L'irréversibilité en physique

(Réflexions sur l'évolution des idées en mécanique
et sur la crise actuelle de la physique)*

G. Lochak

Fondation Louis de Broglie
292 rue Saint-Martin 75141 Paris Cedex O3

RESUME. Le présent texte reprend un travail plus ancien, complété et mis à jour sur certains points. L'auteur se propose de montrer que la crise actuelle de la microphysique est due principalement à ce que la mécanique quantique est une théorie d'états stationnaires et de mouvements réversibles qui ignore, dans ses fondements, la notion de régime transitoire.

Ce caractère essentiel des théories quantiques leur vient de ce qu'elles ont été l'aboutissement de plus de deux siècles d'évolution de la mécanique essentiellement consacrés à la description des phénomènes stationnaires et réversibles.

Le point de vue de l'auteur, qui reflète celui de l'école de Louis de Broglie, est que la microphysique doit maintenant franchir un nouveau pas en cherchant non plus à décrire les états stationnaires et à calculer des probabilités de transitions, mais à décrire ces transitions elles-mêmes et à expliquer la genèse et la stabilité des états stationnaires. L'avenir lui parait être à une microphysique fondée sur l'irréversible.

I - INTRODUCTION

Lorsque l'on considère l'état actuel de la microphysique et qu'on se retourne sur ses succès passés, on ne peut s'empêcher de penser que les fruits mûrs des quanta sont depuis longtemps cueillis et que si l'on

---

* Exposé présenté devant le Séminaire "Philosophie et mathématique" (à l'Ecole Normale Supérieure) le 10 Janvier 1978. Publié dans le Bulletin IEN-ENSM, **31**, 2, 1979. Un texte anglais très proche a été publié dans Foundations of Physics, **11**, 593, 1981.

veut un jour en cueillir d'autres, ce n'est pas en faisant de dangereuses acrobaties sur les dernières branches de l'arbre qu'on y parviendra.

C'est, au contraire, en abandonnant les vieux rêves de cueillette sauvage et en reconnaissant franchement que les temps miraculeux des débuts de la théorie sont bien finis, et qu'il s'agit maintenant de la *comprendre* et même (à mon avis, tout au moins) d'essayer de bâtir une nouvelle microphysique qui nous fasse peut-être, un jour, pénétrer le mystère des quanta.

Car ce mystère reste entier et tout autant celui du dualisme des ondes et des corpuscules. Il y a longtemps déjà que Louis de Broglie exprimait son "anxiété devant le problème des quanta" [1] et proclamait que "la mécanique ondulatoire sous sa forme actuellement enseignée a épuisé son pouvoir explicatif" [2] ; et il y a longtemps qu'Einstein écrivait à l'un de ses correspondants : "Si quelqu'un vous dit qu'il sait ce que $E = h\nu$ veut dire, dites lui que c'est un menteur" [3] et qu'il écrivait à son ami Besso :

"Je pense que seule une spéculation hardie est à même de nous faire progresser, et non pas une accumulation d'expériences. Du matériel empirique incompréhensible, nous en avons plus qu'il n'en faut". [4]

A l'époque de ces citations, on les regardait comme la preuve de l'esprit quelque peu fossilisé de savants à la jeunesse féconde mais qui n'avaient pas su "prendre le tournant" de la nouvelle physique et suivre le progrès des idées, à la naissance desquelles ils avaient pourtant l'un et l'autre contribué.

Mais, de nos jours, le débat sur les idées générales en physique a repris droit de cité et les différentes écoles de pensée s'affrontent dans une atmosphère qui, Dieu merci, s'apparente moins que jadis à celle de la guerre des tranchées.

L'une des raisons de ce changement me paraît être que le caractère fondamental des difficultés rencontrées par la théorie dans le domaine des particules élémentaires apparait plus clairement, alors qu'à l'époque où des visionnaires comme Einstein, de Broglie et quelques autres l'affirmaient les premiers, la majorité des physiciens n'y voyaient que des obstacles momentanés que la théorie en plein essor franchirait très bientôt.

Or, un siècle après la découverte du noyau atomique, nous n'avons, au sujet des forces nucléaires, que des lambeaux d'explication et nous ne possédons, pour les particules élémentaires, que des théories formelles et classifiantes mais peu explicatives, et qui restent affligées d'une inquiétante floraison de néologismes et d'un vocabulaire technique imagé qui ne saurait tenir lieu de théorie.

Comment ne pas évoquer à ce sujet l'admirable préface de Roger Côtes à la troisième édition des Principia [5] (ce Côtes prématurément disparu, dont Newton disait : "Si Côtes avait vécu, nous aurions su quelque chose") ? Rappelant quel était l'état de la philosophie naturelle avant Newton, il disait, notamment, au sujet des péripatéticiens :

"Puisqu'ils étaient entièrement occupés à donner des noms aux choses et non à chercher à l'intérieur des choses elles-mêmes, on doit les regarder tout au plus comme les inventeurs d'une espèce de jargon philosophique et non comme les auteurs d'une vraie philosophie".

Et plus loin, il raconte qu'au XIIIème siècle, Alphonse de Castille ayant ordonné à ses astronomes de lui dresser de nouvelles tables astronomiques, ils lui présentèrent un système du monde embarrassé d'épicycles pour expliquer le mouvement des planètes, qu'Alphonse commenta par cette phrase ironique :

"Si Dieu m'eut consulté lorsqu'il créa l'Univers, tout aurait été dans un ordre meilleur et plus simple".

Les travaux actuels sur les particules élémentaires ressemblent bien à l'oeuvre des astronomes ptoléméens qui, satisfaits de leur système, se complaisaient à la secrète complexité de ses rouages.

Il n'est pas étonnant et il est bien heureux que, devant la persistance des difficultés rencontrées par la théorie, nombre de physiciens se soient remis à réfléchir sur ses fondements.

Ce que je veux exposer dans les pages qui suivent, se rapporte à une idée, jadis émise dans le séminaire de Louis de Broglie [6], puis reprise sous des formes nouvelles grâce à la thermodynamique cachée et à la mécanique héréditaire [7-16]. Il ne s'agit pas encore d'une théorie, mais d'une ligne directrice qui vise à fonder la microphysique non sur l'étude des états stationnaires, comme c'est le cas en mécanique quantique, mais sur celle des états transitoires irréversibles susceptibles d'y mener. Notre but est donc, au lieu d'accepter les états quantiques comme une donnée première, d'essayer de comprendre leur prédominance dans la nature comme résultant de leur stabilité. (Voir Appendice.)

Cette idée est contraire au cours principal de l'évolution de la mécanique depuis le XVIIIème siècle, laquelle a conduit, grâce au développement de la dynamique de Lagrange et de Hamilton, à accorder une primauté absolue aux mouvements réversibles et aux états stationnaires : si on les regarde de ce nouveau point de vue, les théories quantiques n'apparaissent plus en rupture avec les idées passées mais, au contraire, dans leur exact prolongement.

C'est pour montrer cela et pour montrer comment la voie de recherche que nous proposons s'inscrit à la fois dans un tournant de l'évolution de la physique et dans un tournant de l'évolution de la mécanique déjà amorcé, que cet exposé comprendra une assez longue partie historique. Maint exemple passé montre combien l'histoire des sciences (non pas les anecdotes, bien sûr, mais l'histoire des idées !) peut contribuer à l'élaboration d'idées nouvelles.

La voie que nous suivons, non seulement s'impose, à notre avis, pour comprendre plus profondément les quanta, mais encore est suggérée par d'importants problèmes actuels en microphysique, tels que celui des transitions de phases ou celui des particules élémentaires. Comment peut-on espérer comprendre vraiment ce qu'est une transition (quelle qu'elle soit) à partir d'une théorie, l'actuelle mécanique quantique, qui ne sait décrire de façon rigoureuse que le stationnaire ? Peut-on sérieusement espérer fonder sur une théorie d'états stationnaires la description de particules dont la vie est si brève qu'elle se distingue à peine de leur désintégration et que leur énergie n'est, de ce fait, plus définie ?

Bien sûr, on peut essayer de tout faire avec des états stationnaires. On peut même essayer de décrire des processus transitoires comme étant la limite d'une suite de transitions virtuelles entre des états stationnaires, virtuels également.

De la même manière, pouvait-on essayer de rendre compte de l'excentricité des orbites planétaires en considérant des épicycles d'épicycles tracés par des points décrivant des cercles virtuels dont les centres tournaient sur des cercles virtuels.

Mais finalement, ce sont les ellipses képlériennes qui ont prévalu, quelqu'effort qu'il ait fallu pour libérer les esprits de la croyance en l'évidence naturelle des mouvements circulaires.

II - QUELQUES GRANDES LIGNES SUIVIES PAR LE DEVELOPPEMENT DE LA MECANIQUE

Comme on le sait, c'est Aristote, qui, le premier, s'est livré à une réflexion systématique sur la dynamique. Son idée générale, telle qu'on la trouve exprimée chez Duhem [17], était que :

"Tout corps mû est nécessairement soumis à deux forces, une puissance et une résistance ; sans puissance il ne se mouvrait pas ; sans résistance, son mouvement s'accomplirait en un instant, il atteindrait immédiatement le terme auquel il tend par la puissance ; la vitesse avec laquelle le corps se meut dépend à la fois de la grandeur de la puissance et de la grandeur de la résistance".

Aristote fondait ses réflexions sur l'observation des hâleurs du Pirée et sur celle du mouvement des charrettes. Les notions de *masse*, de *mouvement inertiel*, d'*accélération*, ne lui apparurent pas. Ce qu'il appelait *résistance* était essentiellement le *frottement* et la loi du mouvement qu'il imaginait était que la vitesse devait être proportionnelle au rapport de la puissance à la résistance :

$$v \sim \frac{\text{puissance}}{\text{résistance}}.$$

Ce rapport était d'ailleurs une inépuisable source d'ennuis (que l'on songe au cas où la résistance et la puissance seraient égales !). Mais la loi correspond bien, au moins dans son esprit, sinon dans sa forme, au cas d'un mobile soumis à une force extérieure quelconque F et à *une force de frottement beaucoup plus grande que sa force d'inertie*, puisqu'on écrit alors par approximation :

$$v \sim F,$$

ainsi que l'on fait, par exemple, dans la théorie élémentaire du mouvement brownien.

C'est le cas inverse, celui où l'inertie l'emporte sur le frottement qui a constitué le point de départ et la victoire des idées de Galilée et de Newton. Mais pour découvrir la notion d'inertie et formuler les lois de la mécanique, ils ont dû raisonner par abstraction sur un mobile qui se meut dans le vide sous l'action d'une force unique *conservative* (comme nous dirions aujourd'hui) et donc en l'absence de tout frottement. Or le principal banc d'essai et aussi le plus grand succès de cette dynamique a été la mécanique céleste, dans laquelle on peut considérer que ces conditions idéales correspondent à la réalité, ce qui conduisit à une radicalisation progressive de ce point de vue, ainsi qu'à l'instauration d'une primauté des forces centrales conservatives dont l'usage avait si bien réussi en théorie de la gravitation. A partir de ce moment là, les idées en mécanique donnent l'impression d'un grand balancier qui serait parti d'Aristote, deux mille ans auparavant, avec la seule considération des forces de frottement comme obstacle au mouvement et l'ignorance complète (ou au moins la non formulation) de la notion d'inertie, pour aboutir peu à peu à ne plus regarder comme notion première et fondamentale *que* celle d'inertie, jusqu'à vouloir (beaucoup plus tard) y ramener le frottement lui-même et les phénomènes thermiques afférents.

Le frottement, certes, n'était pas oublié : Newton consacre même, dans les Principia, cent cinquante pages à la résistance des fluides, distinguant clairement entre la résistance inertielle proportionnelle au carré de la vitesse du mobile, et la résistance due au frottement visqueux, proportionnelle à la vitesse ; mais le frottement n'était déjà regardé que comme une gêne opposée au mouvement, pas comme une caractéristique à mettre sur le même pied que l'inertie.

Il est intéressant de rappeler, à ce propos, les lignes suivantes de Fabry [18]

"... les fondateurs de la dynamique n'ignoraient pas les phénomènes thermiques qui accompagnent la plupart des mouvements ... mais ils les considéraient comme étant en dehors de leur sujet. On s'habitua à considérer en mécanique les *déplacements* sans parler des phénomènes thermiques concomitants".

Et Fabry proclamait plus loin :

"... qu'on le veuille ou non, presque toute la dynamique est de la thermodynamique. Cette dernière science n'est pas, comme on la considérait autrefois, un appendice de la dynamique. C'est toute la dynamique qui est un cas particulier, un chapitre particulièrement simple de la thermodynamique".

On peut s'interroger, à la lumière de ce commentaire, sur l'erreur que commit Newton dans son calcul de la vitesse de propagation du son, [1] erreur qui provenait de sa méconnaissance du rôle fondamental que jouent les effets thermiques dans ce phénomène.

Toujours est-il qu'après Newton, sous l'influence conjuguée des mathématiciens, des astronomes et des physiciens, la mécanique "noble" devint peu à peu la mécanique conservative, c'est-à-dire celle qui n'admet pas dans ses *fondements* les phénomènes de viscosité, de frottement, plus généralement de dissipation de travail en chaleur sous toutes les formes, et qui écarte donc tout élément d'*irréversibilité*.

---

[1] On sait que Newton considérait la compression due à l'onde sonore comme étant isotherme, et non pas adiabatique comme Laplace l'a reconnu plus tard.

Plus précisément, si l'on effectue un survol des grands traités de mécanique, des manuels et des travaux les plus marquants, on y découvre trois voies principales :

1. On trouve tout d'abord une série d'exposés généraux qui développent les idées de Newton et qui, malgré tous les progrès réalisés au cours des siècles et dont beaucoup s'y trouvent intégrés, descendent en droite ligne des Principia. Ces exposés correspondent à ce qu'on appelle en France la *mécanique rationnelle* ; ils ne visent spécialement ni l'astronomie, ni la physique théorique, ni la grande généralité mathématique et cela, curieusement, même lorsqu'ils sont signés par d'illustres théoriciens. Ils s'étendent à divers domaines d'application et les frottements y sont étudiés souvent en grands détails.

Par contre, le principe de moindre action y occupe une place secondaire et peut même être absent, ainsi que les équations de Hamilton et de Jacobi ; même celles de Lagrange apparaissent tardivement dans ces ouvrages. On peut classer dans cette catégorie :

- Paul Appel [19]
- Jean Chazy [20]
- Synge and Griffith [21]
- Joseph Pérès [22]

Ces traités sont classiques, mais il en est d'autres qui le sont moins, malgré leurs signatures :

- Stefan Banach [23] (mais oui, Banach !) auteur d'un traité très classique, très simple, très descriptif, dans lequel les équations de Lagrange n'arrivent qu'après plus de 450 pages.
- Ludwig Boltzmann [24], Vorlesungen über die Prinzipie der Mechanik.

Les équations de Hamilton et de Jacobi n'y sont exposées qu'au Tome II. Mais attention : le même auteur, dans son célèbre Gastheorie [25], donc dans un ouvrage sur les fondements des théories moléculaires et de la thermodynamique, n'utilise plus *que* la dynamique hamiltonienne, puisqu'il admet le caractère conservatif et réversible des processus élémentaires.

Enfin faisons une place à part à :

- Paul Painlevé [26], Cours de l'Ecole Polytechnique : exposé hélas oublié mais remarquable des *principes* de la mécanique, même si, comme souvent dans ce genre d'ouvrage, le principe de moindre action est oublié. Les équations de Lagrange apparaissent (et discrètement) p. 480, mais en revanche c'est le seul traité de mécanique où les notions de mouvement *réversible* et de mouvement *irréversible* sont clairement définies, l'irréversibilité étant reliée à la dissipation thermique par frottement et expliquée grâce au principe de Carnot, avec même un paragraphe de rappels thermodynamiques.

2. La deuxième série d'ouvrages, et surtout de mémoires originaux, concerne évidemment la *dynamique analytique* avec, avant tout, le chef d'oeuvre des chefs d'oeuvres :

- La *Mécanique analytique* de Lagrange [27].

C'est le principe de d'Alembert qui est pris chez Lagrange comme principe de base, si bien qu'au départ, les systèmes envisagés ne sont pas supposés conservatifs. Le principe de moindre action n'est pas énoncé comme tel, mais démontré en tant que théorème se déduisant des équations du mouvement dans le cas où l'on possède l'intégrale des forces vives. Mais parlant de ce cas, donc de celui où le travail élémentaire des forces extérieures est une différentielle totale exacte, Lagrange a un mot révélateur : "c'est proprement, dit-il, le cas de la nature" (t. I, p.290).

C'est à cet endroit même qu'il écrit les célèbres équations qui portent son nom et qu'aussitôt il se débarrasse implicitement des frottements par l'hypothèse que le travail dérive d'une fonction de force. Comme on vient de le voir, Lagrange le fait sans avoir le sentiment de restreindre le champ d'application de la mécanique : en réalité, il vise l'astronomie exclusivement, ou s'en inspire directement, ce qu'on voit encore au fait que pour lui, les forces se réduisent à des forces centrales attractives ou répulsives et dépendent des seules distances.

Ainsi voit-on, chez le fondateur de la mécanique analytique, s'amorcer la tendance qui allait peu à peu identifier toute la mécanique de Newton à la seule théorie des systèmes conservatifs et cela sous la double influence, d'une part des succès de la mécanique céleste (car le succès d'une science nouvelle restreint inévitablement le champ de vision pour toute une période) et d'autre part de la beauté de l'appareil mathématique, à laquelle les théoriciens finissent toujours par succomber.

Si le principe de moindre action n'occupait pas encore la première place, c'est peut-être parce qu'il se ressentait encore des polémiques qu'il avait suscitées : n'oublions pas que si des savants comme Poincaré, Sommerfeld, de Broglie et d'autres lui ont (à juste titre) reproché son caractère téléologique, Maupertuis l'avait en réalité volontairement énoncé sous cette forme, voulant par là exprimer la tendance du Créateur à faire le meilleur usage de sa puissance. D'où une violente polémique avec Voltaire. D'Alembert lui-même, qui comprenait très bien la portée scientifique du principe de Maupertuis et son utilité en mécanique, n'a pas manqué de lui dénier toute valeur philosophique générale (ce qui est sage quel que soit le principe physique !) et de lui préférer le *principe de causalité* exprimé par Newton dans les Principia et que d'Alembert lui-même mettait au centre de ses propres travaux.

Il est peut-être intéressant de remarquer que quand Voltaire rompait des lances contre le principe d'"*économie de puissance*" du Créateur, cher à Maupertuis, et lui opposait Newton, il cherchait une mauvaise querelle car c'est en fait dans un esprit voisin de celui de Maupertuis que Newton prônait, lui, l'"*économie des causes*" et disait dans les Principia :

"La nature ne fait rien en vain et ce serait faire des choses inutiles que d'opérer par un plus grand nombre de causes ce qui peut se faire par un plus petit".

D'où la *Règle* qu'il énonçait pour l'étude de la physique :

"Il ne faut admettre de causes que celles qui sont nécessaires pour expliquer les Phénomènes".

En réalité, la différence essentielle entre les deux principes n'est pas métaphysique, comme le pensait Voltaire, mais tout simplement d'ordre opérationnel car le principe de causalité de Newton, s'il était tout à fait général, n'était en réalité qu'un précepte, un guide précieux, certes, mais sans valeur heuristique réelle.

Au contraire, le principe de moindre action de Maupertuis, s'il restreint le champ d'action de la mécanique aux seuls systèmes non dissipatifs et donc réversibles, donne lieu, à une formulation mathématique précise, dès l'oeuvre de Lagrange, formulation que Hamilton a pu ensuite généraliser et mettre à la base de sa dynamique. A partir de là, dans les milieux de la mécanique et de la physique théorique, la dynamique tout entière devait peu à peu s'identifier à la dynamique de Hamilton. Le frottement et la dissipation thermique cessèrent d'être regardés comme des aspects élémentaires et fondamentaux du mouvement et les principes variationnels s'imposèrent tout à fait.

Par un phénomène de cristallisation et d'oubli bien connu en science, même certains résultats généraux ne sont plus connus que sous leur forme "hamiltonienne". Tel est, par exemple, le théorème de Liouville qui concernait en réalité la théorie générale des équations différentielles mais dont on n'énonce plus jamais que la restriction aux équations de Hamilton.

Dans le grand traité de Jacobi [28], le mot frottement n'est même plus écrit et, parallèlement à la liste précédente de livres, on en trouve une autre où le principe de moindre action et les équations de Lagrange, de Hamilton et de Jacobi occupent la toute première place. Citons, par exemple, les traités de E.T. Whittaker [29], de Routh [30], de Lanczos [31], de Souriau [32].

Il est curieux de noter le cas extrême de certains traités modernes (excellents, d'ailleurs) et spécialement lus par les physiciens : chez Arnold [33], les principes variationnels sont exposés p.60, chez Goldstein [34] p.35, chez Landau et Lifschitz [35] p.10 !

3. Reste enfin le rameau le plus récent de la mécanique, resté longtemps méconnu, mais qui me paraît être le plus important pour l'avenir, notamment pour celui de la physique : je veux parler de la *théorie générale des systèmes dynamiques* fondée par Poincaré [36], Liapounov [37] et Birkhoff [38] et qui est actuellement en plein développement.

Nous en reparlerons plus loin, mais disons seulement que c'est pour cela que j'ai omis de la liste précédente l'ouvrage monumental de Pars [39] et le traité d'Abraham [40] : ils font partie des rares que je connaisse, parmi les grands ouvrages modernes de mécanique, à ne pas oublier la dynamique générale et la théorie générale de la stabilité du mouvement.

III - LOIS DE CONSERVATION ET LOIS D'EVOLUTION. POURQUOI LE STATIONNAIRE DOMINE-T-IL L'EVOLUTIF EN PHYSIQUE ?

La tendance à identifier l'ensemble de la mécanique à la seule théorie de Hamilton s'est encore vue renforcée par la découverte du principe de conservation de l'*énergie*, dont l'énoncé général est dû principalement à Helmholtz et Kelvin vers 1850, et qui devint rapidement la pierre angulaire de la physique. Pourtant, au même moment, la notion d'*irréversibilité* apparaissait, elle aussi, en physique grâce à Clausius (1850) et encore une fois grâce à Kelvin (1854), qui l'un et l'autre découvraient, développaient et tentaient de répandre l'oeuvre de Carnot. [2] C'est Clausius qui devait, comme on le sait, être le premier à "chiffrer"

[2] Celle-ci était alors complètement ignorée en France. Un rapport officiel sur

l'irréversibilité en découvrant l'*entropie* et sa croissance monotone dans les systèmes isolés. Il énonça le second principe sous une forme qui est particulièrement suggestive de ce point de vue : "Pas de transfert de chaleur d'une source froide à une source chaude sans dépense de travail".

Ainsi se trouvèrent en présence deux principes –l'un de *conservation*, l'autre d'*évolution*– qui étaient, en droit, complémentaires, mais qui, en fait, furent rivaux et se présentaient aux physiciens dans des positions très inégales. Car l'un allait avec l'état d'esprit qui dominait la science de ce temps et l'autre allait contre.

L'un s'appuyait sur une grandeur, l'énergie, qui devint rapidement si intuitive et sensible qu'elle supplanta même l'idée de matière : "Je sens l'énergie" dira Pierre Curie.

L'autre, au contraire, essayait de mettre en avant l'entropie, notion difficile et insaisissable, "prodigieusement abstraite", comme devait la qualifier Poincaré, qui pourtant ne craignait pas l'abstraction.

Et c'est alors que naquit l'*énergétique*, toujours à la même époque (1855), avec un mémoire de Macquorn Rankine qui portait déjà ce titre ; et elle fut soutenue notamment par Mach, Helm, Ostwald. Les énergétistes niaient tout simplement qu'il y eût une différence entre processus réversibles et processus irréversibles, et prétendaient à l'identité de nature entre le transfert de chaleur d'un corps chaud à un corps froid et la simple chute d'un corps. Ostwald réduisait le second principe à l'énoncé suivant, assez nébuleux :

"Pour qu'il se passe quelque chose, il faut qu'il y ait quelque part des différences d'intensité non compensées".

Mais pour lui l'"*intensité* pouvait être aussi bien une pression, un potentiel électrique ou une hauteur de chute qu'une température [41]. En somme le second principe de la thermodynamique fut plus ou moins "phagocyté" par le premier et y perdit son essence même. Des physiciens comme Kirchhoff niaient que l'entropie eût un sens en dehors des états d'équilibre. Et Planck qui soutenait le contraire et affirmait que l'"irréversibilité d'une transformation n'a d'autre mesure générale que la valeur de l'accroissement de l'entropie", n'était écouté par personne.

---

la "science du feu" au XIXème siècle, publié à Paris en 1867, ne citait pas le nom de Carnot [41] ! Or il y avait longtemps à ce moment là que Kelvin, dans son cours annuel à Edinbourg, consacrait plusieurs heures à l'oeuvre de Carnot.

En fait, la partie dominante de la thermodynamique reste, encore jusqu'à nos jours, celle qui traite des états d'équilibre, pour lesquels le second principe se réduit à une loi de conservation, tout comme le premier. On sait, que, même si l'idée d'irréversibilité a été dégagée dès le siècle dernier, le formalisme mathématique qui décrit les processus irréversibles ne date que de notre siècle et est encore assez récent : tout simplement parce que le problème est plus difficile.

Et c'est là tout le secret de la prééminence des états stationnaires dans tous les domaines de la science ! C'est qu'ils sont moins difficiles à étudier :

Ce sont les premiers qui frappent l'observateur et qui se prêtent le mieux au raisonnement théorique. La nature nous apparaît un peu comme certaines petites guêpes par les journées chaudes d'été, que nous observons devant nous presqu'immobiles, soutenues par un battement d'ailes si vif qu'on le discerne à peine et qui, soudain, après un vol bref et rapide, presqu'impossible à suivre, nous apparaissent à nouveau immobiles et frémissantes un mètre plus loin : *le stationnaire saute aux yeux, mais pour saisir le transitaire, il faut le chercher.*

Ce n'est pas par hasard si les premiers phénomènes que les physiciens étudièrent furent le mouvement régulier des étoiles et celui des cordes vibrantes (Pythagore, qui imagina "l'harmonie des sphères", découvrit également les intervalles de la gamme), de même que les premiers grands principes énoncés furent des principes de stationnarité : celui de Maupertuis et celui de Fermat.

Plus tard, la mécanique des vibrations et des ondes commença évidemment par l'étude des états stationnaires et de leurs superpositions linéaires (qui ne détruisent pas la stationnarité des composantes) : *tout comme le font aujourd'hui les théories quantiques.*

Dans une réaction chimique, nous ne savons vraiment décrire que le début et la fin : nous savons encore bien peu du processus lui-même. (Voir Appendice.)

En biologie, nous savons déjà beaucoup de choses sur les éléments de stabilité et de permanence des espèces, mais leur évolution n'est encore qu'un thème de disputes.

Dans les transitions entre les différentes phases de la matière, on ne décrit en réalité que les phases en équilibre et on cherche à prévoir quelques caractéristiques du point de transition, mais la transition elle-même n'est jamais décrite en tant que *processus évolutif* : là encore, il en est de même pour les états quantiques et pour les transitions qui s'opèrent entre eux.

La science, et c'est compréhensible, se raccroche toujours à des éléments de permanence et de conservation, comme l'énergie, la charge électrique, la matière etc. Au besoin, elle en invente qui sont parfois plus ou moins mythiques parce qu'ils ne correspondent à aucune grandeur physique que nous sachions mesurer : comme le spin-isotopique, l'étrangeté, le charme, la couleur.

Dans ce cas, il ne s'agit plus, en vérité, que d'un procédé d'*étiquetage* et de classement des particules, mais il s'accompagne d'une "règle du jeu" inspirée des grandes lois de conservation : l'avenir dira si ces notions abstraites sont susceptibles de recouvrir des grandeurs physiques mesurables.

IV - LA DYNAMIQUE HAMILTONIENNE, LA MECANIQUE STATISTIQUE ET LES QUANTA. LES MICROPROCESSUS SONT-ILS VRAIMENT INSENSIBLES A LA FLECHE DU TEMPS ?

a) *La dynamique hamiltonienne et la mécanique statistique (voir Appendice)*

On voit donc dans quelle situation d'inégalité profonde se trouvaient les deux principes de la thermodynamique et comment la mécanique était entièrement dominée par la dynamique de Lagrange et de Hamilton –à laquelle, pratiquement, elle s'identifiait– lorsque se mirent au travail Joule, Clausius, Maxwell, Boltzmann, Gibbs et les autres fondateurs de la théorie cinétique des gaz et de la mécanique statistique. Ils utilisèrent d'autant plus naturellement la dynamique hamiltonienne que celle-ci rendait compte aussitôt et de façon intuitive du premier principe de la thermodynamique. Et, si j'ose dire ; "il ne restait plus que le second à interpréter". Mais celui-là, on en parle encore et son interprétation reste un sujet de controverse.

Francis Fer a consacré à ce problème un très remarquable chapitre de son livre [14] auquel j'invite le lecteur à se reporter, ne pouvant faire ici que quelques brèves remarques qui, on le verra, se ramènent essentiellement à affirmer que, si grands que soient les succès de la mécanique statistique, le postulat de la *micro-réversibilité* continue de poser des problèmes et mérite d'être réexaminé.

En effet, la grande idée de Boltzmann a été de donner au second principe un caractère collectif et de le fonder sur un postulat probabiliste. Mais si les formules qu'il propose et l'interprétation qu'il en donne conviennent certainement au cas de l'équilibre, on peut se demander comment la croissance monotone de l'entropie et l'irréversibilité des processus macroscopiques qu'elle implique s'accordent avec la micro-réversibilité qu'on suppose par l'emploi de la dynamique hamiltonienne.

C'est là une objection très ancienne qui s'est exprimée notamment dans les fameux paradoxes [45] de Loschmidt et de Zermelo et aussi dans un théorème, aujourd'hui oublié, de Poincaré qui montre qu'il n'existe, en dynamique hamiltonienne, *aucune fonction de phase à croissance monotone* [42] et donc pas d'entropie de la forme $S(p,q)$; Fer, qui n'avait pas connaissance de ce théorème, l'a retrouvé et en a donné une autre démonstration qu'il a ensuite étendue aux fonctions de *constellation* [11][14], ce qui montre donc que la seule dynamique hamiltonienne ne suffit pas à prouver la croissance de l'entropie (même de l'*entropie grossière*).

D'ailleurs, la réponse au paradoxe de Loschmidt par le "coarse graining" de l'espace des phases, autrement dit, par l'idée que la micro-réversibilité peut, en quelque sorte, être brouillée par l'imprécision de nos mesures pour donner naissance à l'irréversibilité, est a priori peu acceptable : si l'entropie augmente, ce n'est pas parce que nous avons "mal regardé" ; je crois que la croissance de l'entropie est un fait objectif et non la conséquence d'un manque d'information.

D'une manière générale, la tentative de concilier la micro-réversibilité avec la macro-irréversibilité a introduit en thermodynamique statistique d'autres arguments subjectifs qui me paraissent inadmissibles. Par exemple, on ne peut pas, à mon avis, répondre au paradoxe de Zermelo en disant simplement que les temps de récurrence qui s'introduisent par le théorème du retour de Poincaré, qu'invoque ce paradoxe, sont si longs que "pratiquement", le système ne revient pas à son état initial : on peut difficilement adopter pour loi physique une augmentation de l'entropie qui ne serait due qu'au fait que nous n'avons pas l'occasion de la voir diminuer.

De même, l'idée certainement bonne d'associer à un état d'équilibre thermodynamique un certain état de désordre maximal, dont la probabilité est très grande par rapport à celle des autres états, peut expliquer pourquoi nous voyons le plus souvent des états d'équilibre, mais n'explique certainement pas comment un système *tend* vers un état d'équilibre. C'est ce que montrait Emile Borel [43] qui soulignait que le fait de nous trouver en présence d'un état peu probable nous autorise seulement à *parier* que nous en verrons de plus probables dans l'avenir (et qu'il y en a eu dans le passé). "Tout ce qu'on peut dire, dit Borel, c'est qu'en multipliant les expériences, ou en les prolongeant, on permet à la loi des grands nombres de se manifester malgré les écarts passagers possibles". Mais autre chose est de trouver une loi d'évolution.

Cela, seule une étude dynamique peut le faire et c'est ce que fait le Théorème H de Boltzmann ; mais il n'y parvient qu'au prix d'une hypothèse fondamentale supplémentaire, le *chaos moléculaire*, qui se superpose à la dynamique hamiltonienne, et qui semble bien lui être irréductible. C'est ce chaos qui, de l'avis de Boltzmann lui-même [14] introduit l'élément d'irréversibilité qui manque à la dynamique hamiltonienne si l'on veut retrouver la croissance de l'entropie : c'est sur quoi insistaient déjà Planck et Zermelo [44].

En vérité, les difficultés que soulève la coexistence, dans une même théorie, de la micro-réversibilité et de la loi de croissance de l'entropie ont été reconnues dès le siècle dernier, mais on ne peut pas dire qu'on y a vraiment répondu : disons plutôt qu'avec la victoire des idées de Boltzmann, on s'en est accomodé et on a fermé les yeux dessus.

Il en est souvent ainsi en science et c'est pourquoi, surtout dans les époques de crise, le point de vue historique et l'étude des textes fondamentaux aident à s'interroger sur le bien fondé de certaines vérités, prises pour éternelles parce qu'on s'y est habitué, et sur la solidité réelle de certaines options qu'on croit, avec le temps, être les seules possibles.

Boltzmann lui-même pouvait difficilement tenir compte des objections qu'on lui faisait : d'abord parce qu'il allait de l'avant –et il avait bien raison– et ensuite parce que les énergétistes menaient contre lui une vraie guerre idéologique et que la plupart des objections étaient de mauvaise foi. C'est dans l'ambiance détestable ainsi créée qu'il s'est même, pour un temps, brouillé avec Planck, parce que celui-ci était l'inspirateur de l'objection de Zermelo, alors qu'allié tardif mais sincère, [3] il cherchait simplement à comprendre ! [44].

C'est à propos des théories moléculaires que Planck a fait cette remarque un peu grinçante mais profonde [44] :

---

[3] N'oublions pas que la théorie du corps noir devait être l'une des premières grandes victoires de la théorie de Boltzmann, par l'application de ses idées statistiques [45].

"Une vérité nouvelle en science n'arrive jamais à triompher en convainquant ses adversaires et en les amenant à voir la lumière, mais plutôt parce que finalement ses adversaires meurent et qu'une nouvelle génération grandit, à qui cette vérité est familière".

Et pourtant ce n'est pas parce que les adversaires avaient tort que leurs critiques étaient toutes sans fondement !

Mais la "vérité nouvelle", qu'il s'agisse des ondes lumineuses, des atomes ou des quanta, triomphe par capitulation de l'adversaire et même par sa disparition, si bien que les objections sont repoussées ou niées, tout en demeurant sans réponse ; et chacun se faisant peu à peu "une raison" devant les victoires de la nouvelle théorie, les objections s'éteignent et la situation se fige. Jusqu'à la prochaine crise où l'on découvre soudain tout l'intérêt de ces objections.

b) *Réversibilité apparente et irréversibilité cachée*

En physique statistique, le choix de la dynamique hamiltonienne n'avait rien d'inéluctable et résultait, comme on l'a vu, de circonstances historiques. Ce n'est qu'*après*, qu'on l'a cru nécessaire et qu'on a fait un bloc des trois idées suivantes, enchaînées abusivement l'une à l'autre en un *faux syllogisme* :

1) L'irréversibilité est liée au second principe.
2) Les lois de la thermodynamique macroscopique (et, en particulier, le second principe) expriment les propriétés moyennes d'un ensemble d'un grand nombre d'atomes.
3) Les processus microscopiques dont ces atomes sont le siège, doivent être réversibles et seuls les processus macroscopiques peuvent être irréversibles.

Mais si les prémisses sont justes, la conclusion, elle, ne s'impose absolument pas et divers exemples suggèrent tout le contraire. Il semble, en effet, que derrière tout équilibre statistique se trouvent des microprocessus *irréversibles* qui relèvent d'un niveau plus profond de la description du phénomène et qui sont responsables de l'établissement de l'équilibre observé.(Voir Appendice.)

Prenons l'exemple du mouvement brownien qu'Einstein invoquait dans une lettre à Besso [4], pour en tirer argument en faveur de la micro-réversibilité. Considérons, disait-il, une série de photos d'une suspension colloïdale en équilibre thermique, prises au microscope, et supposons que l'ordre des photos ait été brouillé. Sommes-nous capables de retrouver cet ordre en examinant la suite des positions des micelles ? La réponse est évidemment *non* et Einstein y voyait une preuve de la réversibilité des micro-processus. Il ajoutait même :

"Si le processus élémentaire dépendait de la flèche du temps, alors l'apparition d'un équilibre thermodynamique serait tout à fait incompréhensible".

Or, ce processus élémentaire qui est, dans le cas présent, le mouvement des micelles, Einstein lui-même l'a décrit, dans sa propre théorie du mouvement brownien [46][47], en faisant intervenir le *freinage* dû au fluide et, par là même, une *irréversibilité au niveau du processus élémentaire.* La loi du mouvement qu'il utilise est même très aristotélicienne, comme nous le disions au § 2, puisqu'il suppose implicitement que les micelles sont observées à des intervalles de temps suffisamment espacés pour qu'on puisse négliger les effets inertiaux et écrire, en vertu de la loi de Stokes et avec les notations d'Einstein lui-même [46] :

$$6\pi kP\ v = K$$

(k : viscosité du fluide ; P : rayon de la micelle ; v : sa vitesse ; K : force exercée sur la micelle par la pression osmotique). C'est de là que provient la présence du coefficient de viscosité dans l'expression du coefficient de diffusion.

On voit donc que le phénomène macroscopique irréversible de la diffusion, ainsi que l'apparition d'un équilibre thermodynamique, ne s'expliquent théoriquement qu'en faisant intervenir au niveau microscopique (celui des micelles colloïdales) le processus irréversible du freinage, donc une "*flèche microscopique du temps*".

Certes, ces microprocessus irréversibles n'apparaissent pas sur la suite des photos considérées par Einstein, mais l'absence d'ordre de cette suite (si elle est prise à l'équilibre thermodynamique) n'exprime qu'une réversibilité *statistique* et non une réversibilité du processus élémentaire. L'exemple d'Einstein me paraît aller à l'encontre de ce qu'il veut prouver et suggère au contraire l'existence de processus irréversibles microscopiques (éventuellement cachés) derrière un phénomène statistique à plus grande échelle et qui sont responsables des états d'équilibre que nous observons sur celui-ci. [4] C'est l'idée même de la Thermodynamique cachée de Louis de Broglie [8], que celui-ci commente dans cette phrase qui fait écho à celle que nous citions de Fabry :

"Tandis qu'à la suite des travaux de Boltzmann et de ses continuateurs la Thermodynamique est apparue comme une branche compliquée de la Dynamique, avec mes conceptions actuelles, c'est la Dynamique qui apparaît comme une branche en quelque sorte dégénérée de la thermodynamique".[49]

On peut citer beaucoup d'autres exemples de phénomènes descriptibles, à une certaine échelle, à l'aide de microprocessus statistiquement réversibles, alors que cette réversibilité même et l'état d'équilibre macroscopique auquel elle correspond ne sont rendus possibles que par une micro-irréversibilité.

Que l'on songe, par exemple, aux jeux de hasard avec lancer, comme la roulette, le jeu des dés, celui de pile ou face etc. On peut y voir, à l'échelle des raisonnements probabilistes habituels, une micro-réversibilité qui s'exprime par une égale probabilité de transition entre les tirages élémentaires (deux numéros de la roulette, deux faces du dé, deux côtés de la pièce). Mais ceci n'a de sens que si l'on tient pour acquise la réalisation des tirages eux-mêmes, donc *la réalisation de certains états stationnaires* : la bille sur un numéro de la roulette, le dé sur une face, la pièce sur un côté. Or ces états sont les aboutissements de processus *irréversibles* car ils exigent l'existence d'un *freinage* sans lequel l'objet même de la statistique n'existerait pas. Ici encore, il y a une irréversibilité cachée derrière la réversibilité vue à plus grande échelle.

De la même manière, prenons la naissance ou la mort. Pour un médecin, ce sont des processus irréversibles très complexes. Au contraire, pour les statistiques d'un démographe ou d'un actuaire, ce sont des processus élémentaires instantanés et réversibles : pour eux, seule la tendance à l'équilibre statistique sur toute une population apparaîtra

[4] Dans le cas du mouvement brownien, la question de savoir si on peut rendre compte, ou non, de cette viscosité par un raisonnement purement hamiltonien est *une autre affaire* et concerne un niveau encore plus profond. Je tiens à dire, cependant, que ma réponse personnelle à cette question est *non* et que je pense qu'on ne peut rendre compte de la viscosité sans introduire d'une façon *ouverte* ou *subreptice* dans les calculs un postulat d'irréversibilité (voir à ce sujet [47][48]).

comme irréversible ; une naissance, ou une mort, se réduira à une fluctuation statistique et leurs calculs n'auront en général pas à tenir compte de la complexité extrême et de l'irréversibilité des processus (pour eux élémentaires et microscopiques) qui se cachent derrière ces fluctuations et cela bien qu'ils soient la cause des phénomènes. A moins, bien entendu, qu'il n'arrive que ces processus élémentaires eux-mêmes, se trouvent profondément modifiés, par exemple par un progrès de la médecine ou de l'hygiène ou, au contraire, par une épidémie.

c) *La dynamique hamiltonienne et les quanta*

Pour en revenir à la mécanique, je crois qu'on peut affirmer que sans invoquer de processus irréversibles, il est impossible d'expliquer l'apparition et la stabilité des états stationnaires :

En particulier la dynamique hamiltonienne, qui est réversible, peut décrire (et elle le fait admirablement) des états stationnaires déjà établis, mais en aucun cas elle ne peut expliquer pourquoi ils se réalisent ni comment ils se maintiennent.

Or, la plus récente, la plus puissante, la plus belle et en même temps la plus controversée de toutes les théories d'états stationnaires, n'est-elle pas la mécanique quantique ? Et elle est une théorie purement hamiltonienne. Elle l'a été dès son origine, dès les premiers travaux de Planck, Einstein, Bohr et Sommerfeld, qui l'avaient édifiée sur les principes de la mécanique céleste auxquels était surimposée la loi des quanta. Et il en est de même pour la forme actuelle de la théorie : la mécanique ondulatoire de de Broglie et Schrödinger s'appuie essentiellement sur le principe de moindre action et sur l'équation de Jacobi, tandis que la mécanique des matrices de Heisenberg, Born et Jordan, "n'est, comme l'a dit plaisamment Dirac, que la mécanique classique exprimée à l'aide d'une algèbre non commutative". Mais par "mécanique classique", Dirac entendait évidemment "mécanique hamiltonienne" : identification entrée dans les moeurs, comme on l'a vu. Il est d'ailleurs remarquable qu'aucun des fondateurs des théories quantiques n'ait songé à prendre une autre dynamique pour point de départ de ses travaux, mais cela s'explique évidemment par le fait que la dynamique de Lagrange, Hamilton et Jacobi dominait toute la mécanique et était la seule à posséder un formalisme suffisamment structuré et varié pour qu'on puisse fonder dessus des généralisations nouvelles. Les théoriciens de notre siècle ont été irrésistiblement poussés par trois siècles d'Histoire de la mécanique dans la seule voie possible et on sait quels éclatants succès ils y ont remportés, mais cette absence même de choix se trouve à l'origine de certains interdits et de prises de position beaucoup trop tranchées qui ont conduit à faire des quanta un dogme sans plus se demander s'ils n'étaient pas, pour une part, un expédient et si l'on avait bien raison de jeter en leur nom toute la mécanique classique aux orties.

Ainsi, Bohr écrivait-il [50] :

"Par dessus tout, la découverte par Rutherford du noyau atomique (1911) révéla aussitôt combien les concepts de la mécanique et de l'électromagnétisme classique étaient impropres à exprimer la stabilité inhérente à l'atome".

Et pourtant ! La propre montre que Bohr portait dans son gousset oscillait suivant une fréquence et une amplitude *stables* qui résistaient très bien aux perturbations et cela en vertu des lois de la *mécanique classique* : la chose n'était donc pas impossible. Mais si Bohr n'a pas songé à cette éventualité d'expliquer la stabilité de l'atome, c'est que pour lui la mécanique était seulement celle de Hamilton qui ne peut, pour de tels systèmes, que décrire les états stationnaires et qui est tout aussi impuissante à rendre compte de la stabilité d'une montre que de celle d'un atome. Il faut reconnaître, d'ailleurs, qu'il est peut-être heureux que Bohr n'ait pas songé à cela car il n'aurait probablement pas su poser et résoudre le problème de la stabilité de l'atome et c'est parce qu'il a tranché dans le vif en postulant cette stabilité grâce à la loi des quanta qu'il a pu construire son célèbre modèle. Il n'est donc pas question de critiquer Bohr pour n'avoir pas ouvert une autre porte que celle qu'il a ouverte (ce serait du reste stupidement présomptueux !) mais on peut certainement le critiquer de n'avoir même pas souhaité que l'on découvrît une autre porte, ou d'en avoir tout simplement nié l'existence en proclamant que les transitions quantiques sont indescriptibles dans l'espace et dans le temps.

C'est une position toute contraire qu'ont adoptée Planck et Einstein qui, tout en développant la théorie des quanta, n'abandonnaient pas l'espoir que l'on expliquât un jour autrement l'étrange postulat. Mais peu à peu, les autres critiques se turent, après avoir été nombreuses au début car, selon le mot de Planck cité plus haut : "... une autre génération grandit ..." pour qui la nouvelle vérité devint familière et on cessa de poser des questions. Il est très intéressant de citer le cas de Jean Perrin qui écrivait dans la première édition des Atomes [51] :

"... il paraît inconcevable que le nombre de tours (d'une molécule) passe d'une valeur t à la valeur $2t$ ou $3t$ sans prendre les valeurs intermédiaires. Je suppose que ces valeurs sont instables ..."

Et Jean Perrin poursuivait plus loin :

"... on pourra négliger les rares molécules dont l'énergie de rotation est en train de changer, comme on néglige pour un gaz les rares molécules en état de choc dont l'énergie cinétique est en train de changer".

Eh bien l'auteur des "Atomes" a supprimé ces remarques dans les éditions ultérieures. S'est-il habitué à cette loi qui lui paraissait auparavant "inconcevable" ? A-t-il pensé que sa question n'avait aucune chance de réponse immédiate ?

Ou bien devant le succès des quanta et sous la pression normale de son entourage scientifique, s'est-il dit que le problème était "dépassé" ?

Dommage, car c'était une bonne question.

Et c'est en la perdant de vue que la mécanique quantique est devenue cette sorte de jeu de dés où l'on ne voit jamais les dés rouler sur la table et où l'on tient pour incongru de se demander s'ils roulent jamais.

Et pourtant, la question a été reposée de deux manières différentes. Et quelles manières !

La première, c'était la mécanique ondulatoire, car le problème que s'était posé Louis de Broglie était de comprendre l'origine de la quantification et c'est ainsi qu'il a été amené à identifier ce phénomène à celui de la stationnarité des ondes. Ayant ainsi retrouvé la loi de Bohr, il commenta son résultat dans sa thèse d'une phrase qui montre bien qu'il se posait à la fois le problème de la stabilité des états quantiques et celui des transitions :

"Nous voyons donc bien pourquoi, dit-il, certaines orbites sont stables, mais nous ignorons encore comment a lieu le passage d'une orbite stable à une autre. Le régime troublé qui accompagne ce passage ne pourra être étudié qu'à l'aide d'une théorie électromagnétique convenablement modifiée et nous ne la possédons pas encore" [5] [52].

Mais comme on le sait, hélas, cette amorce de programme est restée sans lendemain car il s'agit d'un problème extraordinairement difficile. Le succès de la mécanique ondulatoire s'est essentiellement manifesté

---

[5] Notons que le mot *stable* n'est pas pris ici dans le sens de Liapounov, c'est-à-dire "stable par rapport aux trajectoires voisines", mais dans un sens inspiré de la mécanique céleste et voisin de la stabilité à la Lagrange ou à la Poisson [53]. Il s'agit donc plutôt, ici, de la *stationnarité* liée à la *résonance* de l'onde. La stabilité, c'est le fait de revenir à l'orbite initiale si le "régime troublé" n'a pas été suffisant pour changer d'orbite.

dans le domaine des interférences et de la diffraction et dans celui de la description des états stationnaires (une fois de plus !). Les propriétés ondulatoires ont même été laissées au second plan par beaucoup de théoriciens qui ne voient plus dans la mécanique quantique qu'un "nouveau calcul des probabilités" fondé sur l'addition des amplitudes au lieu de l'addition des intensités. [6] En somme, l'*ouverture* que la mécanique ondulatoire donnait sur une meilleure compréhension de la nature des choses a été largement sacrifiée à la *prise* qu'elle donne sur le réel par les méthodes de calcul qu'elle a inspirées.

Mais voyons maintenant quelle a été l'autre manière d'aborder le problème de l'établissement des états quantiques. Il s'agit de la théorie des *mouvements centraux* de Birkhoff [38] qui date de la même époque que la mécanique ondulatoire et est restée inconnue des physiciens. Cette idée a fait long feu à ce moment là parce qu'elle n'était encore, précisément, qu'une idée, ou si l'on veut, un programme dont la réalisation soulève, on le verra, d'énormes difficultés. En outre, elle consistait en une étude des trajectoires des équations différentielles ordinaires et ne cherchait qu'à interpréter l'ancienne théorie des quanta : on comprend donc que la mécanique ondulatoire l'ait entièrement supplantée, au point que son auteur même l'a abandonnée. Mais pourtant, c'était une grande idée et bien loin de s'opposer à la mécanique ondulatoire, elle peut certainement s'y incorporer.

C'est ce dont nous allons parler maintenant.

V - LA TROISIEME VOIE DE LA MECANIQUE

Comme nous l'avons dit, cette voie a été ouverte presque simultanément, à la fin du siècle dernier, par Poincaré et Liapounov.

A une époque où on multipliait encore l'étude de fonctions spéciales de plus en plus compliquées pour résoudre des classes nouvelles d'équations différentielles (principalement en vue des applications à la physique mathématique et à l'astronomie), Poincaré, encore très jeune et qui devait devenir un maître dans ce domaine, publia une série de mémoires inspirés d'un esprit entièrement nouveau : "Sur les courbes définies par les

[6] Je sais bien que les "ondes" de l'espace de configuration ne peuvent guère passer pour des ondes matérielles et suscitent cette interprétation, mais cela prouve seulement à mes yeux qu'on n'a toujours pas su construire une théorie intelligible des systèmes de particules, ce qui est notamment à l'origine du paradoxe EPR et des discussions qui s'ensuivent.

équations différentielles" [36]. Il y posait –et résolvait pour les systèmes du second ordre– le formidable problème de trouver toutes les formes élémentaires et les points singuliers des trajectoires de phase définies par une équation quelconque. Il découvrit ainsi les notions aujourd'hui bien connues de *centre*, de *noeud*, de *foyer*, de *séparatrice* et surtout de *cycle limite*, c'est-à-dire de *trajectoire périodique isolée* [54]. [7]

Il compléta cette étude, par la suite, dans les Méthodes nouvelles de la Mécanique Céleste [53] : par exemple le théorème du retour, la méthode du segment sans contact, ou la recherche des trajectoires périodiques, appartiennent à la même catégorie de résultats.

C'est dans le même esprit que, l'année même ou paraissait le tome I des Méthodes Nouvelles, Liapounov publiait sa Thèse intitulée : "Le problème général de la stabilité du Mouvement" [37] dans laquelle il étudiait systématiquement le comportement d'une trajectoire de phase d'une équation différentielle quelconque, par rapport aux trajectoires voisines. Il donnait notamment les définitions actuellement utilisées dans la théorie de la stabilité et était le premier à distinguer clairement la notion de *stabilité ordinaire* (valable, par exemple, pour un équilibre correspondant à un minimum du potentiel d'un système hamiltonien autonome), de la notion de *stabilité asymptotique* (correspondant, par exemple, à un équilibre d'un système dissipatif). En particulier, un cycle limite stable de Poincaré possède la stabilité asymptotique et on montre facilement que ce type de mouvement est étranger à la dynamique hamiltonienne car la stabilité asymptotique signifie que toutes les trajectoires issues d'un certain voisinage s'écrasent sur le cycle, ce qui est contraire à la conservation de la mesure de l'espace des phases.

Grâce à leur généralité, ces travaux de Poincaré et de Liapounov s'évadaient du cadre de la dynamique hamiltonienne et constituaient le point de départ d'une *dynamique générale* qui resta longtemps ignorée des physiciens, qui ne la découvrirent qu'en 1929 grâce à Andronov et à l'école russe de théorie des vibrations. Mais elle resta longtemps confinée aux domaines techniques de l'électronique et de la régulation automatique. Les théoriciens des quanta l'ignorèrent tout à fait et ce n'est qu'en 1960 qu'un groupe d'élèves [7] de Louis de Broglie la fit entrer dans la microphysique. Et encore, sans guère se faire entendre à cette époque, sinon de Louis de Broglie lui-même, de Norbert Wiener et de Richard Bellmann : encouragements, du reste, plus que suffisants pour persévérer.

[7] Citons plus généralement [54] à [61], ainsi que [39].

Mais il faut redire que c'est Birkhoff qui, le premier, a aperçu un lien possible entre la dynamique générale et les quanta et c'est en 1926 qu'il démontra le *théorème sur les mouvements centraux* dont voici l'idée essentielle :

Considérons un système différentiel quelconque :

$$\frac{dx_i}{dt} = X_i(x_1, \ldots, x_n), i = 1, 2, \ldots, n$$

et supposons qu'à partir d'un certain instant t_0, les trajectoires des phases décrites par $x_i(t)$ restent enfermées dans un domaine borné. Bien entendu, il pourra arriver que *tous* les points $x_i(t)$ soient *non-errants*, c'est-à-dire que leurs mouvements possèdent la stabilité à la Poisson ou, si l'on veut encore, obéissent au théorème du retour de Poincaré ; mais dans le cas général, il n'en sera pas ainsi et parmi les points $x_i(t)$, il en existera, au contraire, qui seront *errants*, c'est-à-dire tels que chaque point de leurs trajectoires respectives possède un voisinage que la trajectoire ne recoupe plus à partir d'un certain instant. Mais (et c'est cela le théorème), Birkhoff montre que, dans ce cas, il existera toujours un ensemble fermé de points *non-errants* qui décriront ce qu'il a appelé les *mouvements centraux* et qui sont tels que si l'on considère un voisinage quelconque de leur ensemble et si l'on suit pendant un temps T le mouvement d'un point *errant* quelconque, alors la fraction $\theta(t)$ de ce temps pendant laquelle on trouvera le point à l'*intérieur* du voisinage sera telle que :

$$lim_{T \to \infty} \frac{\theta(t)}{T} = 1.$$

Autrement dit, si l'on observe le mouvement décrit par le système, il nous *apparaîtra presque tout le temps* au voisinage des mouvements centraux, c'est-à-dire de mouvements qui, par leur propriété de "retour", s'apparentent à ceux d'un système conservatif. Birkhoff a pensé que c'est à cette propriété générale qu'était due l'importance des systèmes conservatifs dans les théories physiques et il supposa que les états quantiques pouvaient n'être que les mouvements centraux d'*un système non conservatif dont les mouvements errants échapperaient à l'observation.*

C'est une idée très voisine qui a servi de point de départ à nos propres recherches entreprises dans l'équipe de Louis de Broglie, sans connaître, au début, le théorème de Birkhoff, mais par contre en connaissant de nombreux travaux de mécanique des vibrations. [8] Or, il

[8] L'admirable ouvrage d'Andronov, Vitt et Khaïkine [54] a été pour nous d'une importance toute particulière.

ressort de ces travaux, si on les regarde avec un peu de recul, que le phénomène de quantification est bien plus courant dans la nature qu'on ne le croit généralement.

En effet, on peut citer d'innombrables mouvements oscillants qui ne peuvent se produire que sur un seul ou quelques modes quantifiés en fréquence et en amplitude, qui restent stables quand ils sont faiblement perturbés ou, plus précisément, qui se rétablissent après une perturbation, en franchissant un *régime transitoire* plus ou moins bref. En outre, ils peuvent éventuellement sauter d'un mode à un autre sous l'effet d'une perturbation suffisamment forte. Citons, par exemple :

- Les phénomènes de grincement, à commencer par l'excitation d'une corde de violon par un archet.
- Les mouvements d'horlogerie.
- Tous les vibrateurs électroniques, en particulier ceux que l'on utilise comme émetteurs de radio.
- Les systèmes de régulation, à commencer par le régulateur de Watt.
- Les instruments à vent qu'ils soient à anche, comme la clarinette ou l'orgue, ou simplement excités par un courant d'air turbulent comme la flûte.
- Les battements cardiaques.
- Le rythme respiratoire.
- Les cycles biologiques tels que le cycle d'ovulation.
- L'onde α du cerveau.
- La fréquence du courant fourni par les réseaux habituels de distribution.
- La sonnerie électrique.
- Le laser (et le maser, bien sûr).
- Le "clignotant" indicateur de direction d'une automobile comme, d'ailleurs, d'autres feux d'alarme (mais pas les phares tournants, pour la même raison que la sirène). [9]
- Le rayonnement variable des céphéides [62].
- Certaines réactions chimiques périodiques.
- Les geysers, etc.

---

[9] La *sirène* n'entre pas dans ces catégories car sa fréquence dépend de celle du moteur et, sauf régulation de celui-ci, peut a priori varier continûment.

Tous ces systèmes appartiennent à la catégorie des *systèmes auto-oscillants* qu'on peut caractériser par les propriétés suivantes :

1) Ils ne possèdent qu'un ensemble discret de mouvements périodiqes possibles, de période et d'amplitde définies, qui sont, dans le cas d'un seul degré de liberté, des *cycles limites* de Poincaré (et ce sont aussi des cas particuliers des mouvements centraux de Birkhoff).

2) Ils sont *ergodiques* en ce sens qu'ils oublient leur passé : à l'exception d'un ensemble de mesure nulle de mouvements non errants mais instables (donc échappant à l'observation), tout mouvement du système est un *transitoire* plus ou moins bref qui tend vers l'un des cycles.

3) Ces systèmes sont *dissipatifs* (et évidemment non hamiltoniens) et l'énergie qu'ils dissipent en chaleur est empruntée à une source qui elle-même n'est pas périodique.

4) Le débit de cette source (ou éventuellement la dissipation, ou même les deux) est commandé par l'état du système. C'est ce mécanisme qu'on appelle le *feed-back*. Il est utilisé depuis le XIVème siècle, puisqu'on le trouve déjà dans l'échappement à roue de rencontre des horloges à foliot, mais son extrême généralité et son importance n'ont été mises en évidence qu'en notre siècle et énoncées par Norbert Wiener [63]. C'est la dépendance du feed-back par rapport à l'état du système qui impose la *non-linéarité* des équations du mouvement.

5) Enfin, un système auto-oscillant s'apparente à une *machine de Carnot* car c'est un système thermodynamique périodique qui fonctionne avec deux *sources d'énergie*.

A l'une (la source "chaude") il emprunte son énergie de fonctionnement ; à l'autre (la source "froide") il cède sous forme de chaleur l'énergie qu'il dissipe.

Et cette dissipation d'énergie, cédée sous forme de chaleur à la source "froide", est aussi indispensable à l'établissement et au maintien du cycle limite, que l'est la fourniture d'énergie par la source "chaude".

Mais, contrairement à une vraie machine thermique, cette chaleur cédée à la source froide n'est pas nécessaire, dans le cas présent, pour transformer en travail de la chaleur empruntée à la source chaude, puisque c'est déjà du travail que le système reçoit : *l'énergie dissipée* *en chaleur par le système, c'est le prix acquitté pour le fonctionnement du feed-back : c'est le prix de la stabilité.* [10]

Si, par souci de perfection technique, on tente de réduire les phénomènes dissipatifs qui sont générateurs de cette chaleur de compensation, on porte aussitôt atteinte à la stabilité des cycles limites : en d'autres termes, plus on cherche à rapprocher le système auto-oscillant d'un système conservatif, plus on détruit son aspect quantifié. Une montre sans dissipation d'aucune sorte (sans frottement, sans effet Joule, etc.) nous serait aussi inutile qu'une montre sans ressort ou sans batterie électrique.

Au siècle dernier, siècle de la machine à vapeur, les constructeurs avaient si bien diminué (par excès de zèle dans l'usinage et l'entretien) les frottements des régulateurs de Watt que ceux-ci en ont perdu leur stabilité. [11] C'est ce qu'a montré la théorie de Wichnegradsky [59] qui concluait son étude en proclamant : "Sans frottement, pas de régulateur". Comment ne pas rapprocher cette affirmation du principe de Carnot qui nous dit : "Sans condenseur, pas de machine à vapeur" ?

De même, dans un laser, où l'"objet oscillant" est une onde lumineuse, on montre [65] que la stabilité des modes (ou plutôt des *quasi*-modes) est due à l'absorption du milie actif et à une diffusion de lumière *incohérente* vers l'extérieur (due aux "imperfections", telles que la dimension finie des miroirs ou leur semi-transparence). Nous pourrions affirmer ici : "Sans perte de lumière par absorption ou diffusion, pas de modes stables dans le laser". Le laser "parfait", non seulement est irréalisable, mais encore, s'il existait, ne fonctionnerait-il pas.

D'une manière plus générale, je pense qu'on peut poser en principe : "*Pas de système physique possédant un ensemble discret d'états stationnaires asymptotiquement stables sans génération d'entropie*".

Et même, plus généralement encore :

"*Pas de stabilité asymptotique sans génération d'entropie*".

---

[10] Il est intéressant de remarquer que si l'on interprète le feed-back comme un transfert d'information, on se trouve bien en accord avec le principe de Brillouin d'après lequel l'information obtenue sur l'état d'un système est inférieure à la néguentropie dépensée pour l'obtenir [64] : il faut donc une *génération d'entropie* dans le système.

[11] On avait aussi, croyant mieux faire, alourdi les boules, ce qui ne faisait que rapprocher le régulateur d'un système conservatif, l'inertie l'emportant sur le frottement.

Ceci revient à identifier stabilité asymptotique au sens de Liapounov et stabilité d'un équilibre thermodynamique d'après le principe de Carnot. Il faut noter qu'un argument important en faveur de ce point de vue est l'analogie qui existe entre la variation monotone de la fonction V de Liapounov qui gouverne la stabilité asymptotique et le comportement d'un potentiel thermodynamique [10].

On voit donc que si l'on cherche à interpréter l'existence des états quantiques à partir de la théorie de la stabilité du mouvement, on doit abandonner le cadre de la dynamique hamiltonienne pour celui d'une dynamique essentiellement irréversible qui, de plus, doit être fondée sur des équations de champ pour rendre compte des *propriétés ondulatoires de la matière* (réf. [7] à [16]).

On comprend, en outre, le lien étroit qui existe entre ces idées fondées sur la théorie des cycles limites et des auto-oscillations et l'idée de la *thermodynamique cachée* de Louis de Broglie qui est fondée sur l'hypothèse que toute particule que nous observons échange continuellement de la chaleur avec un *milieu subquantique*, si bien que toutes les lois mécaniques que nous connaissons (classiques comme quantiques) ne seraient que le reflet des lois thermodynamiques de ce milieu caché. Le principe fondamental de la physique serait alors le principe de Carnot, donc un principe d'évolution irréversible, et ce n'est que pour les mouvements suffisamment proches du stationnaire et à une suffisamment grande échelle qu'on verrait se rejoindre en une loi unique les principes de Carnot, de Maupertuis et de Fermat. [12]

Mais sous quelle forme peut-on réaliser un tel programme ? Les travaux, cités plus haut, de Louis de Broglie et de son équipe ont déjà fourni toute une série de modèles dynamiques possibles dans lesquels les états stationnaires de la mécanique quantique apparaissent comme l'aboutissement de régimes transitoires irréversibles, mais il faut bien dire que des difficultés considérables subsistent. Elles sont, à mon avis, de deux sortes :

A) La première difficulté peut paraître plus ou moins technique, encore qu'elle soit de taille ; elle réside dans la recherche d'un mécanisme submicroscopique de caractère stochastique, susceptible de rendre compte de l'apparition des états quantiques et des distributions statistiques correspondantes. Autrement dit, il s'agit d'imaginer un milieu subquantique ou autre chose qui le remplace.

---

[12] On peut consulter à ce sujet l'exposé général [8], certains chapitres de [66] et une vue d'ensemble dans les derniers chapitres de [67].

De nombreuses tentatives existent dans ce domaine. Parmi les plus récentes, on peut citer les travaux sur l'Electrodynamique Stochastique, laquelle se développe d'ailleurs indépendamment des idées exposées ici, et dont l'hypothèse de base est que les lois quantiques seraient la conséquence d'une interaction entre les particules connues et un "*champ de zéro*", c'est-à-dire, un champ électromagnétique fluctuant et stationnaire. A cette idée, sont attachés, notamment, les noms de Marshall, Boyer, Surdin, Claverie et Diner, de la Peña-Auerbach etc. (voir un exposé général dans [68]). Dans un esprit assez voisin, mais s'inspirant des méthodes d'optimisation dont l'auteur est lui-même l'un des créateurs en automatique théorique, on peut citer les travaux d'Augustin Blaquière [69].

Toutes ces recherches sont aussi parentes de celles de J.P. Caubet, qui se fondent sur une théorie relativiste du mouvement brownien et sur une analyse nouvelle du principe de Huyghens [70].

Mais d'autres travaux s'effectuent dans des directions assez différentes : citons, principalement ceux de F. Fer et D. Fargue qui rattachent l'irréversibilité à la rétro-action du rayonnement de l'atome et à son caractère *héréditaire* dû à la vitesse finie de la propagation [12][13][14].

Une autre orientation qui, pour ma part, me paraît prometteuse est celle des phénomènes collectifs [71].

Cet effet joue un rôle très important dans de nombreux phénomènes. N. Wiener [72] le cite notamment au sujet de la synchronisation des réseaux de distribution d'électricité, dont la stabilité en fréquence est due en partie à la réglation de chaque centrale, mais également à leur synchronisation mutuelle. De même, Wiener a pu montrer que le rythme α du cerveau relève de cet effet ; et c'est aussi le cas de la synchronisation du battement des différentes fibres cardiaques. Mais on peut citer encore la synchronisation entre deux horloges identiques suspendues à un même mur (observation rapportée par Huyghens), ou celle des musiciens d'un orchestre (cet effet s'ajoute à la direction du chef), ou encore celles des molécules dans le milieu émetteur d'un laser. C'est précisément cette analogie que nous utilisons actuellement pour étudier un processus possible de quantification dans lequel les ondes de de Broglie seraient responsables de la transmission des signaux entre les micro-systèmes en voie de quantification –et le processus serait donc collectif. (Voir Appendice.)

Un argument en faveur du point de vue thermodynamique en général est fourni par des travaux récents sur l'*invariance adiabatique*

[10], [13],[15],[73],[74]. En effet, si l'on considère une assemblée d'un grand nombre d'atomes, leurs états les plus probables (donc ceux qui correspondent au maximum d'entropie) doivent posséder cette invariance. Et si l'on prend cette propriété pour critère, on retrouve bien, dans les systèmes conservatifs les états stationnaires (autrement dit, les états de superposition sont aussitôt écartés) ; mais si l'on prend un système soumis à un champ périodique dans le temps, on trouve de nouveaux états (les *états permanents*) dont les propriétés s'accordent avec des résultats connus en résonance nucléaire et justifient notamment la notion dite de "température de spin dans le référentiel tournant". Il semble donc que ce critère est en accord avec l'expérience et la conclusion qu'on peut en tirer est que le soubassement thermodynamique proposé par Louis de Broglie affleure déjà sous la mécanique ondulatoire et que celle-ci doit être à la microphysique future ce que la thermodynamique des états d'équilibre est à la thermodynamique des systèmes irréversibles.

La diversité, et même une certaine disparité, des tentatives trop rapidement évoquées ici ne doit pas dissimuler, par contre, la communauté de leurs desseins et, finalement, l'unique question posée : "Pourquoi y a-t-il des états quantiques ? Comment s'organisent-ils ?"

Aux difficultés physiques s'ajoutent, bien entendu, les difficultés mathématiques car une théorie physique ne prend vraiment son essor que lorsque se réalise, à un moment donné, une union harmonieuse entre un problème de physique clairement posé et un appareil mathématique qui l'exprime correctement :

- Ainsi, pour la mécanique céleste, il y eut la dynamique de Lagrange et de Hamilton.
- Pour la mécanique des fluides et pour la théorie des ondes et du champ électromagnétique, ce furent les équations aux dérivées partielles du second ordre.
- Les théories moléculaires eurent les statistiques et le calcul des probabilités.
- La relativité rencontra les espaces de Riemann et l'analyse tensorielle.
- Quant à la mécanique quantique, elle sut se servir de l'espace de Hilbert, des algèbres d'opérateurs et de la théorie des groupes.
- Et, en général, la théorie des états stationnaires s'est développée grâce au calcul des variations, aux espaces vectoriels, aux équations linéaires, aux problèmes aux limites.

Et nous, en quoi pouvons-nous espérer ?

Nos idées, en fait, s'inscrivent dans tout un courant d'idées actuelles sur les systèmes évolutifs, courant que l'on retrouve dans diverses branches de la physique, de la technique d'automation, de la biologie ; et je présume que c'est ce que j'appelais cette "troisième voie" de la mécanique qui devrait nous fournir l'appareil mathématique nécessaire, c'est-à-dire :

- L'étude qualitative des équations différentielles.
- La théorie de la stabilité du mouvement.
- La mécanique héréditaire [14][61].
- La théorie générale de la structure de l'espace de phase et, spécialement, la théorie des singularités et des bifurcations [75].

Tout au moins, c'est ce qui apparaît actuellement.

B) Mais la seconde difficulté, qui domine les difficultés techniques et est vraiment fondamentale, est d'ordre conceptuel. En effet, si les idées qui sont exposées ici se révèlent fécondes, elles doivent arriver un jour à un tournant de la physique peut-être plus radical encore que celui du premier quart de notre siècle. En effet, pour reprendre une expression d'Olivier Costa de Beauregard, "la relativité et la mécanique quantique sont toutes deux filles de la théorie des ondes et, pour cette raison, elles sont faites pour s'accorder" ; ce qui est parfaitement exact et on peut même ajouter que ces trois théories, ainsi que la dynamique hamiltonienne, appartiennent toutes au monde des principes variationnels, de la stationnarité et de la réversibilité. Mais le principe de Carnot y est à notre avis irréductible et si on le met au centre de la physique, cela signifiera un revirement complet dans la description des lois du mouvement et le grand balancier des conceptions de la mécanique, qui sera allé toujours dans le même sens depuis Galilée jusqu'à Einstein, devra lentement repartir vers Aristote, mais un Aristote qui aurait, entre temps, lu Poincaré, Liapounov et les grands mécaniciens et géomètres de notre siècle.

Si ces idées sont vraies, peut-être devra-t-on considérer que la relativité et les quanta sont un éclatant aboutissement de toute une ère de la science, mais que la véritable microphysique reste encore à venir. Qui sait, si dans l'oeuvre de Louis de Broglie, la très fragmentaire et encore fragile thermodynamique cachée n'apparaîtra pas, un jour, comme aussi importante que la mécanique ondulatoire ?

Car s'il est vrai que l'une a marqué l'apogée d'une science, qui sait si l'autre n'est pas à l'origine de la science de demain ? La microphysique, jusqu'ici, n'a fait que décrire les états stationnaires ; notre tâche, maintenant, est d'en comprendre la genèse et la stabilité.

Références

[1] Louis de Broglie, Disque édité par l'Alliance Française, 1961 ; texte reproduit dans : *Certitudes et Incertitudes de la Science*, Albin-Michel, Paris, 1966.
[2] Louis de Broglie, Conférence donnée au Centre de Synthèse, 1952, reproduite dans : *Nouvelles perspectives en microphysique*, Albin-Michel, Paris, 1956.
[3] Cité par Cornélius Lanczos, *The Einstein Decade (1905-1915)*, Elek Science, London, 1974.
[4] Albert Einstein-Michele Besso, *Correspondance (1903-1955)*, Hermann, Paris, 1972.
[5] Isaac Newton, *Principes mathématiques de la philosophie naturelle*, Albert Blanchard, Paris, 1966 (reproduction de la traduction par Mme du Chastellet, publiée en 1756).
[6] Séminaire Louis de Broglie (I.H.P. 1960), Exposés de J. Andrade e Silva, F. Fer, Ph. Leruste et G. Lochak.
[7] J. Andrade e Silva, F. Fer, Ph. Leruste, G. Lochak, Comptes rendus, **251**, pp. 2305, 2482, 2662 (1960) ; cahiers de physique, **15**, p. 209 (1961), **16**, p. 1 (1962).
[8] Louis de Broglie, *La Thermodynamique de la particule isolée*, Gauthier-Villars, Paris, 1964.
[9] J. Andrade e Silva et G. Lochak, Comptes rendus, **254**, p. 4260 (1962).
[10] G. Lochak, Comptes rendus, **254**, p. 4436 (1961) ; **256**, p. 3601 (1962) ; contribution à : *Prévisions, Calculs et Réalités*, Gauthier-Villars, Paris, 1964.
[11] F. Fer, Comptes rendus, **258**, pp. 2983, 3215, 3435 (1964) ; **260**, pp. 3873, 4159 (1965) ; **262**, p. 1417, **263**, p. 103 (1966) ; **265**, pp. 205, 289 (1967).
[12] D. Fargue, Thèse, Université de Provence, 1974.
[13] D. Fargue, F. Fer, Ann. Fond. L. de Broglie, **1**, p. 30 (1976).
[14] F. Fer, *L'irréversibilité, fondement de la stabilité du monde physique*, Gauthier-Villars, Paris, 1977.
[15] G. Lochak, Ann. Fond. L. de Broglie, **1**, p. 56 (1976).
[16] G. Lochak, exposés généraux : Vers une microphysique de l'irréversible, Revue du Palais de la Découverte, **5**, no. 48, p. 15 (1977) ; Les états quantiques de l'atome sont-ils les seuls possibles ou seulement les plus probables ? dans : *Mélanges offerts à Th. Vogel pour son 75ème anniversaire*, Presses Universitaires de Bruxelles, 1978.
[17] P. Duhem, *Le Système du Monde*, t. I, Hermann, Paris.
[18] Ch. Fabry, *Eléments de Thermodynamique*, Armand Colin, Paris, 1960 (10ème édition).

[19] P. Appel, *Traité de Mécanique rationnelle*, (5 Vols) 2ème éd., Gauthier-Villars, Paris, 1902-1937.
[20] J. Chazy, *Cours de Mécanique rationnelle*, Gauthier-VIllars, Paris, 1933.
[21] J.L. Synge and B.A. Griffith, *Principles of Mechanics*, 2d ed., Mc Graw-Hill, N.Y., 1949.
[22] J. Pérès, *Mécanique Générale*, Masson, Paris, 1953.
[23] S. Banach, *Mechanics*, Wroclaw, 1951 (et Lvow, 1938).
[24] L. Boltzmann, *Vorlesungen über die Prinzipie der Mechanik*, Verlag von Johann Ambrosius Barth, Leipzig, 1897 (I), 1904 (II).
[25] L. Boltzmann, *Leçons sur la Théorie des Gaz*, Gauthier-Villars, Paris, 1905 (Titre original : *Vorlesungen über gastheorie*, 1896 (I), 1898 (II).
[26] P. Painlevé, *Cours de Mécanique*, Ecole Polytechnique, Paris, 1919-1920.
[27] J.L. Lagrange, *Mécanique analytique* (2 tomes), Albert Blanchard, Paris, 1965. (reproduction de la 4ème édition parue précédemment chez Gauthier-Villars).
[28] K.G.J. Jacobi, *Vorlesungen über Dynamik* (édité par Clebsch en 1866).
[29] E.T. Whittaker, *A Treatise of the Analytical Dynamics of Particles and Rigid Bodies*, 3d ed., Cambridge, 1927.
[30] E.J. Routh, *The advanced Part of a Treatise on the Dynamics of a System of Rigid Bodies*, 6-th. ed, Macmillan, London, 1905.
[31] C. Lanczos, *The Variational Principles of Mechanics*, University of Toronto Press, 1949.
[32] J.M. Souriau, *Structure des systèmes dynamiques*, Dunod, Paris, 1970.
[33] V. Arnold, *Méthodes Mathématiques de la Mécanique Classique*, Mir, Moscou, 1976.
[34] H. Goldstein, *Classical Mechanics*, Addisson-Wesley, Cambridge, Mass., 2nd ed. 1980.
[35] L. Landau et E. Lifschitz, *Mécanique*, Mir, Moscou, 1964.
[36] H. Poincaré, *Oeuvres* t. I (Mémoires sur les courbes définies par les équations différentielles, 1881-1884), Gauthier-Villars, Paris, 1951 (nouveau tirage).
[37] A. Liapounov, *Le problème général de la stabilité du mouvement*, Kharkov, 1892 (Traduction française : Ann. Fac. Sci. Univ. Toulouse, série 2, **9**, p. 208, 1907, Editions Gabay, Paris, 1988).
[38] G.D. Birkhoff, *Dynamical Systems*, American Mathematical Society, Providence, USA, 1927.
[39] L.A. Pars, *A Treatise of Analytical Dynamics*, Heinemann, London, 1965.
[40] R. Abraham, *Foundations of Mechanics*, Benjamin, N.Y., 1967.
[41] B. Brunhes, *La dégradation de l'énergie*, Flammarion, Paris, 1909.
[42] H. Poincaré, Comptes rendus, **108**, p. 550, 1889 (Oeuvres, t. X, p. 231, G.V., Paris, 1954).
[43] E. Borel, *Introduction géométrique à quelques théories physiques* (p. 92), Gauthier-Villars, Paris, 1914.
[44] M. Planck, *Autobiographie scientifique et derniers écrits*, Albin-Michel, Paris, 1960.
[45] R. Dugas, *La théorie physique au sens de Boltzmann*, Griffon, Neuchatel, 1959.

[46] A. Einstein, *Investigations on the theory of the brownian movement*, Dover, N.Y., 1956.
[47] J. Salmon, Ann. Inst. H. Poincaré, **27**, p. 73, 1977.
[48] J. Salmon et J. Valton, Ann. Fond. L. de Broglie, **3**, p.175, 1978.
[49] Louis de Broglie, *Recherches d'un demi-siècle*, Albin-Michel, Paris, 1976 ; Ann. Fond. L. de Broglie, **1**, p. 53, 1976.
[50] N. Bohr, *Physique atomique et connaissance humaine*, Gonthier (Gauthier-Villars), Paris, 1961.
[51] J. Perrin, *Les Atomes* (réimpression du texte de 1913 avec une présentation et des compléments de Francis Perrin), Gallimard, Collection "Idées", Paris, 1970.
[52] Louis de Broglie, *Recherches sur la théorie des quanta* (réimpression de la thèse de 1924), Masson, Paris, 1963.
[53] H. Poincaré, *Les méthodes nouvelles de la mécanique céleste*, t. I, II, III, Gauthier-Villars, Paris, 1892, 1893, 1899. (Réimpression : Dover, N.Y., 1957).
[54] A. Andronov, A. Vitt, C. Khaïkin, *Théorie des oscillations*, 2ème édition, Physmatguiz, Moscou, 1959, en russe. Traduction anglaise : Theory of oscillators, Pergamon, London, 1966.
[55] A. Blaquière, *Analyse des systèmes non linéaires*, P.U.F., 1966.
[56] E.A. Coddington and N. Levinson, *Theory of ordinary differential equations*, Mc Graw-Hill, N.Y., 1955.
[57] S. Lefschetz, *Differential equations : geometric theory*, Interscience, N.Y., 1957.
[58] V. Nemitskij et V. Stepanov, *Qualitative theory of differential equations* (trad. du russe), Princeton Univ. press, 1960.
[59] L. Pontriaguine, *Equations différentielles ordinaires*, Mir, Moscou, 1969.
[60] M. Roseau, *Vibrations non linéaires et théorie de la stabilité*, Springer, 1966.
[61] Th. Vogel, *Théorie des systèmes évolutifs*, Gauthier-Villars, Paris, 1965.
[62] S. Gevakine, dans un Recueil à la mémoire d'Andronov, Ed. Ac. Sci. URSS, Moscou, 1955 (en russe).
[63] N. Wiener, *Cybernetics*, Hermann, Paris, 1948.
[64] L. Brillouin, *Science and Information Theory*, Academie Press, N.Y., 1956.
[65] M. Sargent III, M.O. Scully, W.E. Lamb Jr, *Laser physics*, Addison-Wesley, Reading, Mass., 1974.
[66] Louis de Broglie, *Jalons pour une nouvelle microphysique*, Gauthier-Villars, Paris, 1978.
[67] Ouvrage collectif : *Louis de Broglie, sa conception du monde physique*, Gauthier-Villars, Paris, 1973.
[68] P. Claverie et S. Diner, Ann. Fond. L. de Broglie, **1**, p. 73, 1976.
[69] A. Blaquière, Ann. Fond. L. de Broglie, **1**, p. 179, 1976.
[70] J.P. Caubet, *Le mouvement brownien relativiste*, Springer, Berlin-Heidelberg, 1976 ; Ann. Fond. L. de Broglie, **1**, p. 13, 1976 ; Comptes-rendus **285**, pp. 715, 817, 1977, **286**, p. 980, 1978.
[71] Il est intéressant de consulter à ce sujet : H. Haken, *Synergetics*, Springer,

Berlin-Heidelberg, 1977.
[72] N. Wiener, *Non Linear Problems in Random Theory*, J. Wiley, N.Y., 1958.
[73] A. Alaoui et G. Lochak, Ann. Fond. L. de Broglie, **2**, p. 87, 1973.
[74] G. Lochak et J. Vassalo Pereira, Comptes rendus, **282**, pp. 321, 657, 1121 (1976).
[75] R. Thom, *Stabilité structurelle et morphogénèse*, 2ème ed., Inter Editions, Paris, 1977.

APPENDICE

Depuis que l'article ci-dessus a été écrit, dix ans ont passé, ce qui a valu quelques modifications du texte et des compléments bibliographiques que nous donnerons ci-dessous avec quelques brefs commentaires et en suivant la numérotation précédente. Parmi ces références ajoutées, il en est de nouvelles mais aussi de plus anciennes qui avaient été oubliées (mais tant d'autres ont été oubliées !).

Il y a deux aspects dans cet article: le problème général des processus irréversibles et celui des transitions quantiques. Sans méconnaître le mérite, parfois grand, de certains auteurs que nous citerons, on peut dire que le problème de l'irréversibilité reste un thème de controverse et qu'il le restera longtemps, ce qui est normal, s'agissant de l'une des plus difficiles questions que la physique (et même que l'esprit humain en général) ait jamais soulevée. Quant au problème des transitions quantiques, malgré son extrême difficulté, on peut dire qu'il a fait quelques progrès, que nous citerons, sans toutefois que les résultats théoriques arrivent à des résultats déjà contrôlés par l'expérience et qui marqueraient donc une véritable acquisition nouvelle par rapport à la mécanique quantique.

Références complémentaires

[76] P. Glansdorff & I. Prigogine, *Structure, stabilité et fluctuations*, Masson, Paris, 1971.

[77] A. Pacault & C. Vidal, *A chacun son temps*, Flammarion, Paris, 1975.

[78] R. Thom, *Modèles mathématiques de la morphogénèse*, Christian Bourgois, Paris, 1980.

[79] V. Arnold, *Chapitres supplémentaires de la théorie des équations différentielles*, Mir, Moscou, 1978. [Ce livre est aujourd'hui indispensable pour connaître sous une forme souvent intuitive et relativement simple, tout ce que les fondements mathématiques de la théorie des systèmes dynamiques ont acquis depuis Poincaré et Birkhoff.]

[80] J. G. Guckenheimer & Ph. Holmes, *Nonlinear Oscillations, Dynamical Systems and Bifurcations of Vector fields*, Springer, N.Y., 1983. [Cet ouvrage complète de faáon très importante nos autres références sur les vibrations non linéaires, notamment parce que, dans la description qualitative, il sort du cadre étroit des systèmes à un seul degré de liberté. C'est un important traité sur les systèmes dynamiques.]

[81] Pierre Lochak & C. Meunier, *Multiphase Averaging for Classical Dynamical Systems with Applications to Adiabatical Theorems*, Springer, N.Y., Berlin, Heidelberg, 1988. [Ce traité moderne du calcul des perturbations s'adresse spécialement aux physiciens qui y trouveront, sous une forme très accessible, les bases mathématiques, qui leurs manquent

parfois cruellement, de l'une des méthodes fondamentales de la physique, à savoir la division des paramètres d'un système en coordonnées "lentes" et "rapides", ces dernières étant prises "en moyenne". Les théorèmes adiabatiques relèvent évidemment de cette méthode.]

[82] *Dynamical Systems and Microphysics I*, Séminaire du Centre International des Sciences Mécaniques (C.I.S.M. Udine, Italie), ouvrage collectif édité par A. Blaquière, F.Fer & A. Marzollo, Springer Verlag, Wien, N.Y., 1980. [Les références de [82] à [86] correspondent à des colloques internationaux à l'organisation desquels la Fondation Louis de Broglie a pris une part déterminante et qui ont rassemblé des spécialistes de différentes branches de la mécanique quantique ou classique, des mathématiques, de l'automation et du contrôle, dans le but de rechercher des voies posibles d'interprétation et de développement de la mécanique quantique, y compris, bien sûr, les voies qui sont envisagées dans l'article ci-dessus.]

[83] *Dynamical Systems and Microphysics II (Geometry and Mechanics)*, Séminaire du C.I.S.M. édité par A. Avez, A. Blaquière & A. Marzollo, Academic Press, N.Y., 1982.

[84] *The Wave-Particle Dualism*, ed. by S. Diner, D. Fargue, G. Lochak & F. Selleri, Reidel, Dordrecht, 1984.

[85] *Dynamical systems, a renewal of mechanism* (Colloque de la Fondation Louis de Broglie réuni à Peyresq), ouvrage collectif publié par S. Diner, D. Fargue, G. Lochak, World Sientific, Singapore, 1986.

[86] *Dynamical Systems and Microphysics III (Information, Complexity and Control in Quantum Physics)*, Séminaire du C.I.S.M. édité par A. Blaquière, S. Diner & G. Lochak, Springer Verlag, Wien, N.Y., 1987.

[87]P. Bergé, Y. Pomeau, Ch. Vidal, *L'ordre dans le chaos, vers une approche déterministe de la turbulence*, Hermann, Paris, 1984. [Excellente introduction à la théorie des systèmes dissipatifs appliquée à la physique et à la chimie. L'ouvrage doit sans doute une bonne part de ses qualités pédagogiques au fait qu'il a été écrit par un théoricien et deux expérimentateurs. On y trouvera beaucoup de notions qui se trouvent, depuis un certain nombre d'années, au devant de l'actualité dans ce domaine: exposants de Liapounov, bifucations, attracteurs étranges, "chaos déterministe".]

[89] G. Lochak, Quantization as a stability problem (voir [82]).

[90] J. Vassalo Pereira, Adiabatical invariance in microphysics (voir [82]).

[91] G. Lochak & J. Vassalo Pereira, Adiabatical invariance in systems periodically depending on time (voir [83]).

[92] J. Vassalo Pereira, A theorem of phase locking in two interacting clocks: the Huygens effect (voir [83]). [Ce travail, qui a été encore développé depuis lors, donne la première théorie, depuis que cet effet a été signalé par Huygens, de la synchronisation mutuelle de plusieurs systèmes autooscillants. Le résultat, important par lui-même, peut jouer un grand rôle dans nos idées sur la stabilité des états quantiques par influence mutuelle des systèmes quantifiés, ainsi que dans les problèmes posés par certaines propriétés quantiques macroscopiques telles que la condensation d'Einstein.]

[93] Pierre Lochak, Démonstration linéaire du théorème adiabatique en mécanique classique: équivalence avec le cas quantique, C.R.A.S. **295** série 1, 193, 1982.
[94] Pierre Lochak, About the adiabatic stability of resonant states, Annales de l'I.H.P., Section A, **39**, p. 119, 1983. [On établit dans cet article un important résultat, à savoir (pour parler non le langage mathématique de l'auteur, mais celui de la mécanique quantique), que si l'on perturbe un système possédant des états liés, donc un spectre discret, de faáon telle ce que ces états liés se diluent dans un spectre continu, comme il arrive par exemple dans l'effet Stark, les différentielles propres voisines des anciens états liés et qui sont nées de leur étalement restent invariantes adiabatiques. Ce résultat est en faveur d'une hypothèse sur les états quantiques, proposée dans la référence [88].]
[95] G. Lochak, The question of a microirreversibility in statistical mechanics and in quantum mechanics (voir [85]). [Cet article comporte une nouvelle mise au point non seulement sur le problème de la microirréversibilité, mais aussi sur celui des effets dissipatifs et des transitions quantiques, avec des références bibliographiques.]
[96] A. Alaoui, Quantum statistics for systems intreracting with a coherent electromagnetic field (voir [86]).
[97] S. Smale, Annals of the New-York Academy of Sciences, 357, 260, 1980 (article brièvement analysé dans [95]). [On montre dans cet article que les exceptions au théorème ergodique (le voisinage des points elliptiques) sont trop rares pour être négligées, tandis que les cas favorables (le voisinage des points hyperboliques) sont trop restreints pour satisfaire le physicien. Mais tout reviendrait dans l'ordre et le théorème ergodique serait largement vérifié si l'on introduisait dans les systèmes hamiltoniens une perturbation même très petite, mais non hamiltonienne: un terme de friction, qui créerait une large classe d'attracteurs structurellement stables, lesquels seraient ergodiques et mélangeants. Ce résultat vient évidemment à l'appui des arguments développés au sujet de la mécanique statistique dans le présent article.]
[98] N. Gisin, J. Phys. **A 14**, 2259, 1981; J. Math. Phys. **24**, 1779, 1983; Phys. Rev. Letters, **52**, 1657, 1954. [L'auteur propose une équation d'onde non linéaire qui admet, parmi ses solutions, les états stationnaires de l'équation de Schrödinger: ceux-ci sont asymtotiquement stables supérieurement et instables inférieurement. Cette remarquable équation a en outre la propriété d'être unique sous des conditions très générales.]
[99] Ph. Pearle, (voir réf. [84]). [L'auteur construit un tout autre modèle de transitions quantiques, qui est fondamentalement statistique. Il considère la réduction d'un paquet d'ondes comme un jeu de hasard à N joueurs: les N états d'un hamiltonien. La réduction du paquet signifie la ruine totale de tous les joueurs au profit d'un seul.]
[100] I. Prigogine & T. Petrosky, Intrinsic irreversibility in quantum theory, Physica **147A**, 33, 1987. [Les auteurs s'attaquent au problème posé par la coexistence, en mécanique quantique, d'un caractère essentiellement réversible parce que hamiltonien, avec une stochasticité et une

irréversibilité du processus de mesure, lesquelles sont des propriétés quelque peu verbales, puisqu'elles relèvent du commentaire et non pas d'une propriété inscrite dans le formalisme. Les auteurs proposent une nouvelle forme de la mécanique quantique dans laquelle l'irréversibilité est réellement inscrite dans le formalisme et ils indiquent une vérification expérimentale possible.]

[101] I. Prigogine, contribution à l'ouvrage collectif: *Louis de Broglie que nous avons connu*, éd. Fondation Louis de Broglie, Paris, 1988. [L'auteur exprime sous une forme simple l'idée qui est développée dans la référence [100].]