



*Présentation du Professeur Prigogine
par le professeur Gérard Dubois lors de
la conférence donnée en Sorbonne le 15 mai 1991*

Le professeur **PRIGOGINE** jouit d'une notoriété mondiale. Membre de multiples académies en Belgique, en France, aux Etats-Unis, en URSS, en Suède, en Allemagne, en Autriche, en Inde, au Portugal et en Argentine, il a reçu de très nombreux prix dont, vous le savez, en 1977, le Prix Nobel de Chimie.

Le professeur Ilya Prigogine est cependant inclassable. Belge d'origine russe, membre du Haut Conseil de la Francophonie en France, Prix Nobel de Chimie, ses travaux principaux semblent plutôt relever de la physique. Il est passé de la réversibilité du temps à l'éternité, du microscopique à la complexité. Il a d'ailleurs la qualité rare de savoir parler simplement de la complexité.

Le sujet traité sous le titre "le Paradoxe du Temps", me paraît, à mon sens, entraîner les considérations suivantes à titre d'introduction.

La relativité restreinte puis générale a supprimé l'illusion d'un temps et d'un espace absolus. Le principe d'Heisenberg a interdit à l'échelle atomique la notion même de mesure absolue. Le déterminisme semblait cependant conserver sa valeur à notre échelle. La géométrie d'Euclide permet toujours aux architectes de bâtir, les

I. PRIGOGINE

masses tombent toujours en accélérant. Apprêtez-vous cependant à abandonner vos certitudes. On sait maintenant qu'un système simple peut faire des choses compliquées, que la non linéarité conduit à la fois à la stabilité et au chaos, que déterminé ne veut plus dire prévisible, que les lois de la complexité valent universellement sans tenir compte des détails.

Ce tremblement de terre conceptuel change notre façon de regarder le monde. Il ouvre grand une avenue nouvelle de connaissances mais en même temps nous conduit à une grande modestie. Pour y voir plus clair il faut savoir que ce "chambardement" est sans doute la troisième révolution conceptuelle après celle des quantas et celle de la relativité et que nous le devons au professeur Ilya Prigogine qui, ce faisant, se classe sans nul doute à mon avis parmi les plus grands penseurs de notre siècle.

G.D.

Le paradoxe du temps

Ilya PRIGOGINE

Le thème de cet exposé est le paradoxe du temps. Nous pouvons distinguer une fleur qui va s'ouvrir, d'une fleur qui se fâne. Nous ne pouvons comprendre notre civilisation qu'en adoptant un point de vue temporel. Et pourtant quand nous descendons vers les phénomènes les plus élémentaires, la flèche du temps semble disparaître. Pensons à un pendule, sans friction. Les positions successives du pendule peuvent s'ordonner aussi bien suivant une série temporelle que suivant la série inverse. La direction du temps n'intervient pas dans le mouvement du pendule. Il en est de même du mouvement planétaire. Ici encore nous pouvons remplacer le temps t par $-t$. L'inversion du temps, l'échange entre futur et passé n'a aucun effet sur les équations qui régissent le mouvement. En mécanique quantique nous pensons en terme de fonctions d'onde. Là encore, la succession des états décrits par la fonction d'onde, ne possède pas de flèche du temps.

I. PRIGOGINE

Quel est le donc le statut de l'irréversibilité ? Est-ce une propriété fondamentale de l'Univers ? Ou le temps ne correspond-il qu'à un cadre conceptuel que nous imposons au monde intemporel ?

Mon exposé comprendra trois parties :

Comment sommes-nous devenus conscients de l'existence du paradoxe du temps ?

Ensuite j'expliquerai pourquoi ce paradoxe a pris une dimension nouvelle au cours des dernières décennies.

Et enfin, j'exposerai les raisons pour lesquelles nous pouvons parler aujourd'hui de la solution de ce paradoxe.

I

Il va de soi que le problème du temps a toujours préoccupé l'homme. C'est notre dimension existentielle par excellence. La question, «qu'est-ce que le temps ?», a fasciné les artistes, les poètes, les philosophes autant que les scientifiques. Et pourtant, la prise de conscience qu'il y avait un paradoxe attaché au problème du temps est relativement récente. Il semble en effet que, la physique classique, la physique newtonienne continuée par des grands physiciens mathématiciens comme Lagrange, Hamilton et Jacobi avait résolu le problème du temps. A son niveau fondamental le monde était décrit par des trajectoires et le temps apparaissait comme un paramètre qui précisait la position d'un mobile sur sa trajectoire. Mais en 1859, Darwin publie son ouvrage fondamental «*L'origine des espèces*». C'est sans doute, la première théorie de l'évolution basée sur un mécanisme bien défini, la sélection naturelle. Mais une théorie de l'évolution n'est possible que si on distingue radicalement entre l'avant et l'après et si dès lors, on introduit la notion d'irréversibilité.

La réponse des sciences physiques au défi biologique ne s'est pas laissée attendre. En 1865, Clausius formule le Second Principe de la thermodynamique. Ce principe introduit la notion d'entropie. Cette grandeur a des propriétés remarquables. Considérons en effet, un système défini comme une portion limitée de l'espace. Nous pouvons alors décomposer la variation d'entropie en deux parties : un apport de

l'entropie venant du monde extérieur et une production d'entropie due aux phénomènes irréversibles au sein même du système. Le second principe postule que cette production d'entropie est positive. Les phénomènes irréversibles créent de l'entropie. Ces phénomènes irréversibles correspondent par exemple aux phénomènes de transport, diffusion, conductibilité thermique, aux réactions chimiques, aux processus biologiques. En particulier, si le système est isolé, la production d'entropie s'identifie avec la variation d'entropie. Dès lors dans un système isolé, l'entropie croît jusqu'au moment où elle atteint son maximum. C'est alors l'équilibre thermodynamique. L'entropie introduit ainsi une flèche du temps. Celle-ci est orientée dans le sens d'une entropie croissante. Mais qu'est-ce que l'entropie ? Dans l'image traditionnelle de l'entropie, celle-ci est assimilée au désordre. L'équilibre thermodynamique était assimilé à la «mort thermique». Dès sa formulation, Clausius, applique le Second Principe à l'univers tout entier. Ce fut la naissance d'une cosmologie évolutive.

La première réaction des physiciens et mathématiciens, à l'égard du principe entropique fut l'indifférence. Ne s'agissait-il pas d'un concept utile peut-être à l'ingénieur et au physico-chimiste mais dépourvu de signification fondamentale ? Tel ne fut pas l'opinion de Boltzmann. Ce grand physicien viennois fut fasciné par l'image évolutive proposée par Darwin. Ce qui manquait à la proposition de Clausius, c'était un mécanisme qui formerait en quelque manière le parallèle du principe de la survie du plus «apte» de Darwin. C'est ce mécanisme que Boltzmann s'attacha à trouver. En 1872 Boltzmann publie sa théorie cinétique. Il y étudie l'évolution de la distribution des vitesses des molécules d'un gaz dilué et montre qu'à la suite des collisions entre les molécules cette distribution s'approche d'une distribution gaussienne, une courbe en cloche, bien connue dans des domaines divers des mathématiques et de la physique. Plus encore, il définit une grandeur \mathcal{H} liée à la fonction de distribution des vitesses et qui a des propriétés bien remarquables. En effet, Boltzmann montre que cette grandeur ne peut que diminuer dans l'évolution vers l'équilibre thermique. Il obtient ainsi un analogue microscopique de l'entropie. (Plutôt, de l'entropie changée de signe puisque la grandeur \mathcal{H} de Boltzmann ne peut que diminuer).

Ce résultat important de Boltzmann allait déclencher une controverse passionnée et conduire à la prise de conscience du paradoxe du temps. Des grands mathématiciens tels que Henri Poincaré et de nombreux physiciens objectèrent à Boltzmann que son résultat était incompatible avec ses équations de départ. Celles-

I. PRIGOGINE

ci sont les équations de la dynamique classique et sont réversibles. La direction du temps n'y joue aucun rôle. Comment, dès lors, à partir d'équations réversibles, obtenir un résultat qui comporte une flèche du temps et viole l'équivalence entre passé et futur ? Boltzmann reconnut la validité des objections qui lui étaient faites et pourtant, il restait convaincu de l'importance d'une image évolutive du monde physique. Il chercha un compromis. Il n'y aurait pas vraiment une flèche du temps, mais l'apparence d'une flèche. Ce serait une question de probabilités. Pour illustrer le raisonnement de Boltzmann, prenons deux boîtes de même dimension, reliées par un canal et mettons dans une de ces boîtes, beaucoup de particules, mettons dix mille et dans l'autre très peu, mettons deux. Il est naturel qu'au cours du temps, le nombre des particules s'égalise. Ce serait là la justification d'une flèche du temps mais cette flèche du temps n'est qu'apparente car si nous attendons suffisamment, ces mêmes lois de probabilités, nous montrent que la situation initiale pourrait se rétablir. Ainsi, l'image probabiliste de Boltzmann conclut en fait à une négation d'une flèche intrinsèque du temps dans la nature. Quelle a été la réaction de Boltzmann ? Était-il satisfait du compromis qu'il avait imaginé ? Ce que nous savons c'est qu'en 1906, il s'est suicidé. Peut-être, l'impossibilité d'aboutir à une solution satisfaisante du problème de l'évolution, a-t-il joué un rôle dans sa fin tragique ?

Curieusement, pour la plupart des physiciens, la défaite de Boltzmann a été considérée comme une victoire, comme un triomphe qui montrait en quelque manière le caractère complet de la physique fondamentale, c'est-à-dire, à cette époque, de la dynamique classique. Einstein l'a souvent répété : le temps en tant qu'irréversibilité, n'est qu'illusion. Pour comprendre cette réaction, il faut se reporter aux fondements idéologiques de la science classique. Un des principaux fondateurs de la science au 17^{ème} siècle fut Leibniz. Leibniz était non seulement un grand mathématicien, mais aussi un théologien. Il insiste souvent sur le fait que pour Dieu il ne peut y avoir de distinction entre le passé et le futur. A tout instant il connaît le futur comme le passé. Dès lors, l'homme grâce à la science, ne pourrait-il pas se rapprocher de la connaissance divine ? Et l'élimination de la flèche du temps n'est-elle pas la preuve de ce rapprochement ? C'est de cette manière que je m'explique la résistance idéologique, vivace encore aujourd'hui à toute introduction d'une flèche du temps au niveau fondamental de description de la physique. Ce point de vue idéologique s'exprime encore aujourd'hui dans de nombreux ouvrages. Un exemple en est l'ouvrage de S. Hawking «*A brief history of time*» . Il y propose de remplacer le temps par un

temps «imaginaire» qui serait le «vrai» temps. Pour comprendre le sens de cette curieuse proposition, reportons nous à la notion d'intervalle à la base de la relativité restreinte. L'intervalle comprend une partie temporelle, une partie spatiale. En utilisant le temps (ordinaire) le temps y apparaît avec un signe négatif et l'espace avec un signe positif. La proposition de Hawking revient à faire apparaître le temps également avec un signe négatif et ainsi de gommer la différence entre temps et espace. Mais comment comprendre l'évolution biologique, l'évolution humaine dans un univers dont le temps est absent ? Là, Hawking invoque le principe «anthropique». Le monde est tel qu'il est pour nous permettre d'exister. Je dois avouer que je n'ai jamais compris la portée d'un tel principe. Bien sûr, le monde doit satisfaire à des conditions nombreuses pour que la vie et l'homme puissent s'y développer mais c'est à partir de l'étude du monde que nous devons essayer de comprendre l'existence de la vie et la nôtre, et non pas inversement de la présence de la vie ou de notre existence, déduire une explication du monde.

Mais si la résistance à l'introduction d'une flèche du temps au niveau fondamental est encore si vivace, c'est parce que cette résistance n'est pas seulement d'origine idéologique mais comporte aussi une partie conceptuelle liée à des problèmes mathématiques. Comment en effet, faire entrer la flèche du temps dans ces édifices conceptuels grandioses que sont la mécanique classique, la mécanique quantique ou la relativité ? L'ambition de la physique classique avait toujours été de décrire le monde en termes de lois universelles, intemporelles sans référence à des «événements». La fin de la science serait atteinte quand la physique sera ramenée à une géométrie. Mais une telle description est-elle possible ? J'ai toujours été impressionné par le fait qu'à deux mille ans d'intervalle, Lucrèce d'un côté, Einstein de l'autre, concluent qu'il faut ajouter la notion d'événement. Chez Lucrèce, c'est la notion de «clinamen», la rencontre entre atomes qui dévient légèrement d'une trajectoire rectiligne. Chez Einstein, en 1916, c'est l'émission de photons à des moments imprévisibles pour expliquer l'émission spontanée. Aujourd'hui, la nécessité d'introduire des événements temporels, l'irréversibilité apparaît plus clairement que jamais tant en mécanique quantique (avec le problème de la mesure) qu'en relativité (avec le problème du big-bang). Mais cela demande l'élaboration d'un cadre conceptuel et mathématique élargi. Nous y reviendrons, mais passons d'abord à la seconde partie de cet exposé, consacré à l'amplification du paradoxe du temps au cours des dernières décennies.

II

La science classique insistait sur la stabilité, la permanence, la réversibilité dans le temps. Aujourd'hui nous voyons partout instabilité, fluctuations, irréversibilité. Curieusement, deux sciences classiques ont joué un rôle essentiel dans cette transition radicale : la thermodynamique et la dynamique classique. Comme je l'ai rappelé plus haut, un système isolé tend vers l'équilibre thermique, l'état à entropie maximum. Pendant longtemps, l'étude des états physiques de la matière se limitait essentiellement à cet état final d'équilibre. Mais, au cours de la seconde moitié de ce siècle, l'intérêt s'est déplacé vers des états de non équilibre. Et là est apparu en toute clarté un aspect nouveau et inattendu : le rôle **constructif** de l'irréversibilité. J'ai rappelé que classiquement irréversibilité et croissance de l'entropie étaient assimilées à la croissance du désordre. Déjà des exemples très simples montrent qu'il n'en est pas ainsi. Prenons de nouveau deux boîtes mais remplissons-les cette fois-ci d'un mélange de deux constituants. Supposons par exemple que ces deux constituants sont l'hydrogène et l'azote. Si la température est uniforme, la concentration de deux constituants sera elle aussi uniforme. Par contre, si nous chauffons une de ces boîtes, et nous refroidissons l'autre, nous aurons un excès d'hydrogène dans l'une et un excès d'azote dans l'autre. Le non-équilibre, le flux de chaleur, conduit ainsi à l'ordre moléculaire puisqu'il permet la séparation, au moins partielle, des deux constituants. C'est là un résultat qui se retrouve dans la majorité des situations impliquant des phénomènes irréversibles. Les phénomènes irréversibles ont deux faces : création de désordre et simultanément, création d'ordre. C'est peut-être une des caractéristiques les plus curieuses de notre univers : la présence simultanée d'ordre et de désordre. Nous savons que l'univers baigne dans le rayonnement résiduel de corps noir qui provient de ses premiers instants. Ce rayonnement correspond à un désordre thermique et comprend la presque totalité de l'entropie de l'univers. Mais nous avons aussi de l'ordre, les systèmes biologiques, le cerveau humain en sont des exemples particulièrement frappants. Cette dualité révèle le rôle fondamental que l'irréversibilité joue dans l'organisation de la nature. Nous voyons cette création d'ordre par les phénomènes orientés en toute clarté quand nous nous écartons de l'équilibre thermique, c'est-à-dire que nous nous plaçons «loin» de l'équilibre thermique. Nous pouvons facilement réaliser au laboratoire de telles conditions. Il suffit, par exemple, de maintenir des gradients élevés de température ou de considérer des réacteurs chimiques qui échangent continuellement de la matière avec le monde extérieur. Nous arrivons alors à de véritables structures de non-équilibre, aux «structures dissipatives» qui peuvent

prendre des formes extrêmement variées. Le fait même de parler de **structures** dissipatives montre l'évolution de nos idées. Ce sont donc des structures (présentant donc un ordre) dues à la dissipation, c'est-à-dire au non-équilibre. Ces résultats ont fort frappé l'imagination des chercheurs et du public. De nombreux textes exposent les résultats qui sont spectaculaires. Aussi je me limiterai ici à quelques remarques. Un exemple bien connu est celui des oscillateurs chimiques. Pour m'exprimer d'une manière un peu simpliste, nous voyons là un mélange chimique réagissant devenir bleu, puis rouge, puis bleu de manière régulière comme un pendule. C'est un phénomène extraordinaire. On s'attend à ce que la réaction chimique se produise de manière irrégulière, selon les lois du chaos moléculaire. L'alternance régulière de couleur indique qu'il n'en est pas ainsi. Nous en connaissons aujourd'hui la raison : le non-équilibre introduit des corrélations à longues portées. Ces corrélations permettent à chaque molécule de «connaître» l'état des autres molécules et cela sur des distances macroscopiques. Quelle différence d'avec les forces intermoléculaires qui ne s'exercent que sur quelques diamètres moléculaires. Le non-équilibre permet à la matière de «voir». A l'équilibre, la matière est aveugle. Notons aussi l'existence d'oscillations chimiques qui brisent la symétrie temporelle.

Tout récemment, on a mis aussi en évidence des brisements de symétrie spatiale. On a pu observer des structures spatiales régulières analogues en quelque manière à des cristaux. Mais ici les noeuds des cristaux correspondent à des extrêmes de concentration des substances réagissantes. Dans un cristal habituel, un cristal «d'équilibre», les distances entre atomes sont de l'ordre de l'Angström (10^{-8} cm). Ici les distances entre les noeuds sont plutôt de l'ordre du micron (10^{-4} cm). Ces distances sont déterminées par le jeu des réactions chimiques qui se produisent localement et de phénomènes de transport, de «diffusion», qui transportent les constituants d'un endroit à un autre. On peut vraiment comparer l'apparition de ces cristaux de «non-équilibre» à des phénomènes d'urbanisation d'un territoire. Sur l'étendue de ce territoire apparaissent des endroits à forte population (les villes) séparés par des régions à plus faible densité (les campagnes). De nouveau, la répartition des villes est déterminée par les activités urbaines (analogues aux réactions chimiques) et par des modes de transport (analogues aux phénomènes de diffusion).

La variété des structures dissipatives observées ne cesse d'augmenter. A côté de signaux temporels réguliers comme dans les oscillations chimiques, nous trouvons

I. PRIGOGINE

des signaux réguliers, le «chaos». Il est très intéressant de noter que nous avons besoin des deux types de comportement pour interpréter l'activité biologique. Ainsi, un résultat très important, établi par ma collègue Agnès Babloyantz, est que le cerveau exige pour fonctionner le chaos temporel. Différentes maladies, telle que l'épilepsie, se caractérisent par des signaux électriques trop réguliers mesurés par l'encéphalogramme. Donc, loin de l'équilibre, nous avons toute une série de comportements spatio-temporels de la matière. Nous assistons à une succession de ces comportements quand nous nous écartons progressivement de l'équilibre. Notons que le comportement change radicalement en des points particuliers appelés points de «bifurcation». En ces points la solution ancienne, c'est-à-dire, celle d'avant le point de bifurcation devient instable et un nouveau comportement spatio-temporel apparaît.

Le monde du «loin de l'équilibre» est aussi un monde du «non-linéaire» car les écarts à l'équilibre étant importants nous ne pouvons linéariser les équations qui décrivent le comportement de la matière. C'est aussi qu'au lieu d'avoir une seule solution, il apparaît une multiplicité de solutions et nous avons des points de bifurcation. C'est l'origine du phénomène d'autostructure qui est peut-être l'aspect le plus important, lié à la création d'un ordre supramoléculaire nouveau. Le monde autour de nous est précisément un monde non linéaire et non en équilibre. Cela s'applique tant à la biosphère en général, qu'à une variété de problèmes plus particuliers comme le climat, la météorologie et ainsi de suite. On peut vraiment parler d'une seconde révolution copernicienne. La première nous a permis d'interpréter les phénomènes astronomiques réguliers, la seconde nous donne la possibilité de comprendre les phénomènes plus complexes de la nature autour de nous y compris les phénomènes biologiques.

Revenons-en au paradoxe du temps. La découverte du rôle constructif de l'irréversibilité ne nous laisse plus de choix. L'irréversibilité ne peut pas être due à nos appréciations, à notre vision du monde, mais elle est inhérente à la nature. Je rappelais tantôt que l'idéal de la science classique était une description en terme de lois universelles sans faire appel à la notion d'événement. Ici aussi, il est devenu apparent au 20ème siècle que ce programme rencontrait des difficultés fondamentales. En mécanique quantique, l'équation fondamentale, l'équation de Schrödinger, est bien une équation réversible. Mais la mécanique quantique a une structure duale. Il faut, en plus de l'équation de Schrödinger, une théorie de la mesure. C'est là une situation

curieuse qui provient de ce que la mécanique quantique nous donne des potentialités multiples que l'expérience «actualise». Ce passage des potentialités à des réalisations est l'objet de la théorie de la mesure quantique. Dans l'interprétation quantique orthodoxe ce passage serait dû à notre observation qui perturbe le système. Comme ce passage introduit l'irréversibilité, la flèche du temps, en mécanique quantique, nous revenons à la solution classique. Nous serions responsables de l'irréversibilité si manifeste dans l'univers ! Mais comment accepter cette conclusion devant l'existence de l'irréversibilité inhérente à la nature qui se manifeste par cette variété des structures dissipatives que nous avons évoquée.

La relativité d'Einstein aussi voulait ramener la physique à une géométrie. Or cette tentative a échoué car l'observation cosmologique nous force à introduire un élément temporel, le fameux big-bang. Ici encore, nous rencontrons le problème du temps à l'échelle de la description fondamentale de la nature. J'arrive ainsi à la troisième partie de mon exposé, comment résoudre le problème du temps, dépasser le paradoxe qui revient à accepter l'irréversibilité à l'échelle macroscopique et pourtant nier le temps à l'échelle microscopique fondamentale.

III

Pendant longtemps on crut la dynamique classique essentiellement une science achevée. Bien sûr la mécanique quantique introduit des corrélations à l'échelle atomique, la relativité à l'échelle cosmologique. Mais à notre échelle la dynamique semblait avoir pris son visage définitif. Et pourtant il s'est produit une véritable révolution de la dynamique classique dont l'origine remonte aux travaux de Poincaré, à la fin du siècle passé, dont l'essor n'a cessé de s'amplifier par des découvertes importantes au cours de la seconde moitié de ce siècle. Lorsqu'il était président de l'Union Internationale de Mécanique, Sir James Lighthill a écrit que ses confrères et lui devaient s'excuser auprès du public pour avoir propagé depuis trois siècles que les objets de la physique newtonienne obéissaient à des équations déterministes, idée qui se trouve actuellement démentie par les développements récents de la dynamique. C'est là une déclaration que je trouve assez extraordinaire, car chacun de nous peut être amené à s'excuser pour des erreurs commises dans son travail. Mais s'excuser d'avoir suivi pendant trois siècles, une voie qui s'est trouvée finalement erronée,

I. PRIGOGINE

correspond bien à un cas unique de l'histoire des sciences. De quoi s'agit-il ? Pendant près de trois siècles, en effet, on croyait que les systèmes dynamiques se comportaient tous de la même manière, un peu comme notre système planétaire décrit par les lois de Kepler. Or en 1889, Poincaré introduit une classification fondamentale des systèmes dynamiques en systèmes «intégrables» et «non intégrables». Il est bien connu que tout système dynamique possède une énergie cinétique et une énergie potentielle due aux interactions. La question posée par Poincaré peut se reformuler ainsi : pouvons-nous éliminer les interactions et ramener le système à un système de particules sans interactions se mouvant dès lors indépendamment ? Heureusement, la réponse est «non» pour la majorité des systèmes dynamiques. Quand la réponse est «non» nous avons les systèmes non intégrables. Je dis «heureusement», car, si les interactions pouvaient toujours être éliminées, notre univers serait isomorphe, un univers à particules indépendantes, aucune cohérence ne serait possible et il n'y aurait ni vie, ni civilisation.

Mais Poincaré est allé plus loin, il a découvert l'origine de non-intégrabilité dans les «résonances» entre les différents degrés de liberté qui composent le système dynamique. Tout le monde sait ce qu'est une résonance. C'est ce qu'apprend un enfant quand il met une balançoire en mouvement, grâce à des impulsions données à la fréquence naturelle de la balançoire. Ces résonances conduisent à des divergences lorsqu'on veut éliminer les interactions. C'est le fameux problème des «petits dénominateurs» de Poincaré. Celui-ci considérait ce problème comme le problème central de la dynamique. Les travaux ultérieurs dus surtout à Kolmogorov, en 1974, Arnold et Moser (théorie KAM) ont permis de clarifier le sens physique des systèmes non-intégrables. Dans de tels systèmes, nous rencontrons deux types de trajectoires, d'un côté des trajectoires périodiques, comme le sont habituellement celles des systèmes classiques, mais aussi des trajectoires aléatoires correspondant à un «chaos dynamique». Ces dernières limitent le sens même de la notion de trajectoires, car dans ce cas, deux d'entre elles à un instant donné aussi proches que l'on veut, s'écartent exponentiellement au cours du temps. Il y a dès lors un horizon temporel au-delà duquel la notion de trajectoire devient inapplicable. Les systèmes non-intégrables de Poincaré sont des systèmes instables à cause précisément de cette «sensibilité aux conditions initiales» qui font que des trajectoires proches s'écartent exponentiellement. Dès lors, nous sommes forcés d'abandonner le point de vue déterministe et prendre un point de vue statistique car nous devons considérer les ensembles de trajectoires

et nous ne pouvons plus que calculer les probabilités de trouver le système dans un état ou un autre. Il va de soi que la découverte de cette instabilité de trajectoires liée à la non intégrabilité permet de surmonter les objections qui avaient été faites à Boltzmann. On disait à Boltzmann : retournez les trajectoires et l'entropie va diminuer au lieu de croître. Mais nous savons aujourd'hui que c'est impossible dès que l'on a dépassé l'horizon temporel des trajectoires instables. L'étude des trajectoires instables est aujourd'hui poursuivie dans de nombreux centres théoriques à travers le monde. La question se pose alors : peut-on aller plus loin ? Peut-on faire une dynamique qui inclut les trajectoires instables ? Peut-on incorporer cette instabilité dans un schéma cohérent ? C'est la question qui m'a fasciné au cours de ces dernières années et qui je pense permet de donner un sens intrinsèque, microscopique à l'irréversibilité et dès lors de résoudre le paradoxe du temps. Il n'est pas possible au cours de cet exposé d'entrer dans le détail de ces recherches. J'ai déjà indiqué que les difficultés associées à la notion d'irréversibilité provenaient d'un côté d'une résistance idéologique et de l'autre côté, de difficultés techniques et ce sont ces dernières qu'il a fallu vaincre. Tout d'abord, le problème des divergences. Comme indiqué plus haut, l'intégration des systèmes de Poincaré se heurte à des problèmes de divergences dues aux résonances.

C'est un fait bien connu que beaucoup de problèmes fondamentaux en mathématiques ne se résolvent qu'en passant de variables réelles à des variables complexes, $z = x + iy$, qui ont une partie réelle x et une partie imaginaire y . Citons à titre d'exemple le théorème fondamental qu'une équation du $n^{\text{ème}}$ degré à n racines. De même ici nous devons passer au domaine complexe pour éviter les divergences. Nous utilisons là une méthode connue sous le nom de «prolongement analytique». Le moyen le plus direct pour construire ce prolongement analytique est de faire appel à la notion d'un «second temps». C'est là un temps qui n'est plus simplement un paramètre correspondant à la description de trajectoires mais qui décrit la naissance et l'évolution de corrélations. Pour expliquer ce que je veux dire, pensons aux molécules qui forment le contenu d'un verre d'eau. Nous avons vu que le pendule n'a pas de direction du temps. Mais est-ce que le verre d'eau vieillit ? Je crois que oui. Les molécules contenues dans ce verre se cognent. La conséquence d'un choc entre deux molécules est la création d'une corrélation entre celles-ci. Si j'inverse les vitesses, elles vont se «recollisionner». Cette corrélation est propagée. Deux molécules rencontrent une troisième et ainsi de suite. Il y a un flux de corrélations. C'est très voisin de ce qui se passe dans la vie quand nous rencontrons un interlocuteur avec

I. PRIGOGINE

qui nous discutons. Nous pouvons partir à Washington, lui en Australie mais il reste comme un souvenir de la discussion. Chacun de nous en rencontre d'autres, le sujet que nous avons discuté se répand, chacun est ainsi au centre d'un flux de corrélations et reçoit d'un autre côté des informations dues à des discussions ayant lieu entre d'autres personnes. D'ailleurs, si nous vieillissons, ce n'est pas dû au vieillissement des atomes qui nous composent, c'est dû plutôt à une modification des relations entre ces atomes et ces molécules. Et si une société vieillit, c'est encore dû essentiellement à des corrélations qui changent. L'homme du néolithique n'était peut-être pas moins intelligent que nous le sommes mais les types de relations entre les hommes étaient profondément différents. Chacun le sait, nous vivons aujourd'hui dans un monde de corrélations, un monde de communication, un monde des médias qui accélère notre histoire.

Nous avons obtenu ainsi une dynamique des systèmes non intégrables de Poincaré (ou plutôt d'une classe très importante de ces systèmes). Cette dynamique a deux aspects fondamentaux qui la distinguent de la théorie classique. D'abord elle n'est plus une théorie de trajectoires mais une théorie de **probabilités**. Boltzmann n'avait donc pas tellement tort en invoquant les probabilités mais encore fallait-il les rattacher à la dynamique et c'est cela qui devient possible par les systèmes dynamiques instables. Le second aspect c'est que cette théorie présente une symétrie temporelle rompue, c'est-à-dire incorpore l'irréversibilité à la base de la description dynamique. C'est dans ce sens qu'elle résout le paradoxe du temps. Tout cela s'étend à la mécanique quantique. Là encore il existe des systèmes instables à la Poincaré⁶. Il y a toutefois des aspects nouveaux. Ainsi un problème important de la mécanique quantique est celui des valeurs numériques que peut prendre une grandeur observable. En physique classique, on représentait une grandeur physique par une variable et cette variable pouvait prendre toutes les valeurs numériques. En mécanique quantique, la situation est différente, une grandeur physique est représentée par un opérateur. Par exemple, à l'hamiltonien classique qui décrit l'énergie du système correspond l'opérateur hamiltonien quantique et il faut associer à cet opérateur un problème «aux valeurs propres». Il faut trouver l'ensemble des fonctions telles que l'opérateur agissant sur une fonction redonne la même fonction à une valeur numérique près. Cette valeur numérique, c'est la valeur propre associée à l'opérateur et correspond aux valeurs observables. C'est comme cela que la mécanique quantique permet d'interpréter l'existence des niveaux énergétiques.

Quel est alors le problème fondamental auquel nous devons faire face ? Les méthodes mathématiques de la théorie quantique conduisent à des valeurs propres réelles, c'est-à-dire, représentant des fréquences, des niveaux d'énergie. Pour décrire les phénomènes irréversibles, il faut arriver à une théorie d'opérateurs qui conduisent à des valeurs propres complexes dont la partie réelle correspond de nouveau à des niveaux d'énergie et la partie imaginaire à des phénomènes dissipatifs : vie moyenne, diffusion, phénomènes irréversibles de différentes espèces. La théorie que nous avons développée récemment permet d'obtenir des valeurs propres complexes qui décrivent ces phénomènes irréversibles. Mais cela n'est possible qu'en généralisant la notion d'espace sur laquelle ces opérateurs agissent. Il faut, en bref, partir d'un espace «temporalisé» et dans cet espace les opérateurs acquièrent des valeurs propres complexes incluant les phénomènes irréversibles. Comme en théorie classique ce n'est possible que pour les systèmes instables (dans le sens de Poincaré) et seulement au niveau des probabilités (et non des fonctions d'onde). Nous arrivons ainsi à une description du monde physique assez proche de celui qui nous est familière à partir du mouvement brownien ou de la radioactivité. Dans le mouvement brownien, la probabilité de trouver une particule à un certain endroit est décrite par des équations simples. Par contre, la trajectoire elle-même est aléatoire et nous ne pouvons que faire des prédictions probabilistes. De même, si nous prenons des atomes radioactifs en très grand nombre, nous pouvons prévoir combien il en restera au bout de cinq minutes si nous connaissons le paramètre appelé «demi-vie» de ces atomes radioactifs. Par contre, si nous prenons un atome radioactif, nous ne pouvons pas prédire à quel moment il va se transformer. Donc nous arrivons ainsi à un monde à prédiction moins simple, un monde ouvert à l'évolution et un monde ouvert dès lors aussi à l'apparition de la nouveauté. Mais il est temps de conclure.

IV

Dans la pensée occidentale, nous trouvons dès l'aube, la tentation de l'éternel. C'est le cas de Platon, pour qui *«le soleil de l'intelligible illumine ce qui ne change pas, tandis que ce n'est que par nos sens que nous percevons le changement»* qui d'une manière ou d'une autre doit être ramené à l'essentiel, c'est-à-dire à ce qui ne change pas. De même, pour Einstein, je l'ai rappelé, le temps était illusion. Et pourtant

I. PRIGOGINE

à la fin de sa vie, lorsqu'on lui remit un volume en hommage, il s'est produit un incident curieux. Dans ce volume, le grand mathématicien Göedel, présentait un modèle cosmologique dans lequel on pouvait voyager dans son propre passé. Il prenait ce modèle très au sérieux et calculait même la quantité d'énergie qu'il fallait emporter. Il concluait en exaltant la vision intemporelle d'Einstein qu'il croyait ainsi avoir démontré au moins dans un cas particulier. Et pourtant, Einstein se montra prudent. Dans sa réponse, il écrivait qu'il avait des difficultés à accepter la conclusion de Göedel, car enfin *«on ne télégraphie pas dans son passé»* et il ajoutait que ceci nous amène à repenser le rôle de l'irréversibilité. C'est exactement ce que notre groupe de recherche a essayé de faire au cours de ces dernières années. Je ne peux pas manquer de citer ici aussi la tentation de l'éternité chez le grand écrivain argentin Borges. Dans son *"Histoire de l'éternité"* et dans sa *«Nouvelle réfutation du temps»*, il revient continuellement sur l'idée que le temps serait circulaire et que la flèche du temps serait illusion. Et pourtant, il conclut, *«And yet, and yet... Nier la succession temporelle, nier le moi, nier l'univers astronomique, ce sont en apparence, des sujets de désespoir et, en secret, des consolations. Notre destin (à la différence de l'enfer de Swedenborg et de celui de la mythologie tibétaine) n'est pas effrayant parce qu'il est irréversible, parce qu'il est de fer. Le temps est la substance, dont je suis fait. Le temps est un fleuve qui m'entraîne, mais je suis le temps ; c'est un tigre qui me déchire, mais je suis le tigre ; c'est un feu qui me consume, mais je suis le feu. Pour notre malheur, le monde est réel, et moi, pour mon malheur, je suis Borges.»*

On peut se le demander, cette vision temporelle de la nature, est-elle une défaite ou une victoire de l'esprit humain ? Freud a écrit que l'histoire de la science est l'histoire d'aliénations successives. Copernic nous a montré que la terre n'est pas au centre du système planétaire, Darwin a montré que nous sommes un animal comme les autres et lui Freud nous a montré que notre activité rationnelle dont nous sommes tellement fiers n'est qu'une partie de l'activité du subconscient. Mais peut-être que nous pouvons aujourd'hui inverser cette interprétation. Car enfin, si le temps est inscrit dans les lois fondamentales de la nature, nous pouvons considérer que la vie et en partie l'activité de l'homme exprime d'une manière particulièrement frappante, d'une manière pourrait-on dire exacerbée, les lois fondamentales de cet univers. Ainsi le temps ne sépare-t-il plus l'homme de la nature.

Ilya PRIGOGINE
Prix Nobel
Université Libre de Bruxelles