

## 1.6.2 Du déterminisme scientifique au déterminisme statistique

L'évolution selon les lois de la physique traditionnelle de Newton et Maxwell est régie par le déterminisme scientifique : à chaque situation initiale d'un système elle produit une évolution vers une situation à un instant final arbitraire qui ne dépend que de la situation initiale. Cette évolution et la situation finale qui en résulte sont *uniques*, cela nous semble évident à l'échelle macroscopique habituelle.

### 1.6.2.1 Evolution vers un ensemble d'états superposés

Mais l'expérience nous a appris qu'à l'échelle atomique l'unicité n'est pas vraie : l'évolution d'un système à partir d'une situation de départ peut s'interpréter comme *un ensemble d'évolutions simultanées*, produisant chacune un état final ; et ces états finaux existent tous en même temps : on les dit *superposés*.

Ce type d'évolution multiple à partir d'un état initial ne relève pas du déterminisme traditionnel, mais d'un déterminisme particulier : le *déterminisme statistique*.

Exemple : voir le sous-titre *Exemple de différence entre physique newtonienne et Mécanique quantique* au paragraphe *La Mécanique quantique, outil mathématique de l'échelle atomique*.

A l'échelle atomique on ne peut plus décrire un résultat physique unique, car sa description comprend des variables stochastiques ; et l'évolution d'une situation initiale produira *un ensemble* de résultats, chacun assorti d'une probabilité : la certitude déterministe est devenue statistique.

Einstein a proposé en 1904 une théorie sur les ondes électromagnétiques selon laquelle leur énergie existe et se propage sous forme de paquets indivisibles (quanta) appelés photons ; cette théorie s'opposait sur ce point-là à celle de Maxwell, admise à l'époque, pour qui une onde électromagnétique est continue. Une synthèse du modèle corpusculaire d'Einstein avec le modèle continu de Maxwell ne fut établie par Schrödinger et Heisenberg que dans les années 1920.

Selon la théorie actuelle, dont l'outil mathématique est la Mécanique quantique, le comportement d'un photon est imprévisible, mais le comportement moyen d'un grand nombre de photons est régi par les équations de Maxwell sous forme d'ondes continues.

### Un ensemble de résultats d'évolution est parfois aussi corrélé

L'ensemble des solutions d'une équation d'évolution décrite par la Mécanique quantique est parfois aussi *corrélé* (on dit aussi *intriqué*), c'est-à-dire issu de la même situation initiale, décrit par la même fonction d'onde et respectant des conditions évidentes d'invariance connues à l'échelle macroscopique, comme la conservation de la matière-énergie et la conservation de la charge électrique. Nous en avons parlé au paragraphe *Déterminisme statistique*, sous-titre *Admettre les vérités mathématiques même contraires à notre intuition*.

### Une nouvelle réalité multiple : la superposition d'états quantiques

Du point de vue philosophique, l'expérience nous conduit à accepter un nouveau concept d'existence physique, celui d'un objet existant sous forme d'un ensemble d'états réels ayant en commun les invariants de l'objet initial comme la masse et la

charge électrique. La philosophie doit accepter et prendre en compte cette réalité dans ses réflexions sur le déterminisme, car elle correspond à une réalité physique.

#### *Exemple de superposition d'états*

Nous avons vu au paragraphe *La contingence des situations du passé, appréciation spéculative* l'exemple de la molécule d'ammoniac  $\text{NH}_3$ .

#### **1.6.2.2 Décohérence : passage d'une superposition cohérente à un de ses objets**

Mais avant d'accepter cette forme d'existence multiple, l'homme a désiré la voir, la toucher, la connaître le mieux possible, et cela ne fut pas possible : à chaque tentative physique de mesure faite à l'échelle macroscopique, celle-ci interfère avec l'objet étudié : pour savoir qu'un photon existe, par exemple, il faut l'absorber sur une plaque photographique ou dans une cellule photoélectrique, donc le détruire.

Toute interférence avec un objet en superposition cohérente à l'échelle atomique détruit cette superposition en ne retenant qu'un des objets superposés, parce que l'énergie de l'échelle macroscopique mise en œuvre pour voir l'objet superposé à l'échelle atomique est infiniment plus grande que les énergies mises en œuvre pour parvenir à la superposition et la conserver.

Une superposition d'états est toujours très fragile : la moindre perturbation la détruit ; l'ordinateur quantique de Rigetti, maintenu à une température de  $1^\circ\text{K}$  pour que sa mémoire en aluminium puisse être supraconductrice, ne peut garantir la durée des superpositions plus de  $90 \mu\text{s}$  du fait de l'agitation thermique [B153].

##### 1.6.2.2.1 A l'échelle atomique toute mesure perturbe le système mesuré

Pour fournir un résultat visible, une mesure utilise un dispositif macroscopique. Or ce dispositif ne peut pas ne pas échanger de l'énergie (par exemple un photon) avec l'objet qu'il mesure, énergie qui fait donc nécessairement partie de l'expérience, qui doit donc être conçue pour en tenir compte.

##### 1.6.2.2.2 Réduction de la fonction d'onde – Preuve physique de la décohérence

Pour bien comprendre ce paragraphe, lire d'abord :

- En annexe : *Application linéaire, opérateur linéaire, valeur propre, vecteur propre*
- Ci-dessous : *Fonction d'onde*.

Le passage d'une superposition cohérente à un de ses états, donc le choix d'un élément de l'ensemble des résultats superposés d'une évolution, réduit cette superposition d'états à un état unique visible à l'échelle macroscopique.

Cette réduction, appelée *décohérence*, réduit la fonction d'onde du système complet {objet en états superposés + dispositif de mesure} à celle d'une valeur propre particulière de l'observable du dispositif. Elle choisit l'un des objets superposés, lui attribue les paramètres globaux de l'objet initial comme la masse, et le laisse subsister à l'échelle macroscopique. Il est impossible de prévoir lequel des objets superposés sera choisi, car on ne peut décrire avec précision les paramètres de l'énorme perturbation macroscopique infligée à la superposition à l'état atomique par la décohérence, et *c'est cette mesure perturbante qui crée l'état observé à partir de la superposition*.

(Preuves expérimentales : [B52], [B156]).

Les lois physiques de l'échelle atomique sont donc régies par un déterminisme incorporant les possibilités de résultats d'évolution multiples, d'état d'objet en superposition cohérente, et de décohérence choisissant un des objets superposés : ce sera le *déterminisme statistique*.

1.6.2.2.3 C'est la mesure qui crée son résultat ; avant il n'existait pas

Il faut bien comprendre que l'évolution d'un système à l'échelle atomique crée un ensemble de résultats, pas un résultat particulier. De même qu'en mathématiques on ne confond pas un ensemble et un de ses éléments, en physique quantique une évolution crée un ensemble de résultats potentiels ; à la fin de cette évolution le résultat mesuré n'existe pas encore :

**C'est la mesure qui crée le résultat, en le choisissant parmi les éléments de l'ensemble de résultats virtuels créé par l'évolution ;**

**contrairement à la physique macroscopique, aucune observable de physique quantique n'a une valeur indépendamment de sa mesure.**

Mais qu'est-ce que ce processus de choix, quel est son mécanisme physique ?

Le déroulement physique du choix de l'élément de l'ensemble de résultats virtuels de l'évolution dépend du dispositif de mesure, il n'y a pas de règle générale. Mais dans tous les cas il fait intervenir de l'énergie, il n'est pas neutre ; et cette énergie est suffisante pour être cause d'un résultat visible à l'échelle macroscopique.

Exemple : un photon est détruit par son impact sur une cellule photoélectrique qui produit un signal électrique au résultat visible.

Dans tous les cas, la mesure amplifie l'énergie qu'elle échange avec le dispositif expérimental dont elle fait partie : sans cette amplification l'homme ne pourrait rien voir, ses sens n'étant pas assez sensibles. Or cette amplification met en jeu une énergie beaucoup plus importante que celle de l'échelle atomique, énergie qui ne fait pas partie de l'expérience, qui n'est pas intervenue dans l'évolution de celle-ci, dont la loi d'évolution ne peut tenir compte.

### 1.6.2.3 Lois d'évolution régies par le déterminisme statistique

Le déterminisme statistique est un sur-ensemble du déterminisme scientifique, en plus duquel il régit des lois d'évolution dont le résultat est un ensemble d'états :

- Dont les éléments sont prédictibles :
  - Chacun avec une probabilité d'occurrence, dans le cas des ensembles discrets ;
  - Chacun avec une densité de probabilité d'occurrence, dans le cas des ensembles continus (voir en annexe *Densité de probabilité*).
- Dont l'ensemble des éléments :
  - Soit coexistent en superposition cohérente qui peut subir une décohérence ; celle-ci choisit un des éléments de manière nécessairement imprédictible (comme pour l'ammoniac ; voir aussi *Théorie de la résonance chimique*).
  - Soit subissent un choix stochastique produisant un élément unique (comme dans le cas d'un lancer de dé).

### 1.6.3 Etat quantique d'un système

#### 1.6.3.1 Quantum

Un quantum (pluriel : quanta) est une quantité *minimale* non nulle d'une grandeur physique permettant de lui attribuer une valeur qui est nécessairement un multiple du quantum ; on dit alors qu'elle est *quantifiée*. Exemples :

- Toute charge électrique macroscopique est multiple du quantum « charge de l'électron  $e$  », où  $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  coulomb.
- Tout photon, émis (ou absorbé) par un atome dont un électron descend (ou monte) d'un niveau d'énergie est un quantum d'énergie électromagnétique : un échange d'énergie électromagnétique de fréquence  $\nu$  comprend un nombre entier de photons, chacun d'énergie  $h\nu$ , où  $h$  est la constante de Planck.

Sont quantifié(e)s :

- Les forces fondamentales : force électromagnétique, force nucléaire forte et force faible, décrites aujourd'hui par la *Théorie quantique des champs* ;
- La charge électrique ;
- Le moment cinétique d'une particule ;
- Le spin d'une particule ;
- L'action (mesurée en joules .seconde) de la constante de Planck  $h$ , qui intervient dans l'énergie  $E$  d'un photon de fréquence  $\nu$  :  $E = h\nu$ .
- Les *phonons*, quanta d'énergie des oscillations mécaniques des couches atomiques des cristaux, etc.

La *Théorie des quanta* de Planck décrit des grandeurs physiques qui ne varient pas de façon continue, mais en prenant des valeurs discontinues (discrètes) correspondant chacune à un nombre entier de *quanta*.

#### 1.6.3.2 Relations de Planck-Einstein et de Louis de Broglie

Un photon n'ayant pas de masse n'a pas de quantité de mouvement, mais il a :

- Une impulsion  $p = \frac{h}{\lambda}$ , où  $\lambda$  est sa longueur d'onde et  $h$  la constante de Planck ;
- Une énergie  $E = h\nu$ , où  $\nu$  est sa fréquence.

*Relations vraies pour tout corpuscule matériel d'énergie E*

- Les relations  $E = h\nu$  et  $p = \frac{h}{\lambda}$  s'appellent *Relations de Planck-Einstein*.
- La relation  $\lambda = \frac{h}{|p|}$  (où  $\lambda$  est la longueur des ondes de matière et  $|p|$  est la valeur absolue de l'impulsion  $p$ ) est la *Relation de Louis de Broglie*.

Complément : voir dans *Trajectoires d'un électron autour d'un noyau atomique : orbitales* le sous-titre *Orbitales et ondes de matière*.