

Décohérence formelle, décohérence transcendantale

Michel Bitbol
CNRS, Paris

In : J. Kouneiher, *Vers une nouvelle philosophie de la nature*,
Hermann, 2010

Résumé

Les théories de la décohérence ne résolvent pas le problème de la mesure de la mécanique quantique en général, mais seulement une version particulière de celui-ci. Dans la perspective d'une épistémologie transcendantale, on montre cependant que cette version du problème est la seule légitime.

Abstract

Decoherence theories do not solve the measurement problem of quantum mechanics in general, but rather a specific version of it. In the framework of a transcendental (neo-kantian) epistemology, however, this version of the problem is shown to be the only relevant one.

MOTS-CLES: DECOHERENCE, PHYSIQUE QUANTIQUE, EMPIRISME, REALISME, PHILOSOPHIE TRANSCENDANTALE

Introduction

Mon premier but dans cet article est de montrer que des avancées théoriques ou expérimentales ne sauraient fournir une réponse *complète* à un problème philosophique concernant les fondements de la physique. Cela ne veut pas dire que ces avancées n'ont aucune portée philosophique. Elles imposent de telles contraintes à la réflexion qu'elles rendent parfois intenable certaines thèses qui paraissaient plausibles auparavant, ce qui est déjà une précieuse indication en négatif.

L'exemple privilégié qui me servira à illustrer cette proposition est celui des théories de la décohérence,

qualifiées par J. Bub de « nouvelle orthodoxie » en physique quantique. Le but déclaré des théories de la décohérence est de résoudre le « problème de la mesure », illustré par la célèbre expérience de pensée du « chat de Schrödinger » (E. Schrödinger, 1935). À travers cette résolution, elles visent à montrer comment la mécanique quantique peut suffire à s'interpréter elle-même. Elles prétendent, ainsi que l'écrit W.H. Zurek (2001), faire « (...) de la mécanique quantique (...) un outil fondamental dans la recherche de sa propre interprétation ». Or, en dépit de leurs succès remarquables, les théories de la décohérence n'ont pas complètement atteint ce double objectif. Tout d'abord, le problème de la mesure comporte un noyau irréductiblement philosophique, qui continue de leur résister. Ce noyau est, pour aller vite, la question du passage du potentiel à l'actuel; d'une potentialité distribuée à une actualité singulière. Par ailleurs, il serait vain de penser qu'une interprétation satisfaisante de la mécanique quantique puisse entièrement provenir des théories de la décohérence. Il ne faut pas oublier, en effet, que les résultats des théories de la décohérence et des expériences qui les corroborent (M. Brune et al., 1996; J. Dreyer, 1997; E. Hagley et al., 1997) dépendent, pour leur évaluation et leur exposé, d'une interprétation préalable de la mécanique quantique. Leur éventuel enseignement interprétationnel est en d'autres termes suspendu à l'interprétation qu'elles présupposent. Ceci signifie soit qu'on a affaire à un cercle vicieux, soit, de façon plus intéressante, que l'apport des théories de la décohérence se limite à une preuve d'auto-consistance: la consistance mutuelle entre l'interprétation d'où elles partent et l'interprétation à laquelle elles conduisent.

Ce rôle de l'interprétation préalable commence à attirer sérieusement l'attention. Ainsi que l'écrit Ulrich Mohrhoff (2001), « La décohérence n'est pas un

ingrédient de quelque stratégie interprétationnelle que ce soit. Elle est un phénomène physique prédit par la mécanique quantique, et, comme la mécanique quantique elle-même, elle a besoin d'être interprétée ». En fait, comme la mécanique quantique elle-même, la théorie de la décohérence est *déjà* sous l'influence d'une interprétation ou d'une autre, le plus souvent d'un curieux mélange d'au moins deux interprétations. Le mélange le plus fréquemment rencontré comporte une dominante de réalisme des essences formelles et une touche plus discrète d'empirisme. Ma première tâche sera de désintriquer ces deux composantes, réaliste et empiriste, dans le mélange standard d'interprétations. Puis, je montrerai comment concilier les conclusions tirées de l'une et de l'autre à partir d'un point de vue transcendantal.

1. Le réalisme formaliste du vecteur d'état: une approche standard de la décohérence

La composante réaliste détermine presque entièrement, nous allons le voir, le vocabulaire et le programme des théories de la décohérence. Mais d'abord par quoi est-elle motivée? Par une double qualification de la réalité qu'un philosophe néo-kantien (comme je le suis), considèrerait plutôt comme une double qualification de l'*objectivité*. Le réel c'est ici de façon générale une structure qui reste *invariante* par substitution de voies d'accès expérimentales, et c'est aussi plus spécifiquement une structure qui évolue selon une *loi* prenant la forme d'une équation aux dérivées partielles. Or, en mécanique quantique, le vecteur d'état répond bien à ces deux clauses. Un seul vecteur d'état, adéquatement choisi, permet de prédire les résultats de n'importe quel type d'expérience qui pourrait être effectuée à la suite d'une préparation donnée; et d'autre

part ce vecteur d'état est régi par une *loi* d'évolution comme l'équation de Schrödinger ou l'équation de Dirac. Le vecteur d'état se voit dès lors investi d'un poids ontologique: il est traité comme le reflet d'une détermination intrinsèque des systèmes physiques, qu'on appelle l'« état » de ces systèmes par une analogie réglée avec le concept d'état de la mécanique classique. Je passerai sur les critiques, nombreuses, adressées à cette assimilation courante entre un vecteur de l'espace de Hilbert et l'état d'un système, pour examiner sans plus tarder ses conséquences sur la lecture des processus de décohérence.

Si l'on prend pleinement au sérieux l'interprétation qui vient d'être exposée, les théories de la décohérence ont pour but principal de montrer la compatibilité entre les états décrits par la mécanique quantique et les états constatés expérimentalement à grande échelle. Les états décrits par la mécanique quantique sont généralement des superpositions, des combinaisons linéaires quelconques des états accessibles, tandis que les seuls états constatés à l'échelle macroscopique du laboratoire sont ceux qui correspondent aux vecteurs propres d'observables particulières. Les états accessibles intervenant dans une superposition interfèrent, tandis que les états constatés à l'échelle macroscopique, mutuellement exclusifs, n'interfèrent pas. La solution qu'offrent les théories de la décohérence à ce problème de hiatus entre le domaine quantique et le domaine macroscopique semi-classique porte un nom descriptif de son principe. Ce nom est: *Supersélection induite par l'environnement*. L'idée consiste en bref à montrer que les cohérences de phase de l'état d'un appareil corrélé à un système quantique sont très rapidement diluées dans l'environnement avec lequel interagit cet appareil. La quasi-disparition des termes d'interférence réalise alors l'équivalent d'une règle de supersélection, qui retient les

seuls états propres d'une observable (elle-même sélectionnée par le processus de décohérence), à l'exclusion de leurs superpositions. Le résultat est incontestablement important, mais il est survalorisé par l'interprétation réaliste des vecteurs d'état. Si on prend au sérieux un réalisme des essences formelles, on doit admettre que la *réalité* physique, assimilée à l'ensemble des systèmes et de leurs états, est fidèlement représentée par des combinaisons linéaires de vecteurs d'un espace de Hilbert. Dès lors, tout le reste, y compris le comportement classique des objets d'échelle macroscopique n'est qu'*apparence*. Ce que la décohérence a permis, selon cette interprétation, c'est rien moins que de dériver les *apparences* classiques à partir de la réalité quantique. La décohérence *explique*, martèlent plusieurs auteurs, pourquoi un univers essentiellement quantique (c'est-à-dire représenté par un vecteur d'état pouvant impliquer des superpositions) nous *semble* classique à grande échelle de taille et surtout de complexité. Du même coup, les théories de la décohérence se voient assigner pour tâche de justifier *a posteriori*, par un raisonnement et un calcul menés de bout en bout dans le cadre de la physique quantique, l'étrange division du monde prescrite par Bohr entre un domaine classique et un domaine proprement quantique. Dans le cadre de l'interprétation réaliste des théories de la décohérence, la division bohrienne est seulement une distinction à valeur pratique entre ce qui *apparaît*, à nous qui sommes dotés d'instruments grossièrement macroscopiques, et ce qui *est*, tel que le révèle une reconstruction rationnelle partant des données de ces mêmes instruments. On croirait entendre le Kant dogmatique et pré-critique de la *Dissertation de 1770*. Selon lui, les « (appréhensions) sensorielles sont les représentations des choses *telles qu'elles apparaissent*, et (...) les pensées intellectuelles sont les représentations des choses *telles qu'elles sont* ».

Quelques difficultés laissent pourtant soupçonner que, si les théories de la décohérence sont un incontestable succès parce qu'elles ont permis de définir et de prévoir un ensemble de phénomènes inédits, elles ont moins de portée fondationnelle que ne leur en prêtent ceux de leurs créateurs qui se meuvent dans le cadre d'un réalisme du vecteur d'état. J'en prendrai trois exemples, dans un ordre de gravité croissante.

La première difficulté, sans doute la moins aiguë, est la disparition incomplète des termes non-diagonaux de la matrice densité, c'est-à-dire le maintien de termes d'interférence non-nuls. Des superpositions macroscopiques demeurent, même si leurs manifestations sont presque toujours indétectables. Par ailleurs, le processus qui a conduit à la quasi-disparition des termes d'interférence est en droit *réversible*, et peut donc conduire à échéance plus ou moins longue à la réapparition d'interférences entre états macroscopiques. Il ne s'agit pas là d'une vue de l'esprit: des expériences faites à la suite de celles qui ont pour la première fois mis en évidence un effet de décohérence, ont prouvé qu'il pouvait être rendu réversible. Des courbes spectaculaires de récurrence des corrélations de phase illustrent cette réversibilité (J.M. Raimond et al., 1997). La réponse à cette objection n'est cependant pas très difficile à donner dans l'optique développée précédemment. Il suffit d'admettre que les théories de la décohérence n'ont pas la prétention de prouver qu'un monde réellement classique émerge du monde quantique, mais seulement, une fois encore, des *apparences* quasi-classiques. Cela suffit amplement en pratique, étant donné que les termes résiduels sont très petits et que les temps de récurrence sont extrêmement longs. L'argument de Boltzmann contre Loschmidt peut ici resservir.

La seconde difficulté, plus importante, nous conduit au noyau philosophique du problème de la mesure que

j'évoquais précédemment. La décohérence conduit bien à une matrice densité comportant des termes non-diagonaux quantitativement négligeables, mais elle ne conduit pas à de vrais mélanges statistiques (B. d'Espagnat, 1994). Et à supposer que l'on tienne ces matrices densité pour des *quasi*-mélanges statistiques, il faudrait convenir que le processus qui y a conduit n'indique de toutes manières en rien le passage à un état propre singulier de l'observable mesurée. Le processus de décohérence n'équivaut pas à une véritable réduction de l'état. Il aboutit seulement à une superposition très peu interférente en présence de laquelle on peut faire comme si une réduction avait eu lieu (même si on ne sait pas laquelle). Le passage du potentiel à l'actuel n'est manifestement pas du ressort de la théorie quantique, et il n'est sans doute, comme le souligne Roland Omnès, du ressort d'aucune théorie physique. Face à cela, la réaction majoritaire, réunissant en particulier Zurek et Gell-Mann, a consisté à proposer une combinaison de décohérence et de Many-Worlds interprétation. Dans un article récent, Zurek parle par exemple, comme Everett, de réduction *apparente* de l'état, du point de vue d'une contrepartie de l'observateur impliqué dans le processus de mesure; une apparence de réduction rendue crédible par le fait qu'à la suite de la supersélection induite par l'environnement, « (...) des états distincts de mémoire et d'identité de l'observateur (...) ne peuvent pas être superposés » (W.H. Zurek, 2001). Cette solution n'est pas à rejeter d'emblée, mais la nécessité d'y faire appel montre assez que la décohérence n'a pas suffi à elle seule à résoudre le problème de la mesure. Il a fallu la greffer sur une sorte de vision métaphysique d'un univers devenu plurivers, doublée d'une réflexion sur la place des observateurs que nous sommes dans ce plurivers.

La troisième difficulté est la plus subtile mais aussi la plus profonde. Comme l'écrit Zurek, en l'absence de

division de l'univers en sous-systèmes, la seule évolution à considérer serait celle d'un vecteur d'état global, conformément à une équation du type de celle de Schrödinger. L'importance d'une description des processus de décohérence n'apparaît que lorsqu'on focalise l'attention sur des sous-systèmes de cet univers. On arrive ainsi à montrer que pour un certain type de sous-système mésoscopique apte à recevoir et à traiter de l'information sur l'univers à partir de l'intérieur de cet univers (disons l'Homme), les *apparences* sont classiques. Une question délicate doit être posée à ce stade: au nom de quoi faire l'hypothèse d'une division de l'univers en sous-systèmes, alors qu'on a admis qu'ils sont non seulement ouverts et en interaction mutuelle, mais aussi susceptibles d'une intrication quantique qui aboutit à n'attribuer un état qu'au tout et non pas aux parties? Au nom de quoi si ce n'est: (1) parce que *notre* intérêt se concentre tout entier sur l'un de ces sous-systèmes, et (2) parce que *notre* expérience quotidienne nous indique que cette division est en pratique réalisée à une très bonne approximation près, à notre échelle? Mais est-on en droit de faire entrer en ligne de compte notre intérêt anthropologique dans une théorie qui prétend décrire le monde tel qu'il *est*? Et par ailleurs, le but des théories de la décohérence n'était-il pas justement de *justifier* la notion d'une séparation en pratique satisfaisante entre sous-systèmes, et de leur désintrication par perte d'effets d'interférence? Une prémisses majeure des théories de la décohérence tient par conséquent leur conclusion pour acquise. Il semble que l'on ait affaire ici à un cercle, ce qui est très gênant quand on prétend partir d'un fondement ultimement réel (le monde quantique décrit par des vecteurs d'état) pour en dériver unidirectionnellement des conséquences. Seule une interprétation moins forte de la mécanique quantique, que nous allons maintenant examiner, rend cette prémisses des théories de la

décohérence acceptable, tout donnant sens au cercle qui en découle.

2. Une lecture intégralement empiriste de la décohérence

Le deuxième type principal d'interprétation sous lequel peuvent être lues les théories de la décohérence est *empiriste*. Dans un cadre empiriste, l'évaluation de ce qui compte comme étalon du réel est aux antipodes du réalisme des essences formelles. Le réel, pour un empiriste, c'est avant tout le *fait*, le fait immédiatement constaté au laboratoire. Au lieu d'accorder, comme le réaliste des essences formelles, une valeur d'*être* aux invariants et aux représentations générales, l'empiriste déplace le balancier ontologique vers les variations concrètes et les événements singuliers. À ses yeux, tout ce que peuvent faire les lois de la physique, c'est anticiper, par un échafaudage structural dénué de toute prétention à représenter quoi que ce soit, des corrélations reproductibles entre faits possibles. Ainsi, les lois de la mécanique classique anticipent des corrélations *strictes* entre phénomènes possibles; et c'est seulement à condition d'avoir identifié leurs *conditions initiales* à des faits actuels qu'elles fournissent des prévisions pour des faits ultérieurs. Les lois de la mécanique quantique anticipent quant à elles des corrélations *probabilistes* entre phénomènes possibles, qui ne deviennent testables qu'à partir du moment où on a fait correspondre un vecteur d'état initial à une préparation effective, et où on a comparé les probabilités calculées à des phénomènes expérimentaux *effectifs*. Dans cette optique, les vecteurs d'état ne reflètent en aucune manière une réalité plus profonde que les faits qu'ils permettent de prévoir. Ils sont seulement un outil sophistiqué de calcul des probabilités, adapté à des situations où les phénomènes ne sont pas séparables de leur contexte expérimental, ce

qui est le cas en physique microscopique. Quelle peut alors être la signification de la décohérence selon un tel système épistémologique? Certainement pas celle d'avoir démontré l'émergence d'apparences classiques à partir d'une réalité plus profonde décrite par les symboles de la mécanique quantique. Car la réalité, ce *sont* ici les « apparences » classiques. Si quelque chose émerge par décohérence d'après l'interprétation empiriste, ce n'est rien d'autre que la forme habituelle, kolmogorovienne, de calcul des probabilités à partir de la forme quantique de calcul des probabilités.

Les trois principales difficultés de l'interprétation réaliste de la décohérence s'en trouvent transfigurées.

La première difficulté, celle de la non disparition complète des termes d'interférence, n'a rien d'alarmant aux yeux d'un empiriste. Elle prouve simplement que le détachement complet des faits à l'égard de leur contexte est une idéalisation, et que le calcul des probabilités en porte la marque indélébile.

La seconde difficulté en est encore moins une pour le penseur empiriste. Il est même en droit de s'étonner que quelqu'un ait jamais pu espérer dériver le fait actuel d'une pure manipulation formelle des possibles et de leurs corrélations. Cela revient à rêver que la réalité tangible puisse sortir tout armée d'une opération de la pensée; que l'existence puisse dériver de l'essence. Tout ce qu'a pu montrer la décohérence, et on n'a aucune raison de lui en demander plus, est qu'un calcul des probabilités classique interprétable en termes de *hasard d'ignorance* émerge (à une approximation près) d'un calcul des probabilités quantique qui ne se prête pas à cette interprétation. Il est vrai que l'interprétation en termes de *hasard d'ignorance* autorise à imaginer qu'une propriété est réalisée dans la nature indépendamment de sa mise en évidence expérimentale; mais il serait absurde de demander au calcul des probabilités de sélectionner

par lui-même cette propriété parmi toutes celles qu'il sert à pondérer.

La troisième difficulté, enfin, trouve un début d'issue particulièrement intéressant dans un cadre empiriste. Il y a bien une forme de circularité entre la *prémisse* des théories de la décohérence qu'est la division de l'univers en sous-systèmes, et leur *conclusion* qui revient à montrer que les objets d'échelle macroscopique se comportent comme des entités séparées, dotées de déterminations propres et stables. Mais cette circularité n'a rien d'étonnant ni de choquant pour un empiriste. Il est pour lui inévitable qu'on parte de faits mésoscopiques palpables, réels, et concrets, dans l'élaboration de n'importe quelle théorie physique. Tout ce qu'on demande à cette théorie est d'être *compatible* avec cette réalité. Or c'est justement cela qu'a montré l'étude des processus de décohérence, en faisant en quelque sorte boucler la mécanique quantique sur elle-même. La décohérence a démontré que son cadre formel ne s'inscrivait pas en faux contre son matériau réel. C'est peu et beaucoup à la fois. Nous allons mieux voir l'importance de cette démonstration en abordant une troisième interprétation de la mécanique quantique.

3. Décohérence et épistémologie transcendantale

L'interprétation transcendantale, que je voudrais maintenant développer, emprunte quelque chose aux deux précédentes, la réaliste formaliste et l'empiriste; mais elle renvoie aussi dos à dos leurs affirmations ontologiques opposées. Ce qui est réel dans une interprétation transcendantale n'est *ni* la généralité formelle *ni* la singularité du fait. C'est plutôt une dynamique de définition réciproque de l'une par l'autre, dont le travail de la recherche scientifique offre l'exemple le plus pur.

Selon un transcendantaliste, l'empiriste a d'abord raison de suggérer que l'organisation classique du monde mésoscopique est une *condition de possibilité* de l'élaboration du formalisme quantique. Il a raison de souligner que la croyance à des faits singuliers distincts ne peut pas ne pas servir de point de départ effectif à la formalisation quantique, car sans cela on ne verrait même pas à *propos de quoi* la théorie quantique fournit des probabilités. C'est d'ailleurs le sens qu'il faut attribuer à l'insistance de Bohr sur la nécessité de décrire une part au moins de l'appareillage expérimental dans un cadre classique. Mais de là à faire du mode d'organisation et des faits classiques un fondement ultime, il y a un pas que le transcendantaliste, contrairement à l'empiriste, refuse catégoriquement de franchir. Être une condition de possibilité ne revient pas à être une réalité. Servir de point de départ n'équivaut pas à être plus consistant ontologiquement que le point d'arrivée. De surcroît, signale le transcendantaliste, il ne faut pas perdre de vue qu'un fait actuel isolé resterait purement anecdotique. Le fait actuel n'acquiert sa signification et même sa définition qu'à travers un *formalisme* qui lui fait correspondre d'autres faits à travers des lois. L'organisation des faits, condition de possibilité, n'a de valeur et même de rigueur que par la formalisation prédictive qu'elle rend possible. Cela est si vrai que le fait se retrouve progressivement rejeté à l'arrière-plan au profit de sa signification, et de l'intérêt spéculatif qu'il alimente. Et l'on semble en arriver ainsi pas après pas à l'antithèse doctrinale de l'empirisme qu'est le réalisme formaliste.

Mais le transcendantaliste se garde également de cette seconde extrémité. Il trouve vain de vouloir rendre la forme complètement autonome par rapport à tout contenu. Il juge étrange que l'on veuille fonder l'organisation factuelle qui conditionne le formalisme

quantique, sur le formalisme même qui est conditionné. En bref, il ne comprend pas qu'on espère dériver la condition de possibilité à partir de ce qu'elle rend possible. Selon lui, tout autant que le fait appelle une formalisation pour le définir, le faire signifier, et l'insérer dans un réseau légal fondateur de nouvelles objectivités, le formalisme appelle des faits pour lui fournir argument et remplissage. En paraphrasant Kant, les faits sans formes sont certes aveugles, mais les formes sans faits sont vides.

Dans le cadre d'une interprétation transcendantale, les deux premières difficultés de l'interprétation réaliste des théories de la décohérence se résolvent à peu près comme dans l'interprétation empiriste. Mais la solution de la troisième difficulté acquiert une importance particulière. Contrairement à la platitude empiriste, il ne s'agit pas seulement de montrer que le formalisme prédictif de la mécanique quantique s'abstient de contredire sa base réelle qu'est le domaine des faits. L'enjeu est ici d'établir fermement l'une des deux branches de la dialectique constitutive de la physique quantique. Il est d'assurer une parfaite réciprocity de co-définition entre le schéma formel de la théorie quantique et ce qui joue pour lui le rôle de contenu factuel. La branche qui allait d'une certaine classe de faits, en particulier spectraux, à sa formalisation quantique, était connue depuis le début du vingtième siècle; mais il a fallu attendre la fin du vingtième siècle pour clarifier la branche inverse qui va du formalisme quantique à la structure des faits lui servant d'arguments. Les théories de la décohérence ont en somme complété la démonstration *d'auto-consistance* du système constitué de la mécanique quantique et des préjugés qui gouvernent son attestation expérimentale. Grâce aux théories de la décohérence, la mécanique quantique a parachevé ce qu'il est convenu d'appeler son « cercle épistémologique » (M. Bitbol, 2000a) par analogie

avec le « cercle herméneutique ». La mécanique classique avait déjà son cercle épistémologique propre. Car la mesure censée l'attester était interprétée en admettant que les appareils obéissent aux mêmes lois, classiques, que l'objet auquel ils donnent accès. La mécanique quantique a désormais également un cercle épistémologique ne dépendant d'aucune théorie antérieure, puisqu'il a été montré que le processus expérimental qui sert à attester cette théorie est conforme à ses lois.

Telle est la signification, transcendante, de la décohérence: l'établissement d'un cercle qui, loin d'être vicieux, est co-constitutif.

Bibliographie

- M. Bitbol (2000a), « Physique quantique et cognition », *Revue Internationale de Philosophie*, n°212, 299-328
- M. Bitbol (2000b), *Physique et philosophie de l'esprit*, Flammarion
- M. Brune, E. Hagley, J. Dreyer, X. Maître, A. Maali, C. Wunderlich, J.M. Raimond, and S. Haroche (1996) « Observing the Progressive decoherence of the meter in a quantum measurement », *Phys. Rev. Lett.*, 77, 4887
- J. Dreyer (1997), *Atomes de Rydberg et cavités: observation et décohérence dans une mesure quantique*, Thèse de doctorat de l'Université Paris VI
- B. d'Espagnat (1994), *Le réel voilé*, Fayard
- E. Hagley, X. Maître, C. Wunderlich, M. Brune, J.M. Raimond, and S. Haroche (1997) « Generation of Einstein-Podolsky-Rosen pairs of atoms », *Phys. Rev. Lett.*, 79, 1-5
- E. Kant, *Dissertation de 1770*, in: *Oeuvres I*, Gallimard, 1980
- U. Mohrhoff (2001) « Two theories of decoherence », arXiv: quant-ph/0108002

- R. Omnès, *The interpretation of quantum mechanics*, Princeton University Press, 1994
- J.M. Raimond, M. Brune, and S. Haroche (1997), « Reversible decoherence of a mesoscopic superposition of field states », *Physics Review Letters*, 79, 1964-1967
- E. Schrödinger (1935), « La situation présente en mécanique quantique », in: E. Schrödinger, *Physique quantique et représentation du monde*, Points-Seuil
- W.H. Zurek (2001), « Decoherence, einselection, and the quantum origins of the classical », arXiv: quant-ph/0105127