

---

## INDIVIDUALITÉ ET INTERACTION

### DANS LE MONDE PHYSIQUE

---

Moins apte, sans doute, à bien concevoir le continu et le fluent que le discontinu et le permanent, l'esprit humain paraît avoir toujours éprouvé une certaine satisfaction chaque fois qu'il lui a été possible, en étudiant les phénomènes de la nature, d'y discerner des entités élémentaires présentant des caractères permanents et d'interpréter l'évolution du monde physique par les mouvements et les interactions de ces entités élémentaires. C'est cette tendance naturelle de notre esprit qui a poussé les fondateurs de la Mécanique classique à poser à la base de cette science l'idée de « point matériel », c'est-à-dire l'idée d'une certaine quantité de matière occupant une très petite région de l'espace, douée d'une masse invariable et possédant une individualité que l'on peut suivre au cours du temps. Mais en Mécanique classique le point matériel n'est qu'un être de raison et il restait douteux qu'il y eût dans la nature des entités élémentaires offrant une sorte de réalisation concrète et permanente du point matériel. Or, s'accordant ainsi avec nos désirs secrets, la matière s'est ensuite révélée progressivement à nous comme formée par un petit nombre de genres différents de corpuscules élémentaires tels que les électrons et les protons (auxquels nous avons dû récemment ajouter les neutrons et les positons, pour ne point parler des encore hypothétiques neutrinos). Ces corpuscules élémentaires sont caractérisés par des valeurs constantes de leur masse et de leur charge électrique et ont paru constituer de véritables individus physiques dont l'existence pouvait être suivie au cours des transformations incessantes du monde matériel. Le développement des théories quantiques, appuyé sur d'incontestables preuves expérimentales, est venu ensuite nous obliger, comme pour

tant d'autres conceptions de la Physique, à un nouvel examen, et il nous a conduit finalement à atténuer d'une façon curieuse ce que cette notion avait de trop absolu. Exposer comment se présente aujourd'hui cette très intéressante question, par certains côtés encore bien obscure, de l'individualité des particules en physique quantique, tel est le but essentiel que nous nous proposons dans cette étude. Mais, avant d'aborder le fond même de notre sujet, il est utile, pensons-nous, d'examiner sur quelles bases reposait, dans les anciennes théories mécaniques et physiques, la possibilité d'attribuer une individualité persistante aux particules élémentaires et de nous demander si déjà cette possibilité ne s'y heurtait pas à certaines difficultés plus ou moins méconnues.

\*  
\* \*

Dans les théories classiques, préquantiques, comme on dit souvent maintenant, on ne mettait pas un instant en doute la possibilité de localiser exactement les objets physiques dans le cadre de l'espace et du temps. On ne doutait pas non plus de l'impossibilité pour deux éléments matériels différents d'occuper simultanément la même place dans l'espace, impossibilité qui résultait, disait-on, de l'impénétrabilité de la matière. Enfin, on supposait toujours la permanence au cours du temps des entités physiques élémentaires et la constance de leurs propriétés, hypothèses que l'expérience confirmait. Il est alors facile de comprendre pourquoi la Physique préquantique parvenait aisément à attribuer une individualité permanente aux corpuscules élémentaires. Tout d'abord, il était évidemment aisé de distinguer deux corpuscules de nature différente puisque, constamment caractérisées par des valeurs différentes de leur masse ou de leur charge électrique, ils possédaient toujours des propriétés permettant de les identifier. Mais il devenait déjà un peu plus délicat de distinguer constamment des corpuscules de même nature ; car, si l'on observe, par exemple, un système de deux corpuscules de même nature à des instants différents  $t_1$  et  $t_2$  séparés par un intervalle de temps fini, on doit évidemment trouver au temps  $t_1$  deux corpuscules occupant des positions  $A_1$  et  $B_1$ , puis au temps  $t_2$  deux corpuscules occupant des positions  $A_2$  et  $B_2$ , mais il est impossible de

dire si c'est le corpuscule primitivement en  $A_1$  qui est venu en  $A_2$  et le corpuscule primitivement en  $B_1$  qui est venu en  $B_2$  ou si, au contraire, le premier corpuscule s'est rendu de  $A_1$  en  $B_2$  et le second de  $B_1$  en  $A_2$ . Toutefois, cette difficulté ne paraissait pas bien sérieuse avec les conceptions classiques puisque, d'après ces conceptions, rien n'empêche de suivre d'une façon continue la marche des deux corpuscules entre les instants  $t_1$  et  $t_2$  et alors on verra bien si le premier corpuscule s'est rendu de  $A_1$  en  $A_2$  ou en  $B_2$ . Il ne pourrait y avoir encore doute que si les deux corpuscules à un instant  $t$  intermédiaire entre  $t_1$  et  $t_2$  se trouvaient passer ensemble en un même point de l'espace, mais l'impénétrabilité de la matière nous permettait, pensait-on, d'écarter une telle hypothèse. De cette analyse, il résulte en définitive que l'attribution aux particules matérielles d'une individualité permanente et contrôlable semblait rendue légitime, à l'époque de la Physique classique, par la possibilité de suivre d'une manière précise et continue les localisations successives dans l'espace de la particule au cours du temps ; car personne ne mettait alors en doute cette possibilité.

Cependant un examen critique des développements de l'ancienne Mécanique, sur lesquels reposaient les théories physiques, laisse apercevoir que l'individualité des points matériels n'y est pas aussi complète qu'on pouvait le penser tout d'abord. Une remarque que l'on peut faire à ce sujet, c'est que le caractère d'unité discontinue attribué par les anciennes conceptions aux points matériels physiques, aux corpuscules, est au fond plus apparent que réel. En Mécanique classique, le mouvement d'un point matériel est, en effet, déterminé par le champ de force qui l'entoure dont le point matériel se trouve ainsi en quelque sorte solidaire. La forme même du principe de moindre action nous montre que la trajectoire d'un corpuscule dépend en réalité du champ de force dans tout le voisinage immédiat de cette courbe. La trajectoire résulte, peut-on dire, d'une sorte d'exploration du champ dans la région de l'espace où le mouvement s'opère. Cette remarque prend un sens plus net quand on l'envisage du point de vue actuel de la Mécanique ondulatoire où le principe de moindre action apparaît comme une traduction du principe de Fermat appliqué à l'onde associée au corpuscule ; car, du point de vue ondulatoire, le principe de Fermat résulte lui-même de ce

que les ondes explorent l'espace tout autour du rayon lumineux. Le fait que le point matériel est ainsi solidaire du champ dont il subit l'action, nous fait donc déjà pressentir, même dans le cadre classique, la nécessité de ne pas considérer comme trop absolue l'autonomie individuelle des corpuscules. C'est ce que nous allons mieux voir encore en examinant les concepts si fondamentaux et si mystérieux d'interaction et d'énergie potentielle.

C'est qu'en effet une entité physique élémentaire qui posséderait l'autonomie individuelle dans toute sa plénitude serait nécessairement indépendante de tout le reste de l'univers physique : petit monde fermé, elle ne subirait aucune action et ne pourrait en exercer aucune. Pour pouvoir expliquer les phénomènes à l'aide d'entités élémentaires, il est donc nécessaire d'admettre qu'elles exercent entre elles des interactions : dès lors, ces entités, étant en quelque mesure solidaires les unes des autres, ne seront plus aussi autonomes qu'on l'avait admis au début, et leur individualité s'en trouvera quelque peu atténuée. On conçoit alors combien intéressante du point de vue philosophique est la notion d'interaction parce qu'elle implique une certaine limitation du concept d'individualité physique. Or, pour traduire l'existence de l'interaction, la Physique classique, guidée par la Mécanique rationnelle, a introduit l'idée d'énergie potentielle. Très claire au point de vue mathématique, cette idée reste physiquement assez mystérieuse. Afin de mettre en évidence un de ses caractères les plus profonds, envisageons un ensemble de corpuscules en interaction que nous supposons isolé du reste du monde. Voici ce que nous apprend à son sujet l'emploi de la notion d'énergie potentielle : tandis qu'il est toujours possible d'attribuer aux divers corpuscules du système une énergie cinétique et une quantité de mouvement individuelles bien définies, l'énergie potentielle ne peut pas être répartie entre les constituants du système ; elle appartient à l'ensemble du système et est comme *mise en commun* par ses constituants. Cette circonstance achève de prendre toute son importance si l'on se place au point de vue de la théorie de la Relativité. Il existe, en effet, dans cette théorie, une proposition aujourd'hui célèbre sous le nom de « principe de l'inertie de l'énergie » suivant laquelle il y a toujours proportionnalité entre la masse totale d'un système et son énergie. Il en résulte que la masse totale d'un ensemble de cor-

puscules n'est pas en général égale à la somme des masses qu'on peut attribuer individuellement à chaque corpuscule, mais qu'elle contient en outre une contribution (positive ou négative) apportée par l'énergie potentielle d'interaction mutuelle des divers corpuscules : il n'est donc pas possible de répartir, d'une manière non arbitraire, la masse totale d'un système entre ses divers constituants, dès l'instant où il existe entre eux des interactions. Cette conséquence est très importante ; car on est habitué à considérer la masse comme la caractéristique essentielle du point matériel, comme l'attribut propre de son individualité. Naturellement, dans beaucoup de cas usuels, l'énergie potentielle d'un ensemble de corpuscules est beaucoup plus petite que les énergies individuelles de chacun d'eux, et alors la notion de masse subsiste clairement pour chaque constituant. Mais, pour des interactions extrêmement intenses, la notion de masse individuelle doit perdre sans doute toute valeur. D'où cette conclusion que l'individualité des corpuscules élémentaires est d'autant plus atténuée qu'ils sont davantage engagés dans les liens de l'interaction. Comme, d'une part, il n'y a pas de corpuscule entièrement isolé, et comme, d'autre part, la liaison des corpuscules dans un système n'est pratiquement jamais assez complète pour ne pas laisser subsister quelque trace de leur individualité, on voit que la réalité paraît en général intermédiaire entre le concept d'individualité entièrement autonome et celui de système totalement fondu. Il serait d'ailleurs aisé de rattacher cette conclusion à des vues générales sur le rapport des idéalizations abstraites et des réalités physiques.

Ainsi la Physique classique elle-même, complétée par des considérations de Relativité, nous indique que l'idée de corpuscule doué d'individualité et bien localisé est toujours atténuée par l'existence des interactions et doit même à la limite disparaître complètement dans le cas des liaisons extrêmement intenses : nous venons de le voir en ce qui concerne la masse, mais il paraît certain que, dans un système où les constituants seraient si énergiquement liés qu'on ne pourrait plus leur attribuer de masses individuelles, il serait aussi impossible de leur attribuer une position, leur énergie se trouvant pour ainsi dire diluée dans l'espace occupé par le système entièrement fondu. Mais la Mécanique ancienne, Newtonienne ou Einsteinienne, ne s'occupe pas

de ces cas extrêmes ; elle n'envisage que des systèmes où l'énergie potentielle n'est qu'une fraction de l'énergie totale (compte tenu des énergies internes de masse) et alors on peut très approximativement raisonner comme si les corpuscules conservaient une masse, une localisation, et, par suite, une individualité bien définies. Donc, si l'on y réfléchit, on voit que, sous la simplicité apparente de la Mécanique classique des systèmes de points matériels, se cachent de graves problèmes au sujet de ce que nous nommons « interaction » et de la manière dont l'interaction se concilie avec l'individualité. L'on soupçonne déjà qu'individualité et interaction sont au nombre de ces « faces complémentaires de la réalité » que M. Bohr a été amené à considérer dans son interprétation des théories quantiques, faces complémentaires qui, en un certain sens, se complètent en s'opposant. On comprend aussi que la notion d'énergie potentielle, dont l'aspect mystérieux a souvent paru l'un des scandales de la Physique, traduit, en réalité, sous une forme profonde, bien que peut-être maladroite, la coexistence et la limitation réciproque de l'individualité et de l'interaction dans le monde physique.

\*  
\* \*

Si, maintenant, quittant le terrain de la Physique préquantique et des Mécaniques anciennes, nous passons à la Physique quantique et à la Mécanique ondulatoire, la question de l'individualité des particules élémentaires va nous y apparaître comme soulevant des problèmes plus difficiles encore et se rattachant à des phénomènes tout à fait inattendus.

Même quand elle se borne à considérer le mouvement d'un seul corpuscule, la Mécanique ondulatoire a été amenée à introduire des idées tout à fait nouvelles. Elle considère, en effet, qu'on ne peut plus en général assigner à un corpuscule une position bien déterminée dans l'espace à chaque instant. Mis à part quelques cas exceptionnels de probabilité évanouissante, il existe pour la nouvelle Mécanique toute une région étendue de l'espace où le corpuscule peut se trouver, c'est-à-dire où il peut manifester sa présence par une action locale à l'instant considéré. Cette région de l'espace est celle où l'onde, que les conceptions de la Mécanique ondulatoire associent au corpuscule, a une amplitude diffé-

rente de zéro. La localisation imparfaite des corpuscules à chaque instant ne permet plus de leur attribuer constamment une vitesse bien définie, ni, par suite, une énergie et une quantité de mouvement bien déterminées par les formules classiques qui relient ces grandeurs à la vitesse. Elle s'oppose aussi à ce que l'on puisse représenter par une trajectoire, c'est-à-dire par une courbe continue, la suite des positions d'un corpuscule au cours du temps. Le déterminisme des mouvements, tel qu'il était conçu en Mécanique classique, s'en trouve diminué, et les incertitudes d'Heisenberg, où la constante de Planck joue un rôle essentiel, en marquent en quelque sorte les limites.

L'impossibilité de localiser constamment avec exactitude les entités physiques élémentaires entraîne des conséquences très graves quand on veut, en Mécanique ondulatoire, traiter le cas d'un système de corpuscules en interaction. En effet, en Mécanique rationnelle classique, on pouvait considérer à chaque instant la figure formée par l'ensemble des points matériels d'un système et exprimer le mouvement de ces points en tenant compte des interactions, par hypothèse fonctions de leurs distances, qu'ils exerçaient entre eux. En Mécanique ondulatoire, les choses se présentent beaucoup moins simplement, parce que l'on ne peut plus parler de la figure géométrique formée à chaque instant par l'ensemble des corpuscules du système, ces corpuscules ayant une certaine probabilité non nulle de localisation dans toute une région étendue de l'espace. Il est dès lors impossible de considérer le mouvement instantané de l'un des corpuscules sous l'action des forces émanant des autres. Comment, d'ailleurs, pourrait-on exprimer les forces d'interaction par des fonctions des distances entre les corpuscules, puisque ces corpuscules ne sont pas localisés ?

La Mécanique ondulatoire est néanmoins parvenue à surmonter ces difficultés et à traiter, d'une manière qui donne des résultats entièrement satisfaisants en pratique, les problèmes concernant les systèmes de corpuscules en interaction. Mais, pour ce faire, elle a dû employer une méthode assez étrange dont le véritable sens ne nous paraît pas encore aujourd'hui bien éclairci : elle associe au mouvement du système entier la propagation d'une onde dans un espace abstrait, dit « espace de configuration », dont le nombre de dimensions est égal à celui des degrés

de liberté du système, c'est-à-dire, par exemple, à 3 N pour un système formé de N corpuscules susceptibles de se mouvoir librement. Cet espace de configuration, dont le nombre de dimensions généralement supérieur à 3 varie avec le nombre des constituants du système, est visiblement une conception abstraite et il est assez surprenant qu'il forme le cadre nécessaire de notre représentation physique du système. Il n'est cependant pas douteux que les méthodes de la Mécanique ondulatoire des systèmes réussissent et conduisent pratiquement à des prévisions exactes.

Sans vouloir discuter ici dans toute son ampleur la question de l'emploi de l'espace de configuration en Mécanique ondulatoire des systèmes, nous devons cependant faire une remarque : cet emploi n'est rendu véritablement inévitable que par l'existence de l'interaction. Considérons, en effet, un ensemble de N corpuscules qui n'exercent entre eux aucune interaction. On peut, évidemment, en les envisageant tous à la fois, les considérer comme formant un système mécanique et nous devons alors étudier l'onde de ce système dans son espace de configuration. Mais les corpuscules étant sans actions mutuelles, et, par suite, s'ignorant, si l'on peut dire, les uns les autres, il nous est aussi certainement loisible de les considérer isolément, et alors nous devons étudier les ondes individuelles de chaque corpuscule dans l'espace ordinaire. Les deux manières de traiter le problème devant évidemment conduire aux mêmes résultats, il doit être possible, dans ce cas particulier, de passer de l'espace de configuration à l'espace ordinaire. Il en est tout autrement si l'on considère un ensemble de corpuscules exerçant entre eux des interactions : alors il faudra nécessairement considérer l'onde associée au système entier dans l'espace de configuration et il ne sera plus permis d'attribuer à chaque corpuscule une onde individuelle. Tout retour à l'espace ordinaire sera donc impossible s'il existe des interactions. Or, quelle est la différence des deux cas que nous venons d'envisager ? C'est que, dans le second, les corpuscules étant en interaction, ont perdu une fraction de leur individualité en mettant en commun leur énergie potentielle. C'est donc, en définitive, le mystérieux « démembrement de l'individualité », impliqué par l'interaction, qui entraîne en Mécanique ondulatoire des systèmes la considération nécessaire de l'espace de configuration ; il est probable que, si l'on parvenait à mieux comprendre

l'une de ces deux énigmes, on comprendrait mieux l'autre.

Les difficultés que l'on rencontre dans l'interprétation physique des procédés mathématiques employés par la Mécanique ondulatoire des systèmes sont très probablement liés à l'insuffisance de nos conceptions sur l'espace et sur le temps, car ces conceptions, même amendées par la théorie relativiste, ne paraissent pas permettre de décrire exactement les propriétés des entités élémentaires que nous appelons « corpuscules », ni les liens d'interactions qui les unissent. Le défaut de localisation permanente des corpuscules dans l'espace est un premier aspect de cette insuffisance ; l'emploi obligatoire de l'espace de configuration pour décrire le résultat des interactions en est un autre. Il est d'ailleurs bien difficile de prévoir aujourd'hui comment on pourra, si un jour on le peut, remplacer les notions traditionnelles d'espace et de temps pour parvenir à une description plus adéquate des unités élémentaires et de leurs liens mutuels, d'autant plus qu'il faudra bien toujours revenir, semble-t-il, à nos conceptions ordinaires pour exprimer les prévisions relatives aux résultats possibles des observations et des expériences.

\*  
..

On vient de voir quel problème difficile soulèvent du point de vue conceptuel les méthodes de la Mécanique ondulatoire des systèmes, sans d'ailleurs que cela empêche ces méthodes de se développer d'une façon satisfaisante au point de vue formel et de conduire à des prévisions bien vérifiées. Mais d'autres complications encore, que l'ancienne Mécanique ignorait aussi totalement, se présentent en Mécanique ondulatoire quand on y considère des systèmes contenant deux ou plusieurs constituants de même nature.

Il est facile d'apercevoir pourquoi la question des ensembles de corpuscules de même nature doit se présenter sous un autre aspect qu'en Mécanique classique. Nous avons vu, en effet, que ce qui permet en Mécanique classique d'attribuer aux corpuscules de même nature une individualité susceptible d'être suivie, du moins en principe, au cours du temps, c'est la possibilité de déterminer à chaque instant la localisation exacte dans l'espace

de ces corpuscules jointe à l'hypothèse que deux d'entre eux ne sauraient occuper simultanément la même place. Les particules de nature identique ont beau être complètement indiscernables quant à leurs propriétés, leur localisation, par hypothèse toujours différente dans l'espace, suffit à permettre de les distinguer. On conçoit alors combien le problème devient plus délicat en Mécanique ondulatoire, où il existe, en général, pour une particule des régions étendues de localisation possible et où rien n'empêche les régions de localisation possible afférentes à divers corpuscules d'empiéter les unes sur les autres. Évidemment, si, pour les différents corpuscules d'un système, les régions en question n'ont à aucun moment de parties communes, on pourra encore suivre leur individualité ; mais si, à un certain instant, il y a superposition, même très partielle, desdites régions, il devient impossible de suivre d'une façon certaine l'individualité des corpuscules, un échange de rôles pouvant alors se produire entre eux sans qu'on puisse aucunement s'en apercevoir ultérieurement. Comme le cas où il y a superposition, au moins partielle et momentanée, des régions de présence possible est le cas général en Mécanique ondulatoire des systèmes, comme il comprend en particulier tous les problèmes si importants concernant les états stationnaires des systèmes quantifiés (atomes ou molécules, par exemple), le formalisme général de la Mécanique ondulatoire doit être développé de façon à ne préciser aucunement l'individualité des corpuscules de même nature, puisqu'on ne peut par aucun moyen suivre cette individualité au cours du temps. Sans entrer ici dans des détails trop techniques, contentons-nous de dire que ce but a été atteint par l'emploi exclusif de fonctions d'ondes, soit symétriques, soit antisymétriques, c'est-à-dire de fonctions d'ondes qui restent invariables ou qui changent seulement de signe quand on y permute le rôle de deux corpuscules de même nature. Cet emploi exclusif est d'ailleurs rendu légitime par certains théorèmes généraux de la nouvelle Mécanique.

La perte d'individualité des corpuscules de nature identique en Mécanique ondulatoire est donc liée à l'impossibilité de localiser en général dans notre cadre de l'espace les entités physiques élémentaires, c'est-à-dire probablement à l'insuffisance ou à l'inexactitude de notre notion d'espace. Quand nous parlons de perte d'individualité, nous ne voulons pas affirmer que les corpuscules

n'aient plus d'individualité, mais simplement qu'on ne peut plus suivre leur individualité d'une façon certaine. Prenons un exemple un peu trivial, mais qui parle à l'imagination. Soient deux frères jumeaux qui se ressemblent tellement qu'il est impossible de les distinguer. Tant que nous pouvons suivre chacun de ces deux jumeaux au cours de leurs pérégrinations, dans une ville, par exemple, nous pourrions suivre leur individualité par la continuité de notre surveillance et il nous sera possible de les désigner constamment, l'un, par la lettre A, l'autre, par la lettre B. Mais si les jumeaux entrent tous deux dans un édifice où nous ne pouvons pas pénétrer, puis en ressortent l'un et l'autre au bout d'un certain temps, nous ne saurons plus comment nous devons identifier les deux sortants avec celui que nous appelions A et avec celui que nous nommions B. Et il est bien évident, cependant, que notre incapacité à suivre le fil de ces deux individualités n'empêche pas nos jumeaux d'être des individus autonomes. Toutefois, il faut ici remarquer que la Physique contemporaine a une certaine tendance à adopter une attitude phénoméniste et à considérer comme de pseudo-problèmes les problèmes qui ne peuvent d'aucune façon être tranchés par l'expérience. Si l'on adopte ce point de vue, la question de savoir si l'individualité des particules persiste lorsqu'elle n'est pas susceptible d'être suivie doit être considérée comme un pseudo-problème.

Nous avons dit que la Mécanique ondulatoire des systèmes avait dû développer ses formules de manière à ne préciser nullement l'individualité des corpuscules de même nature. Néanmoins, en examinant la question avec soin, on s'aperçoit qu'il y est encore possible de faire les calculs en attribuant à chaque particule une individualité susceptible d'être suivie dans les deux cas suivants : 1° quand les particules sont sans interaction de telle sorte qu'il soit permis de les considérer isolément ; 2° quand les régions de présence possible des particules restent constamment séparées. Pour qu'il soit vraiment nécessaire, dans un problème de Mécanique ondulatoire, d'exclure entièrement du formalisme toute possibilité d'individualiser les corpuscules, il faut donc avoir affaire à un ensemble de corpuscules de nature identique, exerçant entre eux des interactions et pouvant se trouver, au moins à un certain moment, dans une même région de l'espace.

Existence simultanée pour des particules identiques d'une interaction et d'un empiètement des régions de présence possible, telle est la condition pour qu'il y ait perte d'individualité. Il y a alors une sorte d'interaction particulièrement intense appartenant à un type qu'ignorait complètement la Mécanique classique. Elle se traduit mathématiquement par l'apparition automatique dans le formalisme de la Mécanique ondulatoire des systèmes de termes d'énergie mutuelle n'ayant aucun analogue dans les théories classiques qu'on nomme termes d'énergie d'échange. Ils correspondent à l'existence pour les particules identiques d'une sorte de possibilité d'échanger leurs rôles au cours de l'union intime qu'elles subissent quand elles occupent en interagissant une même région de l'espace.

Le processus de l'échange, bien que n'étant pas directement observable, peut être cependant considéré en un certain sens comme un fait physique ; car l'existence de l'énergie d'échange donne lieu à de très importants phénomènes observables. C'est ainsi, on a pu le vérifier, que le choc de deux particules de même nature se fait, à cause de l'énergie d'échange, suivant des lois tout à fait distinctes de celles qui régissent les chocs entre particules de nature différente. D'ailleurs, la si belle et si instructive théorie de la formation des molécules homopolaires, due à MM. Heitler et London, qui a la première fourni une interprétation satisfaisante de la notion de valence chimique et du phénomène de la saturation des valences, s'appuie entièrement sur l'existence des énergies d'échange et, par suite, l'on peut dire que presque tous les faits de la Chimie sont des manifestations de cette existence. Le rôle fondamental de l'énergie d'échange dans la nature est donc aujourd'hui indéniable, bien que sa signification profonde soit encore assez obscure.

\*  
\* \*

La Mécanique ondulatoire traduit, nous l'avons vu, la perte d'individualité des particules semblables en n'admettant comme fonctions d'onde que des fonctions symétriques ou antisymétriques. L'expérience a de plus montré que certaines sortes de particules ont toujours des fonctions d'onde symétriques et d'autres des fonctions antisymétriques, fait qui est compatible, on

le démontre, avec les lois générales de la nouvelle Mécanique, sans être d'ailleurs imposé par elles. Les systèmes formés de corpuscules élémentaires, tels que protons et électrons, ont toujours des fonctions d'onde antisymétriques. Il en est de même des systèmes formés de particules complexes quand elles sont elles-mêmes constituées par un nombre impair de corpuscules élémentaires, tandis que les systèmes formés de particules complexes contenant un nombre pair de constituants élémentaires (particules  $\alpha$ , par exemple) ont des fonctions d'onde symétriques. Ces propriétés des particules complexes peuvent d'ailleurs s'expliquer aisément si l'on admet comme postulat le caractère antisymétrique des fonctions d'onde pour les corpuscules élémentaires.

Les particules à fonctions d'onde antisymétriques, et notamment les électrons, possèdent la très curieuse propriété suivante : deux d'entre elles ne peuvent jamais avoir exactement le même état de mouvement. Si l'une de ces particules possède un certain état de mouvement (caractérisé par un vecteur « quantité de mouvement » bien défini), la possibilité pour une autre particule de même nature du système d'avoir le même état de mouvement se trouve par là même exclue : d'où le nom « de principe d'exclusion » donné à l'énoncé de ce fait singulier. C'est M. Pauli qui, le premier, a formulé le principe d'exclusion dans le cas des électrons où son énoncé mathématique précis fait d'ailleurs intervenir la considération de la propriété interne de l'électron désignée sous le nom de *spin*.

La perte d'individualité des particules de même espèce en Mécanique ondulatoire a conduit à renouveler entièrement les méthodes de la Mécanique statistique. Tandis que la méthode classique de Boltzmann et Gibbs comptait le nombre des complexions élémentaires, dont un ensemble de particules semblables était susceptible, en attribuant à chacune d'elles une individualité reconnaissable, les statistiques quantiques actuelles font ce dénombrement en admettant l'indiscernabilité des particules. Mais, ayant admis ce principe général, elles sont encore obligées de procéder différemment suivant qu'il s'agit de particules à fonctions d'onde antisymétriques ou symétriques, c'est-à-dire de particules soumises ou non soumises au principe d'exclusion. La loi de répartition des énergies entre les particules dans un ensemble statistique, loi qui remplace la loi classique de Maxwell-Boltz-

mann, prend alors dans chacun de ces deux cas une forme différente. Si le principe d'exclusion est valable, on obtient la loi statistique dite de Fermi-Dirac ; dans le cas contraire, la loi statistique de Bose-Einstein. Dans beaucoup de cas usuels, pour les gaz dans les conditions ordinaires, par exemple, la différence entre ces lois et la loi classique est si faible qu'il est impossible de la mettre directement en évidence. Mais la loi de Bose-Einstein se vérifie dans le cas des photons pour lesquels il n'y a pas de principe d'exclusion, car elle conduit alors à la loi bien connue et bien vérifiée de Planck pour la composition spectrale du rayonnement noir. Quant à la loi de Fermi-Dirac, elle a pu être soumise à une vérification indirecte, mais très probante, dans le cas des électrons libres de conductibilité dans les métaux (Sommerfeld).

Sans entrer dans le détail de tous ces développements, montrons combien le principe d'exclusion, traduit par la statistique de Fermi-Dirac, conduit à des conséquences qui paraissent au premier abord tout à fait paradoxales. Envisageons, en effet, un gaz formé de particules obéissant au principe d'exclusion et enfermé dans un récipient de très grandes dimensions. Avec les idées classiques, il est tout à fait inconcevable que, si une particule située à l'une des extrémités du récipient possède un certain état de mouvement, elle puisse empêcher une autre particule située à l'autre extrémité du récipient, donc à une très grande distance, d'avoir le même état de mouvement. En Mécanique ondulatoire, on peut éluder cette difficulté en s'appuyant sur les relations d'incertitude d'Heisenberg : si, en effet, l'on suppose exactement connu le mouvement d'une particule, les relations d'incertitude nous apprennent que la position de cette particule est alors nécessairement tout à fait indéterminée, c'est-à-dire qu'elle peut manifester sa présence n'importe où dans le récipient ; autrement dit, sa région de présence possible remplit tout le récipient. Dès lors, on ne peut pas dire que deux particules, dont on suppose les états de mouvement exactement connus, sont éloignées l'une de l'autre : on peut tout aussi bien dire qu'elles sont en contact puisqu'elles occupent toutes deux, en quelque sorte potentiellement, la totalité du récipient. Cet argument subtil nous montre clairement que l'exclusion au sens de Pauli est étroitement liée à la non-localisation des unités physiques dans l'espace. Son existence nous montre donc une fois

de plus combien nos conceptions traditionnelles sur l'espace sont sujettes à caution. On peut, d'ailleurs, envisager l'exclusion au sens de Pauli comme une forme nouvelle d'interaction spécifiquement quantique et différente de l'énergie d'échange. En dehors de son intervention dans les statistiques quantiques, cette interaction d'un type nouveau joue un rôle essentiel dans beaucoup de phénomènes et se traduit à l'échelle macroscopique par des faits observables d'une importance capitale : toute la diversité de structure des atomes et la différence de leurs propriétés physiques et chimiques s'expliquent, en dernière analyse, par l'existence de l'exclusion de Pauli, et M. Heisenberg a même pu lui rattacher les propriétés magnétiques si remarquables des corps dits ferromagnétiques. L'existence de l'exclusion est donc à la fois certaine et fondamentale, mais sa véritable signification nous reste encore bien cachée.

\*  
\* \*

En résumé, il existe une certaine antinomie entre l'idée d'individualité autonome et celle de système où toutes les parties agissent les unes sur les autres. La réalité, dans tous ses domaines, paraît être intermédiaire entre ces deux idéalizations extrêmes et, pour la représenter, il nous faut chercher à établir entre elles une sorte de compromis. La Physique n'a pas échappé à cette nécessité et, sous sa forme classique, elle a tenté de réaliser le compromis grâce à la notion d'énergie potentielle d'interaction entre particules. Bien qu'à l'examiner de près, ce compromis apparaisse comme assez bâtarde, il a permis cependant de représenter un grand nombre de faits à l'échelle macroscopique et a longtemps paru suffisant. La situation s'est beaucoup aggravée quand la Physique quantique, étudiant les faits de l'échelle microscopique, s'est aperçue que les entités élémentaires ne pouvaient plus y être exactement localisées dans l'espace. Ce fait, si surprenant au premier abord, entraînait l'impossibilité d'attribuer aux particules une individualité susceptible d'être constamment suivie et reconnue : nous avons étudié les complications qui en résultaient. De plus, la possibilité pour plusieurs corpuscules d'occuper simultanément, du moins d'une manière potentielle, une même région de l'espace, provoque l'apparition

de formes nouvelles d'interactions ignorées de la Physique classique : l'interaction d'échange et l'interaction d'exclusion. L'existence de ces interactions est aujourd'hui physiquement certaine, leur importance assurément capitale, mais leur interprétation encore totalement obscure. En Physique quantique, le compromis à réaliser entre l'individualité et l'interaction apparaît donc comme bien plus difficile encore à concevoir qu'en Physique classique : il doit rendre compte de faits complexes et surprenants pour nos habitudes de pensée et il ne pourra certainement pas être développé dans le cadre de nos idées anciennes sur l'espace. En dehors des questions de formalisme mathématique qui sont déjà en partie réglées, il y a là de difficiles problèmes d'interprétation dont la solution demandera encore de longs efforts à ceux dont le principal souci est de comprendre, dans toute la mesure du possible, la nature du monde physique.

LOUIS DE BROGLIE.