

Chapitre 2 – Une solution par la physique ? La décohérence⁴⁴ --

Guido Bacciagaluppi⁴⁵

Traduit de l'anglais par Soazig Le Bihan

1. Introduction

Les phénomènes d'interférence constituent un aspect central bien connu de la mécanique quantique. L'expérience des fentes de Young en est l'exemple le plus fameux. Dans certains cas cependant, les effets d'interférence sont supprimés, soit artificiellement soit spontanément. La *théorie de la décohérence* est précisément l'étude des interactions (spontanées), entre un système et son environnement, qui ont pour conséquence la suppression des interférences. Nous préciserons ce que nous entendons par là dans la Section 2, où nous présentons le concept de suppression d'interférence et donnons un aperçu de la théorie, en insistant sur les aspects pertinents pour la suite de l'article (nous limiterons notre propos à la mécanique quantique des particules non-relativistes).⁴⁶ Notons qu'il est un autre

⁴⁴ Ce chapitre est inspiré de mon article pour la Stanford Encyclopedia of Philosophy (Bacciagaluppi 2003).

⁴⁵ Department of Philosophy, University of Aberdeen, Old Brewery, High Street, Aberdeen, AB24 3UB, U.K., e-mail: ph1138@abdn.ac.uk

⁴⁶ Pour autant que la décohérence fournit seulement des 'règles de supersélection efficaces' (voir Section 2.2), ce cadre standard sera suffisant. Dans le cas où, en revanche, la décohérence peut fournir des règles de supersélection *exactes* (comme peut le suggérer notre discussion de la charge dans la Section 5 ci-dessous), il est possible qu'un changement de cadre soit nécessaire. Le cadre approprié dans ce cas est généralement celui de la mécanique quantique algébrique. Il est cependant impossible de juger du rôle de la décohérence dans le cadre de la mécanique quantique algébrique avant que ne soient discutées les implications de cette théorie au niveau de l'interprétation de façon systématique. (Mes remerciements à Hans Primas sur ce point.)

domaine que nous ne considérerons pas en détail, savoir celui des histoires décohérentes, qui est en partie lié à notre sujet, mais qui est fondé sur une définition plus abstraite de la notion de perte d'interférence.

Il est de nombreuses questions pour lesquelles la décohérence est pertinente (ou du moins est dite être pertinente), depuis le problème de la mesure jusqu'à celui de la flèche du temps, mais elle l'est particulièrement quant à la question de savoir comment le 'monde classique' peut émerger de la mécanique quantique. Dans ce chapitre nous traiterons principalement du rôle que peut jouer la décohérence dans la résolution des problèmes les plus importants et le développement des principales approches en fondements de la mécanique quantique. Plus précisément, la Section 3 est vouée à l'analyse de la thèse selon laquelle la décohérence résout le problème de la mesure. Y sont également discutées les questions de l'élargissement du problème du fait de l'inclusion des interactions avec l'environnement, de l'émergence de la classicalité, et de la pertinence d'une discussion de la décohérence en relation avec les différentes approches en fondements la mécanique quantique. La Section 4 étudie ensuite les relations entre la décohérence et certaines des principales approches en fondements de la mécanique quantique. Enfin, dans la Section 5, nous évoquons des possibles applications de la décohérence qui pourrait lui faire jouer un rôle plus important encore.

La suppression des interférences a été bien entendu le sujet, depuis les débuts de la mécanique quantique, de nombreux articles, tels que l'analyse des trajectoires des particules alpha de Mott (1929). On peut raisonnablement dire que la décohérence devient un sujet indépendant avec les travaux de H.D. Zeh au début des années 1970 (Zeh 1970, 1973). Les articles de W. Zurek (Zurek 1981, 1982) dans les années 1980 eurent une influence comparable. Certains de ces premiers exemples de décohérence (par exemple, la suppression d'interférence entre les états gauche/droit d'une molécule) sont plus accessibles du point de vue mathématique, que certains exemples plus récents. La présentation de la théorie par Zurek dans *Physics Today* (1991) offre une introduction concise dont la lecture est relativement aisée. Cette publication a donné lieu à une discussion des questions les plus controversées, au

travers de plusieurs lettres publiées avec les réponses de Zurek (1993). Parmi les présentations plus récentes du sujet, on trouve Zeh (1995), qui discute longuement de la question de l'interprétation de la décohérence, Zurek (2003), ainsi que les livres sur la décohérence de Guilini et al. (1996) et de Schlosshauer (2007).

2. Décohérence : les fondamentaux

2.1 Interférence et suppression d'interférence

L'expérience des fentes de Young offre un exemple paradigmatique d'une expérience d'*interférence*. L'expérience consiste à faire passer des électrons, ou d'autres particules, au travers d'un premier écran comportant deux fentes étroites, avant de les collecter sur un second écran. On se demande alors quelle est la distribution de probabilité de détection sur la surface du second écran. Pour calculer cette distribution, il suffit de prendre les probabilités de passage des électrons au travers des fentes, de les multiplier par les probabilités conditionnelles de détection sur le second écran relativement au passage au travers de chacune des fentes, et enfin de faire la somme sur les deux fentes.⁴⁷ Un 'terme d'interférence' apparaît dans l'expression de la probabilité, terme qui dépend des *deux* composantes d'onde passant au travers de chacune des fentes.

L'expérience montre ainsi que la description correcte des électrons en termes de fonctions d'onde quantique est bien celle dans laquelle l'onde passe au travers des deux fentes. L'état quantique de l'électron n'est donné ni par une onde qui passerait par la fente du haut, ni par une onde qui passerait par la fente du bas, ni même par une mesure de probabilité d'ignorance.

⁴⁷ Notons que ces probabilités peuvent être bien définies en mécanique quantique, mais ceci dans le contexte d'une expérience différente, à savoir l'expérience comportant un mécanisme de détection au niveau des fentes.

Il existe cependant des situations où ce terme d'interférence n'apparaît pas, i.e. où les formules de probabilités classiques s'appliquent. C'est le cas par exemple quand on procède à la détection des électrons au niveau des fentes, et ceci que l'on croit ou non que toute mesure est associée à une 'réelle' réduction du paquet d'onde (i.e. qu'une seule composante survit après la mesure et poursuit son chemin jusqu'à l'écran). La disparition du terme d'interférence peut cependant être aussi spontanée, et encore une fois même si aucune 'réelle' réduction du paquet d'onde n'est supposée avoir lieu, dans le cas où d'autres systèmes (disons, un nombre suffisant de particules cosmiques se diffusant depuis l'électron) interagissent d'une certaine façon avec l'onde entre son passage par les fentes et son arrivée sur l'écran. Dans ce cas, le terme d'interférence n'apparaît pas, du fait que l'électron est devenu *intriqué* avec les particules dispersées.⁴⁸ La relation de phase entre les deux composantes responsables des interférences n'est bien définie qu'au niveau d'un système plus large, composé de l'électron et des particules dispersées, et ne peut produire d'interférences que dans le cadre d'une expérience incluant ce dernier. Les probabilités de résultats de la mesure sont calculées *comme si* la fonction d'onde s'était réduite à l'une ou l'autre des deux composantes, et les relations de phase sont simplement distribuées au niveau du système plus large.⁴⁹

C'est ce phénomène de suppression d'interférence du fait d'interactions particulières avec l'environnement que nous appelons 'suppression d'interférence', et qui est l'objet d'étude de la théorie de la décohérence. Pour être complets, il nous faut mentionner le concept lié mais distinct d'*histoires décohérentes* (ou *consistantes*). La décohérence, au sens de ce formalisme abstrait, est définie simplement par la

⁴⁸ Il est plus réaliste de dire qu'au cours de chacune des diffusions, l'électron se couple avec les états non-orthogonaux de l'environnement, ce qui provoque une suppression partielle des interférences. Ceci dit, des diffusions à répétition supprimeront les interférences de façon très efficace.

⁴⁹ Malheureusement, cette distinction entre réduction 'réelle' (que ce soit ou non un processus qui ait lieu dans la nature) et réduction 'comme si' est souvent perdue de vue, ce qui provoque des confusions conceptuelles : pour un discussion sur ce point, voir par exemple Pearle (1997), ainsi que Zeh (1995, pp. 28-29).

condition suivante : que les probabilités (quantiques) des composantes d'onde à un instant donné soit calculables à partir des probabilités des composantes d'onde à un instant passé et des probabilités conditionnelles (quantiques), selon le calcul standard classique, i.e. comme s'il y avait eu réduction du paquet d'onde. La question de savoir si ce formalisme constitue une approche indépendante est l'objet de controverses que nous laissons de côté. Le formalisme en lui-même est neutre du point de vue de l'interprétation et est très utile pour décrire les situations de suppression d'interférence. En effet, la définition abstraite offerte a le mérite de mettre au jour deux éléments conceptuels essentiels à l'idée de la décohérence et sur lequel nous insisterons dans la suite : premièrement, que les composantes d'onde peuvent être ré-identifiées au cours du temps, and deuxièmement qu'une telle ré-identification permet d'identifier formellement des 'trajectoires' pour le système.⁵⁰

2.2 Aspects de la décohérence

La *théorie de la décohérence* (appelée aussi parfois décohérence 'dynamique') est l'étude des interactions concrètes et spontanées qui ont pour conséquence la suppression d'interférence.

Les modèles offerts pour de telles interactions présentent plusieurs aspects intéressants (bien que de tels aspects ne soient pas communs à tous les modèles) :

- La suppression d'interférence peut se produire extrêmement rapidement, selon le système et l'environnement considéré.⁵¹
- L'environnement tend à se coupler avec un ensemble d'états « préférés », et à supprimer les interférences entre les membres de ce dernier, que ce soit un ensemble discret (comme les états gauche et droits dans les modèles de molécules chirales) ou un ensemble continu (comme les états cohérents d'un oscillateur harmonique).

⁵⁰ La notion de 'trajectoire' est comprise ici au sens de la théorie stochastique classique. Pour plus de détails sur l'approche en termes d'histoires décohérentes, voir l'article-revue de Halliwell (1995).

⁵¹ Voir la note suivant pour un exemple numérique.

- Ces états préférés peuvent être caractérisés en fonction de leur ‘robustesse’ ou ‘stabilité’ quand aux interactions avec l’environnement. En gros, lorsque le système s’intrique avec l’environnement, les états entre lesquels les interférences sont supprimées sont ceux qui s’intriquent *le moins* avec l’environnement au cours des interactions suivantes. Plusieurs autres aspects, liés les uns aux autres, de la décohérence, découlent de ce point.
- Premièrement, on peut fournir une représentation intuitive de l’interaction entre le système et l’environnement au moyen d’une analogie avec une interaction de mesure : l’environnement ‘contrôle’ le système, ou procède à la ‘mesure’ (plus précisément, il fait que le système est soumis à une interaction similaire à ce qui se passe lors d’une mesure) des états préférés. L’analogie avec une mesure quantique idéale standard sera très bonne dans le cas d’une molécule chirale. En revanche, dans le cas des états cohérents de l’oscillateur harmonique, il faudra penser plutôt à des mesures approximatives de position (ou en fait, à une mesure approximative jointe de la position et de la quantité de mouvement, du fait que l’environnement contient également de l’information concernant le temps de vol).
- Deuxièmement, la robustesse des états préférés est liée au fait que l’information les concernant est stockée de façon redondante dans l’environnement (disons du fait que le chat de Schrödinger a interagi avec un grand nombre de particules dispersées – photons, molécules d’air, poussière). Un observateur peut ensuite accéder à cette information sans perturber le système : nous mesurons (quelque soit l’interprétation que nous donnons à ce terme) si le chat est vivant ou mort en interceptant sur notre rétine une petite fraction de la lumière qui a interagi avec le chat.
- Troisièmement, on dit souvent dans ce contexte que la décohérence induit des ‘règles de supersélection effectives induites’. Le concept de règle de supersélection (stricte) requiert que le formalisme de la mécanique quantique soit généralisé, et fait référence au fait qu’il existe des observables – dit ‘classiques’ en termes techniques – qui *commutent* avec tous les

observables (pour une synthèse, voir Wightman 1995). Intuitivement, ces observables sont infiniment robustes, puisqu'aucune interaction ne peut les perturber (du moins pour autant que l'on considère l'Hamiltonien d'interaction comme un observable). Par règle de supersélection induites, on veut dire que, par une analogie grossière, certains observables (e.g. la chiralité) ne seront pas perturbés par les interactions qui, de fait, ont lieu. (Voir aussi les commentaires concernant la règle de supersélection de la charge faits en Section 5 ci-dessous.)

- Quatrièmement, et c'est peut-être le point le plus important, la robustesse a à voir avec la possibilité de ré-identifier une composante d'onde au cours du temps, et donc avec la possibilité de parler de *trajectoires*, que celles-ci soient spatiales ou non (la composante d'onde de l'électron qui passe par la fente du haut frappe l'écran à un endroit particulier avec une certaine probabilité ; la composante gauche de l'état d'une molécule chirale à un instant t devient la composante gauche d'un état légèrement différent de la molécule à un instant t' postérieur à t). Notons que les articles du début de l'étude de la décohérence insistent sur les états préférés, et sur l'évolution de l'état (réduit) du système : en particulier sur la façon dont l'état du système devient approximativement diagonal dans la base définie par les états préférés. Cette insistance sur les aspects (pour ainsi dire) *cinématiques* ne doivent pas nous faire perdre de vue le fait que les aspects *dynamiques* de ré-identification dans le temps et la formation d'une trajectoire sont aussi importants sinon plus importants pour comprendre le concept de décohérence.
- Dans le cas des interactions de décohérence telles que les mesures jointes de position et de quantité de mouvement, les états préférés sont évidemment les ondes de Schrödinger pour lesquelles la position et la quantité de mouvement sont toutes deux localisées (i.e. étroites) – en gros, les 'états cohérents' du système. De fait, elles peuvent être *très* étroites. Un grain de poussière de rayon $a = 10^{-5}$ cm flottant dans les airs verra ses interférences supprimées

entre les composantes (de la position) dans un espace (la largeur de cohérence) de 10^{-13}cm .⁵²

- Dans ce cas, les trajectoires identifiées au niveau des composantes (i.e. les trajectoires des états préférés), offriront une approximation étonnamment bonne des trajectoires Newtoniennes correspondantes. On peut comprendre intuitivement que, si les états préférés (qui sont des paquets d'ondes étroits en position et quantité de mouvement) sont ceux qui ont tendance à s'intriquer le moins avec l'environnement, ils auront aussi tendance à suivre l'équation de Schrödinger pratiquement sans être perturbés. Mais en réalité, les paquets d'onde étroits suivent approximativement les trajectoires Newtoniennes (du moins si les potentiels extérieurs dans lesquels ils se déplacent sont assez uniformes le long de la largeur des paquets) : les résultats de ce type sont connus sous le nom de 'théorèmes d'Ehrenfest'. Ainsi, les 'histoires' obtenues approchent les histoires Newtoniennes à certaines échelles.⁵³ L'exemple physique le plus intuitif pour cela est celui des trajectoires obtenues par l'observation de particules alpha dans une chambre à bulles, trajectoires extrêmement proches des trajectoires Newtoniennes, mis à part quelques minuscules anomalies.⁵⁴

⁵² Ces valeurs sont calculées sur la base du modèle classique de Joos et Zeh (1985). Des calculs identiques ou similaires montrent que l'ordre du temps nécessaire est également minuscule. La largeur de cohérence évoquée ci-dessus est atteinte au bout d'une microseconde d'exposition à l'air, et la suppression d'interférence pour une largeur de l'ordre de 10^{-12}cm est atteinte en un temps de l'ordre de la nanoseconde. Ces valeurs sont encore plus petites pour des objets de masse supérieure. Pour un résumé partiel mais moins technique des résultats de Joos and Zeh, voir Bacciagaluppi (2000).

⁵³ Pour une synthèse d'arguments plus rigoureux, voir par exemple Zurek (2003, pp. 28-30). De tels arguments peuvent être dérivés du formalisme de la fonction de Wigner, comme le fait par exemple Zurek (1991), ou, de façon plus détaillée, Zurek et Paz (1994), qui appliquent ces résultats pour dériver des trajectoires chaotiques en mécanique quantique (voir également la Section 5 ci-dessous).

⁵⁴ On s'attend en effet à ce que les trajectoires s'écartent légèrement des trajectoires Newtoniennes. Ceci du fait à la fois que les composantes individuelles tendent à s'épandre, et que l'interaction avec l'environnement est analogue à une détection, ce qui ajoute encore à l'expansion des composantes

Aucun des aspects ci-dessus ne font nécessairement partie de toute interaction avec l'environnement. La question de savoir quels systèmes exhiberont tel ou tel aspect, ainsi que celle de la généralité des leçons qui auront pu être tirées de l'étude de modèles particuliers, ne trouveront de réponse que par un traitement physique de détail. Il faut se méfier des généralisations abusives. Par exemple, il est faux de dire que la décohérence ne concerne que les 'systèmes macroscopiques'. Bien entendu, les objets de taille moyenne sur la surface de la Terre se verront l'objet d'une décohérence très efficace du fait de leur interaction avec l'air atmosphérique, et ceci est un exemple excellent de la façon dont la décohérence peut fonctionner. D'un autre côté, on peut donner également d'excellents exemples d'interactions de décohérence sur des systèmes microscopiques, telles par exemple que les interactions des particules alpha avec le gaz d'une chambre à bulles. Ajoutons à cela qu'il existe des objets macroscopiques pour lesquels les effets d'interférences ne sont pas supprimés. Par exemple, il a été montré que, contrairement à toute attente, il est possible de bloquer suffisamment la décohérence de certains SQUIDS (un type de superconducteur) pour observer des superpositions de différents courants macroscopiques (voir (see e.g., Leggett 1984 et plus encore 2002, Section 5.4). Anglin, Paz et Zurek (1997) examinent des modèles de décohérence au comportement moins régulier et offre une mise en garde utile quant aux limites de la décohérence.

(ce détail sera d'importance pour la Section 3.2). Ces déviations apparaissent sous la forme de 'bruit', i.e. sous la forme de particules déviant légèrement de leurs trajectoires. Pour une discussion similaire des trajectoires de particules alpha, voir Barbour (1999, Chap. 20). Pour certains types de système et certains types d'interaction, la composante de bruit peut de fait dominer le mouvement global, de telle sorte qu'on obtient un comportement de type mouvement Brownien (classique).

3. Evaluation Conceptuelle

3.1 Le problème de la mesure résolu ?

Du fait que les interférences sont en général très bien supprimées entre les états localisés des objets macroscopiques, il semble pertinent de faire appel à la décohérence pour tenter d'expliquer pourquoi, de fait, les objets macroscopiques nous apparaissent comme étant dans des états localisés. Dire qu'invoquer la décohérence est pertinent pour cette question ne veut pour autant pas dire qu'elle peut lui offrir une réponse complète, ce qui est une thèse bien plus forte. Dans le cas d'un appareil de mesure, ceci équivaldrait à dire que la décohérence explique pourquoi nous n'observons jamais d'appareil donnant deux résultats de mesure (par exemple), ou encore que la décohérence offre une solution au problème de la mesure en mécanique quantique. Comme l'ont noté de nombreux auteurs, cette thèse n'est pas tenable (par exemple, récemment, Adler 2003 ; Zeh 1995, pp. 14-15).

Le problème de la mesure, en un mot, se pose de la façon suivante. Les systèmes en mécanique quantique sont décrits par des objets mathématiques (des vecteurs) représentant des ondes dont on peut faire la somme (superpositions), et les sommes ainsi obtenues sont conservées lors de l'évolution temporelle (donnée par l'équation de Schrödinger). Ainsi, si un système quantique (disons, un électron) est décrit par une superposition de deux états, par exemple, un spin de $+1/2$ dans la direction x et un spin de $-1/2$ dans la direction x , et si l'on fait interagir ce système avec un appareil de mesure qui se couple à ces états, alors l'état final du système composé sera une somme de deux composantes, une due au couplage de l'appareil avec la composante de spin $+1/2$, and l'autre due au couplage de l'appareil avec la composante de spin $-1/2$. Le problème est que, tandis que nous sommes prêts à accepter qu'un système microscopique (l'électron) soit décrit par de telles sommes (ou superposition d'états), ils nous est impossible de commencer d'imaginer ce que cela peut vouloir dire quand il s'agit d'un appareil de mesure (et de l'électron associé).

Maintenant, que se passe-t-il si on fait intervenir la décohérence dans la description ci-dessus ? La théorie de la décohérence nous dit, entre autres choses, que de nombreuses interactions ont constamment lieu de telle sorte que les états des systèmes macroscopiques localisés en différents points de l'espace se couplent aux différents états de leur environnement. Dans notre cas, les états du système macroscopique localisés en différents points de l'espace pourraient être ceux du pointeur de l'appareil mesurant les différentes valeurs de spin le long des axes x de l'électron. Par un argument de la même forme que celui ci-dessus, le composé formé par l'électron, l'appareil, et l'environnement sera décrit par la somme de (i) un état correspondant au couplage de l'environnement avec l'appareil lui-même couplé avec la composante de spin $x + 1/2$, et (ii) un état correspondant au couplage de l'environnement avec l'appareil couplé avec la composante de spin $x - 1/2$. Ici encore, on ne peut même pas commencer de s'imaginer ce que cela peut bien vouloir dire que le système composé de l'électron, l'appareil de mesure, et son environnement, soit décrit par une telle somme.

Que l'on prenne en compte ou non la décohérence, il nous faut choisir: ou bien le système composé n'est pas décrit par une somme, parce que l'équation de Schrödinger ne s'applique plus et doit être modifiée, ou bien le système est bien décrit par une telle somme, mais alors il nous faut comprendre ce que cela signifie, ce qui demande que nous donnions une interprétation de la mécanique quantique appropriée. Ainsi, la décohérence en elle seule ne fournit pas de solution au problème de la mesure, ou du moins pas sans être associée à une interprétation appropriée de la fonction d'onde. Et de fait, nous verrons que les principaux chercheurs dans le domaine, comme Zeh (2000) et Zurek (1998), suggèrent que la décohérence est comprise de la façon la plus naturelle dans le cadre des interprétations de type Everett (voir ci-dessous Section 4.3).

Malheureusement, les affirmations naïves du type décrit ci-dessus font encore partie du 'folklore' de la décohérence, et attirent avec raison la colère des physiciens (par exemple Pearle 1997) comme des philosophes (par exemple Bub 1999, Chap. 8). (Pour être tout à fait juste, cette idée 'folklorique' a au moins le mérite de soumettre

les interactions de mesure à l'analyse physique, au lieu de supposer que les processus de mesure font partie des éléments fondamentaux de la théorie).

3.2 Le problème de la mesure exacerbé

La décohérence n'est ni une instance d'évolution dynamique contredisant l'équation de Schrödinger, ni une nouvelle interprétation de la fonction d'onde. En revanche, et nous y reviendrons dans notre discussion, elle permet à la fois de mettre au jour des effets dynamiques importants au sein de l'évolution selon l'équation de Schrödinger, ainsi que de *suggérer* des interprétations possibles de la fonction d'onde.

Pour cette raison, la décohérence a beaucoup à offrir à la philosophie de la physique quantique. Mais d'abord, il semble qu'invoquer les interactions avec l'environnement en réalité exacerbe le problème. Intuitivement, si l'environnement procède à de nombreuses mesures de position, et ceci indépendamment de notre intervention, alors le problème de la mesure s'applique plus largement, puisqu'il s'applique également à ces mesures spontanées.

En effet, tandis qu'il est bien connu que les états localisés des objets macroscopiques s'épandent très lentement au cours d'une évolution de Schrödinger sans interaction, la situation est complètement différente s'il y a des interactions avec l'environnement. Même si les différentes composantes qui se couplent avec l'environnement seront extrêmement localisées au niveau individuel, elles peuvent, au niveau collectif, montrer une expansion plus large de plusieurs ordres de grandeur. C'est dire que l'objet et l'environnement pourrait être en état de superposition de milliards de termes très bien localisés, chacun possédant une position légèrement différente, et qui, ensemble, s'étendent sur une *distance macroscopique*, et ceci même pour des objets ordinaires.⁵⁵

⁵⁵ Donnons un exemple numérique : prenons une particule microscopique de rayon 1cm (et de masse 10g) en interaction avec l'air dans des conditions normales. Au bout d'une heure, l'état d'une telle particule s'étendrait dans un espace de l'ordre du mètre ! (Cette estimation est fondée sur les équations [3.107] et [3.73] dans Joos et Zeh (1985).)

Etant donné que les objets macroscopiques ordinaires sont particulièrement sujets aux interactions de décohérence, ceci soulève la question de savoir si la mécanique quantique peut rendre compte de la façon dont le monde de tous les jours nous apparaît en dehors même du problème de la mesure au sens strict. Pour le dire crument : si tout est en interaction avec tout, alors tout est intriqué avec tout, et c'est un problème bien plus grave que celui que présentait la seule intrication des nos appareils de mesure avec les sondes mesurées. Et de fait, une discussion du problème de la mesure ne saurait être satisfaisante que si est prise en considération la décohérence, comme le cas de certaines versions des interprétations modales l'illustre bien – voir Section 4.4.

3.3 L'émergence de la classicalité

La raison pour laquelle faire appel à la décohérence semble pertinent quand il s'agit de répondre à la question de l'apparence classique du monde ordinaire est que, *au niveau des composantes* de la fonction d'onde, la description quantique des phénomènes de décohérence peut montrer des aspects admirablement classiques. La question est alors de savoir si ces aspects classiques peuvent nous aider à expliquer les aspects classiques correspondants au niveau des phénomènes, s'ils sont conçus dans le cadre d'une des principales approches en fondements de la mécanique quantique. La réponse à cette question, ce n'est pas une surprise, dépend de l'approche choisie. La section suivante est vouée à une discussion de la relation qu'entretient la décohérence avec plusieurs des principales approches en fondements de la mécanique quantique.

De façon encore plus générale, on pourrait se demander si les résultats de décohérence peuvent être utilisés pour expliquer l'émergence de la *classicalité du monde ordinaire* en son entier, i.e. pour expliquer à la fois les aspects cinématiques tels que la localisation macroscopique, et les aspects dynamiques tels que les

trajectoires approximativement Newtoniennes ou Browniennes, *quand* de telles descriptions correspondent de fait aux phénomènes. Comme nous l'avons déjà mentionné, dans certains cas la description classique n'est pas une bonne description du phénomène, même si celui-ci inclut des systèmes macroscopiques. Dans d'autres cas, par exemple dans le cas des mesures quantiques, seuls les aspects cinématiques se présentent sous forme classique (les appareils permettent la lecture d'un résultat défini de mesure), tandis que les aspects dynamiques sont hautement non-classiques (les appareils de mesure se comportent de façon indéterministe). En un sens, si l'on suit Bohr dans son exigence que tout 'phénomène quantique' soit décrit par des concepts classiques, et si la décohérence nous donne bien le monde classique ordinaire, alors les phénomènes quantiques *eux-mêmes* devraient devenir une conséquence de la décohérence (voir Zeh 1995, p. 33; et aussi Bacciagaluppi 2002, Section 6.2). La question de l'explication de la classicalité du monde ordinaire devient alors celle de savoir si l'on peut *dérivée* les conditions nécessaires à la découverte et à la pratique de la mécanique quantique, depuis les principes de la mécanique quantique elle-même, et fermer ainsi, comme le dit Shimony (1989), le cercle épistémologique.

Il est clair que trouver une réponse à cette question générale est trop difficile, d'autant qu'elle dépend des possibilités de développement et de succès du programme de recherche physique concernant la décohérence. (Zeh 1995, p. 9). Nous reportons donc la discussion (comportant une part de spéculation) concernant le possible futur de ce programme à la Section 5.

4. La Décohérence et les Différentes Approches de la Mécanique Quantique

Il existe une grande variété d'approches en fondements de la mécanique quantique. Le terme 'approche' est ici plus approprié que celui d'interprétation', du fait que nombres d'entre ces approches constituent de fait des *modifications* de la théorie, ou du moins, introduisent une part importante d'aspects théoriques nouveaux. Il est aisé de présenter ces approches en fonction de leur stratégie pour offrir une solution au problème de la mesure.

Certaines approches, que nous appellerons approches en termes de réduction (*collapse interpretations* en anglais), cherchent à modifier l'équation de Schrödinger de telle sorte que les superpositions d'états 'ordinaires' ne se forment pas ou du moins soient très instables. Intuitivement, de telles approches semblent n'avoir pas grand chose à voir avec la décohérence puisqu'elles cherchent précisément à supprimer les superpositions qui sont créées par la décohérence. Elles entretiennent cependant une relation intéressante. Nous discuterons, parmi les approches en termes de réduction, le postulat de réduction de von Neumann et les théories de localisation spontanée (Section 4.1).

D'autres approches, appelées approches 'à variables cachées', cherchent à expliquer les phénomènes quantiques comme des effets d'équilibre statistique de surface, sous-tendus par une théorie plus fondamentale, de façon fortement analogue aux tentatives d'explication de la thermodynamique par la mécanique statistique. Dans ce groupe, les théories de l'onde pilote sont les plus développées. C'est le cas en particulier de la théorie de Broglie-Bohm, dont nous discutons la relation avec la décohérence en Section 4.2.

Un dernier groupe d'approches cherche à résoudre le problème de la mesure en fournissant seulement une *interprétation* appropriée à la théorie. Non sans ironie, on peut réunir dans ce groupe des approches aussi diverses que les interprétations de type Everett, les interprétations modales, et l'interprétation de Copenhague de Bohr (discutées respectivement dans les Sections 4.3, 4.4 et 4.5).

Nous n'analyserons ces approches que du point de vue de leur relation avec la décohérence. Pour une présentation détaillée, une évaluation générale, et des critiques, nous référons le lecteur à la littérature sur ce sujet.

4.1 Les approches en termes de réduction

4.1.1 Von Neumann

Chacun sait que von Neumann (1932) avait envisagé que la conscience de l'observateur soit d'une façon ou d'une autre liée à ce qu'il appelle le Processus I, autrement connu sous le nom de postulat de réduction, et placé par von Neumann au même niveau que l'équation de Schrödinger (qu'il nomme Processus II). Von Neumann est cependant ambigu quant aux détails. On peut interpréter ses propos comme défendant l'idée que nous avons une façon spéciale d'accéder à notre conscience qui fait qu'il nous semble que la fonction d'onde se réduit, justifiant ainsi une lecture phénoménologique du Processus I.⁵⁶ Une autre interprétation possible est que von Neumann envisage que la conscience joue un rôle causal dans le déclenchement de la réduction, auquel cas le Processus I est un processus physique au même niveau que le Processus II.⁵⁷

Dans tous les cas, l'interprétation de von Neumann requiert que les prédictions finales (de ce qui sera rapporté au niveau de la conscience) soient indépendantes de l'endroit et moment exacts où le Processus I intervient dans notre modèle de l'évolution du système quantique. On appelle souvent ceci la *mobilité de la coupe de von Neumann* entre le sujet et l'objet, ou autre expression similaire. La réduction pourrait avoir lieu quand une particule arrive sur un écran, ou quand l'écran se

⁵⁶ Le terme 'phénoménologique' est ici entendu comme 'lié aux phénomènes' : selon von Neumann (tel qu'interprété ici), le postulat de réduction de la fonction d'onde décrit un processus ayant lieu au niveau des phénomènes observables – des 'apparences' – par opposition aux processus physiques ayant lieu au niveau fondamental. (NDT)

⁵⁷ On peut dire que von Neumann justifie son adoption de l'approche en termes de réduction en se fondant sur: (a) son théorème d'insolubilité (théorème généralisé plus tard par des plusieurs auteurs, e.g. Fine (1970), Brown (1986) et Bassi and Ghirardi (2000)), qui montre que l'indéterminisme phénoménologique de la mesure ne peut être expliqué en termes d'ignorance de l'état exact de l'appareil de mesure; (b) son théorème d'impossibilité des théories à variables cachées, qui, selon lui, permettait d'exclure ce type d'approche (chacun sait que ce théorème sera critiqué plus tard par Bell, 1987, Chap. 2); (c) sa volonté de conserver une relation bijective entre les états mentaux et physiques de l'observateur (c.f. notre discussion dans la Section 4.3 ci-dessous).

noircit, ou quand le résultat se trouve imprimé de façon automatique sur le papier, ou sur notre rétine, ou le long du nerf optique, ou bien quand enfin la conscience intervient. Avant comme après cette réduction, c'est l'équation de Schrödinger qui décrirait l'évolution du système.

Von Neumann montre que ces différentes possibilités sont équivalentes quant aux prédictions finales, de sorte qu'il peut défendre l'idée que la réduction est liée à la conscience tout en appliquant, en pratique, le postulat bien plus tôt dans la description. Cependant, la dérivation de ce résultat par Neumann se fonde sur le présupposé *d'absence d'interférence* entre les différentes composantes de la fonction d'onde. En effet, s'il y avait interférence, le moment auquel la réduction a lieu influencerait les statistiques finales, comme dans le cas de l'expérience des fentes de Young (pour lesquelles les résultats diffèrent selon que la réduction a lieu au niveau de l'écran ou au niveau des fentes). Ainsi, bien que l'approche de von Neumann soit (du moins selon certaines interprétations) une véritable approche en terme de réduction, elle dépend en réalité crucialement de la décohérence.

4.1.2 Théories en termes de réduction spontanée

La théorie en termes de réduction spontanée la mieux connue est la théorie dite GRW (Ghirardi Rimini and Weber 1986), selon laquelle une particule matérielle subit spontanément un processus de localisation, autrement dit subit, à des instants aléatoires, une réduction du type de celle utilisée pour décrire les mesures approximative de position.⁵⁸ Dans le modèle original, chaque particule subit la réduction de façon indépendante (ainsi, la réduction est déclenchée bien plus fréquemment par un grand nombre de particules) ; dans les modèles plus tardifs, la

⁵⁸ La réduction consiste à multiplier la fonction d'onde $\psi(r)$ par une gaussienne de largeur fixée a , dite $a_x(r)$, avec une distribution de probabilité pour le centre x de la gaussienne donnée par $a_x(r)\psi(r)|^2 dr$. Pour le dire autrement, si A_x est l'opérateur correspondant à la multiplication par la Gaussienne $a_x(r)$, l'état $|\psi\rangle$ se réduit à un seul état parmi une infinité (continue) d'états possibles $(1/\langle\psi|A_x^*A_x|\psi\rangle)A_x|\psi\rangle$, avec une densité de probabilité $\langle\psi|A_x^*A_x|\psi\rangle$. En langage technique, ceci est une mesure associée à un POVM (positive-operator-valued measure). Dans le modèle original, $a=10^{-5}$ cm, et la réduction a lieu avec une probabilité de $1/\tau$ par seconde, avec $\tau=10^{16}$ s.

fréquence de réduction dépend de la masse de la particule, de sorte que la fréquence de réduction globale est liée à la densité de masse.⁵⁹

Ainsi, du point de vue formel, l'effet de la réduction spontanée est le même que celui de certains modèles de décohérence, du moins pour une particule isolée.⁶⁰ Notons cependant deux différences cruciales : premièrement, nous avons ici une 'véritable' réduction et non une simple suppression d'interférence (c.f. Section 2 ci-dessus), and deuxièmement, la réduction spontanée a lieu sans que le système ne subisse d'interaction avec quoique ce soit, tandis que dans le cas de la décohérence, la suppression d'interférence n'a évidemment lieu qu'à l'occasion d'interactions avec l'environnement.

Quel usage peut-on faire de la décohérence au sein de la théorie GRW ? La situation peut devenir relativement complexe quand l'interaction de décohérence ne privilégie pas la position (par exemple quand elle sélectionne des courants pour un SQUID), du fait que la décohérence et la réduction peuvent en fait avoir des influences contraires.⁶¹ Mais dans les cas où la principale interaction de décohérence

⁵⁹ Le modèle s'est vu modifié ainsi parce que le modèle originaire impliquait certaines conséquences (non observées) quant aux prédictions de durée de vie du proton (Pearle and Squires, 1994), ceci du fait de la production d'énergie associée à la réduction. Les modèles plus tardifs utilisent généralement le formalisme de la *localisation spontanée continue* (CSL), exprimée en termes d'équations différentielles stochastiques (Pearle, 1989), mais nous passerons sur cela pour simplifier.

⁶⁰ Pour N particules, et dans le cas où la fréquence de réduction est indépendante de la masse, il est aisé de concocter des exemples pour lesquels la théorie donne des résultats très différents de ceux donnés par la décohérence. L'état d'un pointeur macroscopique issu de la superposition d'un état localisé dans une région A et d'un autre localisé dans une région B déclenchera une réduction de façon quasi instantanée à l'un des états localisés, ce qui est aussi ce à quoi on s'attend dans le cas de la décohérence. En revanche, une superposition d'un état (concocté pour l'occasion) dans lequel tous les protons du pointeur sont localisés dans la région A et tous ses neutrons dans la région B, avec un état où tous les protons sont en B et tous les neutrons en A, déclencherait également une réduction, mais cette fois une réduction à l'un des ces états hautement non-classiques. Cette différence entre les deux théories disparaît quand on passe aux versions faisant appel à la densité de masse.

⁶¹ Mes remerciements à Bill Unruh pour avoir porté ce problème à mon attention.

prend la forme d'une mesure approximative de position, la réponse à cette question se réduit à une comparaison quantitative. Si la réduction a lieu plus rapidement que la décohérence, alors la superposition des composantes à laquelle s'applique la décohérence n'aura pas le temps de se former, et, si la théorie en termes de réduction parvient à rendre raison de l'apparence classique des phénomènes, la décohérence n'y est pour rien. Si en revanche la décohérence a lieu plus rapidement que la réduction, alors (comme dans le cas de la théorie de von Neumann) le mécanisme de réduction peut trouver des structures 'toutes faites' auxquelles réduire véritablement la fonction d'onde. Ceci est confirmé de fait par une comparaison de détail (Tegmark 1993, en particulier Table 2). Il semble donc que, en fin de compte, la décohérence peut jouer un rôle dans les théories de la réduction spontanée.

Ceci est aussi lié à la question de savoir si la décohérence a de quelconques implications quant à la *testabilité expérimentale* des théories de la réduction spontanée. En effet, si tant est que la décohérence peut être également utilisée dans le cadre des approches soit de l'onde pilote, soit du type Everett (question que nous discuterons dans les sous-sections suivantes), alors dans les cas où la décohérence est plus rapide que la réduction, tout ce qui pouvait être interprété comme une preuve qu'une réduction avait eu lieu peut maintenant être réinterprété comme le signe qu'une 'simple' suppression d'interférence a eu lieu (par exemple dans le cas d'une mesure), et seuls les cas où la théorie de la réduction prédit une réduction tandis que le système est protégé de toute interaction de décohérence (ou dans les cas peut-être où les deux mécanismes ont des influences contraires) pourraient être utilisés pour tester expérimentalement les théories de la réduction.

Certaines spéculations concernant un possible rôle causal de la gravitation dans le processus de réduction spontanée rendent la question de la testabilité expérimentale (pour les théories en terme de densité de masse) particulièrement problématique. Tegmark (1993, Tableau 2) donne une estimation des effets possibles de suppression d'interférence due à la gravitation quantique. De telles estimations sont bien entendu incertaines, mais sont cependant très proches du taux

de destruction d'interférence du à la réduction spontanée de type GRW (au moins en dehors du domaine microscopique). Kay (1998) en vient à des conclusions semblables. S'il est vrai qu'il existe une correspondance quantitative entre ces effets, alors il devient extrêmement difficile de distinguer entre eux (étant donnée la provision ci-dessus). En présence de gravitation, tout effet positif peut être interprété comme favorisant tout aussi bien l'hypothèse de la réduction que celle de la décohérence. Et dans les cas où le système est protégé des effets de décohérence de manière efficace (disons, dans le cas où l'expérience est menée sur un système en chute libre), aucune réduction n'est supposée avoir lieu si le processus de réduction est de fait déclenché par des effets gravitationnels. Ainsi, la relation entre décohérence and réduction spontanée est loin d'être simple.⁶²

4.2 Théories à onde pilote

Les théories à onde pilote sont des formulations de la mécanique quantique qui rejettent l'idée de réduction et attribue à la fonction d'onde le rôle de déterminer ('piloter' ou 'guider') l'évolution des variables caractérisant le système, à savoir soit la configuration des particules – comme dans les théories de de Broglie (1928) et Bohm (1952), soit la densité du nombre de fermions – comme dans théorie quantique des champs des 'beables' de Bell (1987, Chap. 19), soit encore les configurations de champs – comme dans les propositions variées de théories quantiques des champs à onde pilote (voir par exemple Struyve and Westman (2007) ainsi que les travaux auxquels ils réfèrent.)

L'idée de de Broglie était de modifier la mécanique classique Hamiltonienne et d'obtenir ainsi une théorie analogue à l'optique classique des ondes, en substituant la phase S d'une onde physique à la fonction d'action d'Hamilton et Jacobi. Bien qu'une telle 'mécanique ondulatoire' produise bien entendu des mouvements non-classiques, il nous faut inclure l'analyse de l'apparence de réduction par Bohm (1952, IIe partie) pour comprendre comment la mécanique de de Broglie est liée aux

⁶² Etudier plus en détail la relation entre les théories de la réduction et le décohérence fait partie d'un projet de recherche engagé par l'auteur en collaboration avec Max Schlosshauer.

phénomènes quantiques typiques. Dans le cas de la mesure, Bohm défend l'idée que la fonction d'onde évolue de la façon suivante : elle se transforme en une superposition de composantes qui sont et restent séparées dans l'espace total de configuration du système mesuré et de l'appareil de mesure, de telle sorte que la configuration totale est 'piégée' dans *une seule des composantes* de la fonction d'onde, qui va guider son évolution future, comme si l'onde avait été réduite (c'est là la notion de fonction d'onde 'effective'). Une telle analyse permet de rendre compte qualitativement des réductions dues à la mesure, et, par extension, de certains aspects typiques de la théorie quantique comme le principe d'incertitude et les corrélations parfaites dans les expériences EPR (les aspects quantitatifs de la théorie sont également très bien développés mais nous ne les décrivons pas ici).

Il est naturel d'étendre cette analyse de la mesure au moyen d'un appareil au cas d'une 'mesure spontanée' par l'environnement telle que dans la théorie de la décohérence, appliquant ainsi la même stratégie pour rendre compte des phénomènes quantiques et classiques. On obtient alors l'image suivante : la théorie de de Broglie-Bohm décrit les cas de décohérence comme le mouvement des particules piégées dans une composante extrêmement bien localisée et sélectionnée par l'interaction de décohérence. Ainsi, les trajectoires de de Broglie-Bohm rejoignent les mouvements classiques au niveau défini par la décohérence (la largeur des composantes.)

Un tel usage de la décohérence résout sans doute les problèmes, discutés par Holland (1996)) par exemple, concernant la possibilité d'une 'limite classique' de la théorie de de Broglie. Un de ces problèmes troublants tenait par exemple à ce que les trajectoires aux conditions initiales différentes ne pouvaient pas se croiser dans la théorie de de Broglie-Bohm, parce que les ondes guidaient les particules selon une équation du premier ordre, tandis que dans la théorie de Newton, comme il est bien connu, les équations sont du second ordre, et les trajectoires possibles se croisent. Désormais, en revanche, les composantes sans interférence produites par la décohérence peuvent se croiser, ainsi que les trajectoires des particules piégées en leur sein.

L'image décrite ci-dessus est naturelle, mais non pas évidente. La théorie de de Broglie-Bohm et la décohérence considèrent deux mécanismes a priori *distincts* bien que tout deux liés à l'apparence de réduction, à savoir, respectivement, la séparation des composantes dans l'espace de configuration et la suppression d'interférence. Si la première implique la seconde de façon évidente, il est tout aussi évident que la décohérence n'implique pas la séparation dans l'espace de configuration. Notons en revanche qu'on peut s'attendre à ce que les interactions de décohérence de la forme de mesure approximative de position impliquent une telle séparation.

Si les principales instances de décohérence sont également des instances de séparation de configuration, alors la théorie de de Broglie-Bohm peut *utiliser* les résultats de la décohérence concernant la formation de structures classiques, tout en fournissant une interprétation de la mécanique quantique qui explique pourquoi ces structures sont de fait pertinentes au niveau de l'observation. Dans ce cas, la question qui se pose pour la théorie de de Broglie-Bohm n'est pas seulement la question usuelle de savoir si toutes les apparences de réduction dues à la *mesure* peuvent être associées à une séparation dans l'espace de configuration (question à laquelle on peut répondre en défendant que tous les résultats de mesure, à un moment ou un autre, sont enregistrés dans des configurations macroscopiquement différentes), mais aussi celle de savoir si *toutes* les apparences de classicalité peuvent être associées à une séparation dans l'espace de configuration.⁶³

Il est encore rare de voir une discussion du rôle de la décohérence pour les théories à onde pilote du type suggéré ci-dessus. On trouve une discussion informelle dans

⁶³ On peut rejeter du même coup les variantes de la théorie de de Broglie-Bohm qui ne sont pas fondées sur la représentation en position, mais, par exemple, sur la représentation en quantité de mouvement comme celle défendue par Epstein's (1953). Une telle théorie ne permet pas aux systèmes quantiques d'exhiber le 'comportement de réduction' correct, du fait précisément que les interactions de décohérence ne sont pas fondées sur la quantité de mouvement ! Puisqu'une théorie à onde pilote usant de la 'mauvaise' représentation exhibe de 'mauvais' comportements de réduction, on peut conclure que les considérations liées à la décohérence sont aussi importantes pour discuter des modèles possible de théorie à onde pilote.

Bohm et Hiley (1993, Chap.8) ; des résultats partiels sont donnés par Appleby (1999) ; et une approche différente est proposée par Allori (2001 – voir aussi Allori et Zanghi (2009)). Appleby étudie les trajectoires dans un modèle de décohérence et obtient des trajectoires approximativement classiques, mais utilise pour cela une hypothèse spéciale. ⁶⁴ Allori s'intéresse d'abord à la limite d'onde courte de la théorie de de Broglie-Bohm (suggérée par l'analogie avec la limite géométrique en optique ondulatoire). Dans son analyse, le rôle de la décohérence est crucial mais limité au *maintien* du comportement classique sous les conditions appropriées d'onde courte, du fait que, sans cela, le comportement disparaîtrait au bout d'un certain temps.

4.3 Interprétations de type Everett

Les interprétations de type Everett varient considérablement, et on peut dire que la seule chose qu'elles partagent est l'intuition fondamentale qu'une seule fonction d'onde doit être interprétée comme représentant une *multiplicité* de 'réalités' à un niveau ou un autre. Une telle multiplicité, quelle que soit la façon dont on la conçoit, est associée formellement avec les *composantes* de la fonction d'onde décomposée d'une certaine façon. ⁶⁵

Les interprétations de type Everett diffèrent l'une de l'autre quant à la façon dont premièrement elles *identifient* les composantes pertinentes de la fonction d'onde universelle, deuxièmement elles *justifient* cette identification (c'est là le fameux « problème de la base préférée » -- bien que cette appellation soit peut-être mauvaise), et troisièmement elles *interprètent* la multiplicité de réalités obtenue (de

⁶⁴ Je propose de réinterpréter l'hypothèse d'Appleby comme une hypothèse concernant la fonction d'onde effective du bain de chaleur avec lequel le système interagit. Autrement dit, je propose qu'on essaie de la justifier en traitant le bain du point de vue de la théorie à onde pilote.

⁶⁵ Il se peut que certains auteurs nient même qu'il y ait une fonction d'onde unique de l'univers, et défendent l'idée que l'univers se divise régulièrement en plusieurs univers, chacun de ces univers étant décrit par une fonction d'onde séparée. Une telle conception de Everett, qui est souvent attribuée – justement ou injustement -- à Dewitt (1971), combinerait tous les désavantages des théories à réduction de type von Neumann avec ceux d'une métaphysique extravagante.

nombreuses versions des ‘mondes multiples’ ou des ‘esprits multiples’ existent) – en particulier, elles diffèrent quant à la façon dont elles interprètent les probabilités (leur émergence ?) au niveau des composantes (c’est là le problème de la ‘signification des probabilités’).

Ce dernier problème est sans doute l’aspect des interprétations de type Everett qui fait l’objet des débats les plus acharnés. Il est clair que la décohérence permet la ré-identification au cours du temps des observateurs et des résultats de mesures répétées (et permet ainsi que les fréquences empiriques soient définies). De plus, au cours des dernières années, des progrès considérables ont été accomplis en interprétant les probabilités dans le cadre de la théorie de la décision pour un agent se « divisant » avec les mondes (voir en particulier Wallace 2003b, ainsi que sa version plus longue Wallace 2002).⁶⁶

Le problème pour lequel l’application de la décohérence est la plus utile semble cependant être celui de la base préférée. La décohérence semble offrir une solution (même si peut-être partielle) à ce problème, en ce qu’elle identifie naturellement une classe d’états ‘préférés’ (pas nécessairement une base orthonormée !), et permet même de ré-identifier des états au cours du temps, de telle sorte qu’on peut identifier les ‘mondes’ avec les trajectoires définies par la décohérence (ou plus abstraitement avec les histoires décohérentes).⁶⁷ Si l’un des buts des interprétations de type Everett est d’offrir une interprétation de la mécanique quantique qui n’introduise aucune structure supplémentaire, en particulier qui ne *postule* pas l’existence d’une base préférée, alors leurs défenseurs se doivent d’identifier les composantes pertinentes sur la seule base des structures comprises dans la fonction d’onde. En ce sens, la décohérence est une candidate idéale pour l’identification des ‘mondes’ (voir Wallace 2003a par exemple).

⁶⁶ Pour une dérivation similaire des probabilités quantiques indépendamment de l’interprétation de type Everett, voir Saunders (2004).

⁶⁷ Une telle solution au problème de la base préférée n’est que partiel du fait qu’il existe plusieurs façons – non équivalentes entre elles – de sélectionner les ensembles d’histoires décohérentes. Voir par exemple Dowker et Kent (1995) à ce sujet.

On peut *justifier* une telle identification en disant qu'un 'monde' doit constituer une structure *étendue dans le temps* et qu'il est ainsi nécessaire, pour définir les mondes, de pouvoir les ré-identifier au cours du temps. De façon similaire, on peut aussi invoquer l'idée que les observateurs, afin de pouvoir *évoluer*, doivent posséder des *archives stables* des événements passés (Saunders 1993, Gell-Mann et Hartle 1994), ou que les observateurs doivent pouvoir avoir accès à des *états robustes*, de préférence au travers de l'existence d'information redondante dans l'environnement (c'est là l'« interprétation existentielle » de Zurech 1998).

Si l'on ne veut pas faire appel à la notion globale de 'monde', on peut encore concevoir les composantes de l'état (mixte) d'un système (local) de deux autres façons : en considérant soit que les différentes composantes définies par la décohérence affectent séparément un autre système (plus précisément, les différentes composantes de l'état de cet autre système), soit que ces composantes seront toutes, mais séparément, sous-jacentes à l'expérience consciente du système (si le système possède une telle expérience consciente). La première façon correspond à l'idée origininaire de Everett (1957) d'état relatif, ainsi qu'à l'interprétation relative favorisée par Saunders (1993 par exemple) et, vraisemblablement, Zurech (1998). La seconde conduit directement à l'idée des interprétations « many-minds » (esprits multiples). De plus, supposer que la mentalité peut être associée seulement avec certaines structures décohérentes complexes (voir par exemple Donald 1999 pour plus de références) présente l'avantage supplémentaire de réduire encore l'ambiguïté restante concernant la base préférée.

L'idée des esprits multiples fut avancée d'abord par Zeh (2000, et 1995, p.24). Comme le dit Zeh, la raison pour laquelle von Neuman introduisit la réduction était ce qu'il appelait le 'parallélisme psycho-physique' (on peut raisonnablement penser que ceci correspond à la notion of survenance du mental sur le physique : on ne fait l'expérience que d'un seul état mental, donc on ne devrait avoir qu'une seule

composante correspondante pour l'état physique⁶⁸). Dans un univers caractérisé par la décohérence mais sans réduction, on peut introduire un nouveau parallélisme psycho-physique, dans lequel les esprits individuels surviennent sur chacune des composantes non-interférentes de l'état physique. Zeh propose en effet que, étant donnée la décohérence, ceci constitue l'interprétation la plus naturelle de la mécanique quantique.⁶⁹

4.4 Interprétations modales

Les interprétations modales trouvent leur origine dans les travaux de van Fraassen (1973, 1991) et consistent en des réinterprétations totale de la mécanique quantique. L'intuition première de van Fraassen est que l'état quantique doit être interprété comme représentant un ensemble de possibilités, chacune représentée par une composante de l'état (mixte) quantique. Il ne considère que des décompositions instantanées, et reste agnostique quant à la ré-identification au cours du temps des systèmes physiques. Aussi peut-il exploiter le fait que la décohérence fournit des descriptions en termes d'états de type classique, qui seront conçus comme des possibilités. Ceci garantit l'« adéquation empirique » de la description quantique (un concept crucial dans la philosophie des sciences de van

⁶⁸ La notion de survenance est une notion importante de philosophie analytique. On dit qu'un ensemble de propriétés P survient sur un ensemble de propriétés P' si et seulement si toute différence au niveau des propriétés de type P se traduit par des différences au niveau des propriétés de type P' , ou autrement dit : « pas de différences au niveau des P sans différences au niveau des P' ». Par exemple, on peut dire sans grand risque que la propriété de « solidité » d'une paire de chaussures survient sur ses propriétés physiques : si deux paires de chaussures possèdent exactement les mêmes propriétés physiques (et même microphysiques), elles sont également tout aussi solides l'une que l'autre (en revanche, il est possible que deux paires de chaussures soient également solides, bien que leurs propriétés physiques ne soient pas les mêmes). (NDT)

⁶⁹ Notons que dans la version de l'interprétation « many-minds » de Albert et Loewer (1988), le mental ne survient *pas* sur le physique, du fait que les esprits individuels possèdent une identité trans-temporelle propre. Ceci afin de définir une dynamique stochastique pour les esprits et de pouvoir éviter d'introduire un concept nouveau de probabilité. Même dans ce cas, cependant, la décohérence est d'une importance cruciale, puisque l'évolution dynamique des esprits n'aura de corrélat physique que si les composantes physiques correspondantes sont décohérées. (Mes remerciements à Martin Jones pour son aide sur ce point).

Fraassen). Les aspects dynamiques de la décohérence ne peuvent être exploités qu'indirectement, en ce que les composantes instantanées exhiberont des traces du passé, qui garantissent l'adéquation concernant les observations ; cependant, van Fraassen reste agnostique quant à leur véridicité.

Un autre type d'interprétation modale est généralement associé avec les (différentes) vues de Kochen (1985), Healey (1989) et Dieks and Vermaas (e.g., 1998). Nous nous concentrons ici sur ce dernier. Il s'agit que sélectionner une seule des décompositions possibles de van Fraassen en usant d'un critère mathématique (lié au théorème de décomposition biorthogonale), et d'inclure les aspects dynamiques. Dans le cas d'une mesure quantique idéale (non-approximative), la décomposition sélectionnée correspond à celle définie par les états propres de l'observable mesuré et par les états pointeurs correspondant. L'interprétation semble ainsi résoudre le problème de la mesure (au sens strict).

Ceci dit, l'approche de Dieks, du moins selon son intention originale, était censée fournir une interprétation avantageuse de la mécanique quantique également dans le cas des interactions de décohérence, puisque, au moins pour les modèles simples de décohérence, ce même type de décomposition correspond plus ou moins aux états entre lesquels les interférences sont supprimées (les états très dégénérés mis à part).

Cependant, cette approche échoue lamentablement dès qu'on l'applique à d'autres modèles de décohérence, par exemple, au modèle de Joos and Zeh (1985, Section III.2). En effet, on montre que dans les modèles généraux de la décohérence, les composantes sélectionnées par cette version des interprétations modales sont des états *délocalisés*, au lieu des composantes localisées qui sont naturellement sélectionnés par la décohérence (Bacciagaluppi 2000, Donald 1998). Notons que l'interprétation originale de van Fraassen ne rencontre pas de problème de ce type, et que des interprétations modales plus récentes, telles que celle de Spekkens and Sipe (2001), Bene and Dieks (2002) et Berkovitz and Hemmo (2006) pourraient bien y échapper.

Quelques mots pour finir concernant le fait que certaines positions prises dans la littérature des histoires décohérentes pourraient être apparentées aux vues de van Fraassen en ce qu'elles identifient des possibilités, mais au niveau des cours possibles de l'histoire du monde. De tels « mondes possibles » seraient constitués des séquences temporelles des propositions (quantiques) qui satisfont la condition de décohérence and en ce sens offrent une description en termes d'évolution probabiliste. Une telle approche utiliserait la décohérence comme un de ses ingrédients essentiels, et pour tout dire pourrait bien se révéler être la façon la plus fructueuse d'user les intuitions sur lesquelles se fondent les interprétations modales. Le travail de détail reste à faire dans ce domaine, mais Hemmo (1996) offre un premier aperçu.

4.5 L'interprétation de Bohr ou de Copenhague

Il semble que Bohr défendait en gros le point de vue suivant. Les concepts ordinaires, soit, de fait, les concepts de la physique classique, sont indispensables pour décrire les phénomènes physiques (ceci en un sens – et avec un vocabulaire – qui rappelle les arguments transcendants de Kant). Cependant, les résultats expérimentaux concernant les phénomènes atomiques montrent que les possibilités d'application des concepts classiques sont fondamentalement limitées : ces concepts ne peuvent en effet ne donner que des images partielles (complémentaires les unes des autres) des objets physiques. Bien que ces limites soient négligeables quantitativement dans la plupart des cas au niveau des objets macroscopiques, elles s'y appliquent malgré tout (comme le montre la volonté de Bohr d'appliquer les relations d'incertitudes à l'appareil de mesure dans ses débats avec Einstein), et elles sont d'une importance primordiale au niveau des objets microscopiques. En effet, elles sont constitutives des aspects caractéristiques des phénomènes quantiques, par exemple, l'indéterminisme. L'état quantique n'est pas une représentation « intuitive » (*anschaulich*, traduit également par « visualisable ») de l'objet quantique, mais seulement une représentation « symbolique », un raccourci pour représenter le phénomène quantique constitué en appliquant les différentes perspectives classiques complémentaires.

Bien qu'il soit difficile de déterminer exactement quelle était la position de Bohr (cette notion, ainsi que le terme d'« interprétation de Copenhague » se révèle être une construction plus tardive comme le montre Howard 2003), il est clair que pour Bohr, les concepts classiques sont non seulement autonomes mais en réalité prioritaires par rapport à ceux de la mécanique quantique. Si l'on conçoit la théorie de la décohérence comme montrant comment en fait les concepts classiques émergent de la mécanique quantique, il semble bien que la position de base de Bohr soit fortement ébranlée. Bien entendu, dire que la théorie de la décohérence (un élément de la théorie quantique) *contredit* l'interprétation de Copenhague (une interprétation de la théorie quantique) serait une erreur. Ceci dit, la décohérence suggère que l'on donne sa préférence à d'autres interprétations, dans lesquelles les concepts quantiques se voient donnés la priorité sur les concepts classiques, ou, plus précisément, dans lesquelles les concepts ordinaires émergent de la mécanique quantique (qu'il y ait ou non des concepts encore plus fondamentaux comme dans le cas des théories à onde pilote). En ce sens, si le programme de la décohérence tel que nous l'avons décrit dans la section 3.3 rencontre le succès, cela portera un coup fatal à *l'interprétation* de Bohr, un coup porté par la physique quantique elle-même.

D'un autre côté, si en fin de compte la décohérence se trouve en fait être la première pierre d'une phénoménologie de la mécanique quantique, tel que les interprétations d'Everett et probablement de Bohm le suggèrent, alors *l'intuition* de Bohr que la mécanique quantique telle qu'elle est pratiquée exige un appel au domaine classique sera confirmée par la décohérence. De fait, Zurech (2003) place son interprétation existentielle à mi-chemin entre Bohr et Everett. Douce ironie de l'histoire, il se pourrait que, à la suite de la décohérence, on se retrouve à devoir ré-évaluer cet élément de la pensée de Bohr.

5. Portée de la décohérence

Nous avons déjà noté dans la section 2.2 qu'il nous faut être faire attention à ne pas tirer des conclusions générales abusives se fondant sur le seul examen de modèles de décohérence trop bien policés. D'un autre côté, si l'on veut évaluer le programme

de recherche cherchant à expliquer l'émergence de la classicalité par la décohérence (associée à certaines approches fondamentales), il nous faut gauger *jusqu'ou* les applications de la décohérence peuvent être poussées. Dans cette dernière section, nous examinons certaines des autres propositions d'application de la décohérence, par delà les exemples plus évidents, comme la chiralité et les trajectoires de particules alpha, que nous avons déjà mentionnés. La question de savoir si la décohérence pourra bien être appliquée avec succès à ces domaines devra être en partie tranchée dans le futur, quand des modèles plus détaillés seront proposés.

Zurech et Paz (1994) ont fait usage d'une application directe des techniques permettant de dériver les trajectoires Newtoniennes au niveau des composantes pour dériver des *trajectoires chaotiques* en mécanique quantique. La description du comportement chaotique est problématique pour la bonne raison qu'à première vue elle ne devrait simplement pas être possible. En gros, le chaos se caractérise par une sensibilité extrême du comportement d'un système vis à vis des conditions initiales : la distance séparant les trajectoires dérivant de conditions initiales différentes croît exponentiellement dans le temps. Etant donné que l'évolution de Schrödinger est *unitaire*, elle conserve tous les produits scalaires and toutes les distances entre les vecteurs quantiques. Ainsi, il semblerait que des conditions initiales proches donnent lieu à des trajectoires qui restent uniformément proches au cours du temps, et qu'aucun comportement chaotique ne puisse en résulter (c'est là ce qu'on appelle le « problème du chaos quantique »). L'élément crucial qui permet à Zurech et Paz de conduire leur analyse est que les trajectoires pertinentes dans la théorie de la décohérence sont celles des composantes de l'état du système. L'unitarité est conservée du fait que les vecteurs de l'environnement, auxquels ces différentes composantes sont couplées, sont et restent orthogonaux : la façon dont les composantes elles-mêmes évoluent est sans importance. Une modélisation explicite fournit une représentation du chaos quantique dans laquelle des trajectoires différentes se divisent en plusieurs branches (un aspect absent du chaos classique, qui est déterministe), qui elles-mêmes divergent ensuite exponentiellement. Comme dans le cas des intersections de trajectoires dans la théorie de de Broglie-Bohm

(Section 4.2), on a un comportement au niveau des composantes qui est qualitativement différent du comportement dérivé des fonctions d'onde d'un système isolé.

La notion de règles de supersélection induites a déjà été mentionnée en Section 2.2. Comme le notent Giulini, Kiefer et Zeh (1995, ainsi que Giulini *et al.* 1996, Section 6.4), on peut aussi justifier la règle de supersélection pour la charge en théorie quantique des champs en termes de décohérence. L'idée est simple : une charge électrique est placée dans un champ de Coulomb (en électrostatique, ce champ est infiniment étendu ; ceci dit, l'argument peut aussi être mené en usant du champ retardé). Les différents états de charge électrique d'une particule sont ainsi couplés aux différents états, supposément orthogonaux, du champ électrique. On peut alors considérer le champ lointain comme un environnement de fait incontrôlable qui décohère la particule (et le champ proche), de telle sorte que, de fait, les superpositions de différentes charges ne peuvent jamais être observées.

Certains affirment aussi que faire appel à la décohérence est pertinent quant à la question de l'asymétrie du temps, ou plus précisément, quant à la question de l'apparente direction du temps dans notre monde (classique). Le problème est celui d'une direction du temps au niveau des composantes émergeant d'une évolution symétrique dans le temps au niveau de la fonction d'onde universelle (probablement avec des conditions initiales particulières). Dans la mesure où la réduction est bien un processus dirigé dans le temps, la décohérence devrait être directement pertinente quant à l'émergence de cette « flèche du temps quantique » (voir les discussions de Zeh 2001, Chap. 4; Hartle 1998, ainsi que les références incluses ; et Bacciagaluppi 2002, Section 6.1). On peut aussi se demander si la décohérence est liée aux autres flèches du temps – plus ordinaires, mais c'est une autre question, traitée par exemple par Zurek et Paz (1994), Hemmo et Shenker (2001), et Wallace (2001).

Dans un article récent, Zeh (2003) fait appel à l'idée que la décohérence peut expliquer les « phénomènes quantiques » tels que les détections de particules pour

défendre la thèse selon laquelle le concept même de particule en théorie quantique des champs est une conséquence de la décohérence. C'est-à-dire qu'on n'aurait besoin d'inclure seulement les champs parmi les concepts fondamentaux, tandis que le concept de particule serait un concept dérivé, ce qui est contraire à l'usage qui consiste à introduire les champs par le biais d'une « seconde quantisation ». Ainsi la décohérence semble-t-elle fournir un argument supplémentaire puissant en faveur de la primauté des champs sur les particules pour l'interprétation de la théorie quantique des champs.

Enfin, certains pensent que la décohérence pourrait être un ingrédient utile au sein d'une théorie de la gravité quantique, et ceci pour deux raisons. Premièrement, parce que, si elle était généralisée correctement au niveau d'une théorie complète de la gravité quantique, la décohérence résulterait en la suppression d'interférence entre les espace-temps classiques (Giulini *et al.* 1996, Section 4.2). Deuxièmement, la décohérence est pressentie comme pouvant peut-être résoudre un problème proéminent que rencontre la (théorie « canonique » de la) gravité quantique, le fameux *problème du temps*. Le problème consiste en ce que l'équation qui apparaît comme la meilleure candidate pour la théorie – l'équation de Wheeler-DeWitt – est analogue à une équation de Schrödinger *indépendante* du temps, et ne contient pas le temps comme variable. La question est alors simplement la suivante : d'où vient le temps ? Dans le cadre de la théorie de la décohérence, on peut construire des modèles dans lesquels la fonction d'onde Wheeler-DeWitt se décompose en composantes non-interférantes (pour un sous-système donné), qui chacune satisfont une équation de Schrödinger *dépendante* du temps, donnant ainsi l'impression que la décohérence est de fait à l'origine du temps.⁷⁰ Ridderbos (1999) offre une

⁷⁰ Une analogie avec la mécanique quantique standard pourrait se révéler ici utile. Prenez un oscillateur harmonique en équilibre avec son environnement. Un état d'équilibre par définition consiste en un état stationnaire, autrement dit un état indépendant du temps. Cependant, on peut décomposer l'état d'équilibre de l'oscillateur en une mixture de composantes localisées, chacune correspondant à l'un des mouvements classiques possibles de l'oscillateur (donc chacune dépendante du temps !). On peut trouver une décomposition de ce type par exemple dans Donald (1998, Section 2). Pour un modèle exemplaire, voir Halliwell et Thorwart (2002).

introduction accessible à cette question, ainsi qu'une analyse philosophique et des références aux travaux originaux sur le sujet.

Remerciements

Je voudrais remercier beaucoup de gens, qui, au travers de discussions, m'ont permis de forger ma compréhension de la décohérence le long de plusieurs années, en particulier, Marcus Appleby, Matthew Donald, Beatrice Filkin, Meir Hemmo, Simon Saunders, David Wallace et Wojtek Zurek. Pour des discussions plus récentes, directement liées à la rédaction de l'article sur lequel ce chapitre se fonde, je voudrais remercier Valia Allori, Peter Holland, Martin Jones, Tony Leggett, John Norton, Hans Primas, Alberto Rimini, Philip Stamp, Bill Unruh et, une fois encore, David Wallace pour leur commentaires clairs et constructifs. Enfin, je suis très reconnaissant envers Soazig Le Bihan pour m'avoir invité à contribuer à ce volume.

Bibliographie

Adler, S. L. (2003), 'Why Decoherence has not Solved the Measurement Problem: A Response to P. W. Anderson', *Studies in History and Philosophy of Modern Physics* **34B**, 135-142. Disponible aussi sur [arXiv.org/abs/quant-ph/0112095](https://arxiv.org/abs/quant-ph/0112095) .

Albert, D., et Loewer, B. (1988), 'Interpreting the Many Worlds Interpretation', *Synthese* **77**, 195-213.

Allori, V. (2001), *Decoherence and the Classical Limit of Quantum Mechanics*, Ph.D. Thesis, Università di Genova, Dipartimento di Fisica.

Allori, V., et Zanghì, N. (2009), 'On the Classical Limit of Quantum Mechanics', *International Journal of Theoretical Physics*, à paraître. Aussi disponible sur [arXiv.org/abs/quant-ph/0112009](https://arxiv.org/abs/quant-ph/0112009) .

Anglin, J. R., Paz, J. P., et Zurek, W. H. (1997), 'Deconstructing Decoherence', *Physical Review A* **55**, 4041-4053. Aussi disponible sur [arXiv.org/abs/quant-ph/9611045](https://arxiv.org/abs/quant-ph/9611045) .

Appleby, D. M. (1999), 'Bohmian Trajectories Post-Decoherence', *Foundations of Physics* **29**, 1885-1916. Also at [arXiv.org/abs/quant-ph/9908029](https://arxiv.org/abs/quant-ph/9908029) .

Bacciagaluppi, G. (2000), 'Delocalized Properties in the Modal Interpretation of a Continuous Model of Decoherence', *Foundations of Physics* **30**, 1431-1444.

Bacciagaluppi, G. (2002), 'Remarks on Space-Time and Locality in Everett's Interpretation', in T. Placek et J. Butterfield (dir.), *Non-Locality and Modality*, NATO Science Series, II. Mathematics, Physics and Chemistry, Vol. 64 (Dordrecht: Kluwer), pp. 105-122. Aussi disponible sur philsci-archive.pitt.edu/archive/00000504/ .

Bacciagaluppi, G. (2003), 'The Role of Decoherence in Quantum Mechanics', in Edward N. Zalta (dir.), *The Stanford Encyclopedia of Philosophy (Fall 2008 Edition)*, plato.stanford.edu/archives/fall2008/entries/qm-decoherence/ (première publication 2003)

Barbour, J. (1999), *The End of Time* (London: Weidenfeld and Nicolson).

Bassi, A., et Ghirardi, G.C. (2000), 'A general argument against the universal validity of the superposition principle', *Physics Letters A* **275**, 373-381.

Bell, J. S. (1987), *Speakable and Unsayable in Quantum Mechanics* (Cambridge: Cambridge University Press).

Bene, G., et Dieks, D. (2002), 'A Perspectival Version of the Modal Interpretation of Quantum Mechanics and the Origin of Macroscopic Behavior', *Foundations of Physics* **32**, 645-672. Aussi disponible sur [arXiv.org/abs/quant-ph/0112134](https://arxiv.org/abs/quant-ph/0112134).

Berkovitz, J., et Hemmo, M. (2006), 'A Modal Interpretation of Quantum Mechanics in Terms of Relational Properties', in W. Demopoulos and I. Pitowsky (dir.), *Physical Theory and Its Interpretation: Essays in Honor of Jeffrey Bub*, Western Ontario Series in Philosophy of Science, Vol. 72 (New York: Springer), pp. 1-28.

de Broglie, L. (1928), 'La nouvelle dynamique des quanta', in H. Lorentz (dir.), *Électrons et Photons: Rapports et Discussions du Cinquième Conseil de Physique Solvay* (Paris: Gauthiers-Villars), pp 105-132. Version traduite en anglais dans G. Bacciagaluppi et A. Valentini, *Quantum Theory at the Crossroads* (Cambridge: Cambridge University Press, 2009).

Brown, H.R. (1986), 'The insolubility proof of the quantum measurement problem', *Foundations of Physics*, **16**, 857-870.

Bohm, D. (1952), 'A Suggested Interpretation of the Quantum Theory in Terms of "Hidden" Variables. 'I' and 'II'', *Physical Review* **85**, 166-179 and 180-193.

Bohm, D., et Hiley, B. (1993), *The Undivided Universe* (London: Routledge).

Bub, J. (1999), *Interpreting the Quantum World* (Cambridge: Cambridge University Press, deuxième édition).

Cushing, J. T., Fine, A., et Goldstein, S. (1996), *Bohmian Mechanics and Quantum Theory: An Appraisal* (Dordrecht: Kluwer).

DeWitt, B. S. (1971), 'The Many-Universes Interpretation of Quantum Mechanics', in B. d'Espagnat (dir.), *Foundations of Quantum Mechanics*, Proceedings of the International School of Physics 'Enrico Fermi', Vol. 49 (New York: Academic Press). Réimprimé dans B. S. DeWitt et N. Graham (dir.), *The Many-Worlds Interpretation of Quantum Mechanics* (Princeton: Princeton University Press, 1973), pp. 167-218.

Dieks, D., et Vermaas, P. E. (dir) (1998), *The Modal Interpretation of Quantum Mechanics* (Dordrecht: Kluwer).

Donald, M. (1998), 'Discontinuity and Continuity of Definite Properties in the Modal Interpretation', in Dieks and Vermaas (1998), pp. 213-222. Aussi disponible sur <http://www.bss.phy.cam.ac.uk/~mjd1014/ut.pdf>

Donald, M. (1999), 'Progress in a Many-Minds Interpretation of Quantum Theory', arXiv.org/abs/quant-ph/9904001

Dowker, F., et Kent, A. (1995), 'Properties of Consistent Histories', *Physical Review Letters* **75**, 3038-3041. Aussi disponible sur arXiv.org/abs/gr-qc/9409037 .

Epstein, S. T. (1953), 'The Causal Interpretation of Quantum Mechanics', *Physical Review* **89**, 319.

Everett, H. III (1957), "'Relative-State" Formulation of Quantum Mechanics', *Reviews of Modern Physics* **29**, 454-462. Réimprimé dans Wheeler et Zurek (1983), pp. 315-323.

Fine, A. (1970), 'Insolubility of the quantum measurement problem', *Physical Review*, **D2**, 2783-2787.

van Fraassen, B. (1973), 'Semantic Analysis of Quantum Logic', in C. A. Hooker (dir.), *Contemporary Research in the Foundations and Philosophy of Quantum Theory* (Dordrecht: Reidel), pp. 180-213.

van Fraassen, B. (1991), *Quantum Mechanics: An Empiricist View* (Oxford: Clarendon Press).

Gell-Mann, M., et Hartle, J.B. (1994), 'Equivalent Sets of Histories and Multiple Quasiclassical Realms', [arXiv.org/abs/gr-qc/9404013](https://arxiv.org/abs/gr-qc/9404013).

Ghirardi, G., Rimini, A., et Weber, T. (1986), 'Unified Dynamics for Microscopic and Macroscopic Systems', *Physical Review D* **34**, 470-479.

Giulini, D., Joos, E., Kiefer, C., Kupsch, J., Stamatescu, I.-O., et Zeh, H. D. (1996), *Decoherence and the Appearance of a Classical World in Quantum Theory* (Berlin: Springer; deuxième édition révisée, 2003).

Halliwel, J. J. (1995), 'A Review of the Decoherent Histories Approach to Quantum Mechanics', *Annals of the New York Academy of Sciences* **755**, 726-740. Aussi disponible sur [arXiv.org/abs/gr-qc/9407040](https://arxiv.org/abs/gr-qc/9407040).

Halliwel, J. J., et Thorwart, J. (2002), 'Life in an Energy Eigenstate: Decoherent Histories Analysis of a Model Timeless Universe', *Physical Review D* **65**, 104009-104027. Aussi disponible sur [arXiv.org/abs/gr-qc/0201070](https://arxiv.org/abs/gr-qc/0201070).

Hartle, J. B. (1998), 'Quantum Pasts and the Utility of History', *Physica Scripta T* **76**, 67-77. Aussi disponible sur [arXiv.org/abs/gr-qc/9712001](https://arxiv.org/abs/gr-qc/9712001).

Healey, R. (1989), *The Philosophy of Quantum Mechanics: An Interactive Interpretation* (Cambridge: Cambridge University Press).

Hemmo, M. (1996), *Quantum Mechanics Without Collapse: Modal Interpretations, Histories and Many Worlds*, Ph.D. Thesis, University of Cambridge, Department of History and Philosophy of Science.

Hemmo, M. and Shenker, O. (2001) 'Can we Explain Thermodynamics by Quantum Decoherence?', *Studies in History and Philosophy of Modern Physics* 32 B, 555-568.

Holland, P. R. (1996), 'Is Quantum Mechanics Universal?', in Cushing, Fine et Goldstein (1996), pp. 99-110.

Howard, D. (2003), 'Who Invented the Copenhagen Interpretation? A Study in Mythology', conférence donnée lors d'un colloque d'une journée en l'honneur de Jim

Cushing, Faculté de Philosophie, Oxford, 26 June 2003, <http://www.nd.edu/~dhoward1/Copenhagen%20Myth%20A.pdf>.

Joos, E. et Zeh, H. D. (1985), 'The Emergence of Classical Properties through Interaction with the Environment', *Zeitschrift für Physik B* **59**, 223-243.

Kay, B. S. (1998), 'Decoherence of Macroscopic Closed Systems within Newtonian Quantum Gravity', *Classical and Quantum Gravity* **15**, L89-L98. Aussi disponible sur arXiv.org/abs/hep-th/9810077.

Kochen, S. (1985), 'A new Interpretation of Quantum Mechanics', in P. Mittelstaedt and P. Lahti (dir), *Symposium on the Foundations of Modern Physics 1985* (Singapore: World Scientific), pp. 151-169.

Leggett, A. J. (1984), 'Schrödinger's Cat and her Laboratory Cousins', *Contemporary Physics* **25**, 583-594.

Leggett, A. J. (2002), 'Testing the Limits of Quantum Mechanics: Motivation, State of Play, Prospects', *Journal of Physics C* **14**, R415-R451.

Mott, N. F. (1929), 'The Wave Mechanics of α -ray Tracks', *Proceedings of the Royal Society of London A* **126** (1930, No. 800 of 2 December 1929), 79-84.

von Neumann, J. (1932), *Mathematische Grundlagen der Quantenmechanik* (Berlin: Springer). Traduction : *Mathematical Foundations of Quantum Mechanics* (Princeton: Princeton University Press, 1955).

Pearle, P. (1997), 'True Collapse and False Collapse', in Da Hsuan Feng et Bei Lok Hu (dir.), *Quantum Classical Correspondence: Proceedings of the 4th Drexel Symposium on Quantum Nonintegrability, Philadelphia, PA, USA, September 8-11, 1994* (Cambridge, MA: International Press), pp. 51-68. Aussi disponible sur arXiv.org/abs/quant-ph/9805049.

Pearle, P. (1989), 'Combining Stochastic Dynamical State-vector Reduction with Spontaneous Localization', *Physical Review A* **39**, 2277-2289.

Pearle, P., et Squires, E. (1994), 'Bound-State Excitation, Nucleon Decay Experiments, and Models of Wave-Function Collapse', *Physical Review Letters*, **73**, 1-5.

Ridderbos, K. (1999), 'The Loss of Coherence in Quantum Cosmology', *Studies in History and Philosophy of Modern Physics* **30 B**, 41-60.

Saunders, S. (1993), 'Decoherence, Relative States, and Evolutionary Adaptation', *Foundations of Physics* **23**, 1553-1585.

Saunders, S. (2004), 'Operational Derivation of the Born Rule', *Proceedings of the Royal Society of London* **460**, 1-18.

Schlosshauer, M. (2007), *Decoherence and the Quantum-to-Classical Transition* (Springer: Heidelberg/Berlin, 1^{ère} édition.).

Shimony, A. (1989), 'Search for a Worldview which can Accommodate our Knowledge of Microphysics', in J. T. Cushing and E. McMullin (eds), *Philosophical Consequences of Quantum Theory* (Notre Dame, Indiana: University of Notre Dame Press). Réimprimé dans A. Shimony, *Search for a Naturalistic Worldview*, Vol. 1 (Cambridge: Cambridge University Press, 1993), pp. 62-76.

Spekkens, R. W., et Sipe, J. E. (2001), 'A Modal Interpretation of Quantum Mechanics based on a Principle of Entropy Minimization', *Foundations of Physics* **31**, 1431-1464.

Struyve, W., et Westman, H. (2007), 'A Minimalist Pilot-wave Model for Quantum Electrodynamics', *Proceedings of the Royal Society A* **463**, 3115-3129. Aussi disponible sur [arXiv.org/abs/0707.3487](https://arxiv.org/abs/0707.3487) .

Tegmark, M. (1993), 'Apparent Wave Function Collapse Caused by Scattering', *Foundations of Physics Letters* **6**, 571-590. Aussi disponible sur [arXiv.org/abs/gr-qc/9310032](https://arxiv.org/abs/gr-qc/9310032) .

Wallace, D. (2001), 'Implications of Quantum Theory in the Foundations of Statistical Mechanics', philsci-archive.pitt.edu/archive/00000410/.

Wallace, D. (2002), 'Quantum Probability and Decision Theory, Revisited', arXiv.org/abs/quant-ph/0211104.

Wallace, D. (2003a), 'Everett and Structure', *Studies in History and Philosophy of Modern Physics* **34 B**, 87-105. Aussi disponible sur arXiv.org/abs/quant-ph/0107114.

Wallace, D. (2003b), 'Everettian Rationality: Defending Deutsch's Approach to Probability in the Everett Interpretation', *Studies in History and Philosophy of Modern Physics* **34 B**, 415-439. Aussi disponible sur arXiv.org/abs/quant-ph/0303050.

Wheeler, J. A., et Zurek, W. H. (1983) (dir.), *Quantum Theory and Measurement* (Princeton: Princeton University Press).

Wightman, A. S. (1995), 'Superselection Rules; Old and New', *Il Nuovo Cimento* **110 B**, 751-769.

Zeh, H. D. (1970), 'On the Interpretation of Measurement in Quantum Theory', *Foundations of Physics* **1**, 69-76. Réimprimé dans Wheeler et Zurek (1983), pp. 342-349.

Zeh, H. D. (1973), 'Toward a Quantum Theory of Observation', *Foundations of Physics* **3**, 109-116.

Zeh, H. D. (1995), 'Basic Concepts and Their Interpretation'. Revised edition of Chapter 2 of Giulini *et al.* (1996). [les pages auxquelles il est fait référence sont celles de la version électronique disponible sur arXiv.org/abs/quant-ph/0506020, sous le titre 'Decoherence: Basic Concepts and Their Interpretation'.

Zeh, H. D. (2000), 'The Problem of Conscious Observation in Quantum Mechanical Description', *Foundations of Physics Letters* **13**, 221-233. Aussi disponible sur [arXiv.org/abs/quant-ph/9908094](https://arxiv.org/abs/quant-ph/9908094).

Zeh, H. D. (2001), *The Physical Basis of the Direction of Time* (Berlin: Springer, 4^{ème} édition.).

Zeh, H. D. (2003), 'There is no "First" Quantization', *Physics Letters A* **309**, 329-334. Aussi disponible sur [arXiv.org/abs/quant-ph/0210098](https://arxiv.org/abs/quant-ph/0210098).

Zurek, W. H. (1981), 'Pointer Basis of Quantum Apparatus: Into what Mixture does the Wave Packet Collapse?', *Physical Review D* **24**, 1516-1525.

Zurek, W. H. (1982), 'Environment-Induced Superselection Rules', *Physical Review D* **26**, 1862-1880.

Zurek, W. H. (1991), 'Decoherence and the Transition from Quantum to Classical', *Physics Today* **44** (October), 36-44. [Une version améliorée de 2003 tirée de cet article est disponible sur [arXiv.org/abs/quant-ph/0306072](https://arxiv.org/abs/quant-ph/0306072), sous le titre 'Decoherence and the Transition from Quantum to Classical — Revisited'.]

Zurek, W. H. (1993), 'Negotiating the Tricky Border Between Quantum and Classical', *Physics Today* **46** (April), 84-90.

Zurek, W. H. (1998), 'Decoherence, Einselection, and the Existential Interpretation (The Rough Guide)', *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A* **356**, 1793-1820. Aussi disponible sur [arXiv.org/abs/quant-ph/9805065](https://arxiv.org/abs/quant-ph/9805065).

Zurek, W. H. (2003), 'Decoherence, Einselection, and the Quantum Origins of the Classical', *Reviews of Modern Physics* **75**, 715-775. [Les pages auxquelles il est fait référence sont celles de la version électronique disponible sur [arXiv.org/abs/quant-ph/0105127](https://arxiv.org/abs/quant-ph/0105127).

Zurek, W. H., et Paz, J.-P. (1994), 'Decoherence, Chaos, and the Second Law', *Physical Review Letters* **72**, 2508-2511.