

Avant la science (quelques généralités)...

La "réalité"

Rien n'empêche de supposer qu'il « existe » un « monde réel » ...

Notre perception

Nos sens nous permettent de percevoir certaines propriétés d'objets du « monde réel » et d'observer des phénomènes « naturels ».

On a ça en commun avec tous les organismes vivants disposant d'une « conscience » de leur environnement, même si, bien sûr, la manière de percevoir n'est pas la même. La différence est dans ce qui suit :

Une conceptualisation "pré-scientifique"

- Classification des objets observés selon leurs propriétés (plus grand/plus petit, couleurs, odeurs, chaud/froid, etc.)
- Introduction d'une flèche du temps (avant, en même temps, après)
- Classification des phénomènes observés selon leur durée (plus courte, plus longue)
- Prise de conscience
 - de la reproductibilité de certains phénomènes
 - du fait que l'observation d'un certain phénomène précède toujours l'observation d'un autre phénomène
- Interprétation naïve, adoptée collectivement par intersubjectivité (par exemple « le soleil tourne autour de la terre »)
- Quantification des grandeurs observées (taille, durée, etc.) dans un but opérationnel (par exemple « je veux que tu me fabriques un bâton de 4 pieds de long »)

La démarche scientifique

- Hypothèse d'appartenance d'un ensemble de faits observés (propriétés d'objets, phénomènes) à un même domaine d'étude
- Description des faits observés sous forme quantifiée (identification des propriétés mesurables)
- Hypothèses sur les relations entre les faits observés (relation de cause à effet, corrélation)
- Modélisation par un formalisme mathématique basé sur des axiomes (construction d'une théorie)
- Elaboration d'expériences permettant de vérifier / réfuter la théorie
- Réalisation de ces expériences - observations (mesures)
- Rebouclage si une observation contredit les prédictions de la théorie

- Rebouclage si on observe un nouveau phénomène pouvant appartenir au même domaine d'étude, alors qu'il n'est pas explicable par la théorie

A chaque étape le consensus se fait par intersubjectivité, au moins sur les faits observés et leur interprétation (au moins l'hypothèse qu'ils appartiennent au domaine d'étude)

Tout ce qui peut être "prouvé" est la cohérence interne de la théorie.

La notion de "fait observé" est étendue à l'observation via des appareils de mesure, il ne s'agit plus de la simple perception par nos sens ; la conception des appareils de mesure et l'interprétation des résultats s'appuie sur la théorie.

La théorie ne parle que des relations entre les faits observés et pas de la "réalité". Le scientifique peut supposer (s'il le souhaite) que ces faits correspondent à des éléments de réalité, mais ça ne doit pas influencer la construction de la théorie.

Le rôle de l'observateur

Par définition il est central dans toute démarche scientifique, puisque la théorie qu'il est question de construire ou de "prouver" par l'expérience ne parle que des faits observés, qu'il s'agisse d'observation par nos sens ou par l'intermédiaire d'appareils de mesure.

La notion même de fait "observable" dépend de la théorie, donc d'un produit de notre conscience.

Mais, dans les théories "classiques", l'observateur n'a pas de rôle actif (influant le résultat de la mesure et modifiant les propriétés des objets étudiés) dans le déroulement d'une expérience; une fois l'expérience préparée, il n'intervient que dans la "prise de conscience" du résultat.

L'influence de l'interaction entre l'appareil de mesure et l'objet étudié est soit considérée comme négligeable, soit quantifiable ce qui permet d'en tenir compte par calcul dans la production du résultat de la mesure.

Qu'y a-t-il de différent dans la théorie quantique?

Quelques rappels...

La description d'un objet quantique par la MQ est constituée

- d'un espace des états (espace de Hilbert : espace vectoriel sur le corps des nombres complexes, muni d'un produit "scalaire" qui est en fait une forme sesquilineaire),
- de vecteurs appartenant à cet espace, appelés vecteurs d'état, et représentant les états de l'objet étudié. Des vecteurs d'états colinéaires représentent le même état.
- d'opérateurs, applications linéaires de cet espace dans lui-même. A chaque grandeur physique (propriété de l'objet étudié) dont on peut mesurer la valeur correspond un opérateur hermitien (i.e. égal à son adjoint, donc à valeurs propres réelles) appelé une observable ; les résultats possibles d'une mesure de cette grandeur physique sont les valeurs propres de l'observable.

Lors de la mesure d'une grandeur physique, la probabilité d'obtenir l'une des valeurs propres de l'observable, à laquelle est associé un sous-espace propre sur lequel on considère une base orthonormée, est égale à la somme des produits scalaires des vecteurs de cette base avec le vecteur normé représentant l'état de l'objet.

La réunion des bases orthonormées des sous-espaces propres associés à chaque valeur propre de l'observable (donc à chaque résultat possible de la mesure) est une base orthonormée de l'espace des états. La somme des probabilités ci-dessus pour toutes les valeurs propres de l'observable est la somme des produits scalaires des vecteurs de cette base avec le vecteur d'état normé, et est donc bien égale à 1.

Le produit scalaire de deux vecteurs normés de l'espace des états représente l'amplitude de la probabilité de transition d'un état de l'objet étudié vers un autre.

Remarque : la question n'est pas de savoir si cet aspect probabiliste est intrinsèque ou seulement dû à notre connaissance incomplète du "monde réel" : la théorie n'y répond pas, puisqu'elle ne s'occupe que des faits observables et des relations qu'elle peut établir entre eux. La théorie peut être considérée comme complète du moment qu'elle sait expliquer toutes les relations entre faits observables dans son domaine d'étude.

Le domaine d'étude de la MQ laisse de côté les systèmes "macroscopiques" (incluant les appareils de mesure et les observateurs), sauf dans la prise en compte des effets de leur interaction avec les objets quantiques, "microscopiques" étudiés. La frontière entre le domaine microscopique et le domaine macroscopique est floue, et définie empiriquement dans le cadre de chaque expérience. En fait, est considéré comme macroscopique tout système qui ne peut "voir" (en fait : mesurer) qu'une valeur (parmi le spectre des valeurs possibles) d'une propriété d'un objet quantique.

Une particularité de la théorie de la MQ est que l'opération de mesure, en sélectionnant l'une des valeurs propres de l'observable (et donc en attribuant à cette valeur une probabilité égale à 1), modifie l'état de l'objet étudié : une fois cette valeur sélectionnée, une nouvelle mesure de la même propriété donnera toujours la même valeur. L'opération de mesure projette donc le vecteur d'état de l'objet sur un vecteur propre correspondant à cette valeur propre. C'est la « réduction du vecteur d'état ».

L'interprétation et le rôle de l'observateur

Cela peut être interprété en termes de probabilités conditionnelles : si, lors d'une expérience portant sur une grandeur physique à laquelle est associée une observable, on considère une base orthonormée de l'espace des états constituée de vecteurs propres de cette observable, les coordonnées dans cette base du vecteur normé représentant l'état de l'objet étudié sont les amplitudes de la probabilité de transition de cet état vers chacun de ces vecteurs propres. Ces probabilités sont conditionnées par la connaissance qu'on a de l'état de l'objet relativement à la grandeur physique considérée. Après la mesure, la probabilité que la grandeur physique prenne la valeur mesurée est nécessairement égale à 1, puisque cette valeur est connue.

Dans cette interprétation, le rôle de l'observateur dans la réduction du vecteur d'état semble indéniable, puisque les probabilités sont conditionnées par la connaissance qu'a l'observateur de l'état de l'objet. Mais on peut ne voir dans cette réduction qu'une opération sur un objet mathématique représentant cette connaissance, et non une interaction physique conduisant à une modification de l'état d'un objet « réel ».

Cependant, on peut se demander ce qu'on entend par « observateur » dans ce cas. Selon les astrophysiciens, l'état de l'univers tel que nous l'observons est le résultat de phénomènes quantiques (et gravitationnels) qui se sont produits dans un passé

où aucun être vivant n'était là pour les observer, et qui ont donné lieu à une évolution progressive de cet état depuis la période d'inflation – évolution dont nous pouvons observer les traces puisque, plus les objets observés sont éloignés de nous, plus l'image qui nous en parvient date d'un passé lointain, jusqu'au fond diffus cosmologique. A moins de considérer que cet état était macroscopiquement indéterminé tant qu'aucun être vivant n'était là pour l'observer (mais dans ce cas, comment expliquer la progressivité de cette évolution ?), il faut bien admettre que la réduction du vecteur d'état a lieu indépendamment de la présence d'un observateur conscient.

Par conséquent, le concept intuitif d'observateur pourrait être reformulé ainsi : on appelle « observateur » tout système macroscopique dont l'acquisition d'information sur les propriétés des objets quantiques « appartenant à son environnement » modifie la probabilité de subir une modification de leur état, en même temps qu'elle modifie l'état de ces objets quantiques. Un être vivant, conscient, muni éventuellement d'un appareil de mesure, ne serait qu'un cas particulier d'observateur.

Cela reste compatible avec l'interprétation du formalisme de la MQ en termes de probabilités conditionnelles ; ces probabilités sont toujours calculées « du point de vue de l'observateur », les conditions étant les informations dont l'observateur dispose sur les propriétés des objets quantiques considérés dans l'expérience.

Du point de vue de l'observateur, le fait qu'un éventuel équivalent physique de la réduction du vecteur d'état d'un objet quantique (la décohérence ?) a eu lieu sans qu'il en ait « pris conscience » ne change rien, tant que l'information *dont il ne dispose pas* n'a pas d'influence sur son propre état (comme pour l'observateur à l'extérieur de la boîte du chat de Schrödinger), et la description des phénomènes quantiques par le formalisme mathématique de la MQ est « suffisante ».

Pour illustrer ceci, on peut modifier l'expérience de Schrödinger de la manière suivante :

L'observateur (humain) et la boîte contenant le chat et le mécanisme diabolique sont enfermés dans un local aux parois étanches. En revanche la boîte n'est pas étanche (elle permet la diffusion du gaz à travers ses parois). L'observateur sait que lorsqu'il verra le chat mort, il disposera d'une minute avant que le gaz toxique envahisse tout le local, pour saisir un code qui déverrouillera la porte du local ; cette porte est munie d'une double sécurité : elle ne peut s'ouvrir qu'une fois que le marteau a cassé la fiole contenant le gaz ; d'autre part le dispositif de saisie du code n'autorise qu'une saisie par période de 5 minutes.

Dans cette expérience, l'information sur l'instant auquel le chat meurt est critique pour la survie de l'observateur. Le fait qu'il puisse voir ou non ce qui se passe à l'intérieur de la boîte pendant l'expérience modifie sa probabilité de survie :

- dans le premier cas, *du point de vue de l'observateur*, la réduction du vecteur d'état (opération mathématique) et donc l'acquisition d'information a lieu à l'instant du phénomène physique, et la probabilité de survie de l'observateur est égale à 1 (pour peu qu'il ne panique pas en saisissant le code de la porte).
- dans le deuxième cas elle a lieu à la fin de l'expérience, donc soit au bout d'une heure (le chat n'est pas mort et l'observateur s'en sort bien), soit dans la minute qui suit la mort du chat, avec la mort de l'observateur. Donc, à peu de chose près, la probabilité de survie de l'observateur est de $\frac{1}{2}$, comme celle du chat (sauf si l'observateur a décidé d'essayer de saisir le code toutes les 5 minutes, ce qui augmente un peu ses chances de survie).

C'est donc bien la notion d'information qui est capitale, et la MQ permet de prédire le résultat de l'expérience dans les deux cas, même s'il n'y a pas nécessairement de simultanéité entre la réduction du vecteur d'état et le phénomène physique qui donne lieu à cette réduction.