Sens du temps et processus d'observation

M. Bitbol

Institut de Biologie Physico-chimique
13, Rue Pierre et Marie Curie 75005 Paris

RÉSUMÉ: L'argument le plus fréquemment invoqué pour relier le processus de mesure quantique à un sens privilégié du temps est le fait que cette mesure s'effectue au moyen d'un appareil de dimensions macroscopiques dans lequel se déroulent des phénomènes irréversibles. Un examen simple des notions d'irréversibilité et de sens du temps en physique statistique montre pourtant qu'il n'y a de lien entre elles qu'à travers une convention tacite faisant intervenir les propriétés cognitives de l'observateur. On explicite ce type de convention en se servant pour cela de l'interprétation d'Everett de la mécanique quantique, qui a l'avantage d'incorporer directement dans ses notations certaines des caractéristiques cognitives de l'observateur effectuant une mesure. Cette explicitation permet de retrouver la plupart des traits expérimentaux habituellement attribués à l'existence d'un sens privilégié du temps, en évitant totalement de faire appel à ce dernier concept.

1. Introduction

Depuis les travaux de Clausius et Boltzmann, les physiciens ont pu considérer que la question du sens du temps était complètement circonscrite par leur science. Sa solution, entrevue par les fondateurs de la thermodynamique et de la physique statistique, ne pouvait plus se concevoir que comme l'aboutissement de ces disciplines. Dans ces conditions, le propos du présent article, qui est de nuancer cette croyance en montrant l'utilité renouvelée d'une analyse philosophique du problème, apparaîtra à beaucoup comme une régression. Il n'y aurait régression que si l'on ignorait totalement le travail accompli par la physique statistique moderne, pour se contenter ce qui peut être dit du sens du temps à partir de l'usage commun de cette notion. La démarche philosophique, si elle est comprise au sens de Wittgenstein [1] comme "lutte contre la fascination qu'exercent certaines formes d'expression", et si elle permet par cela d'éviter des pétitions de principe dans l'interprétation des résultats de la physique, peut au contraire contribuer de façon décisive à l'élucidation du problème posé.

Le mot qui exerce la fascination la plus intense sur les physiciens est sans nul doute "objectivité". Cette fascination les a parfois conduits à occulter de façon involontaire l'intervention du sujet connaissant dans leur science, alors même qu'il ne pouvaient l'en exclure totalement. Or la présence non reconnue du sujet dans l'interprétation de la physique risque de devenir une source incontrôlée et inépuisable de préjugés d'autant plus difficiles à dénoncer qu'on en ignore l'origine.

C'est là, à mon avis, que réside le noeud de l'énigme du sens du temps. Il se laisse deviner tout au long de l'histoire de la thermodynamique et de la physique statistique dont l'un des débats majeurs concerne le caractère "objectif" ou "subjectif" du concept d'entropie. Mais l'intrication du noeud évoqué a somme toute été aggravé par un tel débat, car on y a généralement ignoré que le rôle du sujet commence bien en amont de la constitution du concept d'entropie.

Le présent travail est consacré à mettre en évidence ce lieu primordial d'intervention du sujet connaissant dans le problème du sens du temps. Au cours d'une première partie, il sera question d'un présupposé sur lequel est fondé l'interprétation usuelle du théorème H de Boltzmann. L'origine de ce présupposé sera analysée, et reliée aux caractéristiques du sujet. Dans la deuxième partie, on utilisera les notations de l'interprétation d'Everett [2] de la mécanique quantique afin de finir d'expliciter l'intervention du sujet connaissant dans le problème du sens du temps. Cette explicitation est en effet rendue particulièrement aisée dans l'interprétation d'Everett, grâce à une écriture qui inclut le contenu de la mémoire de l'observateur effectuant une mesure.

Mais avant d'en venir là, je voudrais donner un support visuel concret au changement de perspective qui va être mis en oeuvre. C'est-à-dire montrer comment un glissement de conception concernant le sens du temps, allant d'un parti-pris objectiviste à une acceptation de l'intervention du sujet connaissant, peut se manifester dans l'analogue cinématographique qu'on choisit pour l'illustrer. Un exemple pédagogique usuel est celui d'un film contenant la séquence des événements prenant place entre l'instant où un verre a été projeté au sol et celui où il se brise en de multiples éclats. On note à propos de ce film que, si on le passait en sens inverse, la suite des événements qui apparaîtrait alors (recomposition puis ascension d'un verre initialement brisé) serait considérée par tout un chacun comme invraisemblable. Du point de vue de la physique statistique, le sentiment d'invraisemblance largement partagé est la conséquence subjective du caractère hautement improbable (mais pas strictement impossible) de la recomposition d'un verre intact à partir de débris. Dans cet exemple, on aura noté que ce que montre l'image cinématographique c'est le devenir irréversible d'un objet, tandis que l'observateur se tient exclusivement à l'arrière-plan des événements mis en scène.

L'analogue cinématographique prend une toute autre orientation si l'on choisit pour exemple ce que j'appellerai "le casse-tête de Hitchcock". En fin de tournage du film "Topaz", ce cinéaste ne disposait plus du matériel ni du temps nécessaire pour tourner une scène indispensable au dénouement de l'oeuvre [3]. Cette scène devait représenter l'acteur principal rentrant dans son habitation, et la porte se refermant sur lui de l'extérieur. Il existait bien un rush représentant le même acteur ouvrant la porte et sortant de chez lui, mais le retourner ne servait à rien, car une entrée à reculons d'un pas décidé aurait été peu crédible. Hitchcock adopta donc un expédient qui nous importe peu ici. Ce qui est en revanche intéressant à comprendre dans l'illustration précédente, c'est pourquoi une entrée à reculons d'un pas décidé manque à ce point de crédibilité que même un cinéaste comme Hitchcock, qui accepte fréquemment de verser dans le fantastique, la récuse. Il suffit pour le comprendre de constater que le pôle principal d'acquisition d'information sensorielle de l'individu (le visage) est situé à la face antérieure de son corps. Une marche à reculons est dans ces conditions une marche dont le sens est opposé aux possibilités qu'a l'individu d'acquérir une information nécessaire au bon déroulement de sa marche.

Dans ce cas, les caractéristiques cognitives de l'observateur se trouvent portées au premier plan de l'illustration. A l'inverse du premier exemple, un observateur est passé au rang d'acteur. D'autres observateurs (les spectateurs) restent à l'arrière-plan, mais dans la mesure où leur rôle est d'observer les gestes de l'observateur-acteur, ils doivent être qualifiés de "méta-observateurs". Ces métaphores, particulièrement adaptées à la visualisation des idées qui vont suivre, en donnent aussi un avant-goût.

2. Les théorèmes H et le sens du temps

Il est désormais classique de noter que le lien entre thermodynamique et sens du temps est subrepticement posé dès les prémisses du raisonnement qui est censé démontrer un tel lien [4]. Le point précis où cette pétition de principe est commise peut être mis en évidence en analysant le schéma général de la dérivation du théorème H pour des processus stochastiques. Nous en choisirons la forme simplifiée donnée en [5] (voir [6] pour un examen plus détaillé.). Considérons un ensemble de systèmes isolés qui peuvent se trouver dans N états. $P_r(t)$ est la probabilité de trouver un système donné dans le r-ième de ces N états à l'instant t. La fonction H étant:$H = \sum_r P_r \ln P_r$ sa dérivée par rapport à la variable t est:

$$\frac{dH}{dt} = \sum_r (\ln P_r + 1)\frac{dP_r}{dt} \tag{1}$$

L'objet du théorème H est de montrer que dH/dt a un signe bien déterminé. Mais pour cela, d'après l'expression (1), il nous faut d'abord connaitre le signe de dP_r/dt. Ce signe peut à son tour être connu en considérant que toute variation de la probabilité P_r est le résultat d'une inégalité entre le nombre de systèmes entrant dans l'état r et de ceux qui en sortent. Il reste donc à estimer le bilan des entrées et sorties dans l'état r. Pour cela, on considère usuellement des probabilités de transition par unité de durée: W_{rs} , d'un système entre l'état r et l'état s (ces transitions $r \to s$ d'un système donné seront appelées "transitions élémentaires" pour les distinguer de transformations affectant un ensemble de systèmes). Ayant prononcé ce mot de "transition" il faut, suivant la méthode philosophique que nous avons adoptée, l'analyser, afin que la part implicite de son contenu ne vienne pas biaiser notre $r$aisonnement ultérieur. Que veut-on dire lorsqu'on pose qu'il existe une probabilité W_{rs} par unité de durée pour qu'une transition de r vers s se produise? Explicitons: on veut dire par là qu'il y a une probabilité W_{rs} pour qu'un système *initialement* dans l'état r saute dans l'état *final* s pendant l'unité de durée. Dès ce stade, on a supposé comme allant de soi que la transition se produit dans un sens particulier du temps. Le temps intervenant dans la plupart des théories physiques sous forme d'une variable t, ce sens particulier est de plus assimilé conventionnellement à celui des t croissants. Mais il est bien évident que si l'on veut, comme c'est notre cas, obtenir un théorème qui établisse une relation entre la variation d'une fonction H et celle de la variable t, aucune hypothèse du genre de celle qui vient d'être débusquée ne peut être admise. L'absence de circularité du raisonnement est à ce prix.

De façon générale, le bilan B des entrées et sorties dans l'état r peut s'écrire:

$$B = \sum_s P_s W_{sr} dt - \sum_s P_r W_{rs} dt \tag{2}$$

Le premier terme du membre de droite représente l'ensemble des entrées dans l'état r à partir de tous les autres états s, et le deuxième terme l'ensemble des sorties de l'état r vers tous les autres états s, pendant la durée dt. Puisque nous avons décidé de nous passer de l'hypothèse suivant laquelle les transitions élémentaires ont lieu dans un sens particulier du temps, on doit considérer deux cas:

1) Si, comme on le suppose usuellement, les transitions élémentaires ont lieu dans le sens des temps croissants, la probabilité P_r de trouver un système dans un état r s'accroit avec *l'accroissement* de t du fait que les systèmes ayant *initialement* la probabilité P_s de se trouver dans tout autre état s, effectuent des transitions vers cet état r. De même, P_r décroit avec *l'accroissement* de t du fait que le système ayant *initialement* la probabilité P_r de se trouver dans l'état r, effectue des transitions vers tous les autres états s.

2) Si, comme on l'exclut habituellement, les transitions élémentaires ont lieu dans le sens des temps décroissants, les phrases précédentes peuvent être répétées en remplaçant simplement le mot *accroissement* (de la variable t) par le mot *décroissance*, et le mot *initialement* par le mot *finalement*. Par exemple, le premier terme du bilan (2) exprime que P_r s'accroit avec la *décroissance* de t du fait que les systèmes ayant *finalement* la probabilité P_s de se trouver dans un état s, effectuent des transitions vers l'état r.

Dans les deux situations le premier terme représente un *accroissement* de P_r, qu'il ait lieu dans un sens ou dans l'autre du temps, et le second terme, avec son signe moins, une décroissance de P_r. Chacune des deux sommes est positive ou nulle [1]. Une fois ceci acquis, le reste de la démonstration suit aisément.

Supposons en premier lieu que les transitions élémentaires aient lieu dans le sens des temps croissants. Dans ce cas, le bilan des entrées et sorties nous permet de calculer la probabilité P_r à un instant $t+dt$ à partir de la connaissance de P_r à l'instant initial t: $P_r(t+dt) = P_r(t) + B$. Si l'on suppose au contraire que les transitions élémentaires ont lieu dans le sens des temps décroissants, le bilan précédent nous permet de calculer la probabilité P_r à l'instant $t - dt$, à partir de la connaissance de P_r à l'instant t, qui doit être appelé dans ce cas l'instant "final": $P_r(t - dt) = P_r(t) + B$. Nous adopterons donc la notation

[1] Ceci est dû au fait qu'il s'agit de sommes de produits de probabilités, toutes positives ou nulles: P_r , P_s , et $W_{rs}dt$ ou $W_{sr}dt$. A ce propos notons que W_{rs} (ou W_{sr}) étant un nombre positif ou nul (probabilité par unité de durée), dt doit l'être aussi pour que $W_{rs}dt$ le soit. La condition $dt > 0$ (qui pourrait faire penser qu'une hypothèse implicite sur le sens du temps a échappé à notre critique) n'a en fait pas de conséquences dans la suite de la démonstration. Elle intervient tout au plus comme un choix particulier de la variation de la variable t à laquelle la variation de la fonction H va être comparée.

générale: $P_r(t+\epsilon dt) = P_r(t) + B$ où $\epsilon = \pm 1$. En reprenant l'expression (2) de B, on obtient:

$$\epsilon dP_r/dt = \sum_s P_s W_{sr} - \sum_s P_r W_{rs} \tag{3}$$

En se servant de la condition dite de "microréversibilité": $W_{rs} = W_{sr}$, puis en remplaçant dans (1) dP_r/dt par sa valeur donnée en (3), dH/dt devient:

$$\frac{dH}{dt} = \epsilon^{-1} \sum_{r,s} W_{rs}(P_s - P_r)(\ln P_r + 1) \tag{4}$$

Intervertissant les indices de sommation r et s, on réécrit dH/dt de la façon suivante:

$$\frac{dH}{dt} = \epsilon^{-1} \sum_{r,s} W_{sr}(P_r - P_s)(\ln P_s + 1) \tag{5}$$

En utilisant de nouveau $W_{rs} = W_{sr}$, la somme de ces deux expressions de dH/dt en fournit une nouvelle qui a un signe facile à déterminer:

$$\frac{dH}{dt} = (-2\epsilon)^{-1} \sum_{r,s} W_{rs}(P_r - P_s)(\ln P_r - \ln P_s) \tag{6}$$

En effet, puisque $(P_r - P_s)(\ln P_r - \ln P_s) \geq 0$, et que $W_{rs} \geq 0$, on obtient:

$$\operatorname{sgn}(\frac{dH}{dt}) = -\operatorname{sgn}(\epsilon) \quad \text{ou} \quad \frac{dH}{dt} = 0 \tag{7}$$

Ce théorème H généralisé s'énonce de la façon suivante: "La fonction H décroit dans la direction du temps qu'on associe aux transitions élémentaires", à comparer avec le théorème H usuel, qui s'écrit: $dH/dt \leq 0$, et s'énonce: "La fonction H décroit dans la direction des temps croissants". (Dans les deux cas, bien entendu, la fonction H est constante lorsque toutes les probabilités P_r sont égales) Ce qui peut apparaître déroutant dans la généralisation du théorème H qui vient d'être présentée, c'est la totale dissociation entre le processus irréversible (l'uniformisation des probabilités P_r) et le sens du temps t suivant lequel se déroule le processus en question, alors que le théorème H version standard visait précisément à les rendre indissociables. Avant de poursuivre l'analyse, je voudrais faire remarquer que les conclusions précédentes ont été atteintes, par d'autres moyens, dès 1950. Dans un article peu cité [7], Schrodinger insistait sur la nécessaire distinction entre sens du temps et irréversibilité. Pour lui, la tâche principale de la physique statistique était "de formuler tous les énoncés portant sur l'irréversibilité de façon qu'ils soient invariants par la transformation $t\prime = -t$." Sa méthode pour parvenir à ce résultat peut être comprise aisément à l'aide des concepts que nous avons introduits. Considérons deux ensembles de systèmes isolés régis par les lois stochastiques décrites plus haut, et supposons que, pour les deux ensembles, les transitions élémentaires prennent place dans le même sens du temps, mais pas nécessairement dans le sens des t croissants. La fonction H du premier ensemble s'écrit $H_1(t)$ et celle du second ensemble $H_2(t)$. Choisissons à présent deux instants t_A et t_B entre lesquels on évalue la variation des deux fonctions H. D'après le théorème H généralisé écrit en (7), cette variation est nécessairement du même signe pour $H_1(t)$ et pour $H_2(t)$. Par conséquent, le produit $[H_1(t_A) - H_1(t_B)].[H_2(t_A) - H_2(t_B)]$ est nécessairement positif. C'est ainsi qu'on peut exprimer l'irréversibilité de deux ou plusieurs processus, sans se préoccuper du sens du temps suivant lequel ont lieu leurs transitions élémentaires.

D'après ce qui précède, la fonction H (ou l'entropie affectée d'un signe moins) d'un système isolé peut décroitre aussi bien dans un sens du temps que dans l'autre, c'est à dire que, plus précisément, elle peut décroitre aussi bien quand la variable t de la dynamique est croissante que quand elle est décroissante. Cet énoncé me semble irréfutable. Et pourtant il apparait insolite, voire choquant. Analysons ce qui nous choque en lui. Nous savons bien que, si nous mesurons l'entropie d'un système isolé hors d'équilibre et que, en possession de ce résultat, nous remesurons l'entropie du même système, l'entropie de la seconde mesure est plus forte que celle de la première dans une proportion écrasante de cas. Notez ici qu'on n'a pas eu besoin de parler de temps, mais seulement de deux mesures dont l'une s'effectue dans des conditions telles que l'information sur le résultat de l'autre est disponible. Allons un peu plus loin. Suivant Ter Haar [8], la raison pour laquelle on choisit un sens du temps particulier pour les transitions élémentaires est que "Si nous avons défini un ensemble afin qu'il représente un système observé à l'instant $t\prime$, nous sommes seulement intéressés par des prédictions qui pourraient être vérifiées, c'est à dire à un instant $t\prime\prime$. " Dans cette réflexion, le rôle déterminant de ce qui *nous* intéresse (donc le rôle du sujet connaissant) est explicitement mis en avant.

Récapitulons.

– Il n'y a pas de relation entre l'irréversibilité d'une évolution et le paramètre t de la dynamique classique, en vertu de la démonstration (1-7) du théorème H généralisé.

- En revanche, il semble exister une relation nécessaire entre l'ordre d'acquisition des informations portant sur un ensemble de systèmes isolés et son accroissement d'entropie.
- Si, dans ces conditions, on associe conventionnellement l'accroissement du paramètre t à l'accroissement de l'information qu'on peut acquérir sur l'ensemble, alors une relation entre t et l'accroissement d'entropie est introduite.

En somme, le théorème H sous sa forme usuelle n'exprimerait rien d'autre qu'une relation entre une fonction décrivant l'ensemble observé et les caractéristiques de l'information dont le sujet qui l'observe peut disposer sur lui. Cette relation serait seulement rendue indirecte par l'intervention du paramètre t de la dynamique. Pour étayer cette interprétation, nous devons démontrer la possibilité de rendre directe la relation visée, c'est à dire de se passer totalement du concept intermédiaire de paramètre t. C'est le programme que nous nous fixons pour la partie suivante du présent article, dans laquelle le cas particulier de la mesure quantique est abordé.

3. Mesure quantique et sens du temps

La mécanique quantique se prête particulièrement bien au développement des idées précédentes. En effet, alors que la mise en évidence du rôle du sujet connaissant en physique statistique classique a été indirecte et délicate, la démarche est rendue relativement aisée en mécanique quantique grâce au fait que plusieurs interprétations de cette théorie font explicitement appel au concept d'observateur.

Examinons donc la question du sens du temps dans la théorie de la mesure quantique. Dans la première description, qui est la version simplifiée et banalisée de l'interprétation de Copenhague, un système peut évoluer suivant deux modalités distinctes: entre deux mesures, son état $|\psi\rangle$ change continûment suivant l'équation de Schrodinger, tandis que la mesure provoque une transition brutale (et non décrite par l'équation de Schrodinger) de $|\psi\rangle$ vers l'un des états propres $|a_i\rangle$ de l'observable A correspondant à cette mesure. On admet généralement que, dans cette transition brutale, $|\psi\rangle$ précède $|a_i\rangle$. Il faut cependant tout de suite remarquer que, le processus de transition brutale $|\psi\rangle \rightarrow |a_i\rangle$ au cours d'une mesure n'étant pas décrit par l'équation de Schrodinger, on n'a a priori aucune raison de supposer la moindre relation entre le paramètre t qui intervient dans cette équation et le terme "précéder" dont on vient de se servir. A ce stade, toute tentative d'introduire subrepticement une telle relation serait la manifestation d'un présupposé inavoué. Cependant, des chercheurs éminents de l'école de Copenhague ont tenté de donner un fondement solide à l'idée suivant laquelle la transition $|\psi\rangle \to |a_i\rangle$ se déroule dans le sens des temps croissants. Ils ont pour cela fait remarquer que toute mesure d'un phénomène quantique fait intervenir des processus irréversibles à une échelle macroscopique. Un raisonnement de physique statistique conduit dans ces conditions à démontrer que la mesure quantique se déroule de préférence dans un sens particulier du temps. L'ennui est que ce raisonnement tombe sous le coup des difficultés évoquées dans la partie 2 du présent article.

Une seconde manière d'exprimer les principaux traits de la mesure quantique est fournie par l'interprétation d'Everett [2], également connue sous le nom de "interprétation de la mécanique quantique à plusieurs mondes". Indépendamment du jugement qu'on peut porter sur la vraisemblance métaphysique de cette interprétation, on doit noter que ses conséquences observables sont indiscernables de celles qu'engendre l'interprétation de Copenhague.

La conception d'Everett met l'accent sur le fait que la mesure quantique est avant tout une interaction. Bien que cette interaction puisse avoir lieu entre deux objets d'échelle très différente, par exemple entre particule élémentaire et instrument de mesure fait d'un agencement macroscopique de telles particules, ou, à travers d'éventuels intermédiaires, entre particule et organes sensoriels de l'observateur, il est postulé qu'elle obeit à l'équation de Schrodinger. Dans ces conditions, on peut montrer que si l'état du système objet microscopique+observateur s'écrit à l'instant t comme un produit tensoriel: $|\psi\rangle|\phi_0\rangle$ (où $|\psi\rangle$ est l'état de l'objet microscopique et $|\phi_0\rangle$ l'état de l'observateur), l'état auquel donne lieu l'interaction à l'instant $t\prime$ est une superposition telle que l'observateur n'est plus associé à un seul vecteur d'état, mais à un ensemble de vecteurs d'état corrélés aux états de l'objet. Everett appelle "bonne observation" une interaction qui aboutit à ce que l'observateur soit représenté par autant de vecteurs d'état que d'états propres de l'objet, chacun de ces vecteurs d'état étant strictement associé à l'un de ces états propres. Si c'est l'observable A qui est mesurée et que $|\psi\rangle$ s'écrit: $|\psi\rangle = \sum c_i|a_i\rangle$, l'interaction objet microscopique/observateur aboutit à la transformation:

$$|\psi\rangle|\phi_0\rangle \to \sum c_i|a_i\rangle|\phi_i\rangle$$

L'une des originalités d'Everett est qu'il fait intervenir directement, dans ses notations, l'aspect cognitif de la mesure. Il y parvient en posant qu'un observateur dont l'état est corrélé avec un état propre $|a_i\rangle$ de l'observable mesurée n'est autre que cet observateur ayant enregistré, dans sa mémoire, la valeur propre correspondante a_i comme résultat de sa mesure. Les états $|\phi_i\rangle$ se réécrivent de la façon suivante: $|\phi_i\rangle = |\phi[...a_i]\rangle$, où le contenu du crochet représente l'information mémorisée par l'observateur. Dans cette information, on trouve en particulier le résultat a_i de la mesure de l'observable A. La seconde originalité d'Everett est dans l'interprétation de l'écriture $|\phi^T\rangle = \sum c_i|a_i\rangle|\phi[...a_i]\rangle$ de l'état objet+observateur. Nous avons remarqué que l'interaction de ces deux constituants, décrite par l'équation de Schrodinger, multiplie par n le nombre d'états décrivant l'observateur, n étant le nombre de vecteurs propres de A. Ceci est une difficulté majeure si l'on considère qu'un observateur donné ne peut être décrit que par *un* état. La solution apparemment la plus facile à cette difficulté est de considérer que les états $|\phi[...a_i]\rangle$ sont tous possibles mais qu'un seul d'entre eux est actualisé et représente le "véritable" état. Mais quel processus physique pourrait provoquer cette actualisation? Everett propose d'admettre que tous les états de l'observateur sont actuels, et existent dans plusieurs mondes séparés. Dans ces conditions, aucune contradiction n'apparait. En effet, si l'on considère par exemple le monde où l'observateur se trouve dans l'état $|\phi[...a_i]\rangle$, tout s'y passe comme si le seul résultat observé avait été a_i. En particulier, le résultat de toute observation effectuée dans ce monde n'est pas influencé par l'existence parallèle de mondes où l'observateur est dans les états $|\phi[...a_1]\rangle, |\phi[...a_2]\rangle, ..., |\phi[...a_n]\rangle$.

Reste la question la plus importante pour le sujet de cet article. La transition $|\psi\rangle|\phi_0\rangle \rightarrow \sum c_i|a_i\rangle|\phi[...a_i]\rangle$ s'effectue-t-elle nécessairement dans le sens des temps croissants? Plus précisément, l'interaction entre objet microscopique et observateur étant décrite par l'équation de Schrodinger où intervient le paramètre t, l'état non corrélé du système étant réalisé à l'instant t et l'état corrélé à l'instant t', est-il nécessaire que $t' > t$? Il se trouve que la réponse à cette dernière question est non. L'équation de Schrodinger est en effet invariante par la transformation $t'' = -t$, du moins dans certaines conditions généralement réalisées et que je ne préciserai pas ici (voir [9]). Si donc on tient à considérer, comme c'est usuel, que $t' > t$, c'est pour des raisons entièrement extérieures à l'équation de Schrodinger, et qui tiennent vraisemblablement à des conventions implicites, évoquées en 2, concernant les rapports entre accroissement de l'information et accroissement du paramètre t. C'est à ce point que nous allons tenter d'expliciter ces conventions.

Dans ce but, il est intéressant d'apporter quelques compléments à l'interprétation d'Everett de la mesure quantique. Cette interprétation a en effet l'avantage d'intégrer dans ses notations la dimension cognitive du processus de mesure, mais elle en fait une analyse sommaire en ne tenant compte que de la connaissance prise par l'observateur du résultat de la mesure effectuée. Or, on doit remarquer que lorsqu'une expérience scientifique est effectuée, la simple prise de connaissance de son résultat (généralement un nombre) en dehors de toute notion sur la constitution de l'appareillage qui a permis de l'obtenir et sur l'objet étudié, ne saurait être appelée une mesure. L'ensemble de ces informations permettant d'interpréter un nombre comme résultat d'une mesure est obtenu au cours de ce qu'il est convenu d'appeler la "préparation" d'une expérience, et en constitue les conditions initiales. Pour éviter les présupposés habituels liés aux connotations temporelles de mots comme "préparation" et "condition initiale", nous leur préfèrerons les mots neutres "paration" et "conditions nécessaires". Cette dernière expression vise en particulier à indiquer que la caractéristique fondamentale de ce qui est appelé "condition initiale" n'est pas de précéder temporellement un résultat, mais bien de le précéder logiquement en ce qu'elle est "nécessaire" pour pouvoir l'interpréter comme résultat d'une mesure. La mesure met alors en jeu trois systèmes en interaction (et non plus deux): un objet, un appareil, et un observateur. En outre, la mesure comprend deux étapes: la paration et l'obtention d'un résultat. La paration consiste pour l'observateur à choisir l'un des états possibles du système objet+appareil de mesure, ces deux constituants n'ayant pas subi d'interaction mutuelle. Si l'état du système objet+appareil s'écrit comme une superposition linéaire: $\sum |\psi_k\rangle|\mu_k\rangle$, ou $|\mu_k\rangle$ est un état possible de l'appareil de mesure et $|\psi_k\rangle$ l'état correspondant de l'objet à mesurer, l'état de l'ensemble objet+appareil+observateur s'écrit: $(\sum |\psi_k\rangle|\mu_k\rangle)|\phi_0\rangle$. Lorsque la paration est effectuée, l'état du système à trois constituants précédent est noté: $\sum_k |\psi_k\rangle|\mu_k\rangle|\phi[...N_k]\rangle$. Dans cette écriture, le contenu de mémoire de l'observateur (entre crochets) inclut la notion de la condition nécessaire N_k correspondant à l'état particulier $|\psi_k\rangle|\mu_k\rangle$ du système objet+appareil de mesure. A ce stade, la mesure proprement dite consiste en la corrélation de l'appareil avec chacun des états propres de l'observable A, et en la corrélation de l'observateur avec chacun des états corrélés de l'appareil. Si $|\psi_k\rangle = \sum_i c_i^k|a_i^k\rangle$ l'interaction conduisant à l'obtention d'un résultat se manifeste par la transition suivante:

$$\sum_k |\psi_k\rangle|\mu_k\rangle|\phi[...N_k]\rangle \to \sum_{i,k} c_i^k|a_i^k\rangle|\mu_k^i\rangle|\phi[...(N_k, a_i^k)]\rangle$$

Comme nous nous interessons essentiellement aux états de l'observateur, il est intéressant d'adopter la notation branchée:

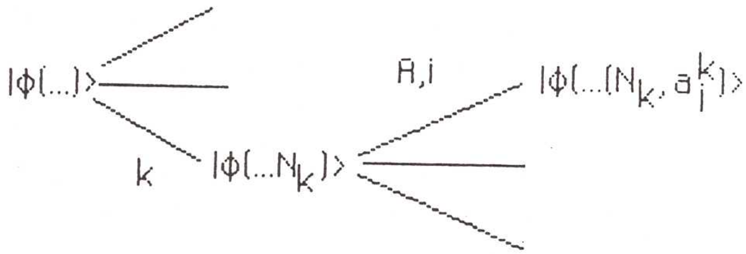

Figure 1. Diagramme 1.

ou sa forme condensée:

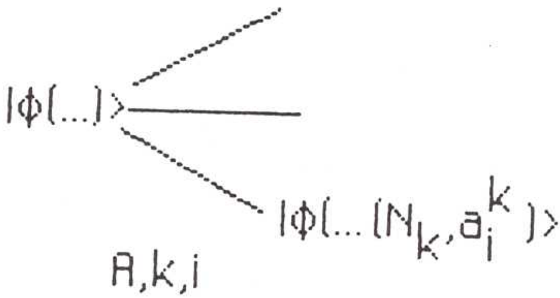

Figure 2. Diagramme 2.

Ce sont ces notations que nous emploierons désormais, mais on remarquera qu'elles ne sont qu'un moyen commode de concrétiser et de réduire à l'essentiel les sommes de produits tensoriels de vecteurs d'état.

Revenons à notre problème central: chacune des transitions représentées sur le schéma précédent peut indifféremment prendre place dans le sens des temps croissants ou décroissants (le mot "temps" désigne ici la variable t intervenant dans l'équation de Schrodinger qui, rappelons-le, régit ces transitions). Ceci semble assez choquant à nos esprits habitués à compter en permanence avec l'impossibilité de faire des mesures dans n'importe quel sens du temps. Mais avant de se déclarer choqué, il faut considérer que la parfaite symétrie du processus de mesure qui vient d'être énoncée, est tout à fait abstraite. Elle signale simplement qu'on ne peut établir de relation biunivoque entre d'une part l'ordre de succession de la condition nécessaire et du résultat d'une mesure, et d'autre part l'ordre numérique des t croissants ou décroissants. Mais cette absence de relation laisse-t-elle la possibilité concrète à un observateur d'effectuer certaines de ses mesures dans un sens du temps et d'autres dans le sens opposé? Il se trouve justement que non, ainsi que nous allons le montrer maintenant.

Considérons pour cela un observateur effectuant la mesure des observables A et B sur un objet microscopique. Les processus d'interaction de l'observateur avec l'objet seront suivis par un second observateur (que nous appellerons le "méta-observateur" car il est observateur au deuxième degré). En particulier, ce méta-observateur se chargera de l'établissement de la chronologie des deux mesures effectuées par l'observateur.

Premier cas (voir diagramme 3): les deux mesures sont effectuées suivant le même sens du temps, que ce sens soit celui des temps croissants ou décroissants. Ici, pas de problème particulier.

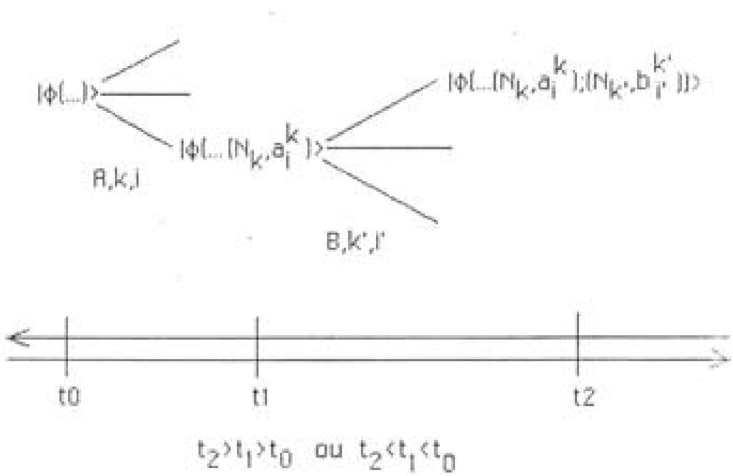

Figure 3. Diagramme 3.

Deuxième cas: l'une des mesures est effectuée dans un sens du temps, et l'autre dans le sens opposé (diagramme 4):

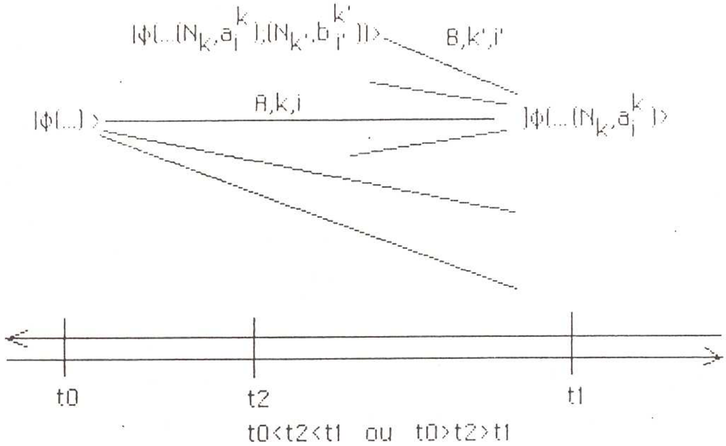

Figure 4. Diagramme 4.

Là, une difficulté apparait. Le méta-observateur remarque en effet qu'au temps t_2, l'observateur est *à la fois* dans un état où il n'a connaissance que de la condition nécessaire et du résultat de la mesure de A, et dans un état où il a connaissance des conditions nécessaires et des résultats des mesures de A et de B. Ceci est une contradiction, même dans le cadre de l'interprétation d'Everett. Dans cette interprétation, plusieurs situations mutuellement exclusives peuvent certes coexister. Cette coexistence est rendue possible sans contradiction apparente grâce à l'hypothèse suivant laquelle chacune de ces situations est associée à un "monde" particulier, totalement indépendant des autres "mondes". Mais, tandis qu'on peut assigner une probabilité à chacune des "branches" qui résultent d'*une seule mesure*, aucune règle théorique ne permet d'inclure les branches issues de *deux* interactions dans un seul espace d'événements, et de leur faire correspondre des probabilités dans cet espace. Le méta-observateur est donc privé de tout critère pour décider à laquelle des séries d'états mémoire de l'observateur il peut accéder s'il décide de poser des questions à ce dernier à l'instant t_2.

Jusque là, nous nous sommes intéressés à décrire ce double processus de mesure du point de vue de quelqu'un qui n'y participe pas directement, le méta-observateur. Voyons à présent ce que peut en dire l'observateur lui-même. Lui ne perçoit de tout ceci que trois contenus de sa propre mémoire: le premier où il ne sait rien, le second où il n'a connaissance que de la mesure de A et de son résultat, le troisième où il a connaissance des deux mesures et de leur résultat:

$$[...]$$

$$[...(N_k, a_i^k)]$$

$$[...(N_k, a_i^k); (N_{k'}, b_{i'}^{k'})]$$

Quelles que soient les localisations temporelles externes de ces contenus de mémoire, l'observateur se perçoit comme ayant accès à l'un d'entre eux à l'exclusion des deux autres. La contradiction précédente, qui apparaissait lorsque le processus de mesure décrit *de l'extérieur* prenait place dans deux sens du temps différents, ne se manifeste plus d'un point de vue purement *intérieur* à l'observateur effectuant la mesure.

En somme, effectuer deux mesures dans deux sens du temps est impossible car: (i) si ces mesures sont décrites de l'extérieur il apparait une contradiction et (ii) si ces mesures sont décrites de l'intérieur, les deux cas (mesures effectuées dans un ou deux sens du temps) ne peuvent être distingués. Il devient clair que l'équivalence formelle entre une mesure effectuée dans le sens des temps croissants et une autre effectuée dans le sens des temps décroissants n'empêche pas qu'il y ait impossibilité pratique d'effectuer des mesures dans deux sens du temps distincts. A présent, il nous reste à mieux comprendre la signification de cette impossibilité.

En définitive, il n'est apparu de véritable impossibilité que dans le compte rendu externe des deux mesures. Le compte rendu interne faisait pour sa part apparaître une simple indistinction entre des couples de mesures ayant eu lieu dans le même sens du temps ou dans des sens opposés. La seule notion qui se manifestait de ce dernier point de vue était une relation d'ordre dans l'ensemble des contenu de mémoire de l'observateur: un contenu inclut le résultat de mesure de A et non celui de B, tandis qu'un autre contenu inclut les deux résultats de mesure. Nous allons montrer que l'impossibilité pour deux mesures de se dérouler dans deux sens distincts du temps, telle qu'elle est attestée dans le compte rendu externe de ces mesures, se réduit elle-même aux caractéristiques internes d'une relation d'ordre de contenus de mémoire. Cependant, il ne s'agit plus cette fois de la mémoire de l'observateur effectuant les mesures, mais de celle du méta-observateur qui les décrit dans ce que nous avons appelé le compte-rendu externe.

Pour voir ceci, nous aurons besoin d'inclure le méta-observateur dans la description quantique des interactions. L'observateur (dont l'état est noté $|\phi[...]\rangle$) effectuera des mesures de l'observable A sur l'objet microscopique.

Le méta-observateur (dont l'état est noté $|Z[...]\rangle$) effectue pour sa part des mesures de l'observable O_ϕ sur l'observateur. Cette observable O_ϕ lui donne accès au contenu de la mémoire de l'observateur. Les deux séquences de mesure de A et O_ϕ que nous considèrerons sont montrées dans le diagramme 5 ci-dessous.

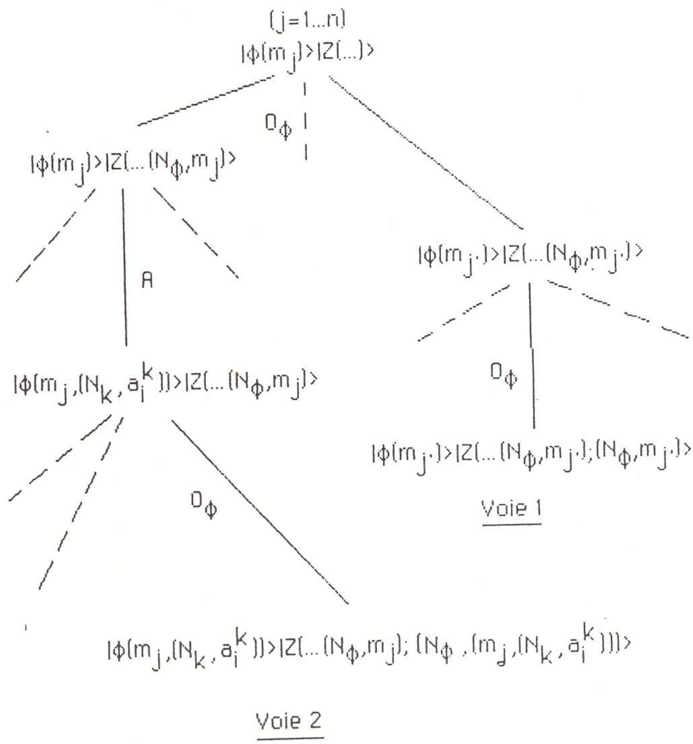

Figure 5. Diagramme 5.

La lecture du diagramme s'effectue comme suit: considérons un système observateur+méta-observateur dans l'état: $|\phi[m_j]\rangle|Z[...]\rangle$. Si, dans cet état, le méta-observateur (Z) mesure le contenu de mémoire de l'observateur (ϕ), c'est-à-dire mesure l'observable O_ϕ , on obtient un état: $|\phi[m_j]\rangle|Z[...(N_\phi, m_j)]\rangle$ (ou $|\phi[m_{j'}]\rangle|Z[...(N_{\phi'}, m_{j'})]\rangle$ dans la voie 1, par souci de la distinguer dès ce stade de la voie 2). Dans chacun de ces états, l'observateur (ϕ) peut soit ne pas mesurer, soit mesurer, l'observable A sur l'objet microscopique (l'état de ce dernier n'est pas dénoté dans le diagramme). Dans le premier cas (voie 1), le contenu de la mémoire de l'observateur (ϕ) que le méta-observateur peut obtenir lors d'une seconde mesure de O_ϕ est *inchangé* par rapport à celui trouvé lors de la première mesure. Dans le deuxième cas (voie 2), le contenu de la mémoire de l'observateur trouvé par le méta-observateur lors de sa seconde mesure de O_ϕ est *plus grand* que celui obtenu lors de la première mesure. Un cas est donc exclu: celui où le contenu de mémoire de l'observateur, connu par le méta-observateur lors de la seconde mesure de O_ϕ, est *plus petit* que celui obtenu lors de la première mesure de O_ϕ. Il est important de noter que la conclusion précédente vaut indépendamment de la croissance ou de la décroissance du paramètre t de l'équation de Schrodinger qui régit les interactions entre les constituants du système ternaire considéré (objet+observateur+méta-observateur). En effet, toutes les transitions représentées sur le précédent diagramme peuvent aussi bien se dérouler à t croissants qu'à t décroissants. Si, dans une étape ultérieure, le méta-observateur définit une *nouvelle* variable t qui ait pour propriété *conventionnelle* d'être uniformément croissante ou décroissante avec le contenu de sa propre mémoire, il peut retrouver le résultat exprimé dans ce que nous avons appelé la description "externe" du processus de mesure conduit par l'observateur: deux mesures effectuées par cet observateur doivent aller dans le même sens du "temps". Mais cette fois, le "temps" a perdu son statut d'entité transcendante et n'est plus qu'une notion dérivée provenant de la numérotation des informations contenues dans la mémoire du méta-observateur.

4. Conclusion:

Le problème du sens du temps n'est en définitive pas aussi inextricable que sa mauvaise réputation pouvait le laisser craindre. Il doit simplement élargir son énoncé pour être clarifié. Les tentatives de mettre en évidence des fonctions des variables dynamiques d'un système qui aient un comportement dépendant du temps (les fonctions H) ont jusque là abouti à des pétitions de principe, du fait qu'elles laissaient intervenir dans leur raisonnement des présupposés pré-scientifiques, sans la moindre ébauche d'analyse critique. Dans le meilleur des cas, on explicitait ces présupposés en conventions dont on ne faisait que soupçonner le lien avec l'intervention du sujet connaissant dans la définition des phénomènes. Dans cet article, j'ai tenté de montrer, sur l'exemple de la mesure quantique, comment les principaux traits de l'unidirectionnalité temporelle des phénomènes peuvent se réduire à des relations d'ordre dans les contenus de mémoire des observateurs qui en prennent connaissance, sans qu'aucun paramètre t défini en dehors de toute référence à ces observateurs ait le moindre rôle à jouer. Un nouveau paramètre t peut éventuellement être construit de façon à exprimer ces propriétés de la prise de connaissance des phénomènes, et il ressemblera fort à l'ancienne entité [10]. Mais cette fois, son unidirectionnalité sera le fruit d'une construction parfaitement maîtrisée, au lieu d'apparaître à la lueur trouble de préjugés inavoués. La méthode employée pour mettre en évidence le rôle constitutif du sujet connaissant dans ce qui peut s'interpréter comme "unidirectionnalité temporelle" a consisté à mettre en scène ce sujet sous le double aspect d'un observateur et d'un méta-observateur dont les propriétés cognitives mises en jeu sont dénotées dans le cadre de l'interprétation d'Everett. Ce procédé évoque la métaphore Hitchcockienne décrite en introduction.

Pour finir, il est tentant d'esquisser l'arrière-plan métaphysique du compte-rendu du problème du sens du temps tel qu'il vient d'être donné. Certains pourront considérer qu'il s'agit d'une vision subjectiviste. Que somme toute, l'unidirectionnalité du temps n'y est qu'une construction de l'esprit. Si cela était vrai, nous serions libérés, comme le dit Schrodinger [11], "(...) de la tyrannie du vieux Chronos." En effet, "Ce que nous construisons nous-mêmes dans nos esprits ne peut pas, je pense, avoir un pouvoir dictatorial sur notre esprit, ni le pouvoir de le créer ni le pouvoir de l'anéantir." Or, nous n'avons pas montré que l'unidirectionnalité du temps est une libre construction de l'esprit, mais seulement qu'elle est une manière d'exprimer certaines contraintes liées à la structure des connaissances de ce même esprit. En ce sens, nous ne sommes pas dispensés de craindre la morsure du temps. Nous trouvons simplement une consolation dans le constat Borgésien: "Le temps est un feu qui me dévore mais je suis le feu."

Annexe: A propos des conceptions de Prigogine.

Je voudrais revenir sur la portée de la démonstration du théorème H généralisé écrit à l'équation (7). Nous avons, pour le dériver, supposé d'emblée que l'évolution à étudier était celle d'un processus stochastique. Pourtant si les systèmes dont nous traitons sont régis par les lois de la dynamique classique, la description de leur évolution par un processus stochastique ne va pas de soi. Pour en arriver là, les pionniers de la physique statistique que sont Boltzmann et Gibbs ont du superposer un peu artificiellement des traits stochastiques à une dynamique totalement déterministe. Leurs approches de ce problème sont assez connues pour qu'on se contente d'en indiquer les étapes essentielles:

-L'introduction par Boltzmann de l'hypothèse dite du "chaos moléculaire", et d'une équation cinétique simplifiant considérablement le processus dynamique dont elle est l'expression.

-L'utilisation par Gibbs du découpage grossier (ou coarse graining) de l'espace des phases.

L'apport beaucoup plus récent de Prigogine consiste à prendre en compte les progrès des travaux théoriques sur la dynamique, en particulier la dynamique classique. Ceux-ci montrent que des mouvements régis par les lois de la dynamique peuvent avoir un caractère intrinsèquement aléatoire. Dans ce cas, les traits stochatiques de l'évolution d'un ensemble de systèmes régis par les lois de la dynamique ne doivent plus être superposés artificiellement: ils sont déjà inclus dans ces lois. Ainsi que le dit Prigogine [12], "c'est la structure des équations du mouvement au niveau microscopique avec leur élément aléatoire qui se manifeste en tant qu'irréversibilité au niveau macroscopique." Le travail de Prigogine et de son équipe a ainsi fait faire un pas décisif à la recherche de l'origine du caractère stochastique des processus dynamiques qui interviennent en physique statistique. Il n'a en revanche strictement pas touché à la question centrale du présent article, qui se ne pose qu'une fois admise l'idée suivant laquelle l'évolution d'un ensemble de systèmes est régie par des lois stochastiques, et ce indépendamment de l'origine de ces lois. Cette question consiste à demander en vertu de quel critère on choisit d'associer un sens particulier du temps aux transitions élémentaires du processus stochastique mis en jeu. Une telle distinction n'a pas été bien perçue par Prigogine, qui a souvent affirmé avoir, par ses travaux, fourni un fondement objectif au concept d'unidirectionnalité du temps: Prigogine [12] appelle "temps" un opérateur T dont les valeurs propres sont, pour aller vite, des nombres de transitions élémentaires. Ceci lui permet de parler d'un "temps interne" dont l'unidirectionnalité intrinsèque serait liée à l'irreversibilité du processus stochastique d'où il est issu. Mais par ailleurs, lorsqu'il traite du sens de variation d'une fonction de Lyapounov construite à partir de l'opérateur précédent, il signale que cette fonction de Lyapounov "augmente ou diminue au cours du temps selon la définition adoptée." Il ajoute encore, en conclusion de son ouvrage, qu' "on peut construire une fonction de Lyapounov qui croit de manière monotone avec la flèche du temps, ou une autre qui décroit." et que, par conséquent, "nous pouvons briser la symétrie du temps de la dynamique de deux manières".

Cette apparente contradiction est de toute évidence due à la coexistence de deux concepts parallèles de temps. L'un (l'opérateur T) qui est organiquement lié au processus irréversible qu'il exprime, et l'autre (le paramètre t) qui est un étiquetage extrinsèque des phénomènes. La relation qu'entretiennent ces deux concepts de temps est exactement identique à celle, déjà bien connue et clairement exprimée par Schrodinger [7], entre irréversibilité et paramètre t.

Références

[1] Wittgenstein L.; *Le cahier Bleu et le cahier brun,* Gallimard (1965), p. 64
[2] Everett H.; *Theory of the universal wave function,* in: The many-worlds interpretation of quantum mechanics, B. S. de Witt and N. Graham eds., P.U.P. (1973).
[3] Truffaut F.; *Hitchcock/Truffaut,* Ramsay, (1983).
[4] Costa de Beauregard O.; *Le second principe de la science du temps,* Seuil, (1963).
[5] Reif F. *Fundamentals of statistical and thermal physics,* Mc Graw Hill, (1965)
[6] Jancel R.; *Les fondements de la mécanique statistique classique et quantique,* Gauthiers-Villars, (1963).
[7] Schrodinger E.; *Irreversibility,* Proc. Roy. Irish Acad. **A 53,** 189-195, (1950).
[8] Ter Haar D.; *Foundations of statistical mechanics,* Rev. Mod. Phys., **27,** 289-315, (1955).
[9] Messiah A.; *Mécanique quantique,* Dunod, (1960).

[10] Bitbol M.; *Time symmetry and quantum measurements,* Phys. Lett. **115 A,** 357-362, (1986).
[11] Schrodinger E.; *Mind and matter,* C.U.P., (1983).
[12] Prigogine I.; *Physique temps et devenir,* Masson, (1980).

Manuscrit reçu le 12 mai 1987