Unifier Information classique et information quantique.
Une lecture de l'approche de David Deutsch et Chiara Marletto,
"Constructor Theory of Information".

David Deutsch est un physicien britannique de l'université d'Oxford. Il est l'un des promoteurs de l'idée du calcul quantique (quantum computation). Il est par ailleurs l'un des partisans d'une des interprétations non classique de la physique quantique : celle des multivers (many words) d'Hugh Everett. A partir de ce *background,* il travaille sur des questions concernant les lois fondamentales de la nature ; dans ce cadre général, il formalise certaines de ses idées dans une "théorie des constructeurs" et dans les applications de cette dernière à la théorie de l'information, et plus spécifiquement à la théorie de l'information quantique. Notre attention a été attirée sur ces travaux à la suite de la journée "La science et l'impossible" (PIF 2014), notamment à la suite l'exposé de Gilles Cohen-Tannoudji sur les constantes fondamentales ; à cette occasion, l'un des articles (Deutsch/Marletto 2014) analysé ici a été cité.

David Deutsch a publié sa "théorie des constructeurs" dans un article précédent publié en 2013 par la revue de philosophie des sciences, Synthese (*Synthese (2013) 190:4331-4359*). Dans cet article, il cherche à montrer que le but fondamental de la science est d'établir quels sont, dans notre monde, les changements (transformations), *qui sont possibles* et ceux *qui sont impossibles*, *et d'expliquer pourquoi ;* autrement dit, d'établir les changements que certains processus (causaux) *peuvent* faire advenir et ceux pour lesquels cette éventualité ne peut se produire, puis d'en dégager les raisons de principe. Il oppose cette conception - basée sur la recherche de ce qui est possible et de ce qui est impossible - à celle_qui met l'accent sur la seule recherche de *ce qui va arriver*, tenant compte des conditions de départ et des lois du changement, une conception qu'il critique et qu'il qualifie de *dominante* (*prevailing conception*).

En 2014, il prolonge son analyse et publie avec Chiara Marletto, dans les proceedings de la Royal Society of London, un second article (*Proc. R. Soc. A 471:201440540*), intitulé Constructor Theory of Information. Dans cet article, les auteurs se donnent pour but d'élargir la théorie de l'information de Shannon pour y intégrer l'information quantique. Ils y présentent une théorie de l'information exprimée en termes de transformations possibles et impossibles, (entendons transformations *physiques*, i.e. de systèmes *matériels*). La notion d'information n'est pas regardée comme étant de nature purement mathématique ou logique : sa nature et ses propriétés résultent des lois de la physique et d'elles seules. A la fin de leur papier, Deutsch et Marletto précisent les spécificités de l'information quantique. La citation de leurs travaux par Gilles Cohen-Tannoudji était motivée par la réunion de ces deux composantes, savoir la dichotomie possible/impossible et la notion d'information en physique, composantes largement présentes dans l'exposé PIF 2014 mentionné.

Le présent billet est essentiellement une note de lecture de l'article Deutsch/Marletto. Nous nous sommes fixé pour but d'en expliciter - pour pouvoir mieux en discuter - les concepts, les postulats et les développements importants. L'article est en effet relativement difficile et abstrait, il s'agissait d'abord pour nous d'en comprendre la cohérence. La note s'articule sur le plan général suivi par les auteurs, savoir en résumé :

i. *Rappel* des notions à la base de leur “théorie des constructeurs”, utiles à leur théorie de l’information : attributs, états et tâches,
ii. *Définitions*, dans les termes de la théorie des constructeurs, de ce que sont un calcul, une information, une mesure.
iii. *Enoncés*, complétant ces définitions, *d’un ensemble de postulats* - ou de principes - nécessaires et naturels, fondant la notion d’*observable* et une théorie de l’*information classique.*
iv. *Spécificités* d’une “*super-information”* et de l’*information quantique*, vue comme un exemple de super-information

Rappel : Eléments de théorie des constructeurs

La théorie des constructeurs décrit le monde en termes de transformations impliquant deux types de systèmes, jouant des rôles distincts : le premier est l’acteur de la transformation (*causing the transformation*), il est désigné comme étant le constructeur ; le second est l’objet de la transformation, un *substrat*. Ce substrat peut être composite, formé de plusieurs sous-systèmes. Une transformation à effectuer sur un substrat par un constructeur prend le nom de *tâche*.

Constructeurs

Cette conception paraît s’inspirer de l’informatique : dualité programme (l’acteur, le constructeur) et données (le substrat) ; dans la même veine, dualité agents/environnement, dans la “programmation à base d’agents”. Mais cette inspiration informatique n’est pas mise au premier plan : au début de son article dans la revue Synthèse, David Deutsch prend l’exemple d’une usine (*automated factory*) qui produit des biens en transformant des ressources en d’autres ressources. Cet exemple fait percevoir la distinction fondant le propos de l’auteur : distinction entre, d’une part, ce qui relève de la science fondamentale, savoir déterminer si et pourquoi ces transformations sont possibles ; et d’autre part, ce qui relève de la technique, la mise en oeuvre effective, plus ou moins optimisée, de ces transformations par un constructeur.

Les autres exemples donnés par David Deutsch vont dans le même sens : d’une part, une machine à vapeur (un constructeur) et, d’autre part, les transformations entre formes d’énergie et leurs lois précisant ce qui est possible ; ou encore, exemple longuement développé (Synthese, p3336-4337), le catalyseur d’une réaction chimique (le constructeur), et le bilan des transformations chimiques opérées. Les lois de la chimie précisent ce qu’on peut attendre au niveau de ce bilan, par exemple les différentes concentrations de solutés à l’équilibre ; le catalyseur est un élément du constructeur qui rend plus ou moins rapide cette marche vers l’équilibre.

Dans l’article de Deutsch/Marletto, la notion de constructeur ne joue pas un rôle important. Car tout le raisonnement et toutes les définitions sont basés sur le caractère, possible ou impossible, des transformations considérées, et non sur leur mise en oeuvre effective. Nous ne nous y attarderons donc pas davantage.

Tâches

Une tâche, selon la première définition qu’en donne Wikipedia, est *l’ouvrage que doit faire un ouvrier dans un certain temps et un certain prix.* Une tâche, chez Deutsch, est effectivement la spécification d'une certaine transformation de l'état des choses, transformation que des constructeurs pourront éventuellement accomplir, plus ou moins parfaitement et en exploitant certaines ressources.

Spécifier une tâche, c'est dresser une liste descriptive des différentes situations, cas de figures, etc, auxquels cette tâche aura à faire face puis, en regard, les différentes situations, qu'elle devra laisser derrière elle une fois accomplie. Ce vocabulaire anthropomorphique sous-tend plusieurs présupposés :

i. la possibilité de circonscrire, dans l'espace et dans le temps, la "partie du monde" à prendre en compte dans les différentes situations de départ et d'arrivée de la tâche : Une tâche s'attache, par nature, à un *système isolé* (*a closed system*).
ii. le caractère fini, limité, des informations à fournir sur ces différentes situations de départ et d'arrivée.

Syntaxe et sémantique des tâches

Une tâche, dans le texte Deutsch/Marletto, soit la transformation à opérer, est spécifiée par une liste de *paires d'attributs* (on entend par attribut une propriété quelconque possédée par l'objet[1]). Dans cette liste, notée $\{x_1 \rightarrow y_1, x_2 \rightarrow y_2, \ldots\}$: les attributs x_1, x_2, caractérisent les différentes situations possibles de départ, c'est la *liste des entrées admissibles* ; les attributs y_1, y_2, …caractérisent autant de situations d'arrivée, c'est la *liste des sorties prescrites*[2].

Une tâche peut en effet être vue comme une *prescription* : Si, avant l'accomplissement de la tâche, le substrat (soit l'objet de la transformation souhaitée), affiche l'attribut x_1, il doit, après l'accomplissement de la tâche, afficher l'attribut associé y_1 ; si le substrat affiche l'attribut x_2, il doit après coup afficher l'attribut y_2, etc.…

Cette forme de spécification est générale : elle ne fixe aucune condition sur les attributs en jeu (être différents, ou bien être les éléments d'un même ensemble logique, par exemple faire partie d'un ensemble de couleurs, etc...). Elle ne restreint pas non plus les degrés de liberté laissés à la tâche dans son exécution, autrement dit, sa marge de manoeuvre ; les seules contraintes résident dans la donnée des attributs associés d'entrée (de départ) et de sortie (d'arrivée) ; ainsi, partant d'une quelconque situation du substrat affichant x_1, l'arrivée dans une situation quelconque du même substrat affichant y_1 suffit à remplir la prescription.

Une tâche est une prescription *générique*. Elle concerne une *classe* de substrats de même nature et structure physique, et non un substrat particulier. Ainsi, selon Deutsch, transformer une architecture métallique en utilisant le métal dont elle est faite, pour fabriquer des milliers de modèles réduits de cette architecture, est une tâche ; transformer la tour Eiffel en milliers de tours Eiffel miniatures n'en est pas une : c'est une instance de la tâche précédente. Le terme de tâche est donc ambigu. Peut-être faudrait-il mieux parler de *classe* de tâches, ou *tâche générique* dans le premier cas et réserver le terme de tâche aux instances concrètes, telle la réduction de la tour Eiffel.

---

[1] Nous revenons plus loin, en détail, sur cette notion et celle d'*état.*

[2] Dans le vocabulaire de Deutsch/Marletto, les *legitimate input states* et *legitimate output states* de la tâche.

Tâches possibles et impossibles.

Spécifier une tâche, ce n'est pas affirmer que sa réalisation est possible ; c'est uniquement faire une proposition, à charge justement à la science de statuer sur sa possibilité et les raisons de cette possibilité ou impossibilité. Selon Deutsch, une tâche est possible *si les lois de la nature n'imposent pas de limites à l'exactitude de sa réalisation, pas de limites non plus aux capacités des constructeurs, qui en ont exécuté une instance, de conserver la faculté d'en accomplir une à nouveau.*

Un tel énoncé suppose que l'on dispose d'une théorie des processus physiques concernés, permettant à la fois : 1) de définir et d'évaluer ce degré d'exactitude ; 2) d'affirmer qu'aucune limite d'exactitude n'existe fondamentalement pour la réalisation. Si au contraire, selon cette théorie, une telle limite fondamentale existe, la tâche sera dite *impossible*.

La réalisation d'une tâche peut nécessiter certaines ressources - par exemple une énergie - ou bien, d'une manière plus large, peut induire des *effets de bord* (*side effects*) sur un autre substrat mobilisé pour l'occasion. L'opération menée par le constructeur implique alors l'accomplissement parallèle d'une seconde tâche - l'extraction de la ressource dans l'exemple mentionné - sur un second substrat, formant conjointement avec le premier un système global isolé. Ainsi, une tâche **A** sera dite ici *possible sous condition*, *ou possible avec effets de bord*, *si elle ne devient possible que combinée parallèlement avec une autre tâche* **T** .

Etats et attributs

La spécification d'une tâche mobilise les notions d'attribut, (affiché par le substrat), ou encore d'état du même substrat. Deutsch utilise en effet dans son propos les deux termes d'état et d'attribut de façon quasiment équivalente. Ainsi, dans l'article de *Synthese*, parle-t-il de *legitimate input states*, alors que dans son article sur la théorie de l'information de 2014, il parle de *legitimate input attributes* ; dans ce dernier document, il définit un attribut comme n'importe quelle propriété du système, qu'elle soit mesurable ou non ; puis, dans la foulée, il définit l'attribut comme étant formellement un ensemble d'états, lesquels vérifient chacun la propriété associée à cet attribut. Dans une version antérieure du même article, il donnait de la notion d'attribut une définition plus constructive, *à savoir n'importe quoi concernant le système qui peut être changé au cours d'un processus physique*.

Dans toutes ces versions, l'ensemble $\mathbb{E}$ des états possibles d'un substrat est à la base de toute la structure des attributs, vus comme des sous-ensembles de $\mathbb{E}$, identifiés par la théorie du domaine concerné. On peut dire aussi, dans l'autre sens, qu'un état est un attribut indécomposable et qu'il constitue le grain le plus fin dans la structure des attributs. Par ailleurs, penser systématiquement un attribut comme un sous-ensemble d'états élémentaires permet de décrire les associations logiques d'attributs (conjonctions, disjonctions), en termes ensemblistes. Mais qu'est ce qu'un état ?

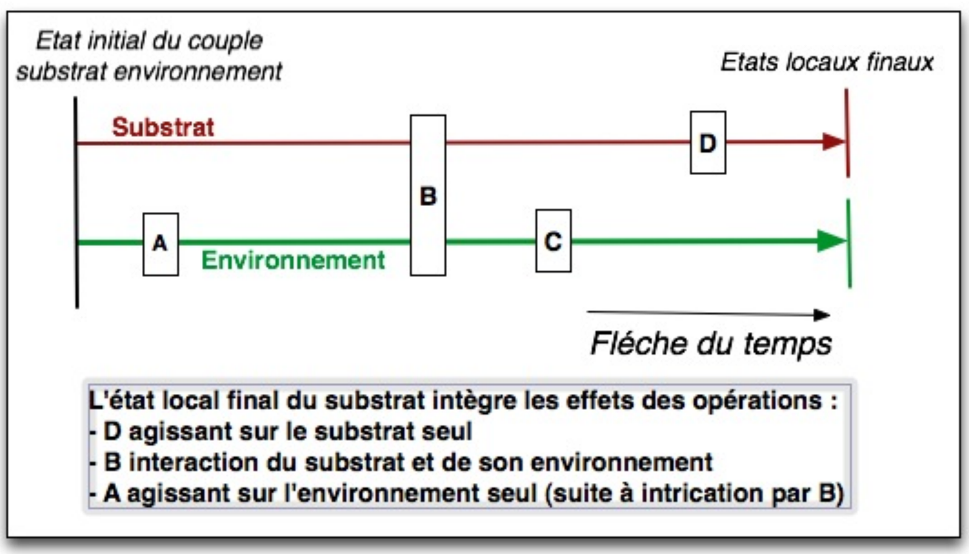
La possibilité de parler d'un état local, *intrinsèque*, d'un système.

La définition constructive des états et attributs, à partir de ce qui peut être *changé*, est à rapprocher d'une remarque incidente faite par Deutsch dans l'article *Synthese* (page 4333) : à savoir, l'idée que les concepts fondamentaux (*primitive entities*), pour décrire la nature, pourraient bien être justement les transformations, et que les substrats, et leurs états, seraient seulement des concepts dérivés. Cet accent mis sur les changements renvoie aux thèses de Deutsch concernant l'interprétation de la physique quantique ; et, sur un plan technique, au traitement de la question de la localité, présenté dans un article publié en 2000 avec Patrick Hayden.

That individual physical systems (and not just the entire physical world) have states …. is guaranteed by Einstein principle of locality (Deutsch/Marletto, *Proc. R. Soc. p. 5)*. Reformulé par Deutsch, ce principe assure la possibilité de décrire l'état d'un système composite comme formé de la juxtaposition des états de chacun des composants ; corrélativement, la possibilité d'intervenir sur l'état de l'un des composants, sans modifier celui des autres.

Pour affirmer cette possibilité de décomposition, Deutsch s'appuye sur la formulation de Heisenberg de la dynamique d'un système quantique. Il pose sa définition de l'état local, comme se limitant à ce qui peut changer et être observé[3].

Dans cette approche, l'état d'un système, à un instant donné, est la résultante de l'histoire du système et de son interaction avec l'environnement, histoire faite de trois types de dynamiques[4], illustrées dans le schéma ci-après, librement inspiré de celui présenté dans l'article cité de Christopher G. Timpson :



---

[3] Citons Deutsch/Marletto, note 3 page 5...*the local states (in our sense) of a system S in the Heisenberg picture are the observables of S ; the global 'state vector' is unchangeable. So the controversy about whether the locality of quantum physics conceals residual 'non-locality' is not relevant here because principle II requires changeable quantities to be local*.

[4] On peut consulter à ce propos le schéma présenté par C.G.Timpson, dans sa critique de l'approche de Deutsch, in Timpson C.G. Nonlocality and Information Flow : The approach of Deutsch and Hayden. *Foundation of Physics,* 35(2) : 313-343. arXiv:quant-ph/0312155 (schéma page 7 du document arXiv)

i. les dynamiques affectant directement le système, et lui seul, donc sans modifier l'environnement (sur le schéma, opération D)
ii. les dynamiques affectant conjointement le système et son environnement, dans le cadre d'une interaction. Cette interaction est à l'origine de l'intrication entre les deux partenaires (sur le schéma, opération B)
iii. les dynamiques ayant affecté, à un certain instant *t*, l'environnement seul, mais qui sont néammmoins intégrées dans l'état du système, par le biais d'une intrication mise en place dans une interaction survenant *postérieurement* à l'instant *t.* (opération A)

Considérer l'état d'un système comme un condensé de son histoire pose le problème de l'état initial de référence, à partir duquel cette histoire est prise en compte. Cette question de l'état initial est l'un des éléments au centre des discussions que les thèses de Deutsch ont provoquées.

Il nous a paru utile, en annexe, d'expliciter l'arrière-plan de ce qui vient d'être dit, savoir l'utilisation que fait Deutsch de la formulation de Heisenberg, dans le contexte des systèmes de quantum-bits.

Calcul, Information, Mesure

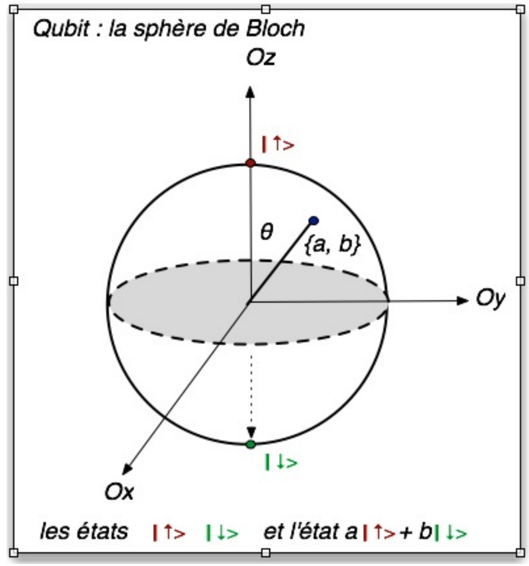
Laissons de côté la discussion sur la localité et raisonnons sur des systèmes considérés comme *isolés*, caractérisés par un état *intrinsèque*, élément d'un ensemble $\mathbb{E}$ d'états bien formalisé. Un *attribut* désigne, comme déjà dit, tout sous-ensemble de $\mathbb{E}$ identifié dans une certaine théorie des processus physiques concernés.

Deutsch et Marletto construisent leur théorie de l'information en considérant des tâches aux objectifs et aux propriétés particulières, et en postulant la possibilité de leur accomplissement, lors de processus *physiques* adéquats. Ils précisent d'abord la notion de "variable", comme ensemble particulier d'attributs. Puis ils redéfinissent, en terme de tâches, des opérations familières dans le traitement des informations, calculs, (re)copies et mesures, ce qui les conduit à spécifier plusieurs catégories emboitées de variables : *computation variables,* que nous appelons ici variables permutables, variables (supports) d'information, enfin variables discernables et mesurables. Ils introduisent simultanément les substrats particuliers disposant de telles variables : média de calcul, et média d'information.

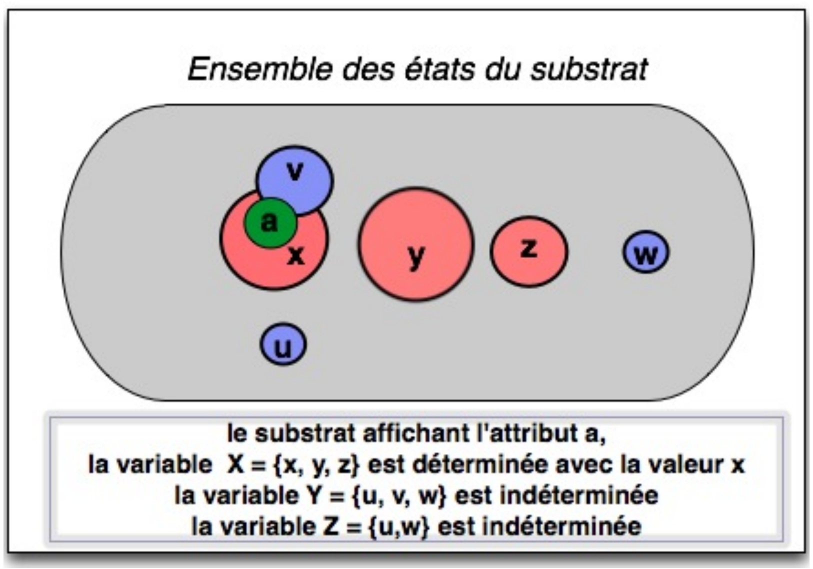
Variables, valeurs déterminées et indéterminées.

Une variable est une liste $X = \{x,y,z,...\}$ d'attributs *disjoints*, au sens ensembliste. Plaçons-nous ainsi dans un domaine cher à Deutsch, sur la sphère de l'espace 3D représentant un *qubit* (pour quantum-bit), savoir la sphère dite de Bloch. Une première variable est constituée des deux attributs "hémisphère nord" et "hémisphère sud", formés respectivement d'une part des états de co-latitudes $0 \leq \theta < \pi/2$ et, d'autre part, des états de co-latitudes $\pi \geq \theta > \pi/2$ d ; une seconde variable est constituée par le couplet de singletons $\{|\uparrow>, |\downarrow>\}$, formés de l'état $\theta = 0$, symbolisé par $|\uparrow>$ - le pôle "nord" de la sphère - et de l'état $\theta = \pi$, symbolisé par $|\downarrow>$, l'antipode du précédent, le pôle "sud".

Considérons maintenant un substrat affichant un attribut donné *a.* Deutsch et Marletto définissent, pour une variable de ce substrat, la possibilité d'être "*sharp*" ou "*non-sharp*", termes traduits ici par "*déterminée*" ou "*non déterminée*". Cette notion de détermination et d'indétermination n'est explicitée dans le texte de Deutsch/Marletto que par le biais d'un seul exemple, celui du *qubit*. Il s'agit pourtant d'une notion importante pour la compréhension de la suite du texte. Voici comment nous l'avons interprétée :



La variable $X = \{x,y,z,...\}$ est déterminée avec la valeur *x* (ou avec la valeur *y*, ou *z*, …), si l'attribut *x* inclut l'attribut *a.* Elle est globalement indéterminée, si aucun attribut de la liste n'inclut *a*. Le caractère indéterminé d'une variable s'interprète différemment selon le contexte :



i. dans un contexte classique, si aucun des attributs x,y,... n'est inclus dans *a,* l'indétermination s'interprète par le "*ni, ni*" : le substrat affichant l'état *a* n'est ni dans l'état *x*, ni dans l'état *y,* … ; ou encore, si l'un des attributs, par exemple *x* possède une intersection avec *a* sans y être inclus, l'indétermination s'interprète par un "peut-être", par un affichage possible de cet attribut *x* avec une certaine probabilité.

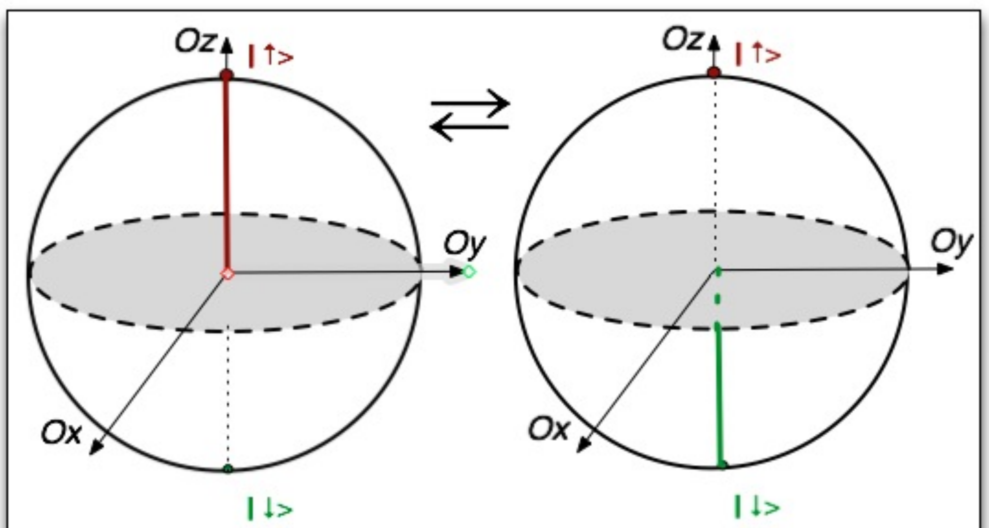
ii. dans un contexte quantique, par exemple (*cas du qubit*), dans l'état superposé a|↑> + b|↓>, l'indétermination de la variable {|↑>, |↓>} peut s'interpréter par un "*et, et*", autrement dit "à la fois dans |↑> et dans |↓>. Dans la note donnant cet exemple, Deutsch évoque aussi l'indétermination liée aux *mélanges* d'états, dans l'étude d'une population de substrats de même nature. Sauf avis contraire, nous laisserons de côté, pour simplifier, ce type d'indétermination.

Permutations et variables permutables

Les auteurs appellent *réversible computation* une tâche **C** s'identifiant à une permutation sur un ensemble, d'au moins deux attributs formant variable ; permutation au sens mathématique du terme : une bijection de cet ensemble dans lui même. C'est la raison pour laquelle le terme de *permutation* nous paraît préférable pour désigner une telle tâche, plutôt que celui de calcul réversible qui serait la traduction immédiate : Soit Π la permutation associée à la tâche, **C**, *S* la variable sur laquelle elle opère, et *x* un attribut de cette variable ; **C** qu'il faut donc noter **C**(Π), est la réunion de toutes les substitutions $x \to \Pi(x)$, $x \in S$.

Les transformations affectant les systèmes physiques ne sont pas nécessairement réductibles à des permutations sur les attributs des variables qui les décrivent. Aussi, considère-t-on plus spécialement les substrats disposant d'une telle propriété. Les auteurs appellent ainsi *computation variable,* ici *variable permutable,* une variable *S* sur laquelle toutes les tâches **C**(Π) *sont possibles, éventuellement sous condition*. L'implication de l'ensemble des permutations sur *S* entraîne que toutes les substitutions $x \to y$, avec $x \in S$ et $y \in S$ sont réalisables ; autrement dit, tous les attributs formant la variable sont accessibles, à partir de n'importe quel état initial affichant un attribut $\in$ S.

Un système physique, dont la description comprend une variable permutable, est un *médium de calcul* (*computation medium*). Sur un tel médium, l'enchaînement d'une permutation et de son inverse, restaurant donc le substrat dans son attribut initial, sera bien possible ; mais si cette possibilité est *sous condition*, les processus physiques accomplissant les permutations affectent également l'environnement ; il peuvent donc être irréversibles.

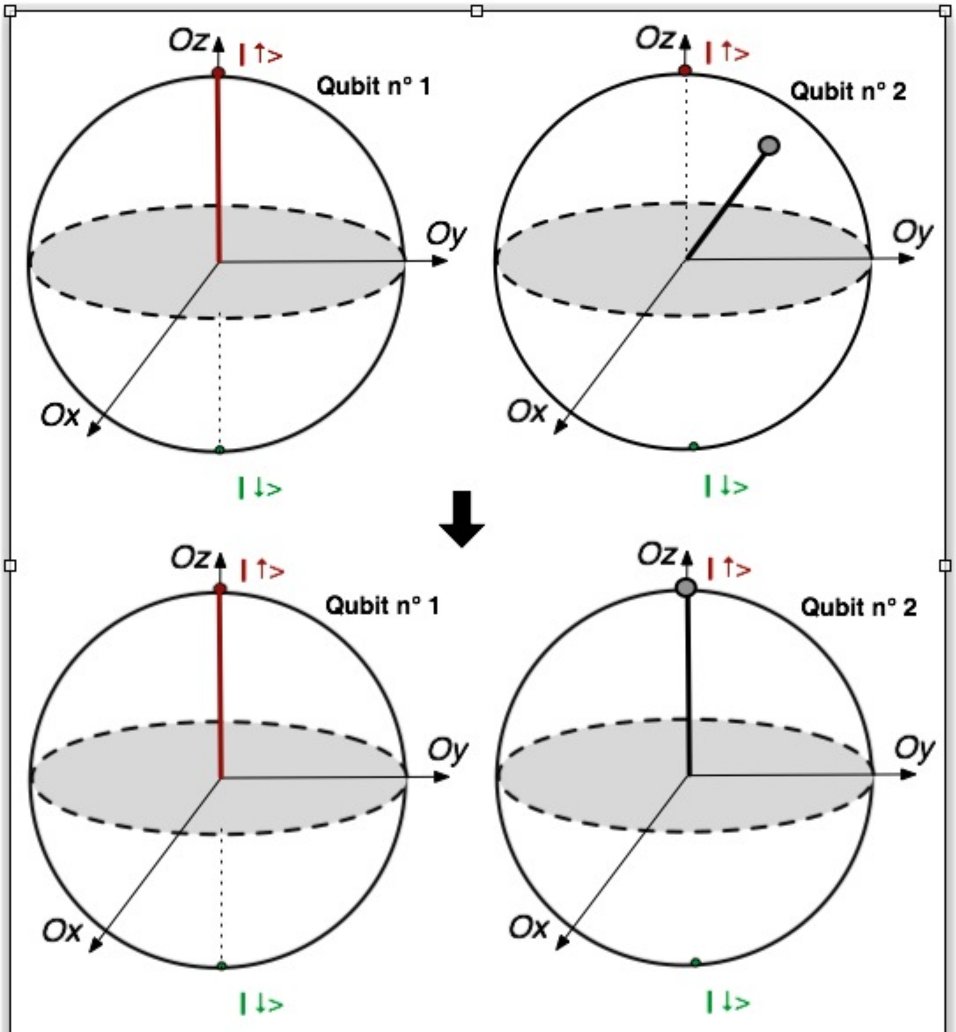


le qubit comme média de calcul : permutation | ↑> ⇄ | ↓>

Variables (re)copiables, variables d'information, médium d'information.

Une *tâche de copie* (*cloning task*) est une tâche opérant sur la composition **S1** ⊗ **S2** de deux substrats **S1** et **S2** de même nature physique. Cette tâche fait afficher par **S2** l'attribut *x* qualifiant déjà **S1,** ce, pour *tous* les attributs *x* d'une certaine variable *S.* Une condition nécessaire de son accomplissement est que le substrat **S2** affiche, avant la copie, un certain attribut $x_0 \in S$: l'expression mathématique d'une tâche de copie **R** (x_0) est la réunion des substitutions x[**S1**],x_0[**S2**]) → (x[**S1**],x[**S2**], pour tout $x \in S$, $x_0 \in S$ étant donné. On remarque que dans cette tâche, l'attribut du substrat **S1** (le substrat copié) reste inchangé.

Une variable *(re)copiable* (*clonable variable*) est une variable pour laquelle une tâche de copie **R** (x_0) est possible - éventuellement sous condition - au moins pour une valeur x_0. ; Ici encore, on conçoit que tous les systèmes physiques ne soient pas susceptibles de copie.



le qubit comme média d'information :
copie de l'état du qubit n° 1 sur le qubit n° 2

Une *variable d'information* (*information variable)* réunit les deux propriétés, d'être à la fois permutables et (re)copiables. Une *information* est un attribut d'une telle variable. Un médium d'information est un système physique comprenant au moins une variable d'information.

Variables discernables

Une variable *S* d'un substrat **S** est une *variable discernable* s'il existe une tâche - donc un processus physique - capable d'accomplir une bijection Ψ de cette variable sur une variable d'information supportée par le même substrat. Donc une tâche possible, éventuellement sous condition, réunissant pour tout $x \in S$, les substitutions [$x \rightarrow$ 'x'], où l'ensemble ['x' = $\Psi(x)$, $x \in S$] des attributs de sortie de la tâche est une variable d'information (donc permutable et (re)copiable). Chaque paire d'attributs d'une variable discernable est elle même une variable discernable ; plus prosaïquement, les attributs d'une variable discernable sont discernables les uns des autres.

Variables mesurables

La définition du caractère mesurable d'une variable suit la même logique. Elle implique cette fois le couplage du système mesuré **S,** et d'un second système **R,** réceptacle de la mesure et médium d'information. Une variable *S* du substrat **S** est une *variable mesurable,* s'il existe une tâche opérant sur S⊗R, capable de réaliser une bijection Ψ de cette variable dans une variable d'information *R* du réceptacle **R**. Les auteurs formalisent cette définition par la possibilité sous condition d'une tâche réunissant, pour tout attribut $x \in S$, les substitutions x[**S**],x_0[**R**]) → (y[**S**], 'x'[**R**] , dans lesquelles :

i. $x \in S$ (variable du substrat mesuré **S**)
ii. x_0 est l'attribut d'un état dans lequel **R** - le réceptacle de la mesure - a pu être préparé,
iii. y un attribut du substrat **S,** attribut de l'état dans lequel se trouve le substrat mesuré après la mesure.
iv. 'x' = $\Psi(x)$ le résultat de la mesure, attribut de la variable d'information *R* du substrat **R**

La tâche modifie donc, à priori, non seulement l'état du réceptacle de la mesure, **R,** mais aussi celui du système mesuré, en changeant x en y. On dira que la mesure est *non-perturbante* (*non-perturbing measurement*) si $y \subseteq x$: le système mesuré **S** affiche toujours *x,* tout en acquérant éventuellement d'autres propriétés non présentes précédemment.

La variable *S* du substrat **S** est également variable du substrat composite **S** ⊗ **R**, association du substrat mesuré et du dispositif de mesure **:** une variable mesurable est discernable.

Postulats et définitions complémentaires

Selon Deutsch et Marletto, les définitions ne suffisent pas à assurer logiquement toutes les propriétés désirées pour la notion d'information. Pour achever de fonder leur théorie, ils les complètent par des postulats qui leur paraissent compatibles avec la réalité physique et ses lois. Ces postulats ou *principes* font l'objet d'un long développement. Ils permettent au bout du compte de spécifier les variables *observables*. Nous en analysons ici deux composantes.

Les notations et le caractère très dense de cette partie du texte Deutsch/Marletto en rendent la lecture assez difficile. Mais en fait, lorsqu'on l'étudie dans le détail, les raisonnements effectués mobilisent des opérations ensemblistes et logiques courantes, et il est possible d'en suivre le cheminement.

Une "algèbre" des tâches possibles

Les tâches peuvent se combiner, par composition parallèle ou par composition en série, pour former d'autres tâches. L'assemblage répété de telles combinaisons forme un graphe, dont les noeuds sont les tâches et les arêtes (orientées) des substrats. Une arête joignant la tâche **A** à la tâche **B** porte une liste d'attributs d'un même substrat **S**, liste formant les attributs de sortie de **A,** et tout ou partie des admissibles de **B.** Un tel assemblage, dès lors qu'il est sans boucle, est un *réseau régulier de tâches*, lequel forme une tâche composite, opérant sur un substrat, lui même composite, composition au sein d'un même système de tous les substrats élémentaires mobilisés.

Les auteurs posent le principe qu'*un réseau régulier de tâches possibles est une tâche possible*. La qualité de tâche possible se transmet donc dans les combinaisons : si **B** et **A** se composant en série dans **BA** sont toutes deux possibles, **BA** est également possible ; si **A1** et **A2**, opérant respectivement sur **S1** et **S2**, sont deux tâches possibles, **A1** $\otimes$ **A2** opérant sur **S1** $\otimes$ **S2** est également une tâche possible.

Par contre, une tâche composite peut être possible sans que ses composantes le soient, prises séparément[5]. C'est d'ailleurs la base de la définition de la possibilité sous condition : **A** n'est pas possible seule, elle le devient par association à une autre tâche **T,** mobilisant les ressources nécessaires à la réalisation de **A.**

Un cas particulier de ce principe concerne les media d'information : *la combinaison de deux média d'information* **S1** *et* **S2***, avec les variables d'information S1 et S2, est un média d'information* **S1** $\otimes$ **S2**, *avec la variable d'information S1xS2* [6]

Une "logique" de la discernabilité.

Une logique de la discernabilité émerge des développements de Deutsch/Marletto dans cette partie de leur texte. Cette logique se condense dans les énoncés suivants :

i. Les attributs d'une variable discernable sont deux à deux discernables. Cela résulte de la définition même d'une variable discernable, en observant que tout sous-ensemble d'attributs d'une variable d'information est lui-même une variable d'information.

---

[5] cf article Synthese, page 4334 : … A1$\otimes$A2 may be possible even when neither A1 or A2 is - for instance, when they violate a conservation law by equal and opposite amounts.

[6] où le signe *x* désigne le produit ensembliste habituel, acceptant toutes les paires possibles d'attributs pris l'un dans *S1*, l'autre dans *S2*.

ii. La réciproque n’est pas obligatoirement vérifiée : les attributs d’une variable pourraient être deux à deux discernables, sans que cette variable n’ait globalement cette qualité[7]. Aussi les auteurs posent-ils le postulat : *si toutes les paires d’attributs d’une variable X sont discernables, alors la variable X est discernable*. Ils justifient ce postulat par une constatation : les mesures de différences entre des objets - mesures caractérisant leur relations mutuelles deux à deux - se ramènent souvent aux mesures d’une certaine grandeur physique qui caractérise ces objets eux mêmes. Par exemple, les mesures de distances (relations entre objets) se ramènent aux mesures de positions de ces mêmes objets.

iii. deux attributs u et v discernables l’un de l’autre sont disjoints ; mais la réciproque n’est pas vraie : deux attributs disjoints ne sont pas nécessairement discernables.

iv. soit x,y,u,v quatre attributs vérifiant $x \subset u$ et $y \subset v$: si u et v sont discernables l’un de l’autre, alors x et y le sont également.

v. réciproquement, si toutes les paires d’attributs [x, y] vérifiant $x \subset u$ et $y \subset v$ sont des paires discernables, alors la paire d’attributs [u,v] est également une paire discernable

De cette logique, il résulte que si un attribut u est discernable à la fois de x et de y, il est discernable de leur union $x \cup y$, et réciproquement. En poussant par ailleurs la “granularité” des attributs à son niveau le plus fin, c.a.d. aux états, les points 4 et 5 ci-dessus affirment l’équivalence entre la discernabilité d’une paire d’attributs [x,y] et la discernabilité de toutes les paires d’états [e_1, e_2] , formées avec $e_1 \in x$, $e_2 \in y$.

Une “logique” de l’indiscernabilité.

L’indiscernabilité est le contraire de la discernabilité : deux attributs x et y sont indiscernables, si l’on constate l’impossibilité d’une tâche visant à les projeter sur deux attributs distincts d’une variable d’information, autrement dit l’inexistence d’un processus physique de mesure capable d’une telle projection.

Deutsch et Marletto introduisent un opérateur ‘bar’ qui rappelle l’opérateur logique “négation”. Dans l’opérateur ‘bar’ le fait d’être “attribut disjoint de tel autre attribut (disjoint = pas d’états communs)” - base de la négation - est remplacé par le fait d’être “attribut discernable de tel autre attribut”. L’application de cet opérateur permet de construire de nouveaux attributs notés $\bar{x}$, $\bar{\bar{x}}$, $\bar{X}$, $\bar{\bar{X}}$:

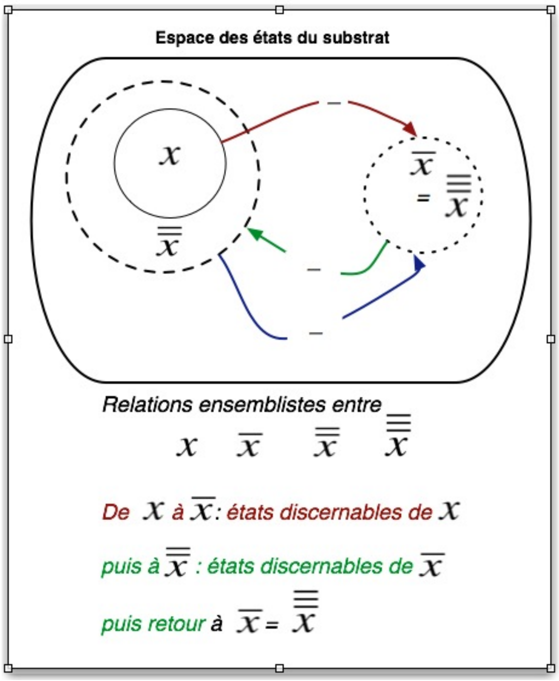
i. L’attribut $\bar{x}$ réunit les états lesquels, chacun d’entre eux pris individuellement, sont discernables de tous les états de l’attribut x. Nous avons $x \cap \bar{x} = \varnothing$: un état ne peut être discernable de lui même.

[7] Deutsch et Marletto en donnent l’intuition à travers un exemple, celui d’une cavité contenant des photons : la variable considérée est l’effectif *N* de photons dans la cavité (les attributs membres de cette variable sont donc des nombres) : on peut être à même de détecter toute modification de l’effectif (les différents nombres composants la variable *N* discernables les uns des autres) ; mais on peut en même temps être incapable de compter les photons - et donc de connaître l’effectif - dans chaque état possible du système ; dans ce cas, la variable *N* ne serait pas mesurable, et donc pas discernable. Mais sur un tel exemple, Deutsch et Marletto ajoute : *But, in Quantum Physics, it (plausibly) is*

ii. L'attribut $\bar{X}$ réunit les états lesquels, chacun d'entre eux pris individuellement, sont discernables de tous les états de l'*attribut X*[8]. Nous avons $X \cap \bar{X} = \varnothing$. Par ailleurs cet attribut $\bar{X}$ peut être vide, la variable *X* est alors dite *maximale* : il est impossible dans ce cas de la compléter par de nouveaux attributs discernables de ceux qui s'y trouvent déjà.

iii. L'attribut $\bar{\bar{x}}$ réunit les états lesquels, chacun d'eux pris individuellement, sont discernables de tous les états de l'attribut $\bar{x}$. Nous avons $x \subseteq \bar{\bar{x}}$: la discernabilité étant réciproque, un état de l'attribut *x* est discernable de tous ceux de $\bar{x}$; cet état appartient donc bien à $\bar{\bar{x}}$. Cette situation rappelle la double négation : Lorsqu'on applique en effet ce type de redoublement à l'opérateur négation, on retombe sur *x* lui même. Mais avec le redoublement de 'bar', le bilan est moins drastique.

iv. L'attribut $\bar{\bar{X}}$ réunit les états lesquels, chacun d'eux pris individuellement, sont discernables de tous les états de l'attribut $\bar{X}$. Nous avons $\bar{X} \cap \bar{\bar{X}} = \varnothing$ et $X \subseteq \bar{\bar{X}}$. Lorsque X est une variable maximale, $\bar{X}$ est vide, il n'y a pas de contrainte, et $\bar{\bar{X}}$ contient tous les états.



Deutsch et Marletto appellent enfin *variable booléenne* une paire formée d'un attribut et de l'attribut réunissant ses discernables, par exemple la paire $B = [x, \bar{x}]$. De telles paires sont bien des *variables*, car leurs membres, étant discernables, sont disjoints. Ce sont alors des variables *maximales* : supposons en effet qu'il n'en soit pas ainsi : il existe alors un état *e* discernable à la

---

[8] Nous avons jusqu'ici considéré la variable X en tant que *liste* d'attributs disjoints. Mais nous pouvons aussi la voir comme un *attribut*, rassemblant l'ensemble des états appartenant aux attributs de la dite liste. Deutsch et Marletto utilisent la même notation pour les deux versions, ce qui présente des inconvénients : Elle nous fait en effet écrire aussi bien $x \in X$ (x est un attribut de la variable *X*) que $x \subseteq X$ (l'ensemble des états $\in x$ est inclus dans l'ensemble des états de l'attribut *X*), ce qui n'est pas exactement équivalent, la première écriture donnant plus d'information.

fois des états $\in x$ et des états $\in \bar{x}$: cet état *e* , en conséquence, appartient à $\bar{B}$; le même état *e,* discernable des états $\in x$, appartient aussi à $\bar{x}$ et, en conséquence, à B. Ce qui est en contradictoire, puisque $B \cap \bar{B} = \varnothing$.

Discernabilité et détermination. Observables.

Les définitions des variables - permutables, copiables, discernables, mesurables - mobilisent des substrats affichant des attributs *x, y, …* bien spécifiés : les variables *X, Y,* dont ils sont partie prenantes, sont déterminées. Mais que se passe t-il concrètement, par exemple dans une mesure, lorsque l'on se trouve en présence d'un substrat dans un état où la variable *X* est indéterminée ? Et quelles sont les nouvelles notions qu'il est utile d'introduire ?

Mesures déterminées sur variables indéterminées.

Deutsch et Marletto considèrent un substrat affichant un attribut *a* et, sur ce substrat, une variable *X* mesurable *de valeur indéterminée.* Ils s'intéressent au cas où un dispositif de mesure de cette variable fournit cependant une mesure '*x*' déterminée : autrement dit, la variable d'information sortie du dispositif de mesure - dans l'état où se trouve le substrat réceptacle **R,** une fois la mesure effectuée - est déterminée avec la valeur '*x*'. Cette constatation fait croire à l'expérimentateur que le substrat mesuré affichait (et éventuellement affiche toujours) l'attribut $x \in X$ correspondant à cette mesure '*x*', alors qu'en réalité le substrat affichait l'attribut *a* et que, dans cette situation, la variable *X* n'avait pas de valeur déterminée.

Par hypothèse, l'attribut *a* du substrat, dans son état d'avant mesure, ne peut être un attribut de la variable *X*, sinon pour cet état la variable *X* serait déterminée avec la valeur *a.* Deux alternatives sont alors possibles : la première, avec $a \subseteq \bar{X}$ et l'autre avec $a \subseteq \bar{\bar{X}}$.

La première alternative est triviale : avec les postulats adoptés sur la discernabilité, la variable X∪a - liste des attributs de X augmentée de *a* - est une variable discernable. Cette nouvelle variable prend sur le substrat affichant *a*, une valeur déterminée : le dispositif de mesure actuel, en confondant *x* et *a*, n'est tout simplement pas assez précis : un dispositif de mesure adéquat fera disparaître toute confusion, en fournissant une mesure 'a' pour a, 'x' pour x, etc.

Reste la seconde alternative, où l'attribut *a,* du fait de son inclusion dans $\bar{\bar{X}}$*,* n'est donc pas discernable d'*au moins* un attribut de *X.* La mesure étant déterminée, l'attribut *x* est le seul, parmi tous les attributs membres de la variable *X*, à pouvoir ainsi être confondu avec *a :* s'il en existait d'autres, la mesure pourrait prendre plusieurs valeurs '*x*' différentes, ou encore n'en aurait pris aucune, elle ne serait pas déterminée[9]. Ainsi, dans une telle situation, l'attribut *a* est-il discernable de tous les attributs de *X,* mis à part l'attribut *x* lui même.

L'idée est alors d'introduire une nouvelle variable *X'* - se substituant à la variable *X* - en remplaçant l'attribut *x* par l'attribut $x \cup a$. *X'* est bien une variable mesurable toujours par le même dispositif : tous ses attributs sont bien discernables, et nous avons '$x \cup a$' = '*x*'. L'itération

---

[9] Citons : "*That means that that measurer can mistake a for only one attribute in X, namely x*".

de cette procédure introduit au bout du compte une variable mesurable *Z.* Cette variable rassemble les attributs de la forme $z = x \cup a(x)$, avec $x \in X$, où $a(x)$ est l'union de tous les attributs $a \subseteq \bar{\bar{X}}$ pouvant être confondus avec *x* (et avec lui seul), toujours avec le même dispositif de mesure. On peut vérifier que tous ces attributs sont discernables les uns des autres ; *Z* est bien une variable mesurable. De plus, lorsque la mesure donne un résultat '*z*', le substrat mesuré affiche bien l'attribut *z* correspondant .

Un postulat de consistance des mesures.

Deutsch et Marletto postulent alors un principe de consistance : *Lorsqu'un dispositif de mesure de la variable X produit une mesure déterminée sur un substrat affichant l'attribut* $a \subseteq \bar{\bar{X}}$*, tous les autres dispositifs de mesure de cette variable feront de même.*

Ce postulat assure que l'attribut *x,* ainsi confondu avec l'attribut *a* par le dispositif de mesure, *est le même pour tous les dispositifs de mesure possibles de X* : la variable mesurable *Z,* construite à partir de *X* dans la procédure précédente, ne dépend pas du dispositif effectivement mis en oeuvre, elle est unique. La démonstration en est la suivante : supposons que deux dispositifs de mesure donnent respectivement les valeurs déterminées différentes '*x*' et '*y*', renvoyant donc à deux attributs différents de la variable X, savoir, *x* et *y* ; nous avons simultanément, dans un tel cas, l'attribut *a* discernable : d'une part, de tous les attributs de X sauf de *x* et, d'autre part, de tous les attributs de X sauf de *y*, ce qui est contradictoire.

Entendons nous bien ; ces dispositifs de mesure, étant physiquement différents, peuvent fournir des résultats ayant une forme physique différente : $'x'_1$, $'x'_2$, etc. L'important est que ces attributs soient équivalents les uns aux autres, en ce sens qu'ils "font croire" tous au même attribut $x \in X$. Ces différents résultats de mesure ne sont que des nouvelles désignations (*re-labelling)* d'une même valeur sous-jacente.

Observables

Les auteurs appellent *observables* les variables mesurables *X* dont les dispositifs de mesure ne "mentent" pas : *sur une telle variable X, chaque fois qu'un dispositif fournit un résultat de mesure déterminé 'x' , c'est que le système présente réellement l'attribut* *x*, et non un attribut $a \in \bar{\bar{X}}$*,* lequel ne lui serait pas discernable, bien que discernable de tous les autres attributs de la même variable.

L'exemple du qubit.

L'exemple déjà utilisé du *qubit*, en tant que système quantique à deux niveaux, est éclairant.

Les "*ensembles complets d'observables qui commutent"* d'un *qubit* sont des opérateurs dont les états propres forment sur la sphère de Bloch des directions opposées. La théorie quantique atteste ainsi que le dispositif de mesure de l'orientation du *qubit* - plus exactement de la composante de son spin - sur l'axe matérialisé par la paire d'états $\{|\uparrow\rangle, |\downarrow\rangle\}$ donne

i. sur les états $|\uparrow\rangle$ et $|\downarrow\rangle$ - un *résultat déterminé* ;

ii. pour tout autre état, de la forme état a |↑> + b |↓> un résultat aléatoire, donc *non déterminé*, soumis aux probabilités quantiques calculables à partir des composantes a et b,

Ce dispositif de mesure, sur la paire {|↑>,|↓>}, ne ment donc pas, et une telle paire est bien une observable au sens du texte de Deutsch/Marletto. Il en sera de même pour toute variable formée de deux directions opposées (états orthogonaux) matérialisant une direction de mesure d'une composante de l'orientation.

Observons aussi que $\bar{X}$, ensemble des états distinguables à la fois de |↑> et de |↓>, est vide : la paire {|↑> , |↓>} est une variable maximale.

Ainsi, dans l'exemple du *qubit*, le formalisme avancé dans Deutsch/Marletto est cohérent avec la théorie quantique des systèmes à deux niveaux.

Considérons enfin l'attribut x = |↑>. L'attribut $\bar{x}$, ensemble des états distinguables de x est formé du seul état |↓> . De même, l'attribut $\bar{\bar{x}}$ se réduit-il à |↑>, et nous avons donc $\bar{\bar{x}} = x$. Cette identité, lorsque vérifiée pour tous les attributs de la variable étudiée (c'est le cas ici), est une propriété caractéristique d'une observable, telle que définie par Deutsch.

Propriétés des variables observables.

Pour caractériser les observables, Deutsch et Marletto commencent par énoncer (et démontrer à partir des principes qu'ils ont adoptés) deux propriétés des dispositifs de mesure. ils montrent en effet que :

i. tout dispositif de mesure d'une variable X, se trouvant en face d'un substrat qui affiche un attribut $a \subseteq \bar{\bar{x}}$, $x \in X$, fournit un résultat de mesure déterminé 'x' = Ψ(x)
ii. réciproquement, si un dispositif quelconque d'une variable X fournit un résultat déterminé 'x' = Ψ(x) en présence d'un substrat qui affiche $a \subseteq \bar{\bar{X}}$, alors a $\subseteq \bar{\bar{x}}$

La lettre Ψ désigne toujours dans ces notations l'application bijective réalisée par le dispositif de mesure, lorsqu'il est dans les conditions où la variable X est déterminée.

Ces propriétés donnent la signification physique de $\bar{\bar{x}}$, $x \in X$ et des états associés : c'est l'ensemble de tous les états $\in \bar{\bar{X}}$, *pour lesquels un dispositif (quelconque) de mesure de X fournit un résultat de mesure déterminé 'x' = Ψ(x).* Pour que ce dispositif ne mente jamais, donc *pour que la variable X soit une observable*, il faut et il suffit que tous les attributs de cette variable vérifient $\bar{\bar{x}} = x$

Super-information

Dans les deux dernières sections de leur texte, Deutsch et Marletto traitent de la notion de super-information, et de l'information quantique qui en est un exemple. Pour ce faire, ils n'introduisent plus de principes nouveaux. Ils explorent les situations pour lesquelles les théories particulières à certains domaines - dont le domaine quantique - impliquent des substrats d'information ayant des propriétés spécifiques, lesquelles ont trait à la manière dont se combinent leurs variables observables. Ces substrats sont appelés média de super-information. En l'occurrence, l'essence de ces propriétés réside dans le fait que l'union X ∪ Y de deux variables d'information observables, sur de tels substrats, n'est pas une variable d'information observable. Une telle union est appelée une (variable de) *super-information*. Ce fait entraîne nombre de *conséquences*, qui sont détaillées et démontrées. Citons en quelques unes ;

i. Existence, dans une super-information, de paires d'attributs non discernables
ii. Non (re) copiabilité d'une super-information
iii. Impossibilité de préparer un état, dans lequel deux composantes observables d'une super-information soient simultanément déterminées. Impossibilité également de les mesurer simultnément.
iv. Imprédictibilité de processus déterministes
v. Impacts irréductibles sur une observable d'une mesure effectuée sur une autre observable
vi. Consistance de mesures consécutives d'une observable non déterminée
vii. Notion de cohérence et d'information localement inaccessible.

L'analyse détaillée de cette partie sera l'objet d'un travail ultérieur

Annexe

Dans cette annexe, on se propose de revenir brièvement, et à titre exploratoire, sur l'arrière plan du texte de Deutsch/Marletto, à savoir, sur les travaux de David Deutsch concernant les systèmes de quantum-bits - ou *qubits* -, et l'utilisation qu'il fait à leur propos de la formulation de Heisenberg. On a vu que cet arrière-plan touchait à la question cruciale de la localité.

Nous sommes partis, pour ce faire, de deux documents déjà cités :

i. l'article de David Deutsch et Patrick Hayden, Information Flow in Entangled Quantum Systems. *Proc. R. Soc. London. A*. 456:1759-1774, July 2000.
ii. l'article de Christopher G. Timpson, Nonlocality and Information Flow : The approach of Deutsch and Hayden. *Foundation of Physics,* 35(2) : 313-343. arXiv:quant-ph/0312155, qui a l'avantage de présenter les raisonnements de Deutsch/Hayden d'une façon très claire.

Il serait utile par ailleurs de consulter la réponse faite par Deutsch à l'analyse critique de Timpson : Vindication of quantum locality. *Proc. R. Soc. A*. rspa. 2011.0420 (Published online).

Le formalisme de Heisenberg. Deutsch utilise pour définir ce qu'il appelle 'état local' une description de la dynamique quantique d'un système basé sur le formalisme de Heisenberg. Rappelons de quoi il s'agit. Dans la formulation de Schrödinger, l'évolution d'un système est représenté par la trajectoire de son *vecteur d'état*, trajectoire se développant dans un certain espace. Les *observables* de ce même système sont des opérateurs agissant sur cet espace d'états, opérateurs qui eux, restent constants. Dans la formulation de Heisenberg à l'inverse, le vecteur d'état reste fixe, et représente donc un *état initial* ; ce sont les observables qui évoluent : la dynamique du système est pour ainsi dire incorporée dans une dynamique d'opérateurs, dans leur propre espace.

L'exemple d'un système de qubits. Deutsch et Hayden partent de la dynamique quantique d'un système composé de *n qubits*. Suivant la *Heisenberg picture*, ils considèrent l'espace vectoriel des opérateurs pouvant représenter des observables d'un tel système - en l'occurrence un espace vectoriel à 4^n dimensions - et représentent la dynamique du système par celle d'une base de cet espace d'opérateurs - un référentiel formé donc de 4^n vecteurs. Il effectue ensuite un choix approprié de cette base et de sa "position" à l'instant *t=0*. Cette position reflète uniquement la structure mathématique des *qubits* : elle est indépendante de l'état initial du système, et cette propriété est importante dans le raisonnement. Deutsch et Hayden montrent alors mathématiquement que la trajectoire au cours du temps de la base choisie dépend *uniquement* de la trajectoire de triplets d'opérateurs, *triplets qu'ils peuvent rattacher individuellement à chacun des n qubits*. Ainsi, *la connaissance de la trajectoire ces n triplets*, notés $\boldsymbol{q}_j\ \boldsymbol{(t)}$ - où les indices ***j*** désignent les *qubits* auxquels ils sont respectivement attachés ***-*** *permet à elle seule de connaître la trajectoire de la base choisie, et donc celle de tous les observables du système entier.* Rapidement dit, la connaissance de la trajectoire du tout peut se déduire de celle de la trajectoire de chacune des parties. La trajectoire de chacune des parties contient toute l'information nécessaire pour connaître le tout.

Les réserves de C.G. Timpson 1). A l'instant initial, les *n* "descripteurs" $\boldsymbol{q}_j\ \boldsymbol{(0)}$ ont une forme simple et, de par cette forme, ils sont effectivement indépendants les uns des autres, en un sens mathématique précis. Mais, dès lors que des interactions interviennent entre qubits au cours de l'évolution, il n'en est plus ainsi : les $\boldsymbol{q}_j\ \boldsymbol{(t)}$ perdent leur forme initiale, pour intégrer l'histoire de leurs interactions avec les autres *qubits* ; ce, dans une transformation mathématiquement analogue[10] à l'*intrication* de l'état global dans la formulation de Schrödinger. Faire, comme le font Deutsch et Hayden, si nous avons bien compris, de chaque $\boldsymbol{q}_j\ \boldsymbol{(t)}$ une *propriété intrinsèque* du *qubit* auquel il est formellement attaché, pose problème : soit c'est une simple façon de s'exprimer qui n'apporte au fond rien de nouveau, soit c'est une sorte de "coup de force", réinterprétant la physique quantique dans le but de résoudre la question de la localité. Ces deux manières de voir les propositions de Deutsch et Hayden sont qualifiées par Timpson de *Conservative interprétation* et d'*Ontological interpretation*.

Les réserves de C.G. Timpson 2). L'accent mis sur les transformations, ce qui peut changer et être observé, tend à réduire *l'instant initial* à un rôle secondaire. Dans l'article Synthese par exemple, il est vrai à propos de l'état initial "du monde physique" pris dans son ensemble, Deutsch dénie à cet état initial une quelconque valeur fondamentale, et y voit un simple héritage de la pensée monothéiste faisant intervenir Dieu à l'origine du temps. Plus formellement, dans l'article Deutsch/Hayden, les auteurs appuyent leur développement sur un état initial "standard", où par exemple, tous les *qubits* du système seraient dans l'état |↑> ; si l'on désire démarrer d'autres états, il suffit pour eux de modifier en conséquence les

---

[10] savoir, transformation d'un point "produit tensoriel" en un point quelconque de l'espace concerné.

$\boldsymbol{q}_j$ ***(0)*** pour se retrouver, à un changement de base près, dans la même histoire. Cette standardisation de l'état initial néglige la variabilité possible de ces états. Timpson la conteste fortement. Elle pose question et doit être appréciée différemment, selon que l'on considère la *Conservative Interprétation* et l'*Ontological Interprétation* des propos de Deutsch. Un fait nous semble clair cependant : la dynamique du système - *telle qu'elle peut être appréhendée par un observateur*, par exemple à travers les probabilités, ou encore les valeurs moyennes, des différents résultats possibles d'une mesure - dépend bien de l'état initial : à tel état initial, et telles trajectoires $\boldsymbol{q}_j$ ***(t),*** correspondent telle probabilité, telle moyenne ; à tel autre état initial, avec les mêmes trajectoires $\boldsymbol{q}_j$ ***(t)***, correspondent telle autre probabilité, telle autre moyenne.