

BULLETIN N° 196
ACADÉMIE EUROPEENNE
INTERDISCIPLINAIRE
DES SCIENCES



Lundi 1er juin 2015 à 15h30 Maison de l'AX 5 rue Descartes 75005 Paris

Conférence du Pr Jean BRICMONT

Institut de Physique Théorique

Université Catholique de Louvain, Louvain-la-Neuve

"Peut-on comprendre la mécanique quantique?"

Notre Prochaine séance aura lieu :

le lundi 7 septembre à 15h30 précises Maison de l'AX 5 rue Descartes 75005 Paris

Elle comportera **deux** thématiques:

de 15h30 à 16h30:

notre Collègue Claude MAURY nous exposera son projet de thème de futur colloque

(après 2016) intitulé:

" Science et hasard "

(voir pièce jointe d'introduction à son colloque)

à 17 h

Conférence du Pr Dominique LAMBERT

Département de Sciences, philosophies et sociétés

Centre d'études sciences et philosophie à Namur (ESPHIN)

Université de Namur, Académie royale de Belgique

" La plasticité comme thème central de la biologie théorique "

Académie Européenne Interdisciplinaire des Sciences

Siège Social : Fondation de la Maison des Sciences de l'Homme 54, bd Raspail 75006 Paris

Nouveau Site Web : <http://www.science-inter.com>

ACADEMIE EUROPEENNE INTERDISCIPLINAIRE DES SCIENCES

FONDATION DE LA MAISON DES SCIENCES DE L'HOMME

PRESIDENT : Pr Victor MASTRANGELO
VICE PRESIDENT : Pr Jean-Pierre FRANÇOISE
SECRETARE GENERAL : Irène HERPE-LITWIN
TRESORIER GENERAL : Claude ELBAZ

MEMBRE S CONSULTATIFS DU CA :

Gilbert BELAUBRE
 François BEGON
 Bruno BLONDEL
 Michel GONDRAN

COMMISSION FINANCES: Claude ELBAZ,
COMMISSION MULTIMÉDIA: Pr. Alain CORDIER
COMMISSION EDITION: Robert FRANCK et Pr Pierre NABET

COMMISSION CANDIDATURES: Pr. Jean-Pierre FRANÇOISE

PRESIDENT FONDATEUR : Dr. Lucien LEVY (†)
PRESIDENT D'HONNEUR : Gilbert BELAUBRE
SECRETARE GENERAL D'HONNEUR : Pr. P. LIACOPOULOS (†)

CONSEILLERS SCIENTIFIQUES :
SCIENCES DE LA MATIERE : Pr. Gilles COHEN-TANNOUDJI
SCIENCES DE LA VIE ET BIOTECHNIQUES :

CONSEILLERS SPECIAUX:
EDITION: Pr Robert FRANCK
AFFAIRES EUROPEENNES: Pr Jean SCHMETS
RELATIONS VILLE DE PARIS et IDF: Michel GONDRAN ex-Président
RELATIONS UNIVERSITES et MOYENS MULTIMEDIA: Pr Alain CORDIER
RELATIONS AX et MÉCENAT : Gilbert BELAUBRE

SECTION DE NANCY :
PRESIDENT : Pr Pierre NABET

juin 2015

N°196

TABLE DES MATIERES

p. 04 Séance du lundi 1er juin 2015
 p. 06 Annonces
 p. 07 Documents

Prochaine séance :

lundi 7 septembre 2015 à 17h Maison de l'AX 5 rue Descartes 75005 Paris

Elle comportera **deux** thématiques:

de 15h30 à 16h30:
 notre Collègue Claude MAURY nous exposera son projet de thème de futur colloque
 (après 2016) intitulé:

" Science et hasard "

(voir pièce jointe d'introduction à son colloque)

à 17 h

Conférence du Pr Dominique LAMBERT

Département de Sciences, philosophies et sociétés
Centre d'études sciences et philosophie à Namur (ESPHIN)
Université de Namur, Académie royale de Belgique
" La plasticité comme thème central de la biologie théorique "

ACADEMIE EUROPEENNE INTERDISCIPLINAIRE DES SCIENCES

Fondation de la Maison des Sciences de l'Homme, Paris.

**Séance du Lundi 1er juin 2015
Maison de l'AX 17h**

La séance est ouverte à 17h **sous la Présidence de Victor MASTRANGELO** et en la présence de nos Collègues Gilbert BELAUBRE, Jean-Pierre BESSIS, Alain CARDON, Gilles COHEN-TANNOUDJI, Claude ELBAZ, Jean -Pierre FRANCOISE, Michel GONDRAN, Irène HERPE-LITWIN, Antoine LONG, Pierre MARCHAIS, Claude MAURY, Edith PERRIER, Jean SCHMETS, Alain STAHL.

Etaient excusés François BEGON, Bruno BLONDEL, Jean-Louis BOBIN, Michel CABANAC, Juan-Carlos CHACHQUES, Alain CORDIER Daniel COURGEAU, Ernesto DI MAURO, , Françoise DUTHEIL, Vincent FLEURY, Robert FRANCK, Gérard LEVY, Jacques LEVY , Gérard LEVY, Valérie LEFEVRE-SEGUIN, Pierre PESQUIES, Jean-Pierre TREUIL , Jean VERDETTI.

I. 17 h Conférence du Pr Jean BRICMONT " *Peut-on comprendre la mécanique quantique?* "

A. Présentation du conférencier le Pr Jean BRICMONT par notre Président

Le Pr Jean BRICMONT est titulaire d'un Ph D de l'Université catholique de Louvain en Belgique. Depuis 1999 il est titulaire de la chaire de Professeur de Physique théorique à l'Université Catholique de Louvain.

Auparavant il a également enseigné dans des universités étrangères:

- Au printemps 1985 et pour l'année académique 1986-1987, il a été Professeur visiteur , au Département de Mathématiques, de Rutgers University
- Au printemps 1987: il a été Lecteur, au Département de Physique de l'Université de Princeton
- En 2007-2008: il a été nommé Professeur Visiteur (Chaire Européenne) à l'Université Paris-Dauphine

Il est depuis 2004 membre de l'Académie des Sciences de Belgique.

Spécialiste de Physique mathématique, il s'est particulièrement intéressé au traitement mathématique de la physique statistique autant classique que quantique.

Il est par ailleurs auteur de très nombreuses publications de renom dans ce domaine et a participé à de nombreux colloques. Il a été lauréat de plusieurs prix scientifiques et membre de comité de lecture de grandes revues scientifiques comme "*Journal of Statistical Physics*" . Il a également été membre du comité de conseil international de STATPHYS..

B. Conférence du Pr Jean BRICMONT " *Peut-on comprendre la mécanique quantique?* "

Pour préparer la conférence nous vous resoumettons le résumé fourni par le Pr BRICMONT:

"Après avoir exposé les deux principaux problèmes conceptuels soulevés par la mécanique quantique, notamment le principe de superposition et de non-localité, je discuterai d'un moyen de comprendre ces problèmes en termes rationnels : la théorie de Broglie-Bohm. Dans cette théorie, les particules ont des positions à chaque instant et de ce fait aussi des vitesses. L'un des aspects les plus intéressants de cette théorie est le fait que lorsqu'on analyse ce que représentent des prises de mesures, on réalise qu'en général, celles-ci ne mesurent aucune des propriétés préexistantes du système "mesuré". En particulier, ceci implique l'absence de contradiction entre l'existence de trajectoires et de vitesses avec le principe d'incertitude d'Heisenberg."

Compte-rendu de la conférence

Le compte-rendu complet sera réalisé par notre collègue Michel GONDRAN que nous remercions chaleureusement. Il sera accessible prochainement sur le site de l'AEIS <http://www.science-inter.com>

Notre Président Victor MASTRANGELO procède ensuite à la clôture de cette très riche séance.

Irène HERPE-LITWIN

Annonces

I. Notre Collègue Antoine FRATINI nous fait part de la manifestation suivante:

FESTIVAL PSY PARIS – 23-24 octobre 2015

Programme accessible sur le site <http://causepsy.fr/nouveautes.html>

Documents

I. Pour préparer la conférence de Dominique LAMBERT sur la plasticité du vivant nous vous proposons:

p. 8 Un article de René REZSOHAZY intitulé " Gènes du développement et structuration de l'organisme" paru dans la Revue des questions scientifiques , 2010, 181(1) :99-110

p. 20 Un article de Dominique LAMBERT intitulé " L'éthique de la robotique, l'interaction « homme-machine » texte d'une intervention réalisée à l'Université de Namur

II. Pour compléter la conférence du Pr Jean BRICMONT nous vous proposons:

p 26 issu du site <http://users.skynet.be/radoux/textes/quantique.pdf> , un extrait de l'article "Contre la Philosophie de la mécanique quantique" un texte présenté par Jean BRICMONT au colloque "Faut-il promouvoir les échanges entre les sciences et la philosophie?" Louvain-la-Neuve, 24 et 25 mars 1994.

Gènes du développement et structuration de l'organisme

RENÉ REZSOHAZY

*Unité des Sciences vétérinaires – Département de Biologie
Institut des Sciences de la vie
Université catholique de Louvain*

La question centrale qu'aborde la biologie du développement consiste à comprendre comment au départ d'une cellule unique, indifférenciée, issue de la rencontre de deux gamètes, un organisme structuré dans les trois dimensions de l'espace est obtenu au terme des divisions et différenciations cellulaires prenant cours lors de l'embryogenèse et de la morphogenèse. En effet, pour se restreindre au monde animal, les phénomènes à l'œuvre au cours du développement embryonnaire organiseront l'organisme selon son axe antéro-postérieur (axe bouche-anus), son axe dorso-ventral, et son axe bilatéral (gauche-droite). On reconnaîtra ainsi le long de l'axe antéro-postérieur d'un vertébré, comme l'homme, la souris, les poissons ou le serpent, un système nerveux central régionalisé, avec le cerveau au niveau de la tête, suivi du tronc cérébral et de la moelle épinière. Différents centres nerveux, différentes populations de neurones, différents nerfs s'individualisent selon leur position sur l'axe du système nerveux. Ainsi verra-t-on par exemple chez nous douze paires de nerfs crâniens qui émanent de la base du cerveau et du tronc cérébral, et qui établissent la connexion entre différents organes et les centres nerveux qui les contrôlent pour assurer par exemple la déglutition ou la respiration. De manière similaire, la colonne vertébrale se développe comme une succession de vertèbres faisant suite au crâne, et dont la forme diffère selon la position sur l'axe principal de l'organisme. Chez les mammifères, la première ver-

tère cervicale, l'atlas qui porte le crâne, adopte une morphologie clairement distincte de la seconde, l'axis, elle-même de forme différente des vertèbres cervicales qui lui font suite, et encore des vertèbres thoraciques qui portent les paires de côtes, et ainsi de suite. Cette structuration spatiale de l'organisme est mise en oeuvre progressivement au cours du temps du développement embryonnaire. Il y a donc un couplage entre le temps et l'espace du développement de l'embryon. Cette structuration de l'espace dans le temps est reproductible et héritée, puisqu'elle définit, au terme de l'embryogenèse, les traits propres aux espèces animales. Deux chats se ressemblent, et se distinguent clairement de deux souris. Elle est donc sous contrôle génétique.



La structuration spatiale de l'organisme est reproductible génération après génération. Elle est sous contrôle génétique. La maman souris ressemble à ses petits.

Homeosis

Les programmes génétiques qui assurent la structuration de l'organisme commencent à être identifiés et, pour certains, on commence à entrevoir les mécanismes de régulation des gènes qui la coordonnent et la contrôlent. À la fin du XIXe siècle, le naturaliste William Bateson rapportait ses observations de mouches portant des structures morphologiquement bien développées, mais disposées à des endroits anormaux sur le corps de l'animal. Il existe par exemple des mouches mutantes portant des pattes en lieu et place des antennes, ou arborant une deuxième paire d'ai-

les au niveau d'un segment du thorax normalement affublé de petits balançiers. Ce phénomène qu'il baptisa *homeosis*, fut redécouvert et interprété une petite centaine d'années plus tard, à la lumière des progrès de la génétique moléculaire et de son étude appliquée à l'embryologie. C'est ainsi qu'il fut identifié que les transformations homéotiques chez la drosophile trouvent leur origine dans la dérégulation de gènes appartenant à une famille de gènes, logiquement dénommés gènes homéotiques (ou gènes *Hox*), qui président à la destinée des structures en développement selon leur position le long de l'axe antéro-postérieur de l'organisme. En d'autres termes, ces gènes homéotiques agissent comme des architectes contrôlant la structuration spatiale de l'organisme. Des gènes homéotiques ont ensuite été identifiés à travers presque tout le règne animal, y compris chez l'homme ou la souris qui en possèdent trente neuf, et leur étude a révélé qu'ils contribuent chez toutes les espèces à l'établissement d'un axe antéro-postérieur bien régionalisé. Par exemple, l'inactivation expérimentale d'un gène homéotique donné chez la souris a conduit à transformer la deuxième vertèbre cervicale, l'axis, en une vertèbre possédant la morphologie de l'atlas. L'invalidation d'un autre gène de la famille a provoqué l'apparition d'une paire de côtes supplémentaires connectées à une vertèbre lombaire qui en est normalement dépourvue. Leur rôle ne se limite cependant pas à la régionalisation du grand axe de l'organisme, car selon les espèces, ces gènes participent aussi par exemple au développement des membres, à la différenciation des lignées cellulaires du sang, à la maturation de la glande mammaire en vue de la lactation ou encore à la croissance des poils.

Les gènes homéotiques codent pour des protéines qui ont pour rôle de contrôler l'expression d'autres gènes. On parle de facteurs de transcription puisqu'ils stimulent ou inhibent la transcription de gènes en ARN qui seront ensuite traduits en protéines. Même si les gènes contrôlés par ces facteurs de transcription *Hox* restent à ce jour largement inconnus, on sait que ces gènes cibles assurent des fonctions très diverses dans la communication entre les cellules, leur division, leur migration, leur métabolisme, toutes fonctions nécessaires à la bonne mise en place des structures en



Le squelette de la souris

développement, qu'il s'agisse de vertèbres ou de nerfs crâniens par exemple. Autrement dit, les protéines encodées par les gènes homéotiques sont des maîtres architectes en ce sens qu'elles contrôlent et articulent le développement de structures dans le temps et dans l'espace (Kmita et Duboule, 2003). Mais comment cette structuration s'opère-t-elle, assurant le développement des bonnes structures aux bonnes places et en bon ordre ?

Les gènes homéotiques instruisent le devenir de nombreuses structures en développement

Les trente neuf gènes *Hox* des mammifères sont répartis en quatre complexes de gènes localisés sur quatre chromosomes différents (pour revue voir Favier et Dollé, 1997). Une relation particulière lie l'ordre physique, linéaire, des gènes homéotiques au sein des complexes chromosomiques, la localisation des territoires embryonnaires qui les expriment et la temporalité de leur expression. Ainsi, les gènes occupant les premières positions au sein de leurs complexes respectifs sont ceux qui sont expri-

més le plus précocement au cours du développement embryonnaire et qui s'expriment dans les structures les plus antérieures. Les gènes suivants commencent à s'exprimer légèrement plus tardivement que les précédents et montrent dès lors une frontière d'expression plus postérieure au sein de l'embryon. Et ainsi de suite. Les derniers gènes dans l'ordre linéaire des complexes chromosomiques sont ainsi ceux dont l'expression démarre le plus tard et dont la frontière d'expression est la plus retirée sur l'axe antéro-postérieur de l'embryon. Même si cette règle de colinéarité qui relie l'ordre des gènes à l'extension spatio-temporelle de leur expression souffre de nombreuses exceptions étant donné que l'expression des gènes est en réalité plus dynamique, on peut cependant considérer qu'une cellule donnée exprimera une combinaison de gènes homéotiques propre à sa position sur l'axe antéro-postérieur de l'embryon. Une cellule plus proche de la tête n'exprimera en effet qu'un petit nombre de gènes *Hox*, alors qu'une cellule qui se trouve plus proche de l'anus exprimera un plus grand nombre de gènes. Autrement dit, la combinaison des gènes homéotiques exprimés dans une cellule la renseigne sur sa position sur le grand axe de l'embryon et y contrôle un programme génétique adéquat à cette position. Il s'établit donc un code résultant de la combinaison de gènes exprimés et qui préside à la destinée des cellules.

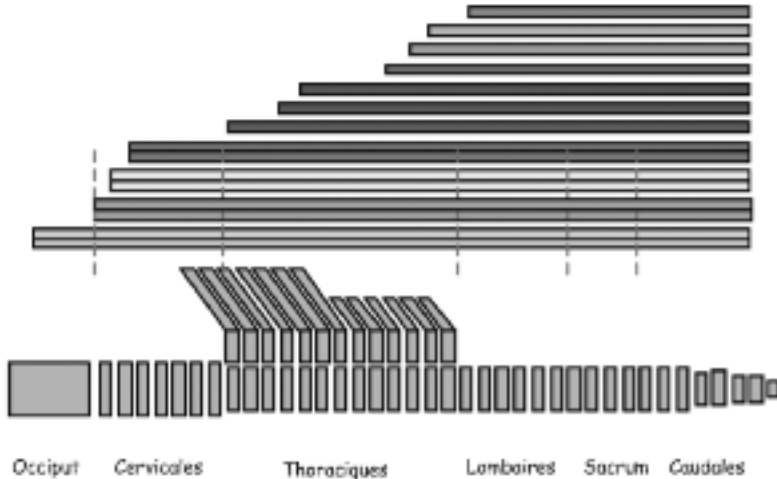
Il apparaît donc que la structuration spatiale de l'organisme repose sur ce code combinatoire homéotique, c'est à dire sur le bon déroulement spatio-temporel de l'expression des gènes homéotiques. Si l'on perturbe expérimentalement ce code chez la souris par exemple, on affecte le devenir des structures en développement qui adoptent la destinée qui est dictée par la combinaison de gènes exprimés imposée par l'expérience. Par exemple, la première vertèbre cervicale, l'atlas, n'exprime pas le gène *Hoxb4*, alors que l'axis, qui lui est juste postérieur, l'exprime. Suite à l'inactivation expérimentale de *Hoxb4*, l'axis adopte une destinée similaire à l'atlas, puisqu'en l'absence du gène *Hoxb4*, cette vertèbre exprime une combinaison de gènes homéotiques qui spécifie la nature de l'atlas (Ramirez-Solis et al., 1993). De manière remarquable, si l'initiation de l'expression d'un gène homéotique est différée dans le temps on assiste à un recul spatial de certaines structures. Par exemple, si le gène *Hoxd11* est exprimé avec quelques heures de retard par rapport à la normale, la ceinture pelvienne sur laquelle s'articule les membres postérieurs et qui prend appui sur la

colonne vertébrale recule d'une vertèbre : les pattes arrière se retrouvent donc un peu plus vers l'arrière (Zakany et al., 1997).

L'expression des gènes, et donc notamment des gènes homéotiques, est régulée par des facteurs de transcription. Ces facteurs reconnaissent et contactent de courtes séquences spécifiques d'ADN aux abords des gènes qu'ils contrôlent. Un gène donné peut ainsi se trouver sous l'influence de plusieurs exemplaires d'une même séquence reconnue par le même facteur de transcription ou sous l'influence de séquences reconnues par différents facteurs. Généralement ces séquences qui constituent des modules de contrôle de l'expression du gène sont nombreuses et c'est leur action combinée qui, suite à l'interaction physique avec les facteurs de transcription qui les reconnaissent, assure le contrôle global et dynamique de l'expression génique au cours du temps et dans les différentes lignées cellulaires de l'organisme en développement. La nature modulaire de ces séquences de contrôle est manifeste dès lors qu'on peut en supprimer ou en ajouter dans le voisinage d'un gène qui voit ainsi son expression modifiée dans l'espace et dans le temps. Dans l'exemple présenté plus haut concernant *Hoxd11*, il s'agit précisément d'une situation où un module de régulation, donc une courte séquence d'ADN, a été modifiée dans le voisinage de *Hoxd11*, de sorte qu'une composante du contrôle spatial et temporel du gène a été perdue. En conséquence le gène s'allume plus tard. Ces modules intègrent donc quantité d'informations renseignant chaque cellule sur son environnement, ses cellules voisines, sa position dans l'espace. Le profil spatial et temporel d'expression des gènes *Hox* et la colinéarité reliant l'ordre de ces gènes sur les chromosomes à leur profil d'expression doivent trouver leur explication dans les modules de régulation qui assurent leur contrôle.

De nombreux régulateurs de l'expression des gènes *Hox* ont été découverts qui permettent au moins partiellement de rendre compte de leurs profils spatio-temporels d'expression. Par exemple, certaines molécules diffusibles, comme l'acide rétinoïque qui dérive de la vitamine A ou certains facteurs de croissance, se distribueraient selon un gradient de concentration antéro-postérieur au voisinage de certains organes en développement comme le cerveau (Shimeld, 1996). Ces facteurs de croissance influencent l'activité de facteurs de transcription qui activent alors de manière dose-dépendante les gènes *Hox* qui sont leurs cibles. À une

concentration donnée du facteur de croissance, correspondant à une localisation donnée sur l'axe antéro-postérieur de l'embryon, le gène cible ne sera pas activé, alors qu'à une concentration légèrement supérieure, donc en un territoire par exemple plus postérieur, il le sera.

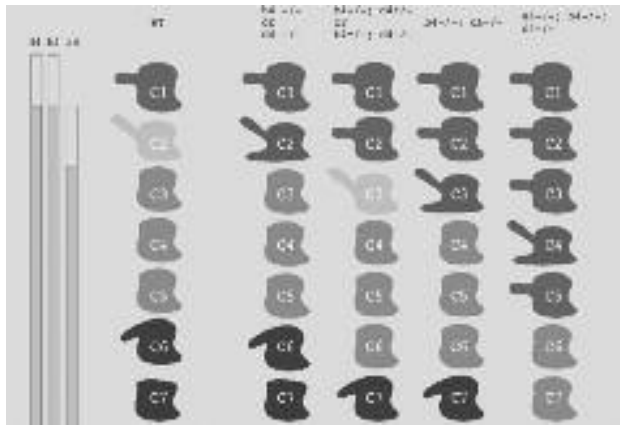


Code homéotique : un schéma de la colonne vertébrale est représenté en parallèle de rectangles grisés figurant l'étendue de l'expression de gènes Hox.

Le problème de l'œuf et de la poule... à la source de l'organisation spatiale de l'embryon

Mais si de tels gradients préfigurent l'axe antéro-postérieur de l'embryon, quelles en sont les causes ? Ces mécanismes de régulation des gènes homéotiques qui permettent d'allumer les gènes de manière ordonnée dans le temps et le long de l'axe antéro-postérieur de l'embryon, impliquent qu'une information de position est déjà conférée aux régulateurs des gènes homéotiques... On ne fait que remonter dans la hiérarchie des régulateurs, sans trouver l'origine première des axes de l'embryon... Quelle est la source première qui organise l'embryon dans les trois dimensions de l'espace ? Pour de nombreux animaux dont le développement embryonnaire n'est pas placentaire, on retrouve les premières asymétries avant même la fécondation, au niveau de l'œuf dont le cytoplasme contient des

protéines et des ARN dont la distribution n'est pas homogène mais bien polarisée. Chez la mouche, certaines protéines présentent une distribution qui préfigure déjà les futurs axes de l'embryon. Cette distribution est dictée par le dialogue que l'œuf en maturation établit avec des cellules nourricières voisines. Donc, les axes embryonnaires trouvent leur origine dans l'ovogenèse. Chez la grenouille, il en va presque de même. L'œuf présente également un cytoplasme non homogène, mais celui-ci ne préfigure pas exactement un axe embryonnaire. Ce n'est qu'au moment de la fécondation que le cytoplasme de l'œuf devenu embryon unicellulaire est réarrangé. Ce réarrangement est en partie guidé par la gravitation universelle qui agit sur le cytoplasme cellulaire dont la densité physique n'est pas homogène. Si après la fécondation, l'œuf réarrangé est placé dans une centrifugeuse de sorte à exercer une force qui contrecarre le mouvement tout juste opéré sous l'effet de la gravitation, on obtient des embryons à deux têtes et qui portent deux colonnes vertébrales (Black et Gerhart, 1985). Chez le poulet, la rotation de l'œuf dans le conduit génital de la femelle procure également à la gravitation un rôle important pour la définition du grand axe de l'embryon qui s'y développe et qui s'oriente selon le champ gravitationnel. Chez les mammifères en revanche, les premières divisions cellulaires qui suivent la fécondation engendrent des cellules qui gardent chacune le potentiel de générer un embryon entier. Ce n'est que plus tard que les potentialités développementales des cellules se restreignent. En particulier, il est notable qu'une partie seulement de la grappe de cellules obtenue au tout début du développement donnera l'embryon proprement dit, le reste contribuant aux annexes comme le sac amniotique ou le placenta. L'origine des axes embryonnaires et de l'axe antéro-postérieur en particulier demeure mal connue chez les mammifères. Quoiqu'il en soit, les asymétries cruciales qui s'établissent très précocement dans l'œuf ou l'embryon sont relayées, raffinées, transformées, jusqu'à instruire les gènes homéotiques qui président à la destinée de segments de l'organisme le long de son axe antéro-postérieur. Ces relais sont bien connus chez la mouche ou la grenouille. Ils le sont moins chez l'homme ou la souris.



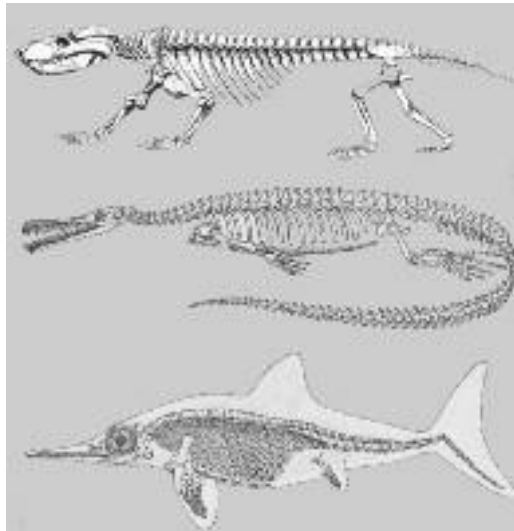
Représentation schématique des transformations vertébrales obtenues suite à l'inactivation de différents gènes conduisant à une perturbation du code homéotique (Dollé et Favier, 1997)

Les gènes du développement et l'évolution des formes animales

Les perturbations que l'on peut produire expérimentalement au niveau de l'expression de gènes qui œuvrent à structurer l'embryon entraînent la transformation de territoires embryonnaires et donc celle du corps adulte. On l'a évoqué, il s'agit par exemple de l'apparition de côtes supplémentaires, de la transformation morphologique de vertèbres ou du recul du point d'ancrage des membres postérieurs. Ces perturbations peuvent être occasionnées en particulier par des mutations dans les modules de régulation qui assurent l'extension spatio-temporelle de l'expression des gènes homéotiques. En réalité, il semble bien que c'est ainsi que, parmi d'autres voies, la diversification des formes animales s'est opérée au cours de l'évolution. Un exemple particulièrement éloquent apparaît avec les serpents. Chez les serpents comme les boas, les combinaisons de gènes homéotiques qui chez la souris s'expriment au niveau des futures vertèbres thoraciques, s'expriment presque tout le long de la future colonne vertébrale (Cohn et Tickle, 1999). En d'autres termes, presque toutes les vertèbres portent des côtes. En revanche, on ne voit pas apparaître de

membres antérieurs, et alors que certains serpents portent encore de rudimentaires ébauches de pattes postérieures, d'autres en sont également complètement dépourvus.

On assiste depuis une dizaine d'années à un foisonnement d'exemples similaires illustrant comment la modification des profils d'expression de gènes contrôlant certaines étapes du développement embryonnaire affecte le devenir ou la localisation de structures comme les membres, les vertèbres, les organes, ... Or l'établissement de ces profils est le fruit de l'intégration de contrôles agissant sur l'expression des gènes par le jeu des multiples modules de régulation. Ces modules peuvent évoluer, changer ou disparaître, sans que tout le programme développemental de l'animal ne soit *ipso facto* désorganisé. De tels changements sont donc compatibles avec une nouvelle intégrité de l'organisme dont la structuration spatiale peut être modifiée. Lorsque ces changements sont maintenus et transmis à la descendance, c'est la forme de l'espèce animale qui évolue.



La diversification des formes animales chez quelques vertébrés

On aura compris que les mécanismes qui régulent la structuration spatiale des embryons, et sur lesquels l'évolution agit pour entraîner la diversification des formes, présentent une grande plasticité. Cette plasticité peut être définie comme une capacité à accuser des mutations, donc d'être

déformable, tout en conservant une cohérence. Déformabilité et cohérence, comme conditions nécessaires à l'évolution adaptative des formes vivantes qui sont aux prises et en interaction continue avec un environnement changeant. La déformabilité et la cohérence sont liées. Elles sont assurées par le caractère modulaire des constituants. Il s'agit par exemple de nombreux modules de transcription qui ensemble informent le gène sur « où » et « quand » il doit être exprimé. Supprimer un module, n'affecte pas nécessairement tout le profil d'expression du gène et ne perturbe pas globalement sa fonction. On l'a vu, la perte d'un module de transcription peut par exemple retarder l'expression d'un gène qui reste cependant fonctionnel, avec pour conséquence un changement dans l'organisation du corps.

La cohérence et la déformabilité des formes vivantes, assises sur la modularité des contrôles, s'appuient aussi sur leur multiplicité. En réalité l'activité des gènes, des protéines et plus largement des fonctions biologiques sont le siège de multiples régulations qui s'intègrent pour entraîner une réponse appropriée aux variations du milieu, qu'il s'agisse de la présence de molécules particulières dans le milieu extracellulaire, de variations dans les communications de cellule à cellule, de changements dans l'environnement de l'individu, etc... L'intégration des fonctions à l'échelle du gène, de la protéine, de la cellule ou de l'organisme entier s'opère par de nombreuses influences croisées et des contrôles en retour. C'est ainsi que certaines protéines qui contrôlent respectivement la destinée antérieure ou postérieure de territoires embryonnaires exercent sur leurs gènes respectifs des contrôles croisés. Si l'activité d'une protéine contribuant à diriger la destinée antérieure était accrue soudainement, par exemple suite à une différence de température du milieu où se développe l'embryon, l'étendue du territoire qui adopterait une identité antérieure serait élargie. Cependant, en vertu des régulations croisées s'opérant entre les gènes contrôlant l'identité des territoires embryonnaires selon leur position, l'accroissement d'activité de la protéine se répercute sur l'expression de gènes contribuant à la destinée postérieure. En retour, ces derniers vont réprimer l'expression des gènes assurant la destinée antérieure. Cette répression exercée sur l'expression génique compense ainsi l'accroissement initial d'activité de la protéine. Ainsi, les variations d'activité d'une protéine et les variations d'expression d'un gène sont contrebalancées par les activités compensatoires des gènes et protéines qui les contrôlent en retour.

Éloge de la plasticité

Notre rapide parcours ayant effleuré les mécanismes qui assurent la structuration des organismes en développement révèle en substance une réalité qui s'applique plus généralement aux phénomènes vivants. Au cœur de toutes les fonctions biologiques et à la source de l'évolution des formes vivantes qui les intègrent, la modularité des régulations et leurs influences croisées assurent le maintien de l'intégrité des individus comme la cohérence de l'évolution de leur espèce. Modularité et multiplicité des contrôles réciproques, cohérence et déformabilité, sont les termes d'une plasticité propre et nécessaire à la vie et à son histoire évolutive (Lambert et Rezsóhazy, 2004).

Références

- S.D. BLACK, J. GERHART, "Experimental control of the site of embryonic axis formation in *Xenopus laevis* eggs centrifuged before first cleavage", *Dev. Biol.* 108 (1985), 310-324.
- M.J. COHN, C. TICKLE, "Developmental basis of limblessness and axial patterning in snakes", *Nature* 399 (1999), 474-479.
- B. FAVIER, P. DOLLÉ, "Developmental functions of mammalian *Hox* genes", *Mol. Hum. Reprod.* 3 (1997), 115-131.
- M. KMITA, D. DUBOULE, "Organizing axes in time and space ; 25 years of colinear tinkering", *Science* 301 (2003), 331-333.
- D. LAMBERT, R. REZSOHAZY, "Comment les pattes viennent au serpent. Essai sur l'étonnante plasticité du vivant", *Nouvelle Bibliothèque Scientifique*, Flammarion (2004).
- R. RAMIREZ-SOLIS, *et al.*, "Hoxb-4 (Hox2.6) mutant mice show homeotic transformation of a cervical vertebra and defects in the closure of sternal rudiments", *Cell* 73 (1993), 279-294.
- S.M. SHIMELD, "Retinoic acid, HOX genes and the anterior-posterior axis in chordates", *BioEssays* 18 (1996), 613-616.
- J. ZAKANY, *et al.*, "Deletion of a *HoxD* enhancer induces transcriptional heterochrony leading to transposition of the sacrum", *EMBO J.* 16 (1997), 4393-4402.

Remerciements

Toute ma gratitude s'adresse à Sophie Remacle et Dominique Lambert pour leur aide et le regard critique qu'ils ont bien voulu porter sur le présent manuscrit. Cet article est une réédition d'un texte apparu en ligne sur le site internet du magazine électronique « Futura-Sciences » (<http://www.futura-sciences.com/>).

L'éthique de la robotique, l'interaction « homme-machine »

Intervention de Dominique Lambert

Université de Namur, Académie royale de Belgique,

(Dominique.lambert@unamur.be)

Disons d'emblée que notre position n'est pas technophobe : nous pensons que les robots sont absolument nécessaires pour assister et soulager les humains dans les tâches dangereuses, ennuyeuses et sales ainsi que pour aider les personnes fragilisées par un handicap. Les robots sont devenus, et c'est très bien, des outils indispensables. Cependant, les projets de construction de robots totalement autonomes posent des questions cruciales qui mettent en jeu le sens profond que nous accordons à l'être humain et à ses décisions. Nous allons passer en revue une série de problèmes éthiques soulevés par ces systèmes robotisés autonomes qu'ils soient d'ailleurs civils ou militaires.

- Avec les robots et surtout les robots autonomes on assiste très facilement à une dilution, à un camouflage des responsabilités en cas de dysfonctionnement. Lors de dysfonctionnement, le responsable est ultimement celui qui a mis en œuvre le robot. Mais avec ce genre de système complexe, il est tentant de reporter la responsabilité éthique et juridique sur le programmeur, l'ingénieur, l'industriel qui a construit le robot, ... Ce qui pose question à l'éthicien, c'est le fait que cette possibilité de dilution ou d'occultation des responsabilités peut être utilisée systématiquement à mauvais escient pour perpétrer des actions illégitimes que l'on ne voudrait pas faire par des humains¹.

- On doit également mesurer l'impact psychologique d'un remplacement progressif de l'homme par la machine (même si on ne peut nier que la machine peut aider à sortir de certaines pathologies, l'autisme par exemple). On connaît déjà des pathologies se développer avec l'enfermement des personnes dans un monde virtuel, ceci pourrait être aussi le cas pour l'environnement robotisé. Par exemple, introduire des robots pour aider les personnes âgées dans les maisons de repos est légitime, le robot restant au service de la personne fragile. En revanche, on pourrait très bien délaissier progressivement les personnes âgées et les isoler sous prétexte qu'elles ont des robots pour les aider ! Il est important de réfléchir au fait que les relations humaines, la rencontre du visage de l'autre (dont a bien parlé Emmanuel Levinas) sont des facteurs essentiels à la construction d'une humanité équilibrée et pacifique. La prolifération de robots autonomes pourrait renforcer l'isolement et augmenter l'angoisse.

¹ « L'efficacité opératoire des mathématiques browniennes, alliée à l'informatique, a permis d'automatiser de nombreuses opérations. Elle a facilité cette évolution qui a accéléré les transactions financières au point de les rendre impossibles à appréhender par l'homme. L'illusion brownienne est en phase de transformer les humains en machines... La titrisation à grande échelle, facilitée par les progrès techniques a estompé la dimension de responsabilité humaine du métier de banquier: se sent-on responsable d'un crédit dont le risque a été distribué sur une longue chaîne d'acteurs, au point où l'on ne sait même plus qui couvre quoi? La financiarisation générale de l'économie tend à créer de toutes pièces des marchés de plus en plus artificiels. Tous ces effets sont aggravés par une représentation dans laquelle les acteurs humains, assimilés à des automates rationnels, perdent leur substance. Cela a des conséquences majeures pour la réflexion éthique, réactualisée par la crise. Un automate est-il responsable? Peut-il être soumis à des interdits? » (Ch. Walter, M. de Pracontal, *Le virus B. Crise financière et mathématiques*, Paris, Seuil, 2009, pp.114-115).

C'est pour cela que des analyses psychologiques, anthropologiques et culturelles sur les relations « hommes-robots » sont extrêmement importantes.

- Pour réguler le comportement des robots autonomes, on pense bien sûr à une réflexion éthique sur la robotique. Mais aujourd'hui certains défendent l'idée qu'on pourrait conférer aux machines elles-mêmes des capacités morales en introduisant, dans les robots autonomes des « logiciels éthiques » : pour obtenir ce que l'on voudrait appeler des « machines morales » ou des « agents moraux autonomes ». Mais ceci est en partie un leurre. On peut imaginer qu'il existe des logiciels qui vérifient la satisfaction de certaines règles standardisées, cela est parfaitement pertinent et utile. Mais on n'obtient ici qu'une imitation, une copie, une simulation de l'agent moral humain. L'agir moral spécifiquement humain ne s'épuise d'ailleurs pas dans l'accord avec des règles (on peut suivre des règles morales tout en étant parfaitement immoral). Cet agir moral suppose en effet la référence à des intentions particulières que l'on ne peut pas attribuer à une machine.

Fondamentalement, un certain nombre de questions se posent qui sont autant d'obstacles à la réalisation complète de ces « agents moraux autonomes » si on veut aller au-delà d'une machine d'aide à la vérification de règles ou de lois. Ces questions sont les suivantes.

+ Quelle éthique va-t-on implémenter? Il n'y a pas qu'un seul cadre éthique possible: va-t-on opter pour une éthique des valeurs?, une éthique utilitariste? (mais comment dire ce qui est utile? , ce qui maximise le bien-être?, ...), une éthique conséquentialiste? (mais jusqu'où arrêter l'espace des conséquences possibles?)... Ce choix n'est pas anodin, car il peut changer complètement l'évaluation des comportements. Aux fondements de la construction des "moral machines", il y a des présupposés souvent idéologiques qu'il est important de mettre en lumière.

+ Dans le cas particulier d'une éthique utilitariste: on décide du comportement à adopter sur la base d'un calcul d'optimisation (maximiser le bien-être et minimiser le mal-être): mais on sait que beaucoup de problèmes d'optimisation dans des situations complexes n'ont pas de solution calculable par des algorithmes. De plus, comment décider de ce qui est le bien-être ou le mal-être? Comment quantifier cela? Le qualitatif et l'intuition débordent ici et dépassent les tentatives de quantification et d'algorithmisation.

+ On évoque souvent le fait que ces « machines morales autonomes » pourraient être plus fiables et performantes que l'humain car elles ne sont pas sujettes au stress, la fatigue, aux sentiments de vengeance,... Ceci n'est que partiellement vrai. En particulier dans la question des conflits de valeurs, des dilemmes, la machine ne fait pas mieux que l'homme. Or, ces dilemmes sont justement les situations dans lesquelles l'éthique prend tout son sens (et où l'on voit bien que la décision n'est justement pas le fruit d'une procédure automatique). Ne fût-ce que dans ces cas de dilemme et de conflit de valeur, il y a un sens profond et une importance cruciale à maintenir l'humain dans la boucle de décision morale.

+ En fait, le problème que nous traitons ici a déjà fait l'objet d'une discussion dans le cadre de la philosophie du droit. On pourrait admettre que des logiciels soient utilisés dans les robots pour vérifier la satisfaction de certaines règles juridiques par exemple. Mais on sait depuis longtemps (par les travaux de Chaïm Perelman² de l'Université de Bruxelles, sur la rhétorique juridique, par exemple) que la décision juridique n'est pas elle-même réductible à

² Auteur avec L. Olbrechts-Tyteca du *Traité de l'Argumentation, I. et II.*, Paris, P.U.F., 1958.

un processus purement mécanique qui la dériverait, par exemple, d'un système d'axiomes d'une « logique déontique »³. Le métalangage juridique n'est pas réductible au langage formel d'une logique des normes. La décision éthique (et non pas seulement juridique) repose sur la compassion et la possibilité de transgresser les règles pour permettre le pardon, la réconciliation. Comme le dit très bien Mireille Delmas-Marty, titulaire de la chaire de droit international au Collège de France, dans un bel article intitulé: « *La justice entre le robot et le roseau* » :

« L'assistance des **robots** sera indispensable à la justice pour maîtriser la complexité croissante des systèmes de droit et contribuer à l'émergence d'une justice à la fois nationale, régionale et mondiale. Mais la fragilité et la flexibilité du **roseau** lui restent d'autant plus nécessaires que le doute est la condition d'une justice qui accepte parfois de renoncer à punir précisément « au bénéfice du doute » ou même de renoncer à juger pour permettre le pardon qui conditionne la réconciliation. »⁴

Après avoir souligné les limites du projet de construction des « moral machines », je voudrais dire que l'un des problèmes centraux des robots totalement autonomes est le suivant: on ne peut pas laisser agir un robot dont on ne pourrait pas maîtriser (ou prévoir) tous les comportements. Or, le robot autonome est précisément, par définition pourrait-on dire, innovant (il ne fera pas nécessairement ce que l'humain aurait prévu) et il est, comme la plupart des systèmes complexes, particulièrement sujet à des comportements imprédictibles (par exemple des bugs informatiques). On pourrait dire que toute technologie présente le risque d'effets néfastes imprévisibles. Mais ici c'est la définition même de la machine qui ouvre la voie à des effets non maîtrisables et non prévisibles liés précisément à l'autonomie.

- Dans le débat actuel sur la robotique autonome, les caractéristiques de l'humain: lenteur, fragilité, émotivité,... sont systématiquement vues comme négatives. Or, dans certaines circonstances, elle peuvent se révéler être des forces. Pourquoi? Nous allons avancer trois raisons.

+ Pour éviter un emballement des machines (qui travaillant trop vite peuvent aussi provoquer de plus grandes catastrophes) un maillon lent peut être important. Pensons ici aux machines qui pratiquent le « *electronic trading* », c'est-à-dire des robots qui lancent des ordres financiers de manière automatique en suivant en temps réels les fluctuations des marchés. La vitesse des transactions peut entraîner des pertes financières colossales en cas de dysfonctionnement des systèmes. Par contre le contrôle humain bien placé peut l'éviter. Remarquons aussi que cette autonomisation des machines financières va de paire avec une conception qui virtualise l'économie et qui vide celle-ci de tout son lien au social et au politique (on se trouve seulement dans une logique de maximisation abstraite de profit).

+ Ces caractéristiques et ces limites humaines peuvent aussi servir à éviter une escalade de la violence: en effet, un acteur compatissant, qui ne réagit pas seulement selon une logique calculatoire de maximisation de profit ou de réussite opérationnelle directe, peut se révéler être juridiquement ou diplomatiquement très performant.

³ Cfr G. Kalinowski *La logique des normes*, Paris, P.U.F., 1972.

⁴ M. Delmas-Marty, « La justice entre le robot et le roseau » in *L'Homme artificiel* (sous la dir. de J.-P. Changeux), Paris, Odile Jacob, 2007, pp. 239-246.

+ Pour changer les esprits et les cœurs, ce qui est essentiel si on veut obtenir une paix durable, un acteur humain fraternel, qui sait éventuellement renoncer à sa force brutale, peut être essentiel et plus efficace que des calculs de rentabilité ou d'efficacité immédiate, économique ou militaire, implémentés dans une machine.

Ceci nous amène naturellement aux questions posées spécifiquement par les robots autonomes armés. Nous les définissons, en première approximation, comme des robots capables de rechercher, d'identifier et d'utiliser des armes (létales ou non) sans médiation humaine dans un environnement non limité (ouvert), ni prescrit a priori, avec la capacité de s'y adapter (éventuellement par apprentissage). Cette définition permet de distinguer les armes "autonomes" et les armes "automatiques" ou "automatisées". En fait, l'automatisme implique, d'une part, que l'on ait précisé et borné rigoureusement l'environnement du robot et que, d'autre part, l'on soit en mesure de prédire et de contrôler les réponses possibles du système armé. L'automatisme pose des problèmes différents, car, dans ce cas, on reste dans le cadre d'un contrôle effectif et efficace par une autorité humaine. Le point crucial, d'un point de vue éthique ou juridique, que l'on soit dans le cadre de l'autonomie ou de l'automatisme, c'est de mettre en évidence, avec des critères précis, quand et où il faudrait introduire l'acteur humain, pour assurer une maîtrise technologique respectueuse de la dignité de l'homme.

- Supposons qu'il existe des robots autonomes armés. Il serait presque impossible qu'ils puissent satisfaire adéquatement aux exigences du droit international humanitaire et de décider ce qu'est une *réponse proportionnelle*, ce qui est ou non une *nécessité militaire*. Car pour ce faire il faudrait que le robot puisse faire intervenir des considérations qui sont difficilement traductibles en algorithme ou intégrable dans une mémoire.

La décision militaire est toujours une décision dans l'incertitude, dans le brouillard. Il faut non seulement anticiper les évolutions futures du conflit (en partie sur base de ce que l'on connaît du passé mais pas seulement) mais aussi décider le niveau de risque que l'on est prêt à accepter pour les personnes ou le patrimoine (industriel, culturel, ...) des pays en conflit. Cette anticipation et la détermination du niveau de risque ne sont pas entièrement calculables, car elle dépend soit d'une capacité intuitive et prospective soit des valeurs. Même dans les sciences de l'ingénieur, on peut très bien réaliser un calcul mathématique fiable d'un risque technologique, mais la décision d'accepter ou non tel niveau de risque n'est pas elle-même calculable. Elle procède en effet de choix fondés sur des valeurs ou sur des contextes qui ne font nullement l'objet de lois nécessaires ou de régularités mathématisables.

Il n'est pas certain non plus qu'un robot autonome puisse vraiment être capable de satisfaire au principe de *discrimination* « combattant-non-combattant » dans un contexte complexe de conflit urbain avec des environnements extrêmement fluctuants et mouvants.

- L'usage de robots autonomes armés (qui n'entraînent aucune victime du côté de l'assaillant) ne peut que provoquer une volonté de vengeance et de destruction plus grande d'humains par des méthodes plus barbares (terrorismes). Des risques d'escalade de la violence liés au caractère ressenti comme déloyal et asymétrique de ce type d'arme ne doivent pas être négligés; cela a été amplement attesté par des rapports récents.

- On pourrait finalement souligner le risque d'une transformation des mentalités lié au fait que la violence armée ne sera plus perçue comme un dernier recours, la guerre étant devenue une entreprise sans risque pour celui qui l'entreprend.

En conclusion, sans vouloir freiner des recherches en robotique, même autonome, si elle sont orientées vers l'aide et la défense de l'homme, il me semble que l'on ne peut autoriser la prolifération d'armes dont le comportement n'est pas par définition assuré. Mais par définition et construction l'arme totalement autonome est justement celle dont le comportement peut à un certain moment innover et faire ce que le concepteur n'avait pas décidé. Ceci pourrait conduire à des dégâts collatéraux importants et imprédictibles. On est ici dans une situation assez similaire à celle des mines anti-personnelles, abandonnées sur le terrain, elles tuent de manière aveugle, imprédictible, sans discrimination du caractère de combattant ou non.

On ne peut autoriser ces armes autonomes, car trop facilement lors de dégâts collatéraux, il sera trop aisé de se dissimuler derrière des listes interminables de responsables possibles. Ce genre d'arme présente une facilité trop grande de cacher les vrais responsables sous le couvert de défaillances technologiques.

On doit maintenir dans l'usage de robots armés une présence humaine (à certains moments décisifs qu'il faudrait préciser) car, la relation humaine, avec ce qu'elle implique de compassion, de possibilité de pardon de transgression des règles pour préserver les vies et la dignité de l'homme, s'est montrée diplomatiquement et militairement souvent plus performante dans un certain nombre de cas historiques anciens ou récents. Même la lenteur de l'acteur humain peut dans certains cas, et à certains endroits de la boucle décisionnelle, s'avérer être un gage de sécurité permettant de contrer l'emballement des processus militaires ou financiers.

Le problème qui se pose dans le cas de la robotisation du droit, comme dans celui de l'implémentation en algorithmes de l'éthique financière ou militaire, est celui de l'impossibilité de formaliser, d'informatiser complètement quelque chose qui est de l'ordre du jugement de prudence, de la *phronèsis* d'Aristote ou de la *prudentia* de Thomas d'Aquin. Cette « prudence applique la connaissance universelle aux réalités particulières »⁵ et « a pour objet les actions humaines en leur contingence ». Cette prudence qui peut conduire à sortir des principes abstraits pour mieux préserver l'homme et son environnement, pour redonner une chance là où la règle stricte l'interdirait et pour tenir compte de ces infinies nuances qui font la complexité de l'agir humain, cette prudence-là n'est pas réductible à un calcul régi par un algorithme. En effet, celui-ci est fondé sur des règles *a priori* et nécessaires qui ne tiennent pas compte par définition du contingent, de ce particulier, qui fait l'histoire et qui survient sans faire l'objet d'aucune régularité prédictible.

En abandonnant les conflits à des décisions prises par des machines autonomes on prive les pouvoirs politiques de véritables capacités d'action et l'on s'en remet purement et simplement à la technologie. Il y a un risque de dépolitisation qui va de paire avec une déshumanisation. On est en train de vider de son sens: la politique, la diplomatie et la profession militaire. Ces activités prennent leur sens en référence à des idéaux, grâce à des décisions responsables qui construisent précisément une histoire humaine. Les machines autonomes risquent de priver les Etats de leur histoire. Cette histoire est justement faite de décisions humaines, de prises de risques fondées sur des valeurs et non pas seulement sur des calculs anonymes faits par des machines sans visage. On peut d'ailleurs se demander si, ultimement, il serait possible de

⁵ « prudentia applicat universalem cognitionem ad particularia » (Thomas Aquinas, *Summa Theologiae*, Ia, IIae, q. 49, a. 1., Ad Primum).

donner encore un sens au respect de la dignité humaine, si on laisse à des machines le droit de tuer sans la médiation d'un contrôle humain.

L'homme peut utiliser des robots, bien entendu, même en partie autonomes, mais il serait auto-contradictoire de promouvoir des robots qui finalement mettraient l'homme complètement hors-jeu en le privant de sa capacité de décider, de réconcilier, d'humaniser et de construire lui-même son histoire.

CONTRE LA PHILOSOPHIE DE LA MECANIQUE QUANTIQUE[†]

Jean Bricmont

Institut de Physique Théorique - U.C.L. - Chemin du Cyclotron 2

B-1348 Louvain-La-Neuve (Belgique)

La philosophie tranquilisante de Heisenberg et Bohr - ou est-ce une religion ? - est si habilement échaffaudée qu'elle permet aux vrais croyants de se reposer sur un oreiller si doux qu'il n'est pas facile de les réveiller.

A. Einstein.

Résumé

La “philosophie de la mécanique quantique” ou du moins ce qui a été longtemps présenté comme tel, n'a fait que cacher des problèmes internes à la théorie physique. De plus, elle a rendu difficile une véritable appréciation du théorème de Bell. Après avoir abordé le problème de la mesure et la non-localité, on passera en revue différentes tentatives de solutions qui ont été proposées pour donner une version (ou une alternative) complètement cohérente de la mécanique quantique.

[†]Texte d'une communication faite au colloque “Faut-il promouvoir les échanges entre les sciences et la philosophie?” Louvain-la-Neuve, 24 et 25 mars 1994.

1 Introduction

Lorsque j’ai étudié la mécanique quantique, j’ai appris que l’objet le plus fondamental de cette théorie, la fonction d’onde, ne décrivait pas le système physique considéré, mais la connaissance que nous en avons¹. En cela résidait l’originalité et l’étrangeté radicale de la mécanique quantique. Mais qu’est-ce que cela voulait dire? Certainement pas ce qu’on pourrait naïvement croire: on n’étudiait nullement les processus internes au cerveau humain qui sont associés à ce que nous appelons “connaissance”. Peut-être était-ce après tout banal: nous n’étudions jamais que des objets ou des propriétés qui sont accessibles à la connaissance humaine: s’il existe des réalités radicalement inaccessibles à notre perception ou à notre connaissance, par définition, nous ne les étudions pas. Mais où réside alors la nouveauté? Parfois, on allait plus loin et on apprenait que la mécanique quantique n’avait fait que justifier un point de vue philosophique antérieur, remontant au moins à Kant, à Hume et à Mach, et développé par les positivistes modernes².

Etrange: voilà une théorie physique qui nous force à adopter une philosophie particulière, sans laquelle on ne peut pas la comprendre³. Une formulation radicale de cette idée est citée par Mermin ([42], p. 115): “La doctrine selon laquelle le monde est fait d’objets dont l’existence est indépendante de la conscience humaine se trouve être en conflit avec la mécanique quantique et avec des faits établis expérimentalement” ([50]). Effectivement, la science suppose traditionnellement qu’on peut séparer le “sujet” humain de l’objet étudié. Mais la mécanique quantique avait changé cela: la philosophie “réaliste” (parfois complétée par le mot “méthaphysique” ou “naïve”) était

¹Par exemple, Heisenberg écrit: “La conception de la réalité objective des particules élémentaires s’est donc étrangement dissoute, non pas dans le brouillard d’une nouvelle conception de la réalité obscure ou mal comprise, mais dans la clarté transparente d’une mathématique qui ne représente plus le comportement de la particule élémentaire mais la connaissance que nous en possédons” ([34], p.18). Bohr quant à lui déclarait: “Il n’y a pas de monde quantique. Il y a seulement une description quantique abstraite. Il est erroné de penser que la tâche de la physique est de savoir ce qu’est la Nature. La physique s’occupe de ce que nous pouvons dire sur la Nature” (voir [7], p.142). Et Peierls ajoute: “Vous voyez, la description de la mécanique quantique se fait en terme de connaissance. Et la connaissance nécessite quelqu’un qui connaît” ([17], p.74). Quand on en vient à la vulgarisation scientifique, on en arrive parfois à ceci: “Les physiciens se demandent si un arbre-ou n’importe quoi d’autre- doit être observé pour pouvoir réellement exister” ([19], cité dans [42], p.115). Vu ce que disent les scientifiques, on peut difficilement reprocher à d’autres, par exemple à Claude Levi-Strauss, de tenir les propos suivants: “Jusqu’au dix-neuvième siècle au moins, la chance des sciences “dures” a été que leurs objets furent considérés comme moins complexes que les moyens dont l’esprit dispose pour les étudier. La physique quantique est en train de nous apprendre que cela n’est plus vrai et qu’à cet égard une convergence apparaît entre les différentes sciences (ou prétendues telles). C’est ainsi, me semble-t-il, qu’il faut entendre les propos de Niels Bohr” [37].

²Quand j’utilise le terme “positivisme”, c’est à cette tradition que je fais référence, et pas à Auguste Comte.

³Ceci contredisait une autre idée, également répandue, selon laquelle la science se passait parfaitement de philosophie. On pouvait réconcilier les deux assertions en faisant apparaître le positivisme non plus comme une philosophie particulière, mais comme une partie intégrante du discours scientifique.

devenue intenable. Cette philosophie avait eu son heure de gloire au 18ème et au 19ème siècle, à l'apogée du matérialisme scientifique triomphant. Einstein était encore attaché à cette vision des choses. C'est pour cette raison qu'il n'avait jamais pu admettre la mécanique quantique. Mais celle-ci nous était imposée par les faits.

Personnellement, je n'arrivais pas non plus à accepter ce point de vue. Il me semblait qu'il y avait quelque chose de profondément erroné dans l'attitude positiviste, pour des raisons purement philosophiques, et je ne voyais pas comment une théorie scientifique, et encore moins "les faits", pouvaient y changer quelque chose. De plus, je voyais qu' Einstein, Schrödinger et parfois de Broglie, avaient soulevé des objections à l'interprétation dominante de la mécanique quantique. Mais, me disait-on, ils appartenaient à une autre génération, et n'avaient jamais pu admettre la nouvelle vision du monde et de la science élaborée pour nous par Bohr, Heisenberg et Pauli. Néanmoins, toute théorie scientifique est mortelle, semble-t-il, et ne se pourrait-il pas qu'un jour une autre théorie, plus perfectionnée, entraîne une révision de nos conceptions philosophiques? Même cet espoir était vain: von Neumann avait paraît-il démontré que toute théorie plus "réaliste" entrerait nécessairement en conflit avec les prédictions expérimentales. C'étaient donc bien les faits eux-mêmes qui imposaient une vision de la science radicalement nouvelle.

Néanmoins Schrödinger, avec son chat, me semblait avoir mis le doigt sur une difficulté conceptuelle fondamentale de la mécanique quantique. Cela me semblait un problème bien plus important que la traditionnelle question du déterminisme, dans laquelle on voulait enfermer les "dissidents". Par contre, je ne voyais pas très bien quel parti tirer des objections d'Einstein: avec Podolsky et Rosen, il avait tenté de montrer que la mécanique quantique était manifestement une description incomplète de la réalité. Mais tout le monde était d'accord pour dire que Bohr avait réfuté de façon magistrale ces objections. Il y avait aussi un certain Bohm qui, à la suite de Louis de Broglie, avait tenté de donner une "interprétation" de la mécanique quantique en termes de "variables cachées". Mais cela aussi avait échoué. De plus, un certain Bell avait montré de façon irréfutable que toute tentative d'interprétation en terme de "variables cachées" devait, sous peine de contredire les prédictions de la mécanique quantique, être non-locale, ce qui était clairement inacceptable.

Ne voyant aucune issue aux problèmes, je me suis occupé d'autres choses, tout en restant insatisfait, comme beaucoup de gens de ma génération. Mais depuis quelques années, il semble y avoir un intérêt renouvelé pour les questions relatives aux fondements de la mécanique quantique. Les différentes versions de ce qu'on a appelé "l'interprétation de Copenhague" semblent faire de moins en moins l'unanimité ⁴. Un des buts de cet article est d'expliquer qu'il y a bien un problème

⁴Bien évidemment, l'immense majorité des physiciens se réclament toujours de cette interprétation. Néanmoins, parmi ceux qui écrivent des livres ou des articles sur la mécanique quantique, il y a un mécontentement croissant.

dans la mécanique quantique, comme théorie physique. Le problème est subtil, il est dénué de conséquences pratiques, mais il existe. Il faut néanmoins éviter de donner à ce problème trop d'importance, et en tout cas, ne pas tomber dans la dérive irrationaliste que l'on rencontre parfois dans les marges du discours sur la mécanique quantique. Par ailleurs, je veux montrer que le problème a été historiquement occulté en prétendant que la solution résidait dans l'adoption d'un point de vue philosophique particulier. Je veux également expliquer pourquoi un certain nombre d'idées reçues, comme celles que j'avais acquises lorsque j'étais étudiant (sur le théorème de Bell, sur l'impossibilité des théories de variables cachées), sont erronées.

Je vais commencer par une brève discussion philosophique sur l'opposition entre réalisme et positivisme (section 2). Il peut sembler étrange de commencer par une discussion philosophique⁵. Néanmoins, il me semble indispensable de commencer par clarifier ces notions et, en particulier, expliquer ce que le réalisme philosophique n'est pas, tant la confusion sur cette question pervertit toute discussion sur les fondements de la mécanique quantique.

Ensuite, je vais situer quel est exactement le problème de la mécanique quantique (section 3), et essayer de montrer que le problème n'est pas lié à une attitude philosophique particulière. De plus, l'idée selon laquelle la solution du problème réside dans l'adoption d'une attitude philosophique positiviste a rendu difficile la compréhension de l'aspect le plus radicalement neuf de la mécanique quantique, à savoir son caractère non-local, mis en évidence par Einstein, Podolski, Rosen et par Bell (section 4). Finalement, je vais brièvement indiquer les solutions possibles existantes (section 5). Bien qu'aucune ne soit entièrement satisfaisante, certaines d'entre elles sont bien plus intéressantes que ce qu'on en dit généralement (souvent sans les examiner), et il faut certainement les étudier si l'on veut un jour arriver à une théorie quantique totalement cohérente et dénuée d'ambiguïtés.

Je dois néanmoins souligner que presque rien de ce qui se trouve dans cet article n'est original (sauf, comme on dit d'habitude, les erreurs). En fait, les articles de Bell ([7, 5]) contiennent, mais souvent de façon fort synthétique, presque tout ce qui peut être dit aujourd'hui sur les problèmes de la mécanique quantique. Un des principaux objectifs du présent article est d'encourager le lecteur à étudier les écrits de Bell. Pour faciliter la lecture de l'article, j'ai mis toute la partie de

A mon sens, l'oeuvre de Bell ([7]), qui est encore trop méconnue, a joué un grand rôle dans cette lente prise de conscience. A part cet ouvrage fondamental, on peut citer, par exemple, ([38, 1, 2, 20]) comme textes critiquant, au moins implicitement, les dogmes de l'école de Copenhague. Il y a aussi des efforts récents tentant d'améliorer la présentation du point de vue de Copenhague, sans pour autant rompre avec cette tradition ([33, 44, 28]).

⁵Et contre-productif: les physiciens ont une profonde méfiance, en partie légitime, vis-à-vis des "préjugés" philosophiques. Mais mon but est de montrer que les pires préjugés ne sont pas nécessairement du côté du réalisme. Par ailleurs, n'étant pas philosophe, je suis conscient d'utiliser une terminologie un peu imprécise pour désigner les différents courants de pensée. Ce qui m'intéresse, c'est la façon dont ces courants se reflètent dans l'attitude adoptée par les scientifiques face à leur pratique.

l'exposé qui nécessite des équations dans les appendices 1 à 3, tandis que le dernier appendice est consacré à des pistes bibliographiques.

2 Réalisme et Positivismisme

Il est intéressant de remarquer que
les solipsistes et les positivistes,
quand ils ont des enfants,
prennent une assurance-vie.

J.S. Bell

Qu'est-ce que la connaissance scientifique? Il y a, en gros, deux conceptions qui s'affrontent à ce sujet. Pour la première conception, réaliste, nous connaissons, pour l'essentiel, la nature telle qu'elle est. Evidemment, chacun sait que le monde n'est pas nécessairement tel qu'il nous apparaît. Ne pas admettre cela serait faire preuve de réalisme naïf. Remarquons au passage que des gens comme Einstein qui sont souvent accusés d'avoir fait preuve de trop de réalisme nous ont donné une conception du monde assez éloignée des apparences (pensons au paradoxe des jumeaux en relativité!). Le réalisme consiste à penser que nous pouvons élaborer des théories qui nous donnent une connaissance objective du monde au moyen de la confrontation systématique de la théorie et de l'expérience.

Mais on peut prendre une attitude sceptique par rapport à cette première conception. D'où vient-on que nos connaissances se rapportent au monde tel qu'il est? Après tout, tous nos rapports entre notre esprit et le monde passent nécessairement par nos sens. Qui nous dit que ceux-ci ne nous trompent pas? Peut-être sommes-nous pris dans un rêve et rien de ce que nous croyons percevoir n'existe réellement. Toutes les représentations mentales peuvent être des illusions internes à mon esprit. C'est la position solipsiste. Je me demande si quelqu'un a sincèrement cru en cette doctrine, ou si même l'évêque Berkeley ne faisait qu'utiliser cette position comme argument contre le matérialisme. Néanmoins, elle est sûrement irréfutable. Si quelqu'un s'obstine à nier la réalité du monde extérieur à sa conscience, et veut s'obstiner à penser qu'il est un clavecin qui joue tout seul, il n'y a aucun moyen de le convaincre de son erreur.

Une autre position, plus complexe et plus répandue, consiste à admettre l'existence du monde extérieur mais à douter de notre capacité à le connaître objectivement. Ce scepticisme peut prendre différentes formes. En général, on ne doute pas de toutes nos connaissances; mais on peut décider de se limiter aux données immédiates des sens et réduire la science à l'établissement de relations entre ces données. Dans une série d'interviews faites pour la BBC à propos de la mécanique quantique, le journaliste résume bien cette position: "l'idée que le monde "existe réellement" et

que nos théories sont en quelque sorte “vraies” ou “fausses” ou sont des approximations de cette réalité, et bien, je pense que cette idée n’est pas très utile”. Il répondait à Bell, qui venait de lui dire: “je crois certainement que le monde était là avant moi et qu’il sera là après moi, et je pense que vous en faites partie! Et je crois que la plupart des physiciens prennent ce point de vue quand ils sont coincés par des philosophes.” ([17] p. 50)⁶ On peut toujours dire que c’est une “croyance” en ce sens qu’il n’y a pas moyen de la démontrer de façon absolue. Mais le fait est que la plupart des scientifiques ont franchi ce Rubicon philosophique et adhèrent à cette croyance. C’est pourquoi le problème de savoir ce qui fonde ultimement cette “croyance” est de préférence laissé aux philosophes.

Non seulement les scientifiques croient à l’existence du monde extérieur, mais ils pensent aussi que l’image que nous en donne la science est globalement correcte. On peut douter d’une théorie particulière concernant l’extinction des dinosaures, mais il y a peu de scientifiques qui douteraient du fait que les propriétés des corps s’expliquent par leur constitution atomique et moléculaire, ou que la théorie de l’évolution rend compte, dans les grandes lignes, de la diversité des espèces. Il faut dire qu’étant donnés les immenses succès théoriques de la science il est difficile de la prendre pour la première illusion venue, ou d’en faire principalement une construction sociale. Pour ne donner qu’un exemple, on peut prendre deux montres extrêmement précises et synchronisées et les faire voyager autour de la terre en sens opposé. On constate alors un léger manque de synchronisation, de l’ordre de un mille milliardième de seconde. Néanmoins, ce décalage est mesurable et, ce qui est extraordinaire, c’est qu’il peut être prédit, avec une assez grande précision, au moyen de la théorie de la relativité [9]. Si l’on regarde le calcul, on voit qu’il est fait en ignorant totalement le dispositif expérimental utilisé, de sorte qu’il n’y a aucune “tricherie” possible, consistant à ajuster les calculs pour qu’ils s’accordent avec l’expérience. Quand on sait qu’il y a un grand nombre de tels succès, par exemple en physique des hautes énergies, il est difficile de ne pas croire à l’objectivité de nos connaissances scientifiques⁷.

Mais ceci nous éloigne du positivisme. Comment le définir exactement? Si l’on met de côté les positions extrêmes (solipsisme, scepticisme radical) qui sont cohérentes, irréfutables, mais que personne ne soutient vraiment, il n’en existe aucune définition très claire. Il y a un ensemble d’idées qui tentent de mettre l’observation, les mesures, les données immédiates des sens à la base de la démarche scientifique. On cherche à se débarrasser de toute “métaphysique”. C’est certainement une réaction saine face à tous les discours a priori sur la “nature des choses”. Les expériences

⁶Bohm est tout aussi catégorique: quand le journaliste lui demande s’il pense que le monde extérieur existe indépendamment de notre existence et de nos observations, il répond: “Tous les physiciens croient cela” ([17] p. 119).

⁷Voir l’excellent livre de Weinberg [55] pour une critique du relativisme historico-sociologique et du positivisme.

constituent bien le seul moyen que nous ayons pour tester nos idées sur la nature. Mais la science ne se limite pas à l'enregistrement de faits. Par ailleurs, on n'arrive pas à reconstruire l'ensemble du discours scientifique en partant uniquement des données immédiates des sens⁸. Heisenberg raconte comment Einstein lui expliquait cela: "Il (Einstein) pensait que toute théorie contenait en fait des quantités inobservables. Le principe selon lequel on ne doit faire appel qu'à des quantités observables ne peut pas être mené à bien d'une façon consistante. Et quand je lui objectais que je faisais seulement appel au genre de philosophie que lui-même avait mis à la base de la théorie de la relativité, il me répondit simplement: "Peut-être ai-je utilisé, même par écrit, une telle philosophie antérieurement, mais c'est néanmoins un non-sens "" (cité dans [55], chapitre 7).

Pour préciser un peu plus la différence entre réalisme et positivisme, prenons un exemple: lorsqu'on dit que les dinosaures ont existé on veut dire exactement ce que cela veut dire: il y a x millions d'années, la terre était peuplée d'animaux ressemblant approximativement à ces gentilles bestioles qui envahissent nos écrans. Il est important de bien comprendre la distinction, qui est particulièrement claire quand on parle de la préhistoire, entre la signification d'une assertion (qui se rapporte ici à ce que le monde est, ou était, réellement) et les méthodes utilisées pour en vérifier la validité. Après tout, nous n'avons accès qu'à des squelettes de dinosaures pour les étudier. Il nous est radicalement impossible de retourner en arrière pour "aller voir" ce qui se passait réellement à l'époque. Toutes, absolument toutes les assertions se rapportant à cette époque, ou au passé en général, sont des "théories" qui transcendent les données immédiates des sens. Celles-ci ne nous donnent même pas "des os de dinosaures". Elles nous donnent des objets que nous interprétons comme étant des os de créatures ayant vécu il y a x millions d'années. C'est déjà une théorie que de dire que ce sont des os de dinosaures. Néanmoins, c'est bien cela que nous voulons dire quand nous en parlons.

Un autre problème fondamental rencontré par les positivistes est qu'il n'est pas possible de définir précisément ce que sont les données immédiates des sens. A partir de quand considère-t-on qu'on a affaire à une théorie par opposition à une observation pure? Même lorsqu'on prend les objets de la vie courante, on doit considérer qu'on a une "théorie" (spontanée, implicite) sur le monde. Dire qu'une table est là, si on la voit, c'est faire l'hypothèse théorique que ce qui est la cause (au moins en partie) de notre "sensation" (la vue de la table) c'est précisément qu'il existe une table, là, en dehors de moi et de ma conscience. Pour les dinosaures, c'est bien pire: l'idée même d'une préhistoire est théorique, évidemment (pourquoi le monde n'a-t-il pas été créé récemment, avec tous les vestiges déjà là?), et toutes les assertions faites à ce sujet sont des "théories" où se mêlent "perceptions" ou "observations" et "hypothèses".

⁸La prise de conscience de cette situation est sans doute responsable du fait qu'en philosophie le positivisme semble être passé de mode.

Ou, comme le dit Bell: “le problème de la mesure et de l’observateur est de savoir ou l’un et l’autre commencent et finissent. Prenez mes lunettes par exemple: si je les enlève, à quelle distance dois-je les mettre pour qu’elles fassent partie de l’objet plutôt que de l’observateur? Il y a de tels problèmes depuis la rétine jusqu’au nerf optique et au cerveau. Je pense que, quand on analyse ce langage dans lequel les physiciens sont tombés, à savoir que la physique concerne les résultats d’observations, vous voyez qu’à l’analyse tout cela s’évapore et que rien de très clair n’est dit.” ([17] p. 48)

Néanmoins, il faut bien souligner ce que le réalisme n’est pas: il n’affirme pas que la vérité est “absolue” en ce sens qu’elle aurait un fondement absolu (on ne peut pas réfuter le solipsisme, ni le scepticisme), ou qu’on obtiendrait nécessairement, ultimement, une théorie parfaite. Il n’affirme pas non plus que tous les concepts introduits dans la théorie doivent nécessairement correspondre à quelque chose de réel. Mais il pose la question “Qu’est-ce qui existe réellement?” Au siècle passé, la question était: les atomes sont-ils vraiment là? Ou sont-ils seulement une façon commode de décrire le monde? On peut poser le même genre de questions pour les gènes et pour d’autres quantités qui ne sont pas nécessairement “observables” au moment où elles sont introduites. Mais poser ce genre de questions, demander à la physique de définir l’ontologie, fait progresser la recherche tandis que déclarer à priori que ce sont des questions “métaphysiques” (la position de Mach concernant les atomes) ne fait que la bloquer⁹. Le réalisme ne consiste pas non plus à croire qu’il est impossible que l’esprit humain rencontre un jour des difficultés insurmontables dans son effort pour comprendre objectivement le monde. Après tout, le cerveau humain est le produit d’une évolution au cours de laquelle la capacité génétique de comprendre scientifiquement le monde procurait un avantage sélectif plutôt limité. L’essentiel pour un réaliste est que la véracité de nos théories dépend principalement, non pas de ce qui se passe dans nos têtes, mais de ce que le monde est. Qu’une connaissance partielle mais objective du monde est possible, et que le but de la science est de se rapprocher sans cesse d’une telle connaissance.

3 Le problème de la mécanique quantique

Pour comprendre le problème, il faut d’abord bien prendre la mesure de l’ambition de la physique. Cette ambition a été remarquablement bien décrite par Laplace: “Une intelligence qui pour un instant donné connaîtrait toutes les forces dont la nature est animée et la situation respective des êtres qui la composent, si d’ailleurs elle était assez vaste pour soumettre ces données à l’analyse, embrasserait dans la même formule les mouvements des plus grands corps de l’univers et ceux du plus léger atome: rien ne serait incertain pour elle, et l’avenir, comme le passé, serait

⁹Un autre exemple, lié à la mécanique quantique, concerne le théorème de Bell (cfr sections 4 et 6).

présent à ses yeux.” Ce qu’il faut retenir de ce texte, ce n’est pas tant l’idée du déterminisme universel que celle du réductionnisme universel ¹⁰. Le but est d’avoir une vision du monde et de ses lois qui est en principe complète. C’est-à-dire qui en principe rend compte de tous les phénomènes observés. Evidemment, l’important est ce qu’on entend par “en principe”. Personne n’a jamais pensé écrire les équations qui gouvernent l’univers et en déduire tous les phénomènes observés. Pour expliquer ceux-ci, on devra toujours faire appel à des hypothèses particulières pour des aspects donnés de la réalité. Mais on ne peut pas s’empêcher de se poser la question: manquent-il quelque chose à nos lois, auquel cas il n’y a aucune raison de ne pas poursuivre la recherche, ou bien sont-elles complètes?¹¹ Exemple: dans la physique classique, on ne peut pas tout ramener aux lois de la mécanique; il faut au minimum introduire les lois de l’électromagnétisme. Autre exemple: le débat sur le vitalisme au siècle passé, qui a abouti à la conclusion que la “vie” est bel et bien réductible à la physico-chimie. Dans son livre sur l’ordinateur, l’esprit et les lois de la physique [47], Penrose se demande si ces lois peuvent, en principe, rendre compte du fonctionnement de l’esprit humain. Quelle que soit l’opinion qu’on ait sur sa réponse, il est clair que la question est importante.

Ce point de vue réductionniste est aussi un point de vue unificateur, et s’oppose à l’atomisation de la science. La science n’est pas une longue suite de “modèles” (physiques, chimiques, biologiques, etc...) sans lien entre eux et plus ou moins bien “vérifiés expérimentalement”. Chaque “modèle” doit être, si possible, ramené à des lois plus fondamentales.

Dans la physique classique, on pensait avoir une description complète du monde: on pouvait penser qu’il “suffisait” de se donner les positions et les vitesses de toutes les particules constituant l’univers ainsi que les forces agissant entre elles; pour être plus précis, on devait aussi introduire la configuration des champs électromagnétiques et gravitationnels. Pour que ceci soit une théorie de “tout” il faut que ces données déterminent les valeurs des positions et des vitesses des particules, au moyen de lois (qui ici sont déterministes, mais qui pourraient être stochastiques) pour tous les temps ultérieurs. La mécanique quantique bouleverse ce schéma, mais offre-t-elle une alternative, une autre théorie, en principe, de “tout”? Si l’on ne pose pas la question en ces termes, on ne même peut pas formuler les problèmes rencontrés en mécanique quantique. En effet, on pourrait considérer cette théorie comme un “modèle” décrivant certains constituants élémentaires de la matière, dans certaines situations expérimentales, et, considérée sous cet angle, la théorie est irréprochable. Par exemple, dans cette perspective, on peut postuler que la mécanique quantique ne s’applique pas à des agrégats suffisamment compliqués d’atomes tels que les appareils de mesures,

¹⁰Dans son dernier livre [55], Weinberg illustre et défend remarquablement bien une version moderne du réductionnisme.

¹¹Feynman posait la question “Est-ce que l’équation de Schrödinger contient les grenouilles, les compositeurs musicaux ou la morale?” [24]

et toutes les difficultés disparaissent.

En principe, la mécanique quantique introduit un objet sensé remplacer les positions et les vitesses des particules, à savoir la fonction d'onde du système. Mais la donnée de la fonction d'onde du système détermine-t-elle la valeur de celle-ci en des temps ultérieurs? La réponse à cette question est un peu compliquée. Si l'on s'en tient aux principes appliqués en pratique en mécanique quantique (pour obtenir ce remarquable accord avec l'expérience), la réponse est non. En effet, d'une part la fonction d'onde évolue selon l'équation de Schrödinger, qui la détermine bien en des temps ultérieurs. Néanmoins, et c'est ici qu'apparaît la difficulté, lorsqu'on fait une "mesure", on est obligé de "réduire" la fonction d'onde c'est-à-dire de lui faire suivre une "loi" d'évolution différente de celle donnée par l'équation de Schrödinger (voir Appendice 1 pour une formulation mathématique du problème). Si l'on ne fait pas cela, les prédictions ultérieures ne seront pas en accord avec l'expérience. Pour reprendre la notation de Penrose [47], qui explique bien ce curieux dualisme, appelons U la loi correspondant à l'équation de Schrödinger, et R la réduction. Mais la réduction n'est pas une opération qui est déterminée en quoi que ce soit par les données qui caractérisent la système avant la mesure, c'est-à-dire par sa fonction d'onde. C'est d'ailleurs pour cela que la mécanique quantique est une théorie essentiellement probabiliste. La fonction d'onde, obtenue comme solution de l'équation de Schrödinger, avant la mesure, permet de calculer la probabilité des différents résultats auxquels la réduction mène après la mesure. Mais ce résultat lui-même est déterminé uniquement par l'observation.

On pense souvent que c'est le caractère essentiellement aléatoire de la mécanique quantique qui suscite l'hostilité de la plupart des critiques, notamment d'Einstein. Il est vrai qu'il a déclaré que Dieu ne jouait pas aux dés avec l'Univers, mais il est aussi clair que son opposition à la mécanique quantique ne venait pas essentiellement de cet aspect irréductiblement probabiliste. Pour commencer, il faut bien comprendre la différence entre la probabilité quantique et classique, du moins dans l'interprétation habituelle. Prenons un dé: on peut le lancer et, tant qu'on ne regarde pas sur quelle face il est tombé, on peut décrire celle-ci au moyen d'une distribution de probabilité, à savoir une chance sur six pour chaque face, si du moins le dé n'est pas pippé. Néanmoins, il existe une face sur laquelle le dé est tombé. Personne ne dira que cette distribution de probabilité est la description physique complète du dé avant qu'on ne le regarde. Dans ce cas-là, il n'y a aucune difficulté pour admettre une différence entre la connaissance que nous avons à un moment donné, et la situation réelle. Mais en mécanique quantique ordinaire, l'idée fondamentale est qu'il n'existe pas de valeur déterminée de quoi que ce soit avant la mesure ou l'observation. Il existe une fonction d'onde et rien d'autre. Cette fonction d'onde ne donne la probabilité de rien d'autre que des résultats possibles de mesure¹². Et donc de rien d'autre que de la fonction d'onde

¹²En d'autres termes, on n'a pas affaire à une probabilité d'être quelque chose mais d'être mesuré.

qui sera produite, après la mesure, par l'opération R . Donc, l'opération R ne révèle pas une valeur (de la mesure) préexistente et peut-être inconnue, elle la crée.

Le problème peut maintenant se résumer ainsi: qu'est-ce qui distingue les situations physiques où l'on doit utiliser l'opération U de celles où l'on doit utiliser R ? En effet, qu'est-ce qui définit physiquement une mesure? De tels processus se produisent-ils uniquement dans le laboratoire ou peuvent-ils avoir lieu, spontanément, dans la nature? Comme le dit Bell, fallait-il attendre qu'il y ait des êtres humains sur terre pour que l'opération R apparaisse? Ou fallait-il attendre qu'il y ait des gens munis d'un doctorat? [5] Evidemment, il est clair que, d'un point de vue pratique, on sait ce qu'est une mesure. Mais la situation est clairement insatisfaisante si l'on veut considérer la mécanique quantique, en principe, comme une "théorie de tout". Tout le problème est là, mais c'est le seul problème. Il n'est pas facile à résoudre, mais il faut souligner qu'on a parfaitement le droit de le considérer comme peu important par rapport aux immenses succès de la théorie quantique, et qu'il ne justifie nullement les énoncés excessifs sur la "disparition du réel" que l'on rencontre parfois¹³.

Une première attitude possible consiste à donner un sens purement subjectif à la fonction d'onde et par conséquent à l'opération R . La fonction d'onde représente la connaissance que nous avons du système. Il n'est donc pas étonnant que cette fonction change abruptement lorsqu'on effectue une mesure. On apprend quelque chose de plus sur le système (c'est une interprétation possible des phrases citées dans la note 1). Mais cette vision pose beaucoup de problèmes: d'une part, d'après l'interprétation orthodoxe, on n'apprend pas vraiment quelque chose sur le système, on le modifie, ou on lui impose une propriété qu'il ne possédait pas avant. D'autre part, dans ce point de vue subjectif, doit-on considérer que chaque expérimentateur, et potentiellement chaque individu, possède "sa" fonction d'onde qui est simplement un résumé de toutes ses "observations" passées? Probablement que personne n'irait jusque là¹⁴.

On peut tenter de donner un sens plus objectif à l'opération R en essayant de la mettre en relation avec l'appareil de mesure: après tout, il n'est pas étonnant, a priori, qu'un appareil de mesure, par définition macroscopique, perturbe considérablement un système composé d'un atome ou d'un électron. On pourrait tenter de décrire l'ensemble composé du système mesuré et

¹³Encore quelques exemples, pris dans des ouvrages de vulgarisation: "Il n'est rien de réel, nous dit la mécanique quantique et nous ne pouvons faire aucun commentaire sur des événements qui se produisent lorsque nous ne les observons pas" ([32] Couverture). Ou encore: "Enfin une sorte de nouvelle religion, que nous avons appelée "syncrétisme quantique", est en train de naître, qui rapporte tout- matière et esprit- à un absolu inconnaissable mais dont l'existence pourrait être déduite des aspects extraordinaires de la nouvelle physique." ([45] p.159). Peut-être, mais c'est aller un peu vite en besogne!

¹⁴Donner un sens purement statistique à la fonction d'onde pose le même genre de problèmes: dans les deux approches, on admet implicitement que la description quantique, ainsi interprétée, n'est pas complète. Peut-être pense-t-on qu'une description complète est impossible, mais il faut justifier cette conviction.

de l'appareil de mesure en suivant strictement l'équation de Schrödinger, appliquée à la fonction d'onde de l'ensemble, et espérer que l'opération R apparaisse comme une description approximative de l'effet de cela sur le système mesuré. Malheureusement, on peut montrer que cet espoir n'est possible qu'à condition de changer l'équation de Schrödinger: celle-ci étant linéaire et déterministe, tout ce que le couplage entre l'appareil de mesure et l'objet mesuré peut produire, c'est une fonction d'onde qui est une superposition de différents états macroscopiques (cfr Appendice 1). C'est ce que Schrödinger a voulu illustrer avec son chat. Toute tentative d'éliminer R revient soit à changer la théorie, soit à admettre son caractère incomplet.

Envisageons maintenant l'ensemble d'idées qu'on associe à l'interprétation de Copenhague. Il faut bien distinguer entre l'algorithme pratique qu'on utilise en mécanique quantique (décrit dans l'appendice 1) et la théorie qui tente de le justifier. Personne ne conteste l'algorithme, en pratique, et ne songe à le modifier (en tout cas pas les auteurs des différentes solutions proposées dans la section 5). Une première justification introduite par l'école de Copenhague consiste à considérer l'appareil de mesure comme radicalement classique. On pourrait accepter cette position comme provisoire (on ne peut pas faire mieux pour le moment) mais ce n'était pas, semble-t-il, l'idée de Bohr.

Ce qui est gênant dans ce point de vue, c'est justement le succès de la mécanique quantique: comment se fait-il qu'on ait une théorie qui marche tellement bien, en ce sens qu'aucune de ses prédictions n'a jamais été mise en défaut, depuis les atomes jusqu'aux étoiles, mais qu'il faille néanmoins restreindre son champ d'application, pour des raisons purement conceptuelles? Pourquoi les appareils de mesure échapperaient-ils aux lois de la physique?

C'est à partir d'ici que les "solutions" philosophiques s'introduisent. Au lieu d'admettre qu'il y a un problème quand on analyse le processus de mesure, on introduit "l'observateur". Celui-ci est "classique" mais il est surtout complètement extérieur aux équations de la théorie. Son seul rôle est de réduire la fonction d'onde. On tente alors de justifier cette "solution" en parlant de la "connaissance que nous avons du système" mais sans vouloir donner un sens purement subjectif à la fonction d'onde (voir [42], p.187 pour une bonne illustration de ce genre d'ambiguïté).

Une deuxième "solution" vague est la "complémentarité". Certaines propriétés sont "incompatibles". Outre que cela ne résoud pas le problème de la mesure, c'est encore une façon d'ajouter à la théorie quelque chose qui ne se trouve nullement dans ses équations¹⁵.

Une autre façon philosophique d'esquiver le problème est de déclarer que le seul but de la science est de prédire les résultats de mesure. Clairement, le problème que nous avons rencontré

¹⁵Chez Bohr, la complémentarité était supposée s'appliquer à toutes les disciplines, biologie, psychologie, etc... Avec parfois les accents vitalistes: "Seul le renoncement à une explication de la vie, au sens ordinaire du mot, nous donne la possibilité de tenir compte de ses caractéristiques" ([13], p.124).

disparaît. Si les prédictions sont correctes, peu importe la cohérence interne de la démarche. Mais comment peut-on prendre cette attitude vraiment au sérieux? C'est confondre la fin et les moyens ¹⁶. Comme on l'a vu dans la section 2, dans toute la démarche scientifique on utilise les expériences pour tester nos connaissances, mais le but n'est pas de simplement prédire les résultats d'expériences "pour le plaisir".

Ce qui est dommage avec toutes ces "solutions", c'est qu'elles permettent d'éviter de donner un statut physique précis à la fonction d'onde: rôle subjectif? Objectif? Amplitude de probabilité? Objet réel? Ces ambiguïtés ont aussi occulté pendant longtemps le problème de la non-localité quantique que nous allons envisager maintenant.

4 La non-localité

En 1935, Einstein, Podolsky et Rosen (EPR) ont mis le doigt sur l'aspect conceptuellement le plus révolutionnaire de la mécanique quantique. Malheureusement, cet aspect a été généralement incompris à l'époque et l'article a été présenté par ses auteurs comme étant seulement une critique de l'interprétation traditionnelle de la mécanique quantique.

Ce n'est qu'en 1964 que John Bell a montré que la seule conclusion possible de l'analyse d'Einstein, Podolski et Rosen est que le monde est non local. Afin de comprendre précisément ce que cela veut dire, voyons d'abord l'argument d'Einstein, Podolski et Rosen. On construit une source qui envoie les particules dans des directions opposées, disons vers la gauche et vers la droite, et ces particules se trouvent dans un certain état quantique. On place des instruments de mesure, un pour chaque particule. Ces instruments peuvent, en principe, être placés arbitrairement loin l'un de l'autre ¹⁷. Ces appareils peuvent chacun se trouver dans trois positions (1,2 ou 3) et le résultat de la mesure est de type binaire: nous le noterons "oui" ou "non". Le résultat d'une expérience peut donc être mis sous la forme, par exemple (1, oui, 2, non) c'est-à-dire que l'appareil de gauche est dans la position 1 et le résultat est "oui" tandis que celui de droite est dans la position 2 et le résultat est "non".

Einstein, Podolsky et Rosen sont partis du fait que l'état quantique prédit une corrélation parfaite quand les appareils, à gauche et à droite, sont dans la même position: s'ils sont tous deux

¹⁶Bohm: Si le seul but de la physique est d'expliquer les expériences, je pense que la physique aurait été bien moins intéressante qu'elle ne l'a été. Je veux dire, pourquoi voulez-vous expliquer les expériences? Cela vous amuse ou quoi?([17] p. 124). Bell: L'expérience est un moyen. Le but reste de comprendre le monde. Restreindre la mécanique quantique exclusivement à des opérations en laboratoire revient à trahir l'entreprise scientifique ([5]).

¹⁷Pour que ce qui suit reste valable, il faut que les particules soient isolées du reste du monde avant d'interagir avec l'appareil de mesure, ce qui en pratique semble impossible pour de très grandes distances. Dans les expériences, les distances sont de l'ordre de quelques mètres. Néanmoins, le phénomène est tellement extraordinaire que le fait qu'en principe la distance entre appareils de mesure puisse être aussi grande qu'on veut mérite d'être souligné.

sur 1 (ou 2, ou 3) les réponses seront toutes deux “oui” ou toutes deux “non”¹⁸. Mais l’état quantique des particules ne nous dit pas si le résultat sera “oui” ou “non”. En langage imagé, chacune des particules n’est ni prête à dire “oui” ni prête à dire “non”, quelle que soit la direction dans laquelle on “l’interroge”.

Bon, mettons maintenant qu’on ne fasse d’abord qu’une mesure à gauche en retardant la mesure à droite (on recule un peu l’appareil de mesure). Immédiatement après la mesure à gauche, on est sûr du résultat à droite (oui si le résultat à gauche est oui, non si le résultat à gauche est non). En effectuant la mesure à gauche, a-t-on changé l’état physique du système à droite¹⁹? Si l’on s’en tient à la description qui vient d’être donnée, la réponse est oui: avant la mesure (à gauche), le système était radicalement indéterminé (des deux côtés) et, après la mesure (à gauche) il est déterminé (à gauche et à droite), en ce sens que la mesure ultérieure (à droite) a maintenant un résultat bien déterminé. Il semble donc qu’on a affaire à une forme d’action à distance, peut-être subtile mais une action quand même²⁰.

Néanmoins, il y a un trou béant dans cet argument: qu’est-ce qui nous dit que lorsque nous effectuons la mesure à gauche nous ne découvrons pas une propriété intrinsèque de la particule (exprimée sous la forme de la “réponse” oui/non) qui serait simplement la même pour la particule envoyée à droite ? Bien sûr, le formalisme quantique ne parle pas de telles propriétés (les particules ne disent ni oui ni non avant d’être mesurées) mais pourquoi ce formalisme est-il le dernier mot de l’histoire ? Avant d’admettre une conclusion aussi radicale que la non-localité, il faudrait peut-être envisager toutes les autres possibilités. Par exemple, comme les particules proviennent d’une source commune, il se peut très bien, a priori, qu’elles emportent avec elles des “instructions” qui spécifient comment répondre aux différentes questions²¹. Et, alors, il n’y a plus aucun mystère

¹⁸Chaque “réponse” apparaissant avec une fréquence 1/2 lorsqu’on répète l’expérience un grand nombre de fois.

¹⁹Dans le formalisme habituel ce qui se passe c’est simplement que la mesure à gauche réduit la fonction d’onde mais, vu sa forme, la réduction opère aussi à droite (cfr appendice 2). Evidemment, l’importance que l’on attache à ce fait, quand il est exprimé dans le formalisme de la mécanique quantique, renvoie au statut que l’on accorde à la fonction d’onde et à sa réduction. C’est pourquoi il vaut mieux discuter la non-localité directement, sans passer par le formalisme de la mécanique quantique, pour éviter de mêler ce problème avec celui des interprétations. De plus, on montre ainsi que la non-localité est une propriété de la nature établie à partir d’expériences et de raisonnements élémentaires, indépendamment de l’interprétation qu’on donne au formalisme quantique. Par conséquent, toute théorie ultérieure qui pourrait remplacer la mécanique quantique devra également être non-locale.

²⁰Il est difficile d’exprimer combien cette notion d’action à distance fait horreur à certains physiciens: Newton écrivait “qu’un corps puisse agir sur un autre à distance, à travers le vide et sans la médiation de quelqu’autre corps ... me paraît être une telle absurdité que je pense qu’aucune personne possédant la faculté de raisonner dans des questions philosophiques ne pourra jamais y croire” (cité dans [35], p.213) et Einstein, parlant de la situation décrite dans l’article EPR disait “Ce qui existe réellement en un point B ne devrait pas dépendre du type de mesure qui est faite en un autre point A de l’espace. Cela devrait également être indépendant du fait que l’on mesure ou non quelque chose en A” ([14], cité dans [42], p.121).

²¹Le mot “instructions” est dû à Mermin[40]. Mais peu importe le terme, il désigne n’importe quoi qui permette

ni action à distance dans le fait que leurs réponses soient les mêmes. Et pour Einstein, Podolski et Rosen, c'était bien la conclusion qui s'imposait: la non-localité étant impensable, ils pensaient avoir démontré que la mécanique quantique était "incomplète". Il faut bien préciser le sens de ce mot. Cela ne veut pas dire que ces "instructions", ou "variables cachées" comme on les appelle, c'est-à-dire n'importe quoi qui n'est pas la fonction d'onde, soient accessibles à notre connaissance, que nous puissions les manipuler, les prédire etc... C'est simplement qu'elles existent. Qu'il y ait quelque chose dans le monde, quelque mécanisme, déterministe, probabiliste peu importe, qui explique comment la source donne ces "instructions" aux particules. Si le lecteur pense que parler de la simple existence de quelque chose (les "instructions") qui puisse être radicalement inconnaisable, incontrôlable, imprédictible, avant la mesure c'est faire de la métaphysique, tant mieux, parce que c'en est, mais de la métaphysique expérimentale.

En effet, et c'est là la contribution géniale de Bell, il y a moyen de tester si ce quelque chose qui manquerait à la mécanique quantique et qui sauverait la localité existe. Mais avant d'arriver à Bell, résumons ce qu'ont montré Einstein, Podolski et Rosen: ou bien le monde est non-local en ce sens qu'effectuer une mesure à gauche a un effet à droite, ou bien la mécanique quantique est incomplète. Cette conclusion-là est inévitable si on analyse l'expérience EPR.

La seule erreur d'Einstein, Podolski et Rosen a été d'en conclure un peu vite que la mécanique quantique devait être incomplète. Cette erreur a été la source de beaucoup de confusion. En particulier la réponse de Bohr à l'article EPR est, soit incompréhensible, soit met en question justement l'hypothèse de localité avancée par Einstein, Podolski et Rosen (voir l'analyse de Bell dans l'Appendice 1 de [6]). Mais, en général, on oublie beaucoup trop vite que, si l'on formule les conclusions d'Einstein, Podolski et Rosen sous forme d'une alternative, comme ci-dessus, elles sont absolument correctes: il n'y a aucun moyen de rendre compte de cette parfaite corrélation si on ne suppose pas, soit une influence de la mesure à gauche sur l'état du système à droite, soit que la fonction d'onde ne décrit pas complètement le système.

En fait, il y a une interprétation de la mécanique quantique qui est parfaitement compatible avec la deuxième possibilité ²². On donne à la fonction d'onde un statut principalement épistémique. Elle représente tout ce que nous pouvons connaître, à jamais, sur le système. Ceci n'empêche nullement qu'il existe des variables "cachées" qui déterminent, pour chaque particule le résultat de la mesure: pour chaque position 1, 2 ou 3, une particule donnée répondra oui ou non et cette réponse est la même à gauche et à droite parce qu'elles viennent de la même source. Mais comme d'expliquer comment le fait que les particules proviennent d'une source commune peut rendre compte, de façon purement locale, des corrélations parfaites.

²²Cette interprétation "subjective", mentionnée dans la section 3, est souvent admise implicitement par ceux qui pratiquent la mécanique quantique. Ce qui explique aussi pourquoi la situation EPR ne leur paraît pas choquante à première vue.

nous n'avons pas accès à ces réponses avant de les mesurer et que l'état initial est tel que les réponses sont, une fois sur deux, oui et une fois sur deux non, on a l'illusion d'une action à distance.

Maintenant, venons-en à Bell. Tout ce que Bell montre c'est que de telles variables cachées qui sauveraient la localité n'existent simplement pas. Comment peut-on tester une idée apparemment aussi "métaphysique" ? On regarde ce qui se passe quand les détecteurs ne sont pas alignés. Alors, on n'a plus de corrélation parfaite mais on a certains résultats statistiques²³, également prédits par la mécanique quantique, et qui sont incompatibles avec la simple existence d'instructions expliquant la corrélation parfaite (voir Appendice 2). Il faut souligner qu'ici on a affaire à un résultat purement mathématique. De plus, comme ces prédictions de la mécanique quantique ont été vérifiées expérimentalement [3], on peut faire le raisonnement en se passant de la théorie et en concluant que la non-localité est déduite directement de l'expérience via le raisonnement d'EPR-Bell. Mais il ne faut pas oublier la partie EPR de l'argument. Sinon, on en conclut que Bell a simplement montré l'inexistence de certaines variables cachées, comme on l'avait toujours pensé de toutes façons et que "Bohr gagne à nouveau" [6]²⁴. Mais ce n'est pas du tout de cela qu'il s'agit. L'inexistence de ces variables cachées implique que le monde est non-local puisque ces variables étaient la seule "porte de sortie" au vu de l'argument EPR. Et c'est cela qui est réellement surprenant dans le résultat de Bell. Voici ce qu'il en dit lui-même: "Le malaise que je ressens vient de ce que les corrélations quantiques parfaites qui sont observées semblent exiger une sorte d'hypothèse "génétique" (des jumeaux identiques, qui ont des gènes identiques). Pour moi, il est si raisonnable de supposer que les photons dans ces expériences emportent avec eux des programmes, qui sont corrélés à l'avance, et qui dictent leur comportement. Ceci est si rationnel que je pense que quand Einstein a vu cela et que les autres refusaient de le voir, il était l'homme rationnel. Les autres, bien que l'histoire leur ait donné raison, se cachaient la tête dans le sable. Je pense que la supériorité intellectuelle d'Einstein sur Bohr, dans ce cas-ci, était énorme; un immense écart entre celui qui voyait clairement ce qui était nécessaire, et l'obscurantiste. Aussi, pour moi, il est dommage que l'idée d'Einstein ne marche pas. Ce qui est raisonnable simplement ne marche pas". ([8], p.84). Il faut souligner que Bell est encore trop gentil: l'histoire n'a pas

²³Il existe une variante de l'argument de Bell [31], avec trois particules, et dans laquelle on n'a pas besoin de statistique: un seul évènement suffit pour montrer l'inexistence de ces "instructions". Mais, dans ce cas, l'expérience n'a pas été faite.

²⁴Bell se plaint lui-même de ce que son théorème soit presque systématiquement interprété comme simplement une réfutation des théories de variables cachées, en oubliant les conséquences concernant la localité: "Mon premier article sur le sujet (Physics 1, 135 (1965)) commence par un résumé de l'argument EPR, déduisant de la localité les variables cachées déterministes. Mais les commentateurs ou presque universellement dit que cet article portait de variables cachées déterministes" ([6], p.157). Remarquons au passage que des variables cachées indéterministes ne feraient que compliquer la tâche des particules devant répondre de *la même façon* des deux côtés. Pour une discussion plus détaillée, voir [38].

simplement donné raison aux adversaires d'Einstein. Ceux-ci ne voyaient pas clairement la non-localité présente dans la nature: que “nous ne puissions pas éviter le fait que l'intervention d'un côté ait une influence causale de l'autre” ([6], p. 150) n'est devenu clair qu'avec le résultat de Bell.

Voyons plus en détail ce que la non-localité est réellement. Pour cela, je vais donner d'abord deux exemples de ce qu'elle n'est pas. Premièrement, il y a l'exemple donné par Bell des chaussettes de Mr Bertlmann [6]. Pour illustrer la même idée, imaginons que je coupe en deux une image et que j'envoie par courrier chaque moitié à des correspondants mettons l'un aux Etats-Unis, l'autre en Australie. Ces deux personnes ouvrent simultanément leur courrier; chacune apprend instantanément (étant supposé qu'elles sont au courant de la procédure) quelle moitié de l'image l'autre a reçu. Disons qu'il y a acquisition (instantanée) d'information à distance, mais il n'y a rien de mystérieux. Ce que le résultat de Bell nous dit, c'est que la situation EPR n'est nullement de ce type. Ici, chaque moitié de l'image correspondrait aux instructions dont Bell montre qu'elles n'existent pas.

Prenons un autre exemple, radicalement différent. Imaginons un sorcier ou un magicien qui agit à distance: en manipulant une effigie il influence l'état de santé de la personne représentée par celle-ci.²⁵ Ce genre d'action (imaginaire) à distance a quatre propriétés remarquables:

- 1) elle est instantanée, ou, du moins, comme on est dans l'imaginaire, on peut le supposer;
- 2) elle est individuée: c'est une personne particulière qui est touchée et pas celles qui sont à côté;
- 3) elle est à portée infinie: même si la personne en question se réfugiait sur la lune, elle n'échapperait pas à l'action du sorcier;
- 4) elle permet la transmission de messages: on peut coder un message sous forme d'une suite de 0 et de 1 et l'envoyer en faisant correspondre un “1” à l'action du magicien, pendant une unité de temps, et un “0” à son absence d'action.

Ce qui est extraordinaire avec la non-localité quantique c'est qu'elle a les trois premières propriétés “magiques” *mais pas la quatrième*. Les propriétés deux et trois sont sans doute les plus

²⁵Voir, par exemple, les ouvrages bien connus de mécanique quantique “Les sept boules de cristal” et “Le temple du soleil”, Hergé, éd. Casterman. Il est inutile de dire, mais cela va encore mieux en le disant, que je ne pense nullement que la non-localité exhibée par la physique quantique ait quoique se soit à voir avec la magie, la parapsychologie, le “New Age”, les médecines “holistes” et autres plaisanteries du même genre. Malheureusement, ce n'est pas toujours bien compris. Pour ne donner qu'un exemple, dans un magasin “health food” à New York on trouve une publicité pour un “programme de purification spirituelle” comprenant “une initiative à la Dynamique Quantique”. Celle-ci permettrait de “dissoudre le Karma de la vie passée” ([8] p.6). Pour une bonne critique des pseudo-sciences, voir [15], et surtout [27] sur l'usage abusif de l'expérience EPR par des parapsychologues.

surprenantes: si l'on envoie un grand nombre de paires de particules en parallèle, un appareil de mesure à gauche va influencer l'état de la particule à droite qui est "jumelle" de celle qui est mesurée et non pas les autres. De plus, cette action ne décroît pas en principe avec la distance, contrairement à toutes les forces connues en physique²⁶. Finalement, cette action semble instantanée, en tout cas elle se propage plus vite que la vitesse de la lumière [3]. Mais elle ne permet pas d'envoyer des signaux. La raison en est simple: quelle que soit l'orientation de l'appareil de mesure à gauche, le résultat à droite sera une suite aléatoire de "oui" et de "non". Ce n'est qu'a posteriori qu'on peut comparer les suites de résultats obtenus et constater la présence de corrélations étranges. Le caractère aléatoire des résultats bloque en quelque sorte la transmission de messages (voir [35], [38] pour une discussion plus approfondie).

On ne saurait trop insister sur cet aspect de la situation EPR: ceci la distingue radicalement de toute forme de magie et invalide à l'avance les efforts de ceux qui voudraient voir dans le résultat de Bell une porte ouverte pour une justification scientifique de phénomènes paranormaux.

Mais les autres aspects sont bien là, et ils sont déconcertants: instantanéité, individualité, non-décroissance avec la distance. Du moins, c'est la conclusion qu'on peut tirer aujourd'hui, au vu des résultats expérimentaux.

De plus, il faut se garder de conclure que l'impossibilité d'envoyer des signaux signifie qu'il n'y a pas d'action à distance ni de relation de cause à effet. La notion de cause est compliquée à analyser mais comme le fait remarquer Maudlin [38], les tremblements de terre ou le Big Bang ne sont pas contrôlables et ne permettent donc pas l'envoi de signaux mais ce sont néanmoins des causes ayant certains effets (voir [38], [39] pour une discussion de la notion de cause en relation avec la situation EPR). La notion de signal est trop anthropocentrique pour que la notion de cause puisse lui être réduite.

Quelles sont les réactions des physiciens face au théorème de Bell? Le moins que l'on puisse dire c'est qu'elles varient. A un extrême, H. Stapp déclare que "le théorème de Bell est la plus profonde découverte de la science" [51] et un physicien de Princeton déclare "celui qui n'est pas dérangé par le théorème de Bell doit avoir des cailloux dans la tête" [40]. Mais l'indifférence est néanmoins la réaction la plus répandue. Mermin distingue différents types de physiciens [40]: ceux du premier type sont dérangés par EPR-Bell. La majorité (le type 2) ne le sont pas mais il faut distinguer deux sous-variétés. Ceux de type 2a expliquent pourquoi cela ne les dérange pas. Leurs explications tendent à être entièrement à côté de la question ou à contenir des assertions physiques dont on peut montrer qu'elles sont fausses. Ceux du type 2b ne sont pas dérangés et refusent de dire pourquoi. Leur position est inattaquable (il existe encore une variante du type 2b qui disent

²⁶Pourvu que les particules soient isolées, ce qui est impossible en pratique pour de grandes distances. Par ailleurs, il ne s'agit pas d'une "force" mais d'un phénomène nouveau.

que Bohr a tout expliqué mais refusent de dire comment).

Les explications reviennent toujours, du moins d'après mon expérience personnelle, à une des deux positions suivantes: soit on déclare qu'il n'y a pas d'action à distance parce qu'on apprend simplement quelque chose sur la particule à droite en effectuant la mesure à gauche. Born adoptait cette position: "Le fond de la différence entre Einstein et moi était l'axiome que des événements se produisant à des endroits différents A et B sont indépendants l'un de l'autre en ce sens que l'observation de la situation en A ne peut rien nous *apprendre* sur la situation en B" [14]. Bell ajoute correctement: "l'incompréhension était totale. Einstein n'avait aucune difficulté à admettre que des situations à des endroits différents soient corrélées. Ce qu'il n'acceptait pas c'est que l'action en un endroit puisse influencer, immédiatement, la situation en un autre endroit". [6]²⁷. L'idée de Born, quand on la rend précise, mène justement aux "variables cachées" dont Bell montre que la simple existence est impossible.

La deuxième réponse revient à dire que la mécanique quantique explique le phénomène et qu'elle est complète et locale. D'abord, comme le dit Bell "la mécanique quantique n'explique pas vraiment; en fait, les pères fondateurs de la mécanique quantique se flattaient plutôt de renoncer à l'idée d'explication" ([17], p.51). Evidemment, la mécanique quantique *prédit* les corrélations parfaites et imparfaites qui interviennent dans le raisonnement EPR-Bell. Mais est-ce que prédire = expliquer? A mon sens, c'est de nouveau tomber dans une confusion philosophique que d'identifier ces deux notions. Même si la notion d'explication est notoirement difficile à expliciter, chacun en possède une idée intuitive suffisante pour saisir la distinction: imaginons un vrai magicien agissant vraiment à distance, d'une façon qui défierait toutes les lois de la physique, mais qui pourrait parfaitement prédire quand ses pouvoirs agissent. Personne ne prendrait cette prédiction pour une explication.

Néanmoins, on peut donner une explication du phénomène EPR-Bell dans le cadre de la mécanique quantique (voir Appendice 2) (dans la situation envisagée par Einstein, Podolski et Rosen). On prend la mécanique quantique au sérieux (c'est-à-dire en donnant à la fonction d'onde un statut physique et pas épistémique et en prenant l'opération R comme réelle) et elle est manifestement non-locale (du moins R l'est dans l'expérience EPR).

Toute cette discussion montre que l'ambiguïté sur le statut de la fonction d'onde (moyen de calcul, objet réel?) entretenue par la tradition positiviste a rendu difficile la compréhension de la non-localité. Si la fonction d'onde est purement épistémique, que les opérations faites sur elle soient "non-locales" n'est évidemment pas un problème. Mais si elle n'est pas réelle, qu'est-ce qui est réel? Quelle que soit la réponse, on n'échappe pas à la non-localité; celle-ci est manifeste si

²⁷Et Bell ajoute "Ceci illustre la difficulté qu'il y a à mettre de côté ses préjugés et à écouter ce qui est réellement dit. Ceci doit aussi vous encourager *vous*, cher auditeur, à écouter un peu mieux."

la fonction d'onde est réelle et elle est une conséquence du raisonnement EPR-Bell si la fonction d'onde est épistémique.

Comme cette action à distance est instantanée ou du moins plus rapide que la vitesse de la lumière, n'entre-t-elle pas en contradiction avec la relativité ? C'est une question assez complexe que je ne vais pas développer (voir [38] pour une discussion approfondie de ce problème) mais il est clair qu'il y a un problème. Comme le dit Penrose: "Il y a essentiellement un conflit entre notre image spatio-temporelle de la réalité physique - même l'image quantique non-locale qui est correcte - et la relativité restreinte !" [47]. Mais comme l'inégalité de Bell est interprétée en général de façon incorrecte, le problème du conflit (subtil mais réel) non-localité / relativité n'apparaît même pas. Néanmoins, il faut souligner que la simple existence d'une théorie quantique et relativiste des champs (dont les prédictions sont les plus spectaculairement vérifiées par l'expérience dans toute l'histoire des sciences) ne permet pas de nier le problème. En effet, l'opération R n'est nulle part traitée de façon relativiste. Et c'est via cette opération que la non-localité s'introduit de façon explicite dans le formalisme quantique.

Au vu du caractère contre-intuitif de la non-localité et du conflit avec la relativité, il est tentant de reprendre l'argument, de l'analyser en détail et de voir s'il n'y a pas une échappatoire. On peut dire que tout ou presque a été essayé (voir par exemple [41] ou [16] pour différentes tentatives et Maudlin [38] pour une discussion critique).

Dans [6], Bell conclut qu'il y a quatre possibilités:

- 1) que les expériences donnent tort à la mécanique quantique. Mais les résultats ne vont pas du tout dans ce sens.
- 2) Admettre la non-localité.
- 3) Considérer que la position des appareils de mesure n'est pas réellement indépendante des particules. En clair, cela revient à dire que les particules emportent avec elles des instructions mais pas pour toutes les questions à la fois. Seulement pour celle que l'on va poser. Mais comment le savent-elles ? La réponse tient dans ce qu'on appelle parfois le "super-déterminisme": la liberté des expérimentateurs qui croient pouvoir orienter les détecteurs à leur guise est une illusion. Non seulement le libre-arbitre est une illusion (là n'est pas le problème), mais l'orientation des détecteurs qui peut aussi être déterminée par les résultats de deux loteries "indépendantes" est subtilement corrélée avec l'état des particules envoyées. Comme "tout", expérimentateurs, particules, loteries, etc..., vient d'une origine commune (le "Big Bang"), en principe cette position est tenable bien qu'au moins aussi étrange que la non-localité. De plus, si on y réfléchit, ce genre d'explication peut être invoqué comme substitut à n'importe quelle théorie physique. Si une loi ne me plaît pas, je peux toujours

déclarer qu'une autre loi est valable, mais qu'il y a une conspiration dans les conditions initiales de l'univers qui m'induit en erreur (systématiquement). Remarquons en passant que ce super-déterminisme est suggéré comme alternative aux problèmes posés par une théorie (la mécanique quantique) qui était supposée introduire un indéterminisme radical dans les lois de la nature; cette ironie devrait donner à réfléchir à tous ceux qui proclament régulièrement la mort du déterminisme.

- 4) Il n'y a aucune réalité en dessous d'un niveau "classique" "macroscopique". A mon sens, Bell commet là une erreur. Tout le problème vient de corrélations entre résultats de mesures (faites par des appareils, par définition, macroscopiques). Au départ, on ne suppose ni l'existence de particules, ni de photons, ni d'aucun de leurs attributs. Tout le problème vient de ce que les corrélations (macroscopiques) n'admettent aucune explication locale.

Il est intéressant de remarquer que Feynman [25], lorsqu'il discute l'inégalité de Bell, suggère deux possibilités: soit le futur influence le passé (ce qui, dans une théorie relativiste, est essentiellement équivalent à la non-localité), c'est-à-dire que les particules "s'ajustent" en fonction de l'orientation des détecteurs qu'ils vont rencontrer. Soit le "super-déterminisme". Et il conclut: "les physiciens n'ont pas de bon point de vue". Bohm, par contre, n'est pas impressionné outre mesure: "Je suis tout-à-fait prêt à abandonner la localité. Je pense que c'est une hypothèse arbitraire. Au cours des derniers siècles, elle a eu un poids énorme. Mais si vous remontez 1000 ou 2000 ans en arrière, presque tout le monde pensait de façon non-locale" ([17], p.125). Peut-être, mais comme l'écrit Redhead, "Nos théories, dit Popper, sont des "filets que nous construisons pour attraper le monde". Nous devons nous rendre compte que la mécanique quantique nous a amené un drôle de poisson" ([49], p.169).

5 Solutions possibles au problème de la mesure

Bell distingue "six mondes possibles", c'est-à-dire six attitudes ou solutions possibles. Il en range trois dans la catégorie "romantique" et trois dans la catégorie "non-romantique". La première attitude, non-romantique, est le pragmatisme. Comme la difficulté liée à la théorie quantique n'a aucune conséquence pratique (on sait bien ce qu'est une mesure), pourquoi s'en faire? Cette position, si elle vraiment prise au sérieux, c'est-à-dire en reconnaissant par ailleurs que le problème existe et en ne le dissimulant pas derrière un discours philosophique, est fort attrayante. Néanmoins, elle a ses limites. L'activité des physiciens théoriciens est tellement centrée sur les principes (particules élémentaires, big bang, trous noirs) qu'une attitude pragmatiste chez eux est pour le moins bizarre. De plus on rencontre parfois certains problèmes qui sont liés aux fondements

de la mécanique quantique: si l'on étudie l'univers en tant que tel (par exemple, dans la cosmologie quantique) où se situe l'observateur? Si l'on néglige la réduction de la fonction d'onde (considérée comme non-fondamentale) comment réconcilier la mécanique quantique avec le chaos (voir [21])?

La deuxième solution, romantique celle-là, est la position de Bohr discutée dans la section 3. Elle est "romantique" parce qu'elle élève la contradiction presque au niveau d'un principe et souligne, à travers la notion de "complémentarité", notre incapacité à comprendre objectivement le monde. L'appareil de mesure est composé de particules qui obéissent aux lois quantiques, néanmoins lui est radicalement classique. Bohr semble-t-il aimait des aphorisme du genre "l'opposé d'une vérité profonde est aussi une vérité profonde" ou "la vérité et la clarté sont complémentaires" ([7], p.190).

Une autre solution romantique consiste à placer l'opération R purement et simplement au niveau de la conscience. Le monde physique obéirait strictement à l'équation de Schrödinger, il serait entièrement décrit par sa fonction d'onde et donc toutes les superpositions macroscopiques (chat vivant et mort) s'y trouveraient si ce n'était l'action d'une conscience humaine immatérielle qui intervient pour réduire la fonction d'onde. Evidemment, pour adopter ce point de vue, il faut supposer que la conscience est ontologiquement distincte du cerveau, ce qui pose au moins autant de problèmes que cela n'en résoud.

La dernière solution romantique consiste à rejeter purement et simplement l'opération R . La fonction d'onde a un statut objectif, elle donne une description complète du système physique et son évolution est toujours gouvernée par l'équation de Schrödinger. On est obligé alors d'introduire des univers parallèles: chaque fois qu'une mesure est faite, tous les résultats possibles coexistent, mais dans des univers différents. Donc, à chaque mesure, il se crée autant d'univers qu'il y a de résultats possibles de cette mesure, et dans chacun d'entre eux, il y a un de ces résultats. Evidemment, cette théorie est pour le moins bizarre: pensons au nombre d'univers qui coexistent. En un sens, c'est l'attitude la plus extrêmement réaliste qu'on puisse imaginer: postuler, uniquement pour des raisons de cohérence interne de la théorie, cette multitude de mondes est certainement la meilleure façon de provoquer Occam à aiguiser son rasoir. Par ailleurs, le problème de savoir ce qui définit vraiment une mesure subsiste. Est-ce que les univers se démultiplient uniquement lors d'une mesure en laboratoire, ou également au cours d'autres processus physiques?²⁸

On ne saurait trop insister sur le fait qu'il faut absolument que ces univers parallèles existent vraiment pour que le problème soit résolu. En effet, on entend parfois l'objection "que voulez-vous dire par "existent"?" . Probablement, les gens qui posent ce genre de questions savent ce qu'ils veulent dire par "exister" en ce qui concerne le monde dans lequel nous vivons (sinon on peut

²⁸Peut-on vraiment formuler cette théorie de façon cohérente? Voir Bell ([7], chapitres 11 et 15) et Albert [1] pour une critique plus approfondie de cette "solution". Albert suggère que, pour la rendre cohérente, on devrait introduire des "esprits multiples".

arrêter la discussion). Et bien, il faut que les autres mondes existent exactement de la même façon. En particulier, on ne peut pas considérer les autres mondes comme des artifices mathématiques ou quelque chose comme ça. Sinon, la difficulté reste entière: l'opération R distingue le monde réel (unique) des autres.²⁹

Si on relègue cette idée dans le domaine de la science-fiction on arrive à une deuxième solution non-romantique, c'est-à-dire essayer de faire en sorte que l'opération R soit réductible à U . Mais, comme on l'a vu, c'est impossible en laissant la théorie telle quelle (cfr appendice 1). La seule possibilité serait de modifier U et de la remplacer par une opération non-linéaire ou stochastique. Celle-ci devrait avoir deux propriétés: être suffisamment bien approximée par U lorsqu'on discute d'un petit nombre de particules, de façon à ce que les prédictions de la mécanique quantique restent vraies pour la nouvelle théorie, et se ramener, lorsqu'on parle d'un grand nombre de particules (par exemple, un appareil de mesure), essentiellement à l'opération R . Divers auteurs ont fait des tentatives en ce sens, mais aucune ne semble être satisfaisante. Vu la difficulté mathématique inhérente au traitement d'équations non-linéaires, cette situation de fait ne peut pas être considérée comme un argument très fort contre cette suggestion: comme la plupart des physiciens considèrent la mécanique quantique ordinaire comme acceptable, peu d'essais, en fin de compte, ont été faits. Certains invoquent l'élégance de l'équation de Schrödinger (parce que linéaire) contre cette approche. Outre que je ne vois pas bien pourquoi des critères esthétiques, forcément subjectifs, doivent jouer un tel rôle en science (surtout lorsqu'on essaye d'échapper à une incohérence - suprême inélégance), on peut aussi répondre, avec Penrose: "Néanmoins, je pense qu'il serait surprenant si la théorie quantique ne devait pas subir un profond changement dans l'avenir - vers quelque chose dont cette linéarité serait seulement une approximation. Il y a certainement des précédents de ce genre de changements. La puissance et l'élégance de la théorie de la gravitation universelle de Newton est en grande partie due au fait que les forces dans cette théorie s'additionnent linéairement. Mais, avec la relativité générale d'Einstein, on voit que cette linéarité est seulement une approximation - et l'élégance de la théorie d'Einstein dépasse même celle de la théorie de Newton" [47]. Comme une telle théorie non-linéaire n'existe pas pour le moment, il faut signaler qu'on peut formuler une théorie stochastique, où la fonction d'onde est réduite aléatoirement, avec une faible probabilité pour un système microscopique, à tout moment. Mais quand on considère un grand nombre de particules, comme dans un appareil de mesure, la probabilité d'une réduction devient grande. Dans sa formulation actuelle, la théorie paraît fort ad hoc (les paramètres qui caractérisent cette réduction probabiliste sont posés de façon à être en ac-

²⁹Bell: "Il est facile de comprendre l'attraction des trois mondes romantiques pour les journalistes qui essayent d'attirer l'attention de l'homme de la rue. L'opposé d'une vérité est aussi une vérité! Les scientifiques disent que la matière est impossible sans l'esprit ! Tous les mondes possibles sont des mondes réels !" ([7], p.193-194).

cord avec l'expérience), mais ce n'est pas une mince qualité que de rendre compte des phénomènes quantiques de façon précise et sans faire appel à aucun principe philosophique. Dans cette théorie, appelée "GRW" d'après les noms de ses auteurs [29], il n'y a aucun mystère lors de la mesure: simplement les "sauts quantiques" qui se produisent partout et tout le temps sont amplifiés à cause du caractère nécessairement macroscopique de l'appareil de mesure.

Finalement, une troisième possibilité non romantique consiste à considérer R comme non fondamental, mais sans changer U . Mais comme alors R ne peut se réduire à U , il faut bien introduire autre chose dans la théorie que la fonction d'onde. On appelle "variable cachée" toute quantité introduite dans la description du système et qui ne se réduit pas à la fonction d'onde. Le théorème de Bell rend en général les gens sceptiques quant à la possibilité d'introduire de telles variables. De plus, on cite encore, parfois, le théorème de von Neumann qui tentait de démontrer l'impossibilité d'introduire des variables cachées tout en conservant les prédictions de la mécanique quantique. Pour ce qui est de l'intérêt de ce théorème, Bell en a fait une analyse détaillée ([7], chapitres 1, 4 et 17), dont la conclusion est exprimée en termes peu charitables: "La preuve de von Neumann, si vous la regardez vraiment, elle tombe en morceaux entre vos mains. Ce n'est pas simplement faux, c'est idiot!" [4] La violence du propos doit être située dans le contexte: comment se fait-il que cet argument, dans lequel il n'y a effectivement rien, ait été pris au sérieux par tant de physiciens et de philosophes, pendant tellement longtemps, même après qu'il ait été réfuté en détail? C'est une question intéressante pour les historiens et les sociologues des sciences [48].

Bell explique qu'il était toujours préoccupé par l'aspect "subjectif" de la mécanique quantique, à savoir la nécessité d'introduire l'observateur dans la théorie (ou l'opération R). Il connaissait aussi le théorème de von Neumann qui soi-disant montrait qu'on ne pouvait faire mieux. Mais, en 1952, il vit l'impossible se réaliser. David Bohm, reprenant les idées de de Broglie, introduisait des "variables cachées", et donnait une théorie "en tous points équivalente à la mécanique quantique d'un point de vue expérimental, mais qui néanmoins était non-ambigue et réaliste" ([17], p.56). Dans la théorie de de Broglie- Bohm, l'état complet d'un système est donné par la fonction d'onde et par les positions des particules (cfr appendice 3). L'évolution de la fonction d'onde est donnée par l'équation de Schrödinger, c'est-à-dire par U , sans aucun changement. La fonction d'onde, à son tour, guide les particules. On peut la penser comme une espèce de vitesse généralisée. La théorie est donc parfaitement déterministe. Néanmoins, on peut montrer que, si la distribution statistique des particules à un instant donné est identique à celle prédite par la mécanique quantique, alors il en sera ainsi pour tous les temps ultérieurs. De cette façon, on retrouve l'accord empirique entre cette théorie et les prédictions de la mécanique quantique. L'opération R perd son statut fondamental: lors d'une mesure, on apprend quelque chose sur le système (tout en le modifiant), mais de ce point de vue, le statut des probabilités n'est pas plus surprenant que dans des situations

classiques (un lancer de dé, par exemple).

Comment la théorie de Bohm échappe-t-elle aux différents théorèmes d'impossibilité? C'est d'une simplicité déroutante: les "variables cachées" ici sont simplement les positions des particules. C'est une théorie de la matière en mouvement. Jamais aucun argument n'a été avancé pour montrer que l'introduction de ces variables-là était impossible. C'est pourquoi tous les discours du genre "la lune n'est pas là quand on ne la regarde pas"³⁰ ou encore "il n'y a rien de réel" ne sont strictement basés sur rien. Ce que l'argument de Bell nous dit c'est qu'il est impossible, en général, d'introduire des variables cachées de spin par exemple (les instructions de la section 4). C'est à cette impossibilité que les discours sur la "disparition du réel" font (mal) allusion, mais c'est tout autre chose que les positions. Supposer que ces variables de spin doivent nécessairement exister avant la "mesure" revient à faire preuve de réalisme naïf et à négliger le rôle "actif" de l'appareil de mesure.³¹ C'est un des grands mérites de la théorie de Bohm que de montrer explicitement pourquoi ces autres variables cachées ne peuvent pas exister et pourquoi, conformément à l'intuition de Bohr, leur valeur est "déterminée" par la mesure. Néanmoins, à la différence de Bohr, on n'a pas affaire ici à un postulat imposé de l'extérieur mais bien à une conséquence des équations de la théorie. Par ailleurs, toute "logique quantique" devient manifestement inutile une fois que le rôle de l'appareil de mesure est bien compris.

En résumé, il y a au moins deux approches alternatives qui s'offrent à qui veut comprendre la mécanique quantique comme représentant plus qu'un algorithme permettant de prédire certains résultats d'expériences. L'une, modifier l'équation de Schrödinger, est essentiellement à l'état de suggestion. L'autre, introduire des "variables cachées" (c'est-à-dire simplement les positions des particules), a l'avantage d'être une théorie parfaitement développée, et qui rend compte de tous les faits expérimentaux invoqués pour justifier la mécanique quantique non-relativiste. Bien que ce soit en partie une question de goût, la théorie de Bohm est aussi naturelle et élégante que n'importe quelle autre théorie fondamentale en physique. Aucun problème d'inconsistance ou de subjectivisme ne subsiste, et la fonction d'onde acquiert une signification physique bien précise.

Bien entendu, cette théorie est non-locale. Le théorème de Bell nous montre que toute théorie au sens propre du terme aura cette propriété. La non-localité doit donc être vue comme une qualité de la théorie de Bohm et non comme un défaut. Mais, évidemment, le conflit avec la relativité se pose et n'est pas résolu (voir Appendice 3). Avant de tirer des conclusions hâtives de cette situation, pensons à ce qui a été accompli, dans le cadre non-relativiste, et qui allait à l'encontre des préjugés les mieux établis. D'autre part, le problème de la mesure n'est même jamais formulé d'un point de

³⁰L'origine de cette phrase remonte à Einstein, qui, excédé par la référence constante à l'observation, a dit à Pais: "Croyez-vous vraiment que la lune n'est là que quand vous la regardez?" ([46], p.907).

³¹Voir [22] pour une critique de ce réalisme naïf.

vue relativiste. Admettons finalement que l'on envisage la théorie de Bohm uniquement comme théorie non-relativiste. Aucune objection sérieuse n'a jamais été soulevée dans ce cadre-là. Or, clairement ici le problème de la mesure n'existe plus. Dès lors, il faudrait dire que le problème de la mécanique quantique est le problème de l'invariance sous le groupe de Lorentz, puisqu'à part cela, la théorie de Bohm résoud tous les problèmes. Ce serait déjà un grand changement de perspective que de poser ainsi la question.

En conclusion, pour citer Albert, la théorie de Bohm est une théorie sur le mouvement des corps matériels qui ne contient "rien de cryptique, rien de métaphysiquement neuf, rien d'ambigu, rien d'inexplicite, rien de vague, rien d'incompréhensible, rien d'inexact, rien de subtil, une théorie dans laquelle toutes les questions ont un sens et ont une réponse et où il n'y a jamais deux propriétés de quoique ce soit qui sont "incompatibles" l'une avec l'autre". ([1], p.169). Ajoutons, avec moins de lyrisme, que cette théorie rend précise l'intuition géniale de Bohr concernant le rôle de l'appareil de mesure, donne un sens physique clair à la fonction d'onde et enlève tout mystère à l'origine des probabilités en mécanique quantique. De plus, elle fait tout cela en ajoutant une ligne (l'équation (2) de l'appendice 3) au formalisme habituel, et elle rend ainsi la théorie parfaitement déterministe, contredisant par là toutes les "démonstrations" de l'impossibilité d'une telle entreprise. Pourquoi cette théorie, due à un des plus grands physiciens de notre temps, est pratiquement universellement ignorée est une énigme que les historiens des sciences des siècles futurs auront à résoudre.

6 Conclusions

Dans les années 20 et 30 de ce siècle, une philosophie à tendance sceptique a dominé l'atmosphère dans laquelle la mécanique quantique s'est développée. Cette philosophie mettait au centre de ses préoccupations l'observation, les mesures ou les données immédiates des sens. Toute tentative visant à construire une théorie objective du monde étaient jugées avec méfiance, et étaient suspectées de vouloir revenir à la métaphysique médiévale discréditée. Il faut souligner que, vu la bizarrerie des phénomènes observés à l'époque, vu le caractère extraordinairement neuf du formalisme quantique et le succès non moins extraordinaire rencontré par ce formalisme dans la prédiction de ces phénomènes, il était normal, et jusqu'à un certain point souhaitable, que cette philosophie ait été l'arrière-pensée de physiciens de cette époque.

Mais ce qui est bon pour un temps ne l'est pas nécessairement pour un autre. De partiellement progressiste qu'elle était, la philosophie quantique est devenue obscurantiste. Déjà à l'époque des pères fondateurs, Einstein, Schrödinger et d'autres voyaient que si l'on prenait à la lettre certains de ses slogans ("le rôle de la science se limite à prédire les résultats de mesure") on abandonnait l'essentiel de l'entreprise scientifique. Mettre l'observateur au centre de tout ("l'homme est acteur

et non pas spectateur dans le théâtre de la vie” [13]), c’était revenir aux illusions anthropocentriques du discours pré-scientifique. L’absence d’une formulation précise de la mécanique quantique encourage des discours confus et parfois franchement irrationnels.

Par ailleurs, le théorème de Bell est une bonne illustration des vertus du réalisme. Pauli comparait le problème de savoir si quelque chose dont on ne peut rien connaître existe néanmoins avec la vieille question du nombre d’anges qui peuvent s’asseoir sur la pointe d’une aiguille et il pensait que les questions d’Einstein étaient de ce type-là. ([42], p.81). Bell par contre connaissait la théorie de Bohm, la trouvait satisfaisante mais était préoccupé par son caractère non-local. Il voulait voir s’il y avait moyen de faire mieux ou si toute théorie concernant le monde réel aurait nécessairement cet aspect extraordinaire. Mais c’est en posant ce genre de questions “métaphysiques” qu’il est parvenu à son résultat.

Revenant à la théorie de Bohm (et à la théorie GRW), elle montre qu’il faut se garder d’être dogmatique avec les théorèmes d’impossibilité et de proclamer trop vite qu’on a atteint les limites de notre compréhension rationnelle du monde. “Qu’on l’aime ou non, elle est un contrexemple parfait à l’idée que le vague, la subjectivité, l’indéterminisme nous sont imposés par les faits expérimentaux de la mécanique quantique non-relativiste” [7].

Je laisserai le mot de la fin à un philosophe, à Sénèque qui, parlant des comètes, exprimait son optimisme dans l’avenir des connaissances humaines: “Le jour viendra que, par une étude suivie de plusieurs siècles, les choses actuellement cachées paraîtront avec évidence, et la postérité s’étonnera que des vérités si claires nous aient échappé.”