'est pas si absurde. De nombreux physiciens et philosophes se la sont posée. Éludons volontairement cette question de par trop métaphysique, et supposons que le temps fait son œuvre même si aucune intelligence n'est là pour le remarquer. N'oublions pas aussi que dans l'approche de Brillouin, l'observateur n'est pas exclusivement intelligent, et de fait les mesures qu'il peut entreprendre sont indépendantes de la nature même de l'observateur. Le point important à retenir est la nécessité de couplage entre systèmes et l'installation de flux thermodynamiques.

D'un point de vue plus général, les physiciens considèrent que l'entropie générale de notre univers ne fait qu'augmenter. Qu'est ce que cela veut dire dans le contexte des idées de Boltzmann, de Shannon et de Brillouin ? Dans un premier temps cela signifie simplement que l'énergie de l'Univers existe sous plusieurs formes que l'on peut classer de la moins à la plus dégradée. L'augmentation de l'entropie de l'Univers signifie tout simplement qu'il dégrade en permanence de l'énergie des formes les moins dégradées vers la ou les formes les plus dégradées. Une forme d'énergie dégradée a cette particularité qu'elle ne peut être source de travail lors d'un nouveau processus de dégradation. Car il faut bien comprendre que dégrader de l'énergie signifie principalement produire du travail. Dans ma thèse [4] j'ai démontré que, dans le cas particulier du calcul, et plus généralement dans le cas des systèmes logiques, réaliser un calcul est équivalent à la production de travail. Processus lui-même générateur d'une certaine quantité de néguentropie pour l'observateur du résultat, et nécessairement producteur d'une quantité d'entropie plus importante. Ce qui a comme conséquence de consacrer le calcul et les processus logiques comme des processus thermodynamiques. J'ai également démontré que, comme tout processus thermodynamique, un calcul doit nécessairement dégrader de l'énergie. Reprenant les conclusions de Brillouin, Szilard, Landauer [9], Matherat et Jaekel [8], j'ai démontré que la première forme d'énergie *logique* est le temps. Autrement dit, un calcul instantané est impossible.

La question se pose indubitablement quant à la généralisation de ces résultats à l'Univers matériel (par opposition aux processus logiques). La réponse n'est pas simple. Dans le cadre de cet article imaginons que tel est le cas. Certains physiciens ne sont d'ailleurs pas loin de cette conception, et que l'organisation de l'Univers est similaire à un calcul permanent. De la même façon, Hawking et Penrose ont largement introduit une thermodynamique cosmique, et particulier celle des trous noirs. Phénomènes qui sont actuellement plus des singularités de la relativité générale que des objets réellement observés [**?**]. La conséquence immédiate de ce postulat c'est que l'Univers doit nécessairement dégrader de l'énergie pour assurer sa production d'organisation. La généralisation des résultats sur les processus logiques amène directement à également considérer le temps comme une forme d'énergie élevée, voire la plus élevée, c'est à dire la moins dégradée.

De fait, ce que nous désignons comme la flèche du temps serait l'inexorable dégradation du temps par l'Univers pour produire du travail afin d'assurer sa cohésion structurelle et organisationnelle, mais également produire de l'entropie. Pourquoi alors parler de flèche, et donner un sens unique à cette dégradation ? La thermodynamique nous dit que la dégradation d'énergie est irréversible, et elle le formalise dans son deuxième principe, qui lui-même servit de base au «principe de Carnot généralisé» de Brillouin. Cependant, comment pouvons-nous nous représenter ces principes dans le cas où nous accordons au temps le statut d'énergie ? La loi de progression de l'entropie statistique est de la même forme que celle de l'entropie informationnelle, c'est à dire une loi logarithmique. Á chaque instant, et pour chaque quantité de temps dégradée, aussi petit soit-elle, le système (ici l'Univers tout entier) à le choix entre une multitude d'états parmi l'ensemble de tous les états accessibles. On peut démontrer que dans le cas des processus logiques ce nombre d'états croît exponentiellement [4]. C'est pour cette raison fondamentale que la dégradation d'une énergie est un processus irréversible. En effet, renverser le processus, dans notre cas, remonter le temps reviendrait à lever l'indétermination à rebours sur l'ensemble des chemins possibles constitués par l'ensemble des enchaînements d'états accessibles au système (à un moment donné), et ceci pour toute l'histoire du système.

Une telle entreprise n'est pas impossible, mais elle va demander une quantité d'énergie, de temps en premier lieu, nettement plus grande que toute l'information qu'elle pourrait nous apporter. Ainsi, observer, même localement, une remontée du temps spontanée, n'est pas physiquement impossible, mais hautement improbable. Si improbable qu'il faudrait vraisemblablement attendre un temps plus long que l'âge de l'univers pour espérer l'observer.

Nous pouvons tenter d'expliquer cette façon de voir les choses en faisant un lien entre la théorie de l'information et notre hypothèse quant à considérer le temps comme une forme d'énergie peu dégradée. Dans la théorie de Shannon, l'entropie est la conséquence directe de l'ignorance de l'observateur (et par généralisation de tout processus réalisant une mesure). En effet, la seule façon de réduire son ignorance sur l'état du système étudié est de faire une mesure et se faisant, de produire de l'entropie. Ainsi, la dégradation de l'énergie du genre temps (celle qui donne le sens de la flèche) produit de l'entropie, soit de l'ignorance. Comme nous somme dans une réflexion temporelle, cette ignorance signifie une «perte de mémoire» sur l'histoire du système, soit tous les états par lesquels il est passé. Lever notre ignorance de façon arbitrairement exhaustive demanderait, selon le principe de Carnot généralisé (appelé également principe de néguentropie de l'information) demanderait plus d'énergie que toute celle présente dans l'Univers lui-même, et aussi plus de temps que l'âge de l'Univers. L'assertion 7 de ma thèse [4] pose : «*pour connaître avec précision l'état d'une structure logique, il faudra en temps proportionnellement long comme l'exponentiel de son entropie*». Cette assertion n'a pas comme restriction le sens dans lequel on parcours le temps. Elle est donc vraie dans le sens normal de la flèche comme dans le sens inverse.

Si comme nous l'avons fait jusqu'à présent on généralise le contexte logique au contexte matériel, il faudrait pour lever l'indétermination sur l'histoire de l'univers, et donc remonter le temps, un temps long comme l'exponentiel de son entropie au moment où l'on commence la remontée. Ainsi, plus le *temps* passe, plus le nombre d'états accessibles (ce qu'Einstein nommait les complexions) augmente, et plus il faudra de l'énergie pour commencer notre voyage retour. Ainsi, s'il fallait répondre allégoriquement à la question ; qui a tiré la flèche du temps, nous dirions que chaque personne qui contemple l'Univers y participe un peu.

4 Conclusion

Cette conception du temps qui le dote d'un nouveau statut, plein de sens et de conséquences en physique, peut sembler choquant. Cependant, nous arrivons à ce résultat par l'interprétation, ou la réinterprétation, et la mise en corrélation de plusieurs visions de physiciens. Le point de départ est certainement la révolution sémantique introduite par Boltzmann : l'abandon de l'approche exclusivement déterministe, et qui de fait permettait la réversibilité du temps dans les lois de la mécanique.

La thermodynamique a un indéniable côté comptable et procédurier. Toute chose, toute action implique une dépense, et dans certains cas un gain. Autrement dit, rien n'est gratuit. Les physiciens modernes commencent à généraliser l'approche thermodynamique à l'Univers dans sa globalité, ou à des domaines loin des machines à vapeur, tel l'informatique et le calcul.

Dans cette vision, la théorie de Shannon a une place particulière, parce que pour la première fois elle place au centre de sa conception un observateur. Brillouin alla encore plus loin puisqu'il renforce le rôle de cet observateur en consacrant le processus de mesure comme unificateur entre cet observateur et l'Univers qui l'entoure. De même il indique que c'est la mesure qui est à l'origine des flux thermodynamiques initiaux.

En conséquence de toutes ces considérations le temps apparaît comme la «matière première» indispensable à l'établissement de ces flux. Par analogie et en généralisant les travaux sur les processus logiques, le temps acquiert le statut d'énergie. Pas n'importe quelle énergie, puisqu'il s'agit d'une forme très peu dégradée. Il n'existe peut être même pas d'énergie moins dégradée. L'Univers consomme ce temps et se faisant perd la mémoire de son histoire, ce qui obligerait tout observateur à dépenser une somme d'énergie colossale pour en retrouver la trace. Le temps a donc un sens, non pas absolue, mais probable. L'observation d'une remontée spontanée de ce sens est hautement improbable, la provoquer demanderait une quantité d'énergie dépassant toute celle contenue dans l'Univers. Il existe peut-être d'autre façon de remonter le temps, elles devront alors proposer une alternative au second principe, et au principe de néguentropie de l'information, tel qu'énoncé par Brillouin. Á une échelle infime, nous sommes tous responsables, et source de l'irréversibilité du temps.

Références

[1] C.H. Bennett. Logical reversibility of computation. *IBM J. Res. Develop.*, pages pp. 525–532, 1973.

[2] L. Brillouin. *La science et la théorie de l'information.* Masson & Cie, Paris, 1958.

[3] G. Cohen-Tannoudji. *Les constantes universelles.* Collection Questions de sciences. Hachette, 1995.

[4] R. Cozien. *Premiers éléments de la théorie du calcul singulier.* PhD thesis, Université de Champagne Ardenne, Reims, octobre 2002.

[5] B. d'Espagnat. *Physique et réalité.* Arts et sciences. Diderot edition, 1998.

[6] B. Diu, C. Guthmann, D. Lederer, and B. Roulet. *Physique statistique.* Collection enseignement des sciences. Hermann, 1989.

[7] S.W. Hawking. *Une brève histoire du temps - Du big bang aux trous noirs.* Flammarion, 1989.

[8] M.T. Jaekel and P. Matherat. Dissipation logique des implémentations d'automates - dissipation du calcul. *Technique et science informatiques*, 15(n° 8/1996) :pp. 1079–1104, 1996.

[9] R. Landauer. Irreversibility and heat generation in the computing process. *IBM journal*, pages pp. 183–191, juillet 1961.

[10] Elliott H. Lieb and Jakob Yngvason. A fresh look at entropy and the second law of thermodynamics. *Physics Today*, pages 32–37, avril 2000.

[11] L. Szilard. On the decrease of entropy in a thermodynamic system by the intervention of intelligent beings. *Behavorial Science*, (Vol. 9) :pp. 301 – 310, 1964.

[12] S. Vauclair. *Éléments de physique statistique.* InterEditions, 1993.