

Ecole des Hautes Etudes en Sciences Sociales
Université Paris VI Pierre et Marie Curie
Ecole Polytechnique
Ecole Normale Supérieure

Mémoire de recherche présenté en vue de l'obtention du DEA Sciences Cognitives
2002-2003

Intrication sujet-objet dans la mesure de l'information

Marco Testi
Sous la direction du Prof. Giuseppe Longo
LIENS (CNRS-ENS), 45 rue d'Ulm, 75005 Paris

Table des matieres

0	Position du problème et encadrement scientifique	4
0.0.1	Présentation/abstract	4
0.1	Complexité et Information Morphologique.....	4
0.2	Subjectivité et Métrique de l'information.....	4
0.3	Dynamical Hypothesis	5
0.3.1	DH comme outil d'homogénéisation d'heterogeneité	6
0.3.2	DH comme outil de recouvrement de la Taille du Problème	6
1	(Un) Problème de la mesure	8
1.0.1	Resume.....	8
1.1	Introduction	8
1.2	Définition(s) de mesure.....	8
1.2.1	Math, espaces de mesure.....	8
1.2.2	Physique	9
1.2.3	ISO/TAG 4/WG 3, UNI 4546	9
1.3	Le probleme de la mesure en Physique Classique	9
1.3.1	Définition effective de grandeur physique.....	9
1.3.2	Composants fondamentaux de l'instrument de mesure	10
1.3.3	Distinction entre instrument analogique et digital	10
1.3.4	Caractérisation de l'instrument de mesure	10
1.4	Le problème de la mesure en Mécanique Quantique	11
1.4.1	Encadrement du probleme.....	11
1.4.2	Eléments theoriques	13
1.4.3	Entanglement et (un) probleme de la mesure.....	15
1.4.4	Plusieurs observables.....	17
1.4.5	Plusieurs systemes	17
1.5	Des reflexions	18
1.5.1	Problème ontologique et hypothese sur la taille de l'information quantique.....	18
1.5.2	Heisenberg reloaded et hypothese de travail	19
1.5.3	Information physique et cognitive	21
1.5.4	Une précision.....	21
1.6	L'espace de l'information physique	22
1.6.1	Ordinateurs quantiques.....	22
1.6.2	Capacité computationelle de l'Univers.....	23
1.6.3	Software quantique ≡ Hardware quantique	23
1.7	Conclusion	24
2	L'instrument sur la Dynamical Hypothesis	25
2.0.1	Résume.....	25
2.1	Une description informelle	25
2.1.1	Voir en code.....	25
2.1.2	Description	26
2.1.3	Approche ecologique et spectre d'energie	27
2.1.4	Extériorité du phenomene.....	27
2.2	L'espace de l'information cognitive de CIM.....	27
2.3	Rappels de reseaux de neurones formels.....	28
2.3.1	Eléments fondamentaux	28
2.3.2	Notion d'overlap.....	29

2.3.3	Overlap de processus/Parallelisme	30
2.4	Dynamique	31
2.4.1	Dynamique synchrone, asynchrone à sequence ordonne et random	31
2.5	Correspondances de l'analogie	33
2.5.1	Considération sur les dynamiques synchrones	33
2.5.2	Systèmes, appareils de mesure et environnement dans Wsyn, Wasyr, Wasyo	34
2.5.3	Information/Mesure d'information	34
2.5.4	Composition de J et passage aux Wsyn, Wasyr, Wasyo	35
2.6	Conclusion	37
	Bibliographie	39
	Remerciements	42

0 Position du problème et encadrement scientifique

0.0.1 PRESENTATION/ABSTRACT

Ce mémoire de DEA Sciences Cognitives rend compte d'un travail de stage qui s'est déroulé au sein du projet Complexité et Information Morphologique (CIM) dirigé par Prof. G. Longo, LIENS, Paris. Implicitement dans les thématiques de CIM, on a cherché à saisir le problème de la *subjectivité de l'information* et on a exploré une perspective sous l'angle de vue des concepts de mesure et d'instrument de mesure: sujet et objet deviennent appareil de mesure et phénomène à mesurer.

Cela a abouti à une analyse du concept d'instrument de mesure en physique classique et quantique en termes des enjeux relatifs au substrat d'implémentation et ses correspondances dans un espace représentatif de la dynamique du phénomène de la mesure. On a donc essayé de transposer ces enjeux et idées sur un système cognitif vu dans le cadre de la « Dynamical Hypothesis » (les agents cognitifs sont des systèmes dynamiques), en se donnant des analogies avec l'espace de phase d'un réseau neuronal.

Même si certains arguments sont traités d'une façon détaillée, le but de ce travail est d'explorer et clarifier les interfaces nécessaires à rendre effective et utilisable l'analogie entre le problème de la mesure et la structure fonctionnelle cognitive d'un réseau neuronal. La validation exigerait -si possible- un travail complet de thèse.

0.1 COMPLEXITE ET INFORMATION MORPHOLOGIQUE

Au sein du projet « Complexité et Information Morphologique » on aborde les questions suivantes :

- De l'information et de la complexité algorithmique vers une "géométrie de l'information et de la complexité"
- Entropie et complexité morphologique
- Fondements et cognition

(voir [1] pour l'explicitation)

0.2 SUBJECTIVITE ET METRIQUE DE L'INFORMATION

Parmi plusieurs questions implicites dans ce cadre scientifique, il est primordial le rôle joué par ce qu'on pourra appeler la subjectivité de l'information au sens large:

- les structures qu'on se propose d'étudier sont elles-mêmes « visibles » scientifiquement sous divers points de vue (fait assez troublant, dont la résolution du

quel est elle-même dans les objectifs du projet CIM) et cela est déjà suffisant pour poser la question de la subjectivité

- en l'état actuel en Sciences Cognitives, on ne peut plus ignorer que l'information n'est pas une caractéristique absolue mais qu'elle est déterminée par les caractéristiques d'interaction entre des entités (plus ou moins) cognitives entre elles.

La détermination du contenu d'information se passe typiquement en termes très généraux comme la construction d'un espace de mesure approprié au problème qu'on se pose. C'est à dire qu'on va aboutir enfin –sous une forme ou une autre- à l'écriture du problème en termes des

- espaces de données
- des transformations entre les espaces (qui représentent une partie du processus d'interprétation, typiquement qualitative¹)
- des mesures² (autre que l'interprétation, typiquement quantitative) qu'on sera capable de rapporter sur ces espaces

Etant donné la généralité des objectifs au sein de CIM et ayant posé la question de la subjectivité de l'information, on a tenté considérer une approche dont on a découvert qu'elle existait déjà: la position du problème cognitif selon la Dynamical Hypothesis

0.3 DYNAMICAL HYPOTHESIS

La “Dynamical Hypothesis” (DH)³ est affirmée que des agents cognitifs sont des systèmes dynamiques, en précisant qu'on n'adresse pas la question de *ce qui* permet à quelque chose d'être cognitif, mais comment l'agent cognitif *fonctionne*⁴.

On remarque d'abord que ce document n'a pas pour intérêt de soutenir la DH ou de gloser sur la DH. Tout simplement, on a trouvé dans la position du problème cognitif selon la DH des nombreux points communs avec la ligne d'investigation qu'on avait choisie

Dans [3], §4.1-2 on remarque qu'en DH on pose « the nature hypothesis » (les relations qui permettent de définir des agents cognitifs comme des systèmes dynamiques) et

¹ On peut bien penser aux caractéristiques qualitatives d'une transformation

² Voir par exemple [2] pour un simple mais efficace présentation

³ Voir [3] pour une présentation et l'intéressant open peer commentary relatif

⁴ “The dynamical hypothesis is the claim that cognitive agents are dynamical systems. Crudely put, the question here is not what makes something cognitive, but how cognitive agents *work*.” [3]

« the knowledge hypothesis » (on peut *les comprendre* comment telles, « cognitive science can and should take dynamical form »)⁵.

C'est sur cette deuxième hypothèse que l'on va travailler dans la suite, en mettant l'accent sur l'objet d'action d'un tel système dynamique cognitif : l'information.

0.3.1 DH COMME OUTIL D'HOMOGENEISATION D'HETEROGENEITE

L'énorme avantage décisif de cette position du problème réside en ceci qu'il permet de transposer n'importe quel problème cognitif dans un domaine de composition des transformations dynamiques qui agissent entre les espaces les plus hétérogènes qui soient.

L'hétérogénéité des domaines est un fait très troublant dans l'étude des systèmes cognitifs : la nécessité d'intégrer ces domaines pour agir scientifiquement d'une façon unifiée représente le problème technique principal des sciences cognitives. Dans la DH, l'inhérente hétérogénéité au niveau phénoménologique typiquement présente dans un système cognitif est cependant structurée et réorganisée en liaisons homogènes dans le système dynamique global qu'on est en train de construire⁶. La liaison devient homogène car enfin la matière traitée n'est rien d'autre que l'*information* dans toutes ses allures. Sur cela, on pourra appliquer les outils qualitatifs et/ou quantitatives du langage des systèmes dynamiques afin d'étudier autant que possible les propriétés du système.

Spécifiquement dans le projet CIM, cette position du problème permettra de rendre *explicités* les rôles et les enjeux de la structure fonctionnelle cognitive de soutien par rapport à l'objet du traitement⁷.

0.3.2 DH COMME OUTIL DE RECOUVREMENT DE LA TAILLE DU PROBLEME

Lorsqu'on approche le problème de la complexité, on peut faire une distinction entre complexité objective et complexité épistémique⁸. Il devient donc fondamental de saisir les mécanismes à l'origine de la complexité épistémique.

⁵ Cela permet quand même de poser ici une vision du « problème de la recherche » très intéressant : on peut voir la recherche scientifique comme représentée par l'évolution d'un système dynamique de traitement de l'information selon des règles (transformations) pas connues à priori, où la caractérisation de l'information est l'objet de la recherche et le système dynamique de traitement de l'information n'est rien d'autre que l'entité cognitive dans sa complétude (singulier ou sociale) qui conduit la recherche. On va s'approcher à cette vision dans une des thématiques en appendice.

⁶ Par exemple, la liaison entre structure neurologique/neurodynamique et fonctionnalités abstraites du système nerveux peut bien être implémentée au niveau conceptuel selon la DH. (au niveau technique, c'est plus difficile, mais c'est une difficulté technique et non méthodologique). Plus généralement, cela suffira de prendre les espaces plus ou moins conceptuels où on cherche à mettre des relations d'information et les munir des transformations nécessairement hétérogènes qui effectuent les liaisons entre eux.

⁷ Voir aussi [4], [5], [6] pour des exemplifications de ces enjeux chères au projet CIM

⁸ Voir [7]

“Ce que je veux montrer c’est que les problèmes ne sont jamais seulement pratiques ou politiques. Les vrais problèmes sont toujours à l’intérieur de nous”⁹

« Complexité » et « problème » sont à entendre au sens large ici¹⁰. On utilise ces deux affirmations génériques pour se rendre compte trivialement que la taille du problème que l’on se pose a bien la taille de la connaissance et donc la position du problème selon la DH est bien ciblée¹¹

⁹ Krzysztof Kieslowski, réalisateur polonais 1941-1996. A propos de la citation, voir absolument la scène finale très (même trop) explicite de « Amateur » (1979) et, pour ce qui concerne le thème fondamental de ce mémoire, une des scènes initiales de « La double vie de Véronique » (1991) ou Veronika regarde le monde s’écouler d’une fenêtre de train à travers une sphère de cristal. Je remercie Marianna Menzione pour m’avoir introduit au « monde » Kieslowski.

¹⁰ Dans un cadre strictement scientifique, il n’existe pas de définition concorde de complexité (c’est aussi une des thématiques de base au sein du projet CIM). Voir [8], Appendix 1 – “A Brief Overview of Some Existing Formulations of Complexity” (attention, congelé au 1997!)

¹¹ Ca a l’air très compliqué car on « jette dans la même marmite » vraiment tout, mais enfin on a une marmite avec un langage commun, le langage des systèmes dynamiques. Le programme de recherche consiste en l’art de mettre des métriques « cognitives » sur cet espace. A bien suivre l’idée de Riemann - selon laquelle « la métrique est une condition d’intelligibilité d’un espace » - on sera déjà à bon point : on a trouvé l’espace

1 (Un) Problème de la mesure

1.0.1 RESUME

On va rapprocher le problème de la subjectivité de l'information à ce qu'on appelle en physique le problème de la mesure : sujet et objet deviennent appareil de mesure et phénomène à mesurer. On va examiner des idées en provenance de la physique classique, mécanique quantique et des ordinateurs quantiques et on va extraire la notion de ségrégation/mélange dynamique des processus sujet/objet lorsque ils coexistent dans un même espace d'information.

1.1 INTRODUCTION

Que l'on pose la DH ou non, une réflexion méthodologique de base ne peut pas échapper : lorsqu'on étudie la cognition humaine, on étudie et on fait des mesures sur le même appareil utilisé pour faire les mesures. Cela pose deux considérations :

- Générale : a sort of « egg and chicken problem » sur les fondations de la méthode scientifique, qu'on ne va pas affronter ici d'une façon directe.

- Spécifique : on fait des mesures sur un système avec un instrument de mesure qui n'est pas indépendant (au sens mathématique) du système qu'on veut mesurer.

Clairement, on aura toujours ce type de problème lorsqu'on adresse des questions scientifiques sur les fondements de la cognition; en mots simples, on voit le monde qu'on voit, point, et il faut faire avec. Comment ?

Cela mène à une digression méthodologique sur le problème de la mesure en Physique, sans aucune intention normative. On va essayer d'en tirer des lignes méthodologiques d'aide à la tâche d'investigation qu'on se propose dans CIM.

1.2 DEFINITION(S) DE MESURE

1.2.1 MATH, ESPACES DE MESURE

Soit X un ensemble. Une σ -algèbre de sous-ensembles de X est un ensemble B de sous-ensembles de X satisfaisant trois conditions: (i) $X \in B$, (ii) si $B \in B$, alors $X \setminus B \in B$, (iii) si $B_n \in B$, pour $n \in \mathbb{N}$ alors $\cup_{n \in \mathbb{N}} B_n \in B$.

Si B est une σ -algèbre de X on appelle l'espace (X, B) un espace de mesure. Une mesure finie sur (X, B) est une fonction $\mu: B \rightarrow \mathbb{R}^+$ qui satisfait $\mu(\emptyset) = 0$ et $\mu(\cup_{n=1.. \infty} B_n) = \sum_{n=1.. \infty} \mu(B_n)$, si $(B_n)_{n \in \mathbb{N}}$ est une suite d'éléments de B à deux à deux disjoints. Si $\mu(X) = 1$, (X, B, μ) est un espace de probabilité ou espace de mesure normalisé.

1.2.2 PHYSIQUE

Mesure : valeur d'une grandeur exprimée comme le rapport entre la grandeur donnée et une autre grandeur de la même espèce qu'on suppose être l'unité. Cette valeur est déterminée au moyen d'un processus de mesure approprié. (voir 1.3)

1.2.3 ISO/TAG 4/WG 3, UNI 4546¹²

Information constituée par: (i) un nombre (ii) une indétermination (iii) une unité de mesure

1.3 LE PROBLEME DE LA MESURE EN PHYSIQUE CLASSIQUE

En physique classique on fait tout simplement des mesures de grandeurs physiques sur un système -ou phénomène quel qu'il soit- au moyen des instruments de mesure comme on les connaît. On prend un texte de référence comme par exemple [9] et la méthodologie de la mesure y est tout de suite tracée:

« La méthode expérimentale, méthodes d'observation, définition effective de grandeur physique, analyse dimensionnelle, caractéristiques d'un instrument de mesure, mesures directes et indirectes, erreur limite absolue, relatif et propagation sur les mesures indirectes, erreurs systématiques, erreurs accidentelles, analyse statistique des erreurs accidentelles, moyenne, mode, médiane, écart type, distribution de Gauss, niveau de confiance, méthodes de fitting, etc. »¹³

On va s'intéresser avec plus de détail à une liste de quelque'un des termes utilisés¹⁴

1.3.1 DEFINITION EFFECTIVE DE GRANDEUR PHYSIQUE

Définition effective de grandeur physique: la description des *instruments*, des *méthodes* et des étalons de référence pour la mesure de la grandeur même.

¹² ISO: International Standard Organisation, www.iso.ch, on reporte ici la norme ISO (et sa correspondance italienne UNI) concernant la définition de mesure

¹³ D'ailleurs, ceci est pratiquement le programme d'un cours universitaire de Laboratoire de Physique 1

¹⁴ Ce qui suit est extrait ou est la traduction littéraire des définitions utilisée normalement dans les textes spécialistes. Les mots en *italique* sont mis en évidence par l'auteur

1.3.2 COMPOSANTS FONDAMENTAUX DE L'INSTRUMENT DE MESURE

Élément révélateur : appareil sensible à la grandeur à mesurer. Typiquement l'élément révélateur interagit avec la grandeur en examen et il subit une modification dans une de ses caractéristiques. *Parfois c'est aussi l'élément qui interagit avec la grandeur et la modifie.* Cela crée des problèmes à l'expérimentateur qui doit s'apercevoir de la modification introduite et consécutivement essayer de l'annuler ou de l'estimer à fin d'obtenir une mesure correcte.

Transducteur : partie de l'instrument qui transforme l'*information* obtenue par le révélateur en une grandeur plus facile à utiliser pour l'expérimentateur.

Dispositif de visualisation : composant qui fournit visiblement ou graphiquement le *résultat* de la mesure, *synthétisant* les opérations déroulées par le révélateur et le transducteur.

1.3.3 DISTINCTION ENTRE INSTRUMENT ANALOGIQUE ET DIGITAL

Analogique : les processus de lecture, d'analyse et de sortie des données sont exécutés de façon analogique, c'est à dire en utilisant des dispositifs (amplificateurs, instruments mécaniques ou optiques, etc.) qui *opèrent de façon continue*.

Digital : les dispositifs de lecture (filtres), analyse et sortie opèrent une *discrétisation* sur les *informations*.

Typiquement les processus de lecture et d'analyse sont plus fidèles en analogique tandis que la sortie de l'information est sûrement plus facile à lire et précise en digital. Les instruments modernes sont dotés d'interfaces de communication vers l'ordinateur : cela permet de transférer, stocker et analyser les données avec des moyens intégrés.

1.3.4 CARACTERISATION DE L'INSTRUMENT DE MESURE

Stabilité, fiabilité : Capacité de l'instrument à fournir des mesures égales de la même grandeur. Egalement, robustesse de fonctionnement au cours du temps. En pratique, l'instrument doit être bien isolé *par rapport aux effets de l'environnement*. Exclu, bien entendu, l'effet du à la grandeur mise en examen.

Temps caractéristique de réponse, rapidité : Temps de réponse nécessaire à une variation de la grandeur en examen. Rapidité de l'instrument à donner le résultat d'une mesure.

Sensibilité : Plus petite grandeur capable d'engendrer une révélation de mesure par rapport au début de l'échelle de mesure. Elle détermine la limite inférieure du champ de mesure de l'instrument.

Fond-échelle : limite supérieure de la grandeur que l'instrument peut relever.

Intervalle de fonctionnement : fond échelle - sensibilité

Résolution : Sensibilité, mais définie le long de tout le champ de mesure. En général, résolution= variation grandeur/variation mesure.

Précision : Erreur relative de mesure= erreur absolue/mesure

1.4 LE PROBLEME DE LA MESURE EN MECANIQUE QUANTIQUE¹⁵

Pour une référence à la fois technique et abordable en mécanique quantique on pourra consulter [10], [11], [12]. Ici on donnera une interprétation des notions de base de la mécanique quantique de manière assez synthétisée, ayant un objectif duplice :

- Comprendre en gros la problématique de la mesure quantique.
- Donner de premières réflexions, soit techniques soit génériques, contextualisées sur le travail du mémoire. On devra reprendre ces aspects sous forme détaillée lorsqu'on continuera le travail dans une thèse.

1.4.1 ENCADREMENT DU PROBLEME

Un système quantique S est un système que l'on essaye de comprendre en termes de *dynamique* de ses états. On a accès au système au moyen de grandeurs physiques *observables* O_1, O_2, \dots que l'on extrait avec un processus de *mesure* sur l'état du système. Lorsqu'on considère un observable O , la cardinalité N du spectre SO de la mesure qu'on obtient (ensemble continu $SO = \{o\}_{o \in (a,b)}$, $N = \text{card}(SO)$, ou discret $SO = \{o_i\}_{i=1..N}$, où i est un nombre dit *quantique* utilisé pour indexer chaque mesure possible de l'observable) donne la dimension N de l'espace H où l'on définit l'état du système selon ce qui est possible d'inférer à partir de O ¹⁶. Lorsqu'on s'intéresse à plusieurs observables O_1, O_2, \dots - qui contribuent à

¹⁵ Ce qui suit est une interprétation par l'auteur de quelques thématiques standard de la mécanique quantique. L'approche suivie donne une vision « constructiviste » de la théorie plutôt que une présentation aseptique. Cette synthèse a été écrite pour donner des moyens de compréhension opératif du problème quantique à un lecteur qui possède une formation de base typique en sciences cognitives: on s'est efforcé de donner les éléments nécessaires à la tractation du travail de mémoire sans ajouter de complications inutiles; remarquablement on ne va pas traiter explicitement les fonctions d'onde et on se concentrera sur des espaces à dimension finies. L'exposition suivra parfois une tractation pas totalement orthodoxe : ceci est un choix explicite de l'auteur, fonctionnel -à son avis- pour une compréhension du problème quantique contextualisée au problème adressé dans ce travail. Cette forme d'exposition à demande beaucoup d'effort et d'élaboration, et de risques académiques, que l'on n'aurait pas eu si on avait tout simplement recopié les notions comme on les trouve sur les textes de référence en Physique, sans, pour autant, rendre plus explicites les liens avec la problématique présenté ici. Enfin, on a essayé de tenir au cœur tant que possible une phrase (peut-être la seule!) retenue pendant le parcours formative: « la Mécanique Quantique est beaucoup plus simple que les Echecs » [Alain Cordier, Prof. de Mécanique Quantique en Licence de Physique Fondamentale à Paris XI Orsay].

¹⁶ On juge important de poser tout de suite la remarque suivante. On vient de dire que: $\dim(H) = \text{card}(SO)$
Ceci apporte d'abord un « éclat dimensionnel » du problème, qu'il faut intégrer dans la compréhension du problème quantique le plus tôt possible. En fait, on est habitué à la « vision » suivante, typique d'un système dynamique classique: on observe les valeurs d'une certaine grandeur physique responsable de la description d'un système, on aligne ces valeurs sur un axe (c'est à dire qu'on met implicitement une relation d'ordre); cet axe constitue une dimension d'un espace dit de phase, la dimension de cet espace de phase est donc égale au nombre de

donner une définition plus détaillée du système et donc contribuent à une définition plus détaillée de l'état – ils n'ont pas nécessairement besoin d'agir sur des espaces H_1, H_2, \dots séparés. Ces espaces codent des états par rapport à la grandeur qu'ils représentent : si des enjeux existent entre les grandeurs, cela va se répercuter en termes de enjeux au niveau des états. On appellera H_S l'espace globale résultant du système.

Avec cette position du problème, on ne rend pas compte du processus par moyen du quel on obtient la mesure. Dans d'autres domaines on pourrait partiellement s'en désintéresser, mais dans le cas microscopique quantique on ne peut absolument pas: la mesure comporte une interaction entre appareil de mesure et système qui est du même ordre que les interactions internes au système qu'on entend mesurer. Donc l'appareil de mesure A doit interagir avec les états du système que l'on étudie à fin d'extraire l'information nécessaire. Ceci devient « facile » à modéliser si l'on considère l'appareil de mesure comme un système, lui-même décrit par états : en fait, l'appareil de mesure n'est qu'un système comme un autre, donc ses états doivent trouver un lieu dans un espace qu'on appellera H_A . Cette fois, H_S et H_A ne peuvent obligatoirement pas être séparées, car des enjeux doivent exister entre les grandeurs de S et de A (sinon, on ne mesure rien du tout!). A ce point, on complète le cadre global en se rendant compte que le système S et l'appareil A sont plongées dans une réalité contextuel E doué d'une quantité des états possibles vraiment formidable (c'est l'Univers) et encore une fois des enjeux vont exister entre les états de $\{S, A\}$ et E. Considérer S et A isolées par rapport à E (d'ailleurs, deux ou plus systèmes S_1, S_2, \dots isolées entre eux) est une situation

grandeurs qu'on utilise pour caractériser le système, et l'on observe enfin sur cet espace la trajectoire du vecteur descripteur de l'état du système selon les coordonnées données par les valeurs. Dans le cas quantique (mais aussi lorsque l'on s'intéresse à l'étude plus générale des corrélations entre des observations quelconques), on utilise une dimension pour *chaque valeur de chaque grandeur*. L'espace résultant est un espace beaucoup plus riche. C'est un espace d'analyse plutôt que de synthèse : C'est un environnement où on n'a plus « d'espace » explicite pour coder les corrélations entre les mesures. La synthèse classique de cet espace (on « presse » une dimension dans une valeur) implique le choix d'une classe de relations entre les éléments de l'espace: dans le choix on a la réduction de « l'éclat dimensionnel ». Malheureusement on est habitué à voir le monde « classiquement »: tout l'espace qu'on a devant soi (ou à l'intérieur de son esprit) contient déjà les corrélations que l'on a choisi de faire implicitement – C'est, en fait, un *espace* (donc il possède une structure, quelle elle soit) et n'est pas un ensemble sans aucune structure sauf celle nécessaire à donner un lieu quelconque à chaque élément - et que l'on relègue à des corrélations dont on met « à l'extérieur » le rôle « collagène » explicite. On aura une compréhension cognitivement plus efficace du problème quantique si on se force à voir le plus possible « le gros espace » avec sa totalité de corrélations, c'est à dire « ouvrir » dans son esprit un tableau gigantesque – dont on verra qu'il possède un nom : la *matrice de densité*- et être capable de voir / lire au travers de ce tableau la réalité classique comme un cas particulier auquel il ne faut pas donner trop d'importance, il n'est qu'un point dans une mer dimensionnelle. Le thème de cette remarque est proche à ce que l'on adresse en littérature comme le « problème de l'objectification » ([12], p. 85).

Exercice intéressant : pour comprendre le mécanisme cardinalité $\leftarrow \rightarrow$ dimension « sur sa propre peau », on peut essayer la même opération sur la réalité classique, en pressant chaque *dimension classique* sur une seule valeur, et essayer de voir ce qu'on obtient : on verrait grossièrement la même réduction entre la « réalité quantique » par rapport à la réalité classique. Dans cet exercice, les dimensions classiques que l'on choisira n'ont aucune raison d'être seulement des dimensions spatiales ou temporelles : elles peuvent être n'importe quelles grandeurs sur lesquelles on peut mettre une relation d'ordre.

très théorique pour une raison fondamentale: l'« isolation » n'est pas jouée au niveau physique matérielle (donc, comment on est plus ou moins habituée classiquement) mais elle doit être jouée au niveau des états. Les états peuvent être intriqués (angl : *entangled*): l'intrication lie des grandeurs qu'on extrait sur un certain état à des grandeurs existant sur un état à lui intriquée (dans le cas qu'on s'intéresse à l'extraction des plusieurs grandeurs), ou plus simplement et generiquement, lie des grandeurs qu'on extrait à un état qu'on ne comprend pas bien jusqu'au où « il arrive »¹⁷. La distinction entre système et objet physique - objet qu'on considère grossièrement définie par la donne des grandeurs- devient *très* épineuse à faire, comment on peut bien comprendre.

1.4.2 ELEMENTS THEORIQUES

On plonge le problème quantique relatif à un certain nombre k d'observables $O_1, O_2 \dots$ ayant un spectre de mesure $SO_1, SO_2 \dots$ dans un espace d'Hilbert H à dimension N - c'est à dire à dimension complexe N , où $N \leq \prod_{i=1..k} \text{card}(SO_i)$ - et dans l'algèbre linéaire associée typiquement à cet espace¹⁸. On pose des postulats pour transférer la physique quantique sur le formalisme, qu'on peut aisément trouver dans [10]¹⁹.

¹⁷ Il est obligatoire citer la première apparition de cette problématique sous le nom de EPR paradoxe

¹⁸ ▪ *Opérateur hermitienne* O : une matrice hermitienne (ou auto adjointe, $O = (O^\dagger)^*$ ou aussi plus synthétiquement $O^\dagger = O$) à dimension $H \times H$.

▪ Vecteur « ket » $|\psi\rangle$ tout simplement un vecteur $|\psi\rangle \in H$, et son vecteur dual « bra » $\langle\psi| = |\psi\rangle^\dagger$ ▪ L'action de O sur un vecteur ket s'écrit donc $O|\psi\rangle = |\phi\rangle$ ▪ *Produit hermitienne* (ou produit interne ou produit scalaire) entre $|\phi\rangle$ et $|\psi\rangle$ est $\langle\phi|\psi\rangle = \langle\psi|\phi\rangle^*$ ▪ La norme de $|\psi\rangle$ est donc $\langle\psi|\psi\rangle$ ▪ *Produit externe* entre $|\phi\rangle$ et $|\psi\rangle$ est $|\phi\rangle\langle\psi|$, attention, le résultat possède les dimensions de $H \times H$ ▪ *Projecteur* sur $|\phi\rangle$ l'écriture $|\phi\rangle\langle\phi|$, l'opérateur dual de l'opération de norme, appelé projecteur car il projette sur $|\phi\rangle$ n'importe quel vecteur $|\psi\rangle$, comme on peut le vérifier en examinant l'écriture suivante $|\phi\rangle\langle\phi|\psi\rangle$ ▪ si c est un nombre complexe, $|c\psi\rangle = c|\psi\rangle$, et $\langle c\psi| = c^*\langle\psi|$ ▪ *Commutateur* entre deux opérateurs A et B l'écriture $[A,B] = AB - BA$ ▪ etc. etc.

¹⁹ On ne va pas les donner ici afin ne pas alourdir l'exposition, premièrement, et pour ne pas dériver sur une tractation du problème de la mesure quantique trop technique. On posera quand même des considérations sur les postulats :

- Un observable O est un *opérateur linéaire hermitienne* O (qu'on indique \hat{O} , d'ailleurs aussi l'observable) qui agit sur un espace d'états H ayant au moins la dimension de la cardinalité de l'ensemble SO des valeurs de la grandeur comment on a vu au §1.4.1, on appelle $|\psi\rangle$ un vecteur quelconque de cet espace - ou aussi une fonction d'onde ψ correspondante, laquelle on ne va pas traiter ici-, et on impose que le spectre de mesure SO à valeurs réelles est le spectre de \hat{O} ; on obtient donc le spectre des vecteurs propres $SF = \{|\psi_i\rangle\}_{i=1..N}$ qui forme une base de \hat{O} et donne la correspondance entre les valeurs de SO et les vecteurs d'états dans H . Ce choix sur la forme de l'opérateur mérite une explication: plus la variance d'une mesure sur un certain état est petite et plus la distribution des valeurs de la mesure se concentre autour de la valeur moyenne de la mesure, -valeur qui semble être humainement l'objet de toute cette machinerie de mesure-, donc si l'on impose l'annulation de la variance dans le formalisme qu'on vient de décrire, on trouve la condition que la valeur moyenne doit être une valeur propre de l'opérateur de mesure : démonstration extrait de [13] : $\widehat{\Delta F}^2 = (\hat{F} - \langle F \rangle)^2$, $\widehat{\Delta F}^2$ est hermitien, donc pour l'état $|\psi\rangle$ on a:

$\langle \Delta F^2 \rangle = \langle \psi | \widehat{\Delta F}^2 | \psi \rangle$, une norme, donc quantité qui s'annule seulement pour $\widehat{\Delta F}^2 |\psi\rangle = 0$, c'est à dire si $\boxed{\hat{F}|\psi\rangle = F|\psi\rangle}$

- La forme d'un opérateur est générique (hermitienne quand même!). Un opérateur de mesure est construit sur les mesures qu'il doit donner et -associé à l'équation d'évolution temporelle du système- va donner des prédictions sur les valeurs possibles de l'observable. Le processus effectif qui effectue la mesure, donnant une valeur appartenant au spectre de mesure et donc, *de facto*, mettant le système dans l'état propre (=vecteur propre) correspondant à une telle mesure, est seulement postulé dans les postulats (justement) et il introduit une discontinuité dans

Typiquement on considère que l'état du système est la donnée d'un vecteur $|\psi\rangle \in H$. Les coordonnées de ce vecteur sont à valeurs complexes et on visualise mieux l'état dans sa forme plus générale : la donnée de sa matrice de densité ρ ²⁰

$$(1.1) \quad \rho = |\psi\rangle\langle\psi| = \sum_{i,j} c_i^* c_j |\psi_j\rangle\langle\psi_i| \quad i,j = 1..N \quad ^{21}$$

Les termes diagonaux $c_i^* c_i$ $i=1..N$ donnent la *densité de probabilité* des vecteurs/états de base, les termes non diagonaux $c_i^* c_j$ $i,j \neq i$ donnent des termes dites d'*interférence* entre les vecteurs/états de base, ces derniers étant les responsables des phénomènes d'interférence quantique: la racine fondamentale du traitement quantique sur laquelle tout le formalisme est développé. On va interpréter les $c_i^* c_j$ $i,j \neq i$ comme indicatif des états où le système est en quelque forme *à la fois soit sur l'état i et sur l'état j*.

Souvent cette matrice est utilisée pour le traitement *statistique* d'un *mélange* des états quelconques $\{|\psi^{(k)}\rangle\}_k$

$$(1.1a) \quad \rho = \sum_k \text{Pr}(k) |\psi^{(k)}\rangle\langle\psi^{(k)}| \quad \text{où Pr}(k) \text{ est la probabilité statistique } \textit{classique} \text{ de l'état } k.$$

On a noté ici la (1.1a) car elle est symptomatique des deux niveaux fondamentaux de l'analyse du problème quantique : une « statistique » inhérent au problème quantique, donné pour l'équation (1.1), et une « couche » ultérieure statistique au sens classique, donnée pour l'équation (1.1a). On ne va pas s'intéresser ici à l'équation (1.1a), mais on considère important de la mentionner.

L'évolution d'un système quantique est régie par l'équation de Schrödinger sur le vecteur d'état $|\psi\rangle$, que l'on peut re-écrire sur la matrice de densité selon

l'évolution du système. La justification explicite de ce que l'on appelle « le collapsus de l'état sur un état propre » à la suite d'une mesure est au cœur du débat contemporain.

- Toutes les grandeurs O_1, O_2, \dots - qui contribuent à la définition de l'état $|\psi\rangle$ - n'ont pas nécessairement besoin d'une correspondance avec des espaces H_1, H_2, \dots séparés. Ces espaces codent des états par rapport à la grandeur qu'ils représentent : si des enjeux existent entre les grandeurs, cela va se répercuter en termes de enjeux au niveau des états.

- Les observables spatiales et temporelles, qui définissent typiquement « l'espace » dans lequel on plonge la physique classique et notre conception naturelle de la réalité, ne sont que des contributions, comme d'autres, au cadre « globale » donnée par l'espace des états que l'on accroît « à coups » d'observables. Espace et temps sont aussi passibles d'enjeux plus ou moins maîtrisés avec d'autres grandeurs. Encore une fois: plus tôt on sera capable de se détacher du rôle préférentiel qu'on donne à ces observables, et plus tôt on sera capable de voir le cadre global qu'on a esquissé au 1.4.1. Cette considération n'est pas évidente lorsqu'on attaque didactiquement le problème quantique en termes de détermination d'une fonction d'onde ψ , typiquement exprimée en termes de *variables* spatio-temporelles et de *paramètres* quantiques. De ce fait, on donne à l'espace temps un rôle préférentiel qu'il ne possède que dans notre compréhension du monde

²⁰ Elle est aussi nommée opérateur de densité car elle possède toutes les propriétés d'un opérateur (elle est hermitienne). Notation : on va souvent écrire ρ pour $\hat{\rho}$, problématique liée à l'éditeur de texte utilisé.

²¹ $|\psi\rangle = \sum_i c_i |\psi_i\rangle$, avec c_i nombres complexes, où les coefficients c_i donnent l'*amplitude* de chaque état de base correspondant $|\psi_i\rangle$. Les états de base sont ceux qui correspondent aux états où une ou plusieurs grandeurs ont une valeur bien déterminée.

$$(1.2) \quad i\hbar(\partial/\partial t)\rho^\wedge = [H^\wedge, \rho^\wedge]$$

où i est l'unité imaginaire, \hbar est la constante de Planck/ 2π ²² et H^\wedge l'Hamiltonien du système (l'opérateur qui donne l'énergie du système)

Ceci est intéressant –entre d'autres raisons- car on peut expliciter l'origine et tracer l'évolution des termes de densité : donc l'évolution des coordonnées du système et, notablement, les termes d'interférence ($i \neq j$), qui peuvent apparaître ou disparaître selon :

$$(1.3) \quad i\hbar(\partial/\partial t)\rho_{ij} = \sum_k h_{ik} \rho_{kj} - \sum_k \rho_{ik} h_{kj} \quad 23$$

1.4.3 ENTANGLEMENT ET (UN) PROBLEME DE LA MESURE

On considère²⁴ deux systèmes S et A, avec respectivement des états $|\psi\rangle_S$ et $|\varphi\rangle_A$ définis sur des espaces d'Hilbert H_S et H_A . L'espace du système composite est $H_S \otimes H_A$ et l'état du système composite est donné par

$$(1.4a) \quad |\Omega\rangle = |\psi\rangle_S |\varphi\rangle_A \text{ qu'on appelle } \textit{état pure}.$$

On peut choisir un observable \hat{O}_S et un observable \hat{O}_A qui agissent respectivement sur H_S et H_A , et trouver donc une base pour H_S donnée par les autovecteurs de $\hat{O}_S, \{|i\rangle_S\}$, et une base pour H_A donnée par les autovecteurs de $\hat{O}_A, \{|j\rangle_A\}$. On peut donc re-écrire l'état du système composite selon l'équation

$$(1.4b) \quad |\Omega\rangle = (\sum_i a_i |i\rangle_S) (\sum_j b_j |j\rangle_A) \text{ qui sera donnée pour les choix de certains } a_i \text{ et } b_j$$

On rappelle qu'une base de $H_S \otimes H_A$ est donné par $\{|i\rangle_S\} \otimes \{|j\rangle_A\}$, donc l'état plus général qu'on peut décrire sur $H_S \otimes H_A$ est

$$(1.4c) \quad |\Theta\rangle = \sum_{i,j} c_{ij} |i\rangle_S |j\rangle_A$$

Et en effet, lorsqu'on considère la dynamique de tout $H_S \otimes H_A$ selon la (1.2), l'état originellement donné par la (1.4b) va évoluer dans un état du type (1.4c). Si on ne peut pas factoriser la (1.4c) en termes de (1.4b), c'est à dire écrire la (1.4c) dans la forme d'un état séparable, on appelle cet état *entangled*.

²² On rappelle que \hbar a la dimension d'une *action*, [action] = [énergie] * [temps]

²³ On peut donc voir grossièrement l'évolution d'un système quantique comme un flux de densité de probabilité « plus ou moins complexifié » qui se passe pour les parties triangulaires de la matrice de densité (grâce aux phénomènes des interférences), en départ et en arrivée sur les termes diagonaux qui donnent les probabilités des coordonnées du système auxquelles on a –presque- accès; en fait, on peut penser les termes diagonaux comme le résultat du flux de densité de probabilité entre le même état. La matrice de densité est donc une représentation qui donne d'un seul coup une présentation statique/ « semi dynamique » de l'état: les termes diagonaux donnent les « coordonnées », les densités de probabilité de chaque état de base au moment donnée, et les termes triangulaires donnent les interférences qui sont à la base de l'évolution dynamique du système. Cette interprétation est arbitraire et posée par l'auteur.

²⁴ Cet exemple est extrait –pour sa simplicité d'exposition- de http://www.wikipedia.org/wiki/Quantum_entanglement

Exemple: lorsqu'on se donne deux vecteurs de base de $H_S, \{|0\rangle_S, |1\rangle_S\}$, et deux vecteurs de base de $H_A, \{|0\rangle_A, |1\rangle_A\}$, ceci est un état entanglé:

$$(1.4d) \quad |\Theta\rangle = (1/\sqrt{2}) (|0\rangle_S|1\rangle_A - |1\rangle_S|0\rangle_A)$$

Aucun des deux systèmes n'a d'état défini: ses états sont superposés. On peut comprendre l'entanglement (intrication) dans ce sens. Maintenant supposons qu'on fait une mesure sur le système A avec \hat{O}_A : on a deux possibilités. Soit on obtient 0 et donc l'état du système composite collapse sur $|1\rangle_S|0\rangle_A$, soit on obtient 1 et le système composite collapse sur $|0\rangle_S|1\rangle_A$. Lorsqu'on est dans la première situation, toutes les mesures qu'on va réaliser sur S vont donner 1 (sauf clairement attendre une évolution du système, soit sur le système S sépare, soit encore une fois sur le système composite); lorsque on est dans la deuxième, c'est l'inverse qui a se passer.

Donc, un système est perturbé par les actions qu'on peut faire sur un autre système à qui lui sont corrélé, tout en jouant sur la séparation/corrélation des états au moyen de la dynamique globale de l'interaction. Noter que tout cela permet de lier l'état d'un système à un autre -ce qui est intéressant au regard de la position du problème de la mesure- mais il *ne clarifie pas* le mécanisme explicite de la mesure: le fait que l'état collapse sur un état de base est un fait mais il n'a pas d'explication précise, comme on l'a déjà noté avant²⁵.

En plus, la mesure possède un certain sens si on est capable de *préparer* l'état du système avant -c'est à dire mettre le système dans un état connu (par exemple au moyen d'une

²⁵ On a trouvé intéressant de donner ici l'extrait suivant:

Enfin, Altman dit à propos de l'utilisation du zoom: « Le zoom rétablit un rapport entre plan et arrière plan, puisant le plan en avant en donnant l'impression qu'il est vraiment là. Je veux créer la sensation qu'il y a quelque chose qui se passe en dehors du cadre, c'est à dire que « la vie continue autour ». Le zoom, pourtant, maintient le rapport de contiguïté métonymique entre ce qui est dans le cadre et ce qui est en dehors (*métonymie*: gr. *Metonymia* 'échange de nom'. La métonymie désigne une 'entité au moyen du nom d'une autre entité qui est en rapport avec la première comme la cause l'est à l'effet (...) où elle est en correspondance par relations de quelque interdépendances (...)) [14], trad. par l'auteur). On considère le début de la longue séquence du duel. McCabe prend la décision de grimper sur le clocher de l'église pour mieux dominer le champ d'action: la camera l'encadre du dos lorsque il pose le fusil aux pieds de l'escalier. Lorsque, en montant, il sort du cadre, dans le cadre qu'on appellera « Y » reste le seul fusil. Quand le personnage redescend, la camera l'encadre de front: McCabe cherche convulsivement son arme, en vain. De norme, un réalisateur aurait proposé ici le même cadre « Y », cette fois dramatiquement manquant de la carabine. Par contre Altman ne se détache pas de McCabe en train de fouiller le vide: tout d'un coup apparaît de son dos un prêtre avec un fusil, ce fusil, dans ses bras, visée. Dans la régie de Altman, le fusil « récite»: étant abandonné imprudemment par McCabe, le fusil devient la proie du prêtre qui, du dehors du cadre, en prend possession. Si Altman avait proposé le cadre « Y » sans le fusil, il aurait montré la même portion d'espace communiquant au spectateur pas un vol – un détournement, l'intervention de quelqu'un qui du dehors du cadre s'approprie un objet géré jusqu'à présent par le protagoniste – mais une disparition inattendue, une *volatilisation* en sens absolue de l'objet lui-même. (...). En renonçant au cadre « Y », le fusil est traité en sens métonymique: on le retrouve dans les bras, tout simplement, de celui qui en était le plus *proche*. (*McCabe and Mrs Miller, ou bien « le cadre Y »*, extrait de [15] et traduit par l'auteur)

mesure même)- et après vérifier le parcours de l'évolution du système. Sinon, plutôt que des *mesures*, ce qu'on est en train de faire est de mesurer des *corrélations*.

Il est utile de mentionner ici un autre phénomène appelé *décohérence*, qui agit entre un système et un environnement beaucoup plus grand (en termes des états) : selon ce mécanisme, la matrice de densité du système devient de plus en plus diagonale, c'est à dire les termes hors diagonale (d'interférence) disparaissent et le système « perd » sa caractéristique quantique et deviens « classique ». On aimerait approfondir cet aspect pendant une éventuelle poursuite du travail en thèse.

1.4.4 PLUSIEURS OBSERVABLES

Lorsque l'on considère deux ou plusieurs observables agissant sur un même système, on aura les situations suivantes (on considère deux observables A et B pour la suite):

- $[A^{\wedge}, B^{\wedge}] = 0$, les observables commutent. On peut démontrer que les deux observables partagent une même base d'autovecteurs, même si on a des parties du spectre de l'une ou de l'autre qui sont dégénérées. Ceci signifie en dernière analyse que les résultats de la mesure de B sont invariants par rapport aux résultats de la mesure de A (et vice-versa). Donc on pourra mettre les mesures en relation étant sûr qu'elles se réfèrent au même état. Sous une forme équivalente, on peut démontrer que les variances des deux observables peuvent être nulles en même temps. On peut accroître l'ensemble des opérateurs ayant cette propriété *deux à deux* et construire ce que l'on appelle *Ensemble Complet d'Observables qui Commutent (ECOC)*
- $[A^{\wedge}, B^{\wedge}] = i C^{\wedge}$, les observables ne commutent pas et le commutateur donne naissance à un troisième opérateur $i C^{\wedge}$ (C^{\wedge} peut-être aussi une constante). A partir de cette expression, on arrive à démontrer qu'il existe une relation entre les variances de l'observable A^{\wedge} et de B^{\wedge} et qu'elles ne peuvent pas être nulles au même instant. Plusieurs interprétations de ce fait sont possibles. Ici, tout simplement, on va dire que l'action d'un opérateur agit sur l'état du système de telle façon qu'elle change « des aspects » de l'état qui vont être mesurées par l'autre opérateur, et vice-versa.

1.4.5 PLUSIEURS SYSTEMES

On peut penser une composition de systèmes, agissant sur un espace global qui est le produit tensoriel des espaces de chaque système, qui suivent l'évolution globale donnée par l'équation (1.2) ²⁶. C'est cela la situation réelle où de facto on utilise le formalisme quantique,

²⁶ On remarque que la matrice de densité peut être donnée soit pour la (1.1) que pour la (1.1a)

où l'on rencontre ses limites d'un côté et sa capacité d'analyse de l'autre. Ceci sera très important dans la suite de ce travail.

1.5 DES REFLEXIONS

1.5.1 PROBLEME ONTOLOGIQUE ET HYPOTHESE SUR LA TAILLE DE L'INFORMATION QUANTIQUE

Dans tout cela le fait le plus évident est l'incapacité à saisir par un regard extérieur « absolue » ou « aseptique » le fait « atomique » dans la réalité qu'on entend étudier. Dans ce cas, l'information est elle-même physique²⁷. En ce qui concerne le cas en examen, le problème ontologique est bien présent et on doit l'affronter.

On peut voir un phénomène quantique de base comme rien d'autre que l'échange d'information physique élémentaire qu'on est arrivé à saisir. On pose donc l'hypothèse suivante: on peut déterminer le grain de l'information qu'on arrive à saisir d'un système quantique -au moyen d'observables- lorsqu'on arrive à déterminer la taille de son indétermination. Etant donné qu'on n'a que les observables, on doit faire avec.

Cette hypothèse est formulée à partir d'un raisonnement très grossier. La référence [18]²⁸ donne des outils beaucoup plus fins que l'on pourrait intégrer dans un développement détaillé de la problématique. On poursuit quand même sur cette hypothèse.

- Si on utilise des observables qui commutent, on ne peut saisir aucune indétermination: on va interpréter cela comme le fait que ces observables ne pénètrent pas suffisamment des enjeux ultérieurs « internes » au système. De plus, on sait -de par la théorie- que ces observables ont leurs valeurs sur des mêmes états. Pourtant, on n'a aucun indice qui nous permettrait même de savoir s'il existe d'autres états. En fait, ils donnent un cadre complet d'un système (si ECOC) et cela n'ajoute rien à la connaissance ultérieure : obtenir la connaissance d'un système au moyen d'un ECOC est le mieux qu'on puisse faire.

- Si on utilise des observables qui ne commutent pas, cela signifie -au moyen du processus de mesure- qu'on a déclenché quelque chose (quelle qu'elle soit) hors les états auxquelles on peut avoir accès au moyen des observables qu'on s'est donné, et cela doit amener une information ultérieure. Cette information est justement l'indétermination qu'on obtient sur le commutateur: elle cache n'importe quel type d'information sur le système, mais elle est là

²⁷ voir [16] parmi les dizaines de possibles expositions de ce concept

²⁸ [18] est un des récents encadrements disponibles sur le problème de l'inférence statistique en Mécanique Quantique vu sous un point de vue strictement mathématique. C'est une publication technique relativement abordable avec des notions de Mécanique Quantique au niveau de licence-maîtrise de Physique ou de Mathématiques.

dans sa forme grossière. Chaque processus de mesure est fait à la dépense d'une énergie d'interaction qui se passe au moins entre le système et l'appareil de mesure. Donc une forme suffisamment générique de considérer l'indétermination d'information quantique consiste à voir l'indétermination que l'on a sur l'énergie et le temps, justement ce que caractérise un échange d'information : une énergie et un temps. Donc à partir de la fameuse relation

$$(1.5) \quad \Delta E \cdot \Delta t \geq \hbar^{29}$$

on obtient la taille minimale de l'information physique lorsqu'on ne peut pas s'empêcher de faire des enquêtes par moyen de tous les observables qu'on sera capable de se donner ou de découvrir et qui ne seront pas nécessairement un ECOC. En physique la grandeur [énergie] * [temps] est appelée [action], que synthétise dans sa définition l'environnement ou –en fait– l'*action se passe*. Et bien, ce qu'on suppose ici est le fait qu'en physique quantique cet environnement possède une taille minimale. Il a la valeur de la constante de Planck / 2π

$$h = 6.62606876 \times 10^{-34} \text{ [J*s]}$$

$$h / 2\pi = \hbar = 1.054571596 \times 10^{-34} \text{ [J*s]}$$

On pourra exprimer mieux ce concept sous une forme plus rigoureuse lorsqu'on s'intéressera à un développement détaillé.

1.5.2 HEISENBERG RELOADED ET HYPOTHESE DE TRAVAIL

A la suite du paragraphe précédent, on pose une hypothèse de travail qu'on croit être dense d'intérêt. L'indétermination qu'on trouve en mécanique quantique n'est pas spécifique à la physique qu'on est en train d'étudier, mais est un fait beaucoup plus général lié seulement à la nature du traitement de l'information, information à laquelle on a accès comme sujet connaissant. En mécanique quantique l'accès est fait aux moyens d'opérateurs, mais les opérateurs ne sont qu'un outil de compréhension du sujet connaissant. Il est d'importance capitale de tenir ce concept *leitmotif* de la mémoire jusqu'à l'esquisse finale du paysage cognitive générale qu'on donnera à la fin de ce mémoire.

On arrive au même *leitmotif* selon le raisonnement suivant: une fois qu'on ne peut plus faire de distinction précise entre information et substrat d'implémentation de l'information ou bien, pour ce que concerne tout le travail dans la suite, entre instrument de mesure et phénomène, on peut aboutir à des insaisissables. Ce fait est structurel et intellectuel : la Physique n'est pas la réalité, elle est une science développée par l'homme contrainte à être cohérent à l'observation ou à l'action sur la « réalité » qui nous entoure. Observation ou

²⁹ Une des relations d'incertitude d'Heisenberg, q'on peut trouver par moyen des raisonnements semi-classiques ou quantiques formels

action dans ce cas ce n'est que de l'information traitée pour notre organisme (sociale, scientifique ou personnel), et enfin traitée pour notre système nerveux. La cohérence est structurelle dans le traitement³⁰. Donc la Physique n'est qu'un cas particulier de traitement d'information et comme telle elle rencontre des singularités de traitement.

On peut voir plein d'autres formulations de ce même problème, qui ressortent dans l'histoire de la science ou de l'homme un peu partout et dans ses allures caméléonesques les plus variées. Juste pour en dénombrer quelqu'un : les théorèmes d'incomplétude de Gödel.

On doit faire avec, soit en Physique, soit n'importe où. L'indétermination aura toujours une taille d'un certain « \hbar », qu'en physique quantique on appelle constante de Planck / 2π et a la valeur de $\hbar = 1.054571596 \times 10^{-34}$ [J*s] , grandeur qui est déterminée pour la « taille minimale » de comment on code l'information saisissable minimale dans ce monde spécifique.

On fait donc l'hypothèse qu'en mécanique quantique l'information possède les dimensions d'une action. Entrer à l'intérieur de la taille minimale admise signifie détruire l'information, perdre le sens de l'information, se poser des « questions » auxquelles on n'est pas *techniquement* capable d'accéder. Poursuivre causalités et effets à l'intérieur de cette taille n'a presque aucun de sens car cause et effets impliquent une transmission saisissable d'information, impossible techniquement à gérer, à maîtriser « là dedans ».

De tout cela sort l'idée guide de ce travail:

On va toujours essayer de rapporter sur le même espace d'interaction l' «instrument de mesure» et le « phénomène à mesurer» dans leur globalité, et mettre en évidence quantitativement les enjeux dynamiques qui se passent entre les deux entités.

En ce qui concerne la suite on va introduire une h généralisée, on peut l'appeler « h cognitive » (h_{cog} dans la suite), mesurée au moyen des grandeurs qu'on utilise pour coder « l'information » en termes « concrète » dans le domaine cognitif en question.

La détermination de la taille de h_{cog} et la généralisation du problème de l'indétermination de l'information comme on l'a pose ici devient donc un des objectifs clef de ce travail. Si, en plus, on est capable de décrire les enjeux qui lient les grandeurs de définition d'information entre des domaines de pertinence divers (par exemple, au moyen des mécanismes de l'information mutuelle, mais c'est que un exemple), on peut trouver les équivalences de la taille de h_{cog} en d'autres unités de mesure. On pourrait aussi trouver la taille de h_{cog} en termes de la bonne vieille « action » chère aux physiciens, si on est capable

³⁰ Par exemple voir [19]

de décrire/tracer tous les enjeux qui lient l'énergie physique [=Joule] et le temps physique [=s] nécessaires à l'implémentation physique du fait « atomique » de gestion de l'information sur le système cognitive. Si on applique cette recherche tautologiquement dans le cas de la Physique, on arrive juste à $1.054571596 \times 10^{-34}$ [J*s], peut-être le grain, la résolution d'indétermination cognitive la plus fine que l'on peut obtenir à l'état de l'art actuel.

Il est désormais claire qu'on peut voir la Physique comme construite à partir de l'information, et non l'inverse. Car les limites -c'est à dire le grain du problème- est donc sur l'information, pas sur la physique³¹. En [16], Landauer R. "The physical nature of information" on est plus réaliste si on regarde de l'autre coté: "The informational nature of physics" .

Dans cette bagarre, on laisse dehors et tranquille pour le moment la *réalité*. « On ne peut pas voir plus loin des choix qu'on peut comprendre »³².

1.5.3 INFORMATION PHYSIQUE ET COGNITIVE

Suivant l'hypothèse de travail, toute l'énorme littérature développé autour du problème de la mesure quantique n'est rien d'autre qu'une littérature sur le traitement d'information lorsqu'on a des problèmes de « granularité » à la saisir. On aimerait bien continuer la digression sur la mesure en mécanique quantique mais cela devient un travail technique et spécifique qu'on aimerait poursuivre dans le cadre d'une thèse plutôt que d'un mémoire de DEA. Dans ce qui suit, on va juste esquisser des idées à développer car elles sont fonctionnelles au problème cognitif.

1.5.4 UNE PRECISION

Tout processus physique peut-être pensé comme un processus de traitement d'information à un niveau ou à un autre³³, et donc à priori on pourrait se demander pourquoi on doit se concentrer sur la mécanique quantique. C'est l'énorme bagage technique développé autour d'une discipline bien ciblée et assez générale comme la mécanique quantique qui constitue la richesse d'une telle vision.

³¹ L'homme va toujours chercher à aller plus loin dans sa compréhension de la physique, mais il ne pourra pas s'empêcher d'utiliser l'information, son seul outil vraisemblable de compréhension

³² Phrase prononcée par le personnage l'Oracle dans le film « Matrix Reloaded »

³³ Voir le codage et récupération d'information génétique dans une chaîne d'ADN, tout processus biologique, les phénomènes qui régissent la machine climatique terrestre, les processus neuronaux, etc. etc. etc. etc.....

1.6 L'ESPACE DE L'INFORMATION PHYSIQUE

1.6.1 ORDINATEURS QUANTIQUES

Dans ce qu'on appelle aujourd'hui ordinateurs quantiques on code l'information sur les « *qubits* », rien d'autre que les nombres quantiques qui caractérisent l'état d'une particule ou d'un système quantique. Cela semble au début intéressant car on miniaturise au maximum l'ordinateur, on est capable de réaliser des algorithmes spéciaux³⁴ tout en jouant sur les dynamiques propres aux systèmes quantiques, on utilise une structure de calcul naturellement parallèle, etc. En revanche, on trouve des problèmes soit à isoler le processus de calcul par rapport au monde physique qui l'entoure, on l'a déjà vu à propos de l'action de l'environnement sur la dynamique d'un système quantique (clairement le monde est quantique lui-même, il n'existe pas de barrière d'hétérogénéité³⁵), soit à extraire le résultat du calcul –le problème de la mesure, l'observable en mécanique quantique-. Ces deux problèmes sont soignés respectivement grâce à des algorithmes de calcul « robustes » par rapport à toutes les sortes de problèmes de décohérence, dissipation, etc. externes au processus, et grâce à coups d'ingénieuses opérations et manipulations du système de calcul avec les opérateurs de mesure.

D'abord on remarque que l'information, codée sur l'état des qubits, n'est pas totalement gérable car on voit les qubits « expérimentales » qu'on peut obtenir et pas les « qubits théoriques » du processus subjacent, qui sont le vrai siège du traitement d'information. Si on réfléchit aux considérations sur la taille minimale de l'information physique données ci-dessus (l'information minimale saisissable codée dans la physique réside à l'intérieur d'une taille équivalente à \hbar .), tout semble dire que l'information subit un « trauma » lorsqu'on essaie de la toucher. En utilisant une image descriptive, on « touche » l'état, les qubits, au moyen d'une énergie associée, on produit une « coupure » dans l'espace du système en *action* pour extraire une projection sur l'espace des énergies seulement. Mais cette projection n'est pas aseptique car on coupe des « boules » d'actions minimales : on force un déterminisme nécessaire à la compréhension de ce qui se passe dans l'espace d'action et le système réponds avec une indétermination sur la mesure (Heisenberg).

Le résultat d'un calcul dans un ordinateur quantique, l'état ou les états des qubits -ce qu'est « l'information » selon celui qui a fabriqué l'ordinateur- n'est que la *coupure faite à un*

³⁴ Par exemple de cryptographie

³⁵ Plus explicitement : une barrière d' « hétérogénéité » existe par exemple dans les ordinateurs électroniques courants, car la physicalisation du traitement d'information est suffisamment isolé par rapport au contexte (dans un transistor le flux des électrons ne se mélange pas (*trop*))

certain temps de cet espace de phase en action. On coupe des informations d'une façon ou d'une autre, il y a quelque chose que l'on ne va pas comprendre ou perdre : peut-être un calcul fait par l'ordinateur, peut-être une partie de la structure fonctionnelle de l'ordinateur. Si cette perte n'est pas fonctionnelle au calcul, ce n'est pas grave : la tâche des « ingénieuses opérations et manipulations du système de calcul avec les opérateurs de mesure » c'est justement cela. On pourra poursuivre cet aspect lors du travail de thèse, par exemple à partir d'un texte comment le [20]

1.6.2 CAPACITE COMPUTATIONELLE DE L'UNIVERS

Une image assez forte et fertile d'idées réside dans le fait de voir la Nature comme un géant ordinateur quantique. Le physicien Seth Lloyd a calculé la capacité computationnelle de l'Univers depuis le Big Bang entendu comme un géant ordinateur quantique³⁶ [21]. Il ne s'est pas posé de questions spécifiques : si l'Univers a calculé une galaxie, une étoile, une planète, un processus neuronal d'un organisme vivant, la page d'un bouquin avec l'explication de l'entropie d'information selon Shannon et l'exemple d'une séquence aléatoire de caractères alphanumériques, etc. C'est à dire : il n'a pas considéré l'information mutuelle -les informations mutuelles- sous lesquelles on peut interpréter un calcul ou un autre. Il a juste calculé la quantité d'information quantique brute que l'Univers s'ait échangée grâce aux processus quantiques qui donnent l'existence à sa masse et à ses transformations³⁷. Ce n'est pas un calcul difficile si on connaît la masse de l'Univers et l'âge de l'Univers.

L'image forte réside dans le fait que tous les traitements d'informations qu'on peut s'amuser à trouver, sont fait à la dépense de ces calculs quantiques là.

1.6.3 SOFTWARE QUANTIQUE ≡ HARDWARE QUANTIQUE

On peut voir un processus de calcul quantique (c'est à dire l'évolution dynamique d'un système quantique) soit comme un logiciel qui tourne dans « une machine » contextuelle, soit comme un objet qui est là et qui fait sa vie (une macromolécule, un stylo, le soleil, etc.) et dans ce cas là, le « logiciel » n'est rien d'autre qu'un logiciel auto stable (une

avec la structure du transistor). Si je joue à *briscola* (jeu aux cartes typique italien) et je mets mes cartes sur une table déjà pleine des cartes partout, l'information n'est pas isolée par rapport au contexte, la barrière d'hétérogénéité n'existe plus.

³⁶ "All physical systems register and process information. The laws of physics determine the amount of information that a physical system can register (number of bits) and the number of elementary logic operations that a system can perform (number of ops). The Universe is a physical system. The amount of information that the Universe can register and the number of elementary operations that it can have performed over its history are calculated. The Universe can have performed 10^{120} ops on 10^{90} bits (10^{120} bits including gravitational degrees of freedom) " (Abstract de [21])

³⁷ Masse et énergie sont équivalentes selon la fameuse relation $E=mc^2$

dynamique stable) et autonome d'un point de vue énergétique. Donc on peut voir le soleil comme un logiciel quantique, on peut penser les « objets » comme des processus quantiques qui ont une stabilité de forme, des propriétés que nous, humains, arrivons à reconnaître. « Programmer » en « Quantum OS »³⁸ signifie créer aussi des objets.

1.7 CONCLUSION

Cela mène cette digression sur les ordinateurs quantiques et la physique vers le bout : la distinction entre les processus, les processus contextuels et les objets qui réalisent les calculs est un fait qu'on ne peut plus imposer de l'extérieur, mais un fait à jouer totalement sur le champ de la dynamique du traitement de l'information quantique. Donc le processus à mesurer comme l'instrument de mesure sont deux entités qui ont leur individualité grâce à la dynamique que l'on sera capable d'instaurer (ou de faire avec).

Sujet et objet sont isolés ou mélangés dynamiquement lorsqu'ils coexistent dans un même espace d'information.

³⁸ Portabilité totale sur tout type de plate-forme sauf Relativité Générale, compatibilité totale avec tous les autres systèmes opératifs existants

2 L'instrument sur la Dynamical Hypothesis

2.0.1 RESUME

On va esquisser une transposition des thématiques de la mesure sur la DH. Face à la nécessité de simuler des processus pour mieux comprendre les enjeux de la transposition, on examine les algorithmes qu'on utilise pour simuler la dynamique des réseaux de neurones. L'analogie avec la mesure amène à individualiser dans l'espace de phase du réseau neuronale le terrain sur lequel la ségrégation/mélange des processus sujet/objet est joué, en utilisant pour la transposition le concept d'overlap de processus.

2.1 UNE DESCRIPTION INFORMELLE

2.1.1 VOIR EN CODE

On présente ici une description « vivant » des parties mises en jeu dans un processus de mesure, ayant pour but de rapprocher le problème traité jusqu'ici à l'expérience subjective. En d'autres termes, on cherche à sensibiliser le lecteur à un parcours introspectif, à chercher pas seulement « sur les formules » mais aussi dans soi-même les liens et les poignées « qu'on tire » à chaque instant de son existence cognitive. Ce travail d'approche au problème cognitive des « deux cotes » (substrat implémentatif et niveau subjectif) est à la base de la psychologie cognitive (entre autres) et était aussi à l'origine des travaux Gestaltistes; ici on essaie de rapprocher les bornes des côtés en ayant très clairement à l'esprit un point d'arrivée: lorsque les bornes des côtés vont se toucher, on va « voir en code »³⁹

³⁹ Encore une fois une citation du film « Matrix ».

Un petit essai de cette « technique », on peut déjà la faire selon par exemple l'expérience suivante. On ferme les yeux et on va voir des taches bruissantes qu'on considère être la contrepartie « visuelle » des processus résiduelles neuronales du cortex visuel (niveau du substrat implémentatif). Après on va ouvrir un seul œil et on va essayer de repérer sur l'image externe la superposition des taches bruissantes, qui vont être cette fois celles de l'œil fermé (le cortex visuel de l'œil fermé n'a pas de stimulation visuelle explicite, sauf les interactions du à la vision binoculaire) et celles de l'œil ouvert (les processus résiduels de l'œil ouvert sont toujours là!). Enfin on ouvre les deux yeux et on essaye de ne pas perdre « l'accrochement » aux taches bruissantes et en même temps de voir le monde externe. L'exercice n'est pas facile du tout et demande beaucoup de concentration. Lorsqu'on perd l'accrochement, on peut renfermer un œil ou les deux et recommencer. On peut penser aux taches bruissantes comme à une sorte de « grain » qui est posé entre le monde externe et les processus mentales les plus profonds (comme la reconnaissance des objets dans l'image). Ce grain est posé sur le cortex visuel primaire : lorsqu'on le voit, on voit un processus interne à soi-même superposé à la perception du monde externe, on voit en code.

On va pénétrer le « code » plus profond lorsqu'on réussira – par exemple- à « voir » les objets, présentes dans le champ visuel, au niveau des associations (ou d'autres processus cognitifs) que le cerveau est en train d'activer au regard. Cela peut donner l'idée d'une plaisanterie au moment, mais à fur et à mesure qu'on comprend les fonctionnements internes, on est capable de les retracer dans l'expérience subjective.

Lorsqu'on a compris quoi doit chercher, on va le trouver : cela, d'ailleurs, se passe déjà au propos de l'expérience qu'on vient de proposer sur l'activité de la cortex visuelle primaire.

2.1.2 DESCRIPTION⁴⁰

Une mesure comporte un phénomène à mesurer, un processus de mesure, une entité ou système qui donne un sens à la mesure. Le système doit être suffisamment fort pour se rendre compte de ce qu'il veut mesurer, il doit trouver quelque chose à mesurer. Une sorte de *séparation cognitive* en soi-même doit lui permettre de ne pas se mélanger avec la mesure qu'il est en train de faire, de ne pas mélanger la mesure avec le processus, l'évidence « externe » qu'il est en train de considérer. La mesure est une propriété de caractérisation du processus par le système, elle n'est pas le processus, elle n'est pas le système de mesure. La mesure rend compte de l'efficacité d'une sorte d'interface de compréhension entre le système qui effectue la mesure et le phénomène. La forme que cette interface va prendre -après plusieurs mesures peut-être, et sur plusieurs types de mesures divers- va sortir la caractérisation du phénomène selon le système, qui va lui permettre de comprendre d'une façon ou d'une autre le phénomène. La « forme de compréhension » est régie par les mesures. Ce sont les mesures qui tiennent la forme « en pied ». La « forme de compréhension » est construite à partir des mesures, des évaluations, des évidences « expérimentales ». Elle est la squelette où les mesures sont « collées » à la métrique (ou plusieurs métriques) représentationnelle, plus ou moins explicites, conçues par le système-entité de mesure. Typiquement le phénomène est d'une forme grossière déjà individué dans le système qu'effectue la mesure, il y a déjà des évaluations faites sur quelques mesures grossières ici et là qui permettent d'individuer, d'une façon ou d'une autre, que « là-bas » il y a quelque chose à mieux saisir.

La mesure n'a aucun sens s'il n'existe pas une distinction palpable entre phénomène et système de mesure. Plus précisément et objectivement : si d'un point de vue de l'information, on n'est pas capable de mettre une frontière entre les deux entités. Plus précisément et subjectivement (du point de vue du système de mesure) : si la métrique où il faut coller les mesures n'est pas claire, cela engendre une non-compréhension de la forme, la forme n'est plus une forme, même grossière, mais est un objet indéfini, un objet qui se mélange avec les processus de compréhension internes, un objet qui met en discussion les métriques internes, qui a une sorte de « *pouvoir* » de modification des processus internes et donc du système même. Fonctionnellement, l'objet/phénomène se mélange avec le système de mesure.

⁴⁰ On utilise ici souvent des termes ayant des significats très profonds et discutés. Le ton du discours est informel et donc il faut comprendre ces termes au sens large.

Le processus de mesure est une façon scientifique/cognitive de voir les interactions possibles entre le système de mesure et le phénomène.

2.1.3 APPROCHE ECOLOGIQUE ET SPECTRE D'ENERGIE

La forme métrisé⁴¹ que le phénomène va prendre dans le système de mesure est une thématique très proche de l'approche écologique en sciences cognitives et de ses dérivations. On peut trouver des idées sur ce que Stoffregen et Bardy appellent « spectre d'énergie » et « global array » dans l'article [22], mais on ne va pas approfondir la question ici.

2.1.4 EXTERIORITE DU PHENOMENE

Noter qu'il n'y a aucune raison de postuler que le phénomène soit « externe » au système de mesure au sens physique. On doit plus génériquement supposer que le phénomène est externe au système de mesure au sens du traitement de l'information. C'est une condition fonctionnelle. Notez que la frontière posée ne doit pas être nécessairement nette. Au fait, l'étude de la frontière devient une des thématiques q'on pourrait approfondir dans le travail de thèse.

2.2 L'ESPACE DE L'INFORMATION COGNITIVE DE CIM

Suivant les conclusions données au §1.7, il ne reste qu'a repérer l'équivalence de l'espace de l'information physique dans le cas cognitive. Cet environnement doit présenter un traitement d'information le plus général possible: on a donc choisi l'ensemble du système nerveux périphérique et centrale de l'être cognitive en examen (dans le cas du projet CIM l'être coïncide avec nous), où on considère que l'échange d'information est donné par l'ensemble des mécanismes neurodynamiques du réseau neuronal: on doit donc trouver le bon bout du fil des thématiques de complexité et d'information dans la structure du traitement d'information neurodynamique. Cette dernière tâche va être beaucoup plus simple si l'on regarde le problème de l'autre côté: au fur et à mesure que l'on clarifie des mécanismes neurodynamiques, on va les traduire dans des évidences « de surface » cognitives qu'ils induisent, et donc constamment re-écrire les notes détaillées des thématiques en géométrie de l'information et en complexité épistémique selon cette nouvelle « base ».

On transpose donc toutes les idées du chapitre 1 sur l'espace de phase d'un réseau neuronal humain. En clair pour la suite, on n'est pas en train d'adresser la pertinence des

⁴¹ à comprendre au sens de la métrique

mécanismes quantiques explicites pour expliquer les mécanismes de la conscience humaine, mais seulement transposer des idées sur la modélisation dynamique.⁴²

2.3 RAPPELS DE RESEAUX DE NEURONES FORMELS⁴³

2.3.1 ELEMENTS FONDAMENTAUX

On considère un réseau de N neurones formels comme la donnée de :

- Un vecteur d'état $\mathbf{s} \in \text{SGN}^N$ où chaque coordonnée s_i a valeurs dans $\text{SGN} = \{-1, 1\}$ qui représente l'état {inactive, active} de chaque neurone
- Une matrice des poids synaptiques $\mathbf{J} \in \mathbb{R}^N \times \mathbb{R}^N$ où chaque terme J_{ij} représente l'efficacité de la connexion synaptique du neurone j vers le neurone i , $J_{ii} = 0$. La matrice \mathbf{J} est une matrice quelconque⁴⁴
- Un vecteur de biais (ou de seuil d'activation) $\mathbf{b} \in \mathbb{R}^N$ où chaque coordonnée représente le seuil d'activation de chaque neurone en unités arbitraires
- Une équation dynamique locale (sur chaque neurone) à temps discrétisé

$$(2.1) \quad s_i(t+1) = \sigma \left(\sum_j J_{ij}(t) s_j(t) - b_i(t) \right)$$

où σ est une fonction non linéaire $\sigma : \mathbb{R} \rightarrow \text{SGN}$ qui dépend du degré de déterminisme que l'on suppose ($\sigma(x) = \text{sgn}(x)$ dans le cas déterministe, et dans tout les autres cas, σ est une fonction monotone croissante).

$$(2.2) \quad h_i(t) = \sum_j J_{ij}(t) s_j(t) \text{ le « champ local » en unités arbitraires}$$

En réalité, un neurone émet un « spike » ou « potentiel d'action » pour une durée temporelle de t_s ($\cong 1$ ms), lorsque s_i devient active à la suite des conditions sur son champ local, $h_i(t)$, et seuil d'activation, $b_i(t)$. L'équation (2.1) ne tient pas compte (explicitement) d'un effet qu'on vérifie expérimentalement: lorsqu'un neurone émet un spike, il tombe tout de suite dans un état réfractaire (inactif) et a besoin d'un certain temps (de l'ordre de quelque t_s) pour rétablir les conditions dynamiques de son fonctionnement. Dans (2.1) on considère le fait que le neurone transmette tout le temps son état d'activité lorsque les conditions sont vérifiées à chaque pas de la dynamique: chaque pas est donc considéré comme la durée temporelle nécessaire à rétablir le neurone. On pourrait coder l'activité neuronale sur la fréquence

⁴² Lorsqu'on s'intéresse par contre aux enjeux que le substrat quantique physique du cerveau et de l'environnement peut avoir avec les mécanismes de la conscience, on pourra par exemple suivre le débat à partir des affirmations du physicien R. Penrose ou consulter un article en contrepartie comment le [23]

⁴³ On intègre/utilise ici la référence [24]

⁴⁴ On ne fait pas d'hypothèses d'un réseau totalement connexe

d'activation plutôt que sur l'activité instantanée et ils existent des formes des modélisations dans telle sens, q'on ne va pas considérer ici.

Par analogie avec les modèles de verres de spin de la physique statistique, on appelle
 (2.3) $E(t) = -1/2 \sum_{i,j} J_{ij}(t) s_i(t) s_j(t)$ l' « énergie » du réseau en unités arbitraires⁴⁵

Lorsqu'on laisse évoluer le réseau sur la donnée d'un état initiale $\mathbf{s}(t=0)$ et d'une dynamique globale discrète - selon certaines suppositions sur le synchronisme/asynchronisme de (2.1) sur le réseau global, puis selon le degré de déterminisme de (2.1) et les règles de modification sur \mathbf{J} et \mathbf{b} que l'on verra dans la suite – on observe un comportement typique des systèmes chaotiques : qui peuvent spécifiquement contenir des états limites où la dynamique devient stable, appelés attracteurs de la dynamique.

L'équation (2.1) est considérée comme une « bonne » modélisation de la dynamique d'un neurone biologique. Sans considérer d'autres comportements collectifs qu'on observe dans les réseaux de neurones biologiques⁴⁶, il est d'usage commun de considérer les attracteurs du réseau formel comme des états où le réseau biologique forme un percept ou concept bien déterminé.

Sous des conditions spécifiques simplificatrices (\mathbf{J} est une matrice symétrique, réseau entièrement connexe = Modèle de Hopfield) on vérifie qu'on peut fixer les états limites $\mathbf{s}(t=\infty)$ sur certaines configurations $\xi^{(\mu)}$, $\mu \in \{1, 2, \dots, p < N\}$ si l'on charge \mathbf{J} selon l'équation

$$(2.4) \quad J_{ij} = 1/N \sum_{\mu=1..p} \xi_i^{(\mu)} \xi_j^{(\mu)}$$

On appelle « **patterns** » les $\xi^{(\mu)}$. Il existe une relation qui donne une limite de « saturation » sur le nombre p de patterns que l'on peut coder sur une \mathbf{J} , que l'on trouve au moyen d'argumentations de physique statistique. Cela dépend des conditions à satisfaire sur la convergence des états limites et de la dynamique que l'on suppose (voir suite). D'ailleurs, on ne va pas s'intéresser ici à la problématique des états spurious.

2.3.2 NOTION D'OVERLAP

On appelle « **overlap** » une mesure de distance (ou presque) entre deux états

$$(2.5) \quad m^{(q,r)} = 1/N \sum_i s_i^{(q)} s_i^{(r)}; \quad m^{(q,r)} : \text{SGN}^N \times \text{SGN}^N \rightarrow [-1,1]$$

$m^{(q,r)} = 1$ si $\mathbf{s}^{(q)} = \mathbf{s}^{(r)}$; $m^{(q,r)} = -1$ si $\mathbf{s}^{(q)} = -\mathbf{s}^{(r)}$; $m^{(q,r)} = 0$ si $\mathbf{s}^{(q)}$ est complètement décorrélé par rapport à $\mathbf{s}^{(r)}$. Avec peu de modifications on obtient une distance formelle.

⁴⁵ Ceci est en réalité l'expression pour un réseau totalement connexe et avec une matrice \mathbf{J} symétrique : on reporte ici l'expression juste pour laisser entendre qu'il est possible définir une énergie q'on associe à chaque configuration, au moyen de la quelle énergie on est capable d'effectuer un traitement en termes statistiques de la dynamique.

⁴⁶ Oscillations synchrones des champs de sous-ensembles de neurones, etc.

En première interprétation, ceci donne une « distance » entre l'état du réseau $\mathbf{s}(t)$ et un certain état $\xi^{(\mu)}$ qui peut être, par exemple, l'attracteur (le pattern) qu'on souhaite rejoindre

$$(2.6) \quad m^{(\mu)}(t) = 1/N \sum_i \xi_i^{(\mu)} s_i(t)$$

et donc on pourrait adresser avec ceci un critère de convergence de l'état du réseau sur l'état $\xi^{(\mu)}$.

2.3.3 OVERLAP DE PROCESSUS/PARALLELISME

Plus intéressant: on remarque que lorsque la dynamique est stabilisée sur un attracteur $\xi^{(\mu)}$, elle est en fait en train de coder le *processus* donné par la suite des termes constants $\xi^{(\mu)}(t) = \xi^{(\mu)}(t+1) = \xi^{(\mu)}(t+2)$ etc..., c'est à dire un processus $\Xi^{(\mu)}$ (qu'on peut penser ici comme une suite, $\Xi^{(\mu)} = \{\xi^{(\mu)}(t)\}_{t=1\dots}$) indépendant par rapport au temps. Rien n'empêche donc de considérer, en effet, la séquence $\mathbf{s}(t)$, $\mathbf{s}(t+1)$, $\mathbf{s}(t+2)$, etc. comme un seul processus \mathbf{T} ($\mathbf{T} = \{\mathbf{s}(t)\}_{t=1\dots}$) gérant en *parallèle* les processus $\Xi^{(\mu)}$ pour tous les μ ,

$$(2.7) \quad \mathbf{T}(t) = F(\{\Xi^{(\mu)}\}_{\mu=1..p})$$

où F est une composition de processus qui n'ont aucune besoin d'être définie: elle est le résultat de la dynamique du réseau.

Donc on peut considérer que le vecteur $\mathbf{m}(t)$ –s'agissant du $m^{(\mu)}(t)$ de l'équation (2.6) pour tous les μ – donne une sorte de recouvrement de l'activité de chaque pattern⁴⁷: très grossièrement, le degré d'activité de chaque pattern/processus présente dans l'activité.

L'étape suivante est de considérer codés dans $\mathbf{s}(t)$, $\mathbf{s}(t+1)$, $\mathbf{s}(t+2)$, etc. non pas des processus constants mais des processus quelconques $\Xi^{(\mu)}(t) = \{\xi^{(\mu)}(t)\}_{t=1\dots}$, donc:

$$(2.7a) \quad \mathbf{T}(t) = F(\{\Xi^{(\mu)}(t)\}_{\mu=1..p})$$

Cela signifie enfin que l'activité globale du réseau est en train de gérer divers processus en parallèle, et cela n'implique aucune partition explicite sur le niveau physique en train de gérer le processus : les processus coexistent au même temps sur le même substrat physique. La contextualisation de cette forme de parallélisme sur l'état de l'art actuel en modélisation dynamique des processus neuronales deviens une autre thématique à développer pendant le travail de thèse.

C'est sur cette forme de parallélisme q'on va baser des correspondances possibles avec la modélisation des processus quantiques.

⁴⁷ on peut formaliser en effet un recouvrement au sens du recouvrement des systèmes dynamiques

2.4 DYNAMIQUE

Un réseau neuronal biologique est régi par une dynamique essentiellement asynchrone, où chaque neurone est actif ou inactif à la suite de conditions sur son champ locale, $h_i(t)$, et seuil d'activation, $b_i(t)$.

Quand on doit comprendre le problème de la dynamique globale d'un réseau ou quand on a besoin d'effectuer des simulations pour valider des effets, il est nécessaire de comprendre les effets globaux de la dynamique locale définie dans (2.1). On remarque que l'équation (2.1) est déjà sous une forme discrétisée et non différentielle, lorsque la formulation originale est analytique. L'étude discrétisée des formes différentielles en régimes chaotiques engendre des différences notables de comportement par rapport à la même forme analytique, jusqu'à poser de sérieux doutes sur la validité d'une telle approche (voir -une pour toutes- le comportement de l'équation logistique lorsque on l'exprime en forme analytique ou discrétisée). La détermination des limites sous lesquelles une discrétisation est acceptable va au-delà des considérations de ce mémoire, mais on soulève quand même le problème, ici.

Ceci étant, on attaque typiquement le problème d'une dynamique discrétisée d'un réseau neuronal en considérant respectivement une dynamique synchrone, asynchrone à séquence ordonnée, asynchrone à séquence aléatoire.

2.4.1 DYNAMIQUE SYNCHRONE, ASYNCHRONE A SEQUENCE ORDONNE ET RANDOM⁴⁸

On approche le problème dynamique en termes probabilistes, en considérant la probabilité de transition d'un état quelconque j vers un autre i . Pour cela on a besoin, avant tout, de traiter la dynamique d'un neurone i , définie dans (2.1), en termes probabilistes (probabilité de $s_i(t+1)$ d'avoir chaque valeur dans SGN). Ceci est fait au moyen de considérations de physique statistique, on trouve que

$$(2.8) \quad \Pr(s_i) = 1/2 (1 + \tanh(\beta h_i s_i)), \quad s_i \text{ prend ses valeurs dans } \text{SGN} = \{-1, 1\}$$

où β est reliée à la distribution du bruit synaptique et d'autres paramètres concernant le caractère aléatoire de la transmission d'information dans le réseau, $\beta^{-1} =$ « Température » du réseau, en analogie avec le modèle d'Ising sur les systèmes de spin en physique statistique. La fonction \tanh est un synonyme de la fonction σ utilisée avant.

On pose donc la différence entre dynamique synchrone ou asynchrone⁴⁹:

⁴⁸ On suit ici [24] pp 65-75

⁴⁹ Ce que suit est une traduction presque littéraire de [24], notation presque incluse

Synchrone: On considère que, à un pas de la dynamique, tous les neurones font évoluer leur dynamique selon les conditions relatives au pas antérieur. Donc la probabilité de transition d'un état J ⁵⁰ (spécifiée pour la donnée de $s^J(t-1)$) à l'état I (donnée par $s^I(t)$) est le produit des probabilités des transitions de l'état de chaque neurone de l'instant $t-1$ à l'instant t selon l'équation (2.8)⁵¹. On peut donc construire une gigantesque matrice stochastique \mathbf{W} dont les coefficients sont définis par :

$$(2.9) \quad \mathbf{W} (I | J) = \prod_{i=1..N} \text{Pr}(s_i)$$

Chaque coefficient donne la probabilité de transition de l'état I à J . \mathbf{W} (\mathbf{W}_{syn} dans ce cas) possède dimensions $2^N \times 2^N$ ($2 = \text{card}(\text{SGN})$): cette fois, l'évolution dynamique du système est produit en laissant agir \mathbf{W} sur un vecteur A des configurations de dimension 2^N , un vecteur ayant une seule coordonnée $\neq 0$, celle que repère arbitrairement la disposition spécifique des coordonnées s_i de l'état s à un temps donnée. *Nota bene* : si on ne suppose pas un déterminisme absolu à imposer à la fin de chaque pas de la dynamique, on peut penser que le vecteur A est au fait une superposition pondérée et normalisée des vecteurs de tous les configuration possibles. Ceci rapprocherait la tractation au cas du vecteur d'état quantique.

Asynchrone: On considère d'effectuer un pas de dynamique discrète d'une durée temporelle nominale $\delta t = 1/N$ en examinant la dynamique d'un seul neurone i , donc on change le vecteur d'état d'un seul élément au maximum à chaque pas δt . On construit donc le terme $\mathbf{W} (I | J)$ selon les règles suivantes:

- Si $s^I \neq s^J$ pour plus d'un $s_i \rightarrow \mathbf{W} (I | J) = 0$
- Si non, $\rightarrow (2.10) \quad \mathbf{W} (I | J) = \text{Pr}(i \rightarrow k) \text{Pr}(s_i)$, où $\text{Pr}(i \rightarrow k)$ est la probabilité que le neurone k (qui va être mise à jour) suit le dernier neurone i (que vient d'être mise à jour sur J), et $\text{Pr}(s_i)$ est la (2.8)

On doit donner la règle pour choisir le neurone à chaque pas δt : Asynchrone **random** lorsqu'on établit une séquence random de mise à jour de tous les neurones du réseau à chaque « grand pas » de la dynamique, asynchrone **ordonne** lorsque la liste est fixe. La matrice du grand pas est le produit des matrices des pas δt .

La matrice \mathbf{W}_{syn} est composée de toutes ses lignes pleines, chaque ligne s'occupe de la probabilité d'un état J de passer à tous les autres états. La matrice \mathbf{W}_{asyr} asynchrone random résultant est composé de lignes ayant au plus $N+1$ termes $\neq 0$ (toutes les probabilités

⁵⁰ Attention, on utilise ici les lettres majuscules I, J pour donner un état dans l'espace des configurations des vecteurs d'état, ayant dimension 2^N ($2 = \text{card}(\text{SGN})$)

⁵¹ Cela considère donc chaque événement de transition au temps t rigoureusement indépendant des autres une fois par toutes

de transition à partir d'un état J sur un état I ayant changé au maximum l'état d'un seul neurone, plus la probabilité de rester dans le même état (terme diagonale)). La matrice **Wasyo** asynchrone ordonnée résultante est composée de lignes ayant au plus 2 termes $\neq 0$ (la seule probabilité possible de transition vers un certain état, plus la probabilité de rester dans le même état (terme diagonale)).

Donc, à chaque grand pas de la dynamique, le vecteur d'état évolue génériquement selon des probabilités données pour critères sur l'énergie qui sont implicites dans (2.8), notablement on vérifie que la dynamique privilégie des configurations qui minimisent l'énergie. Si l'on regarde l'évolution sur les vertex d'un hypercube de dimension N, on va observer que le vecteur d'état :

- si **Wsyn**, peut aller n'importe où
- si **Wasyr**, à chaque pas δt il va rejoindre un parmi les N vertex adjacents au vertex où il se trouve.
- si **Wasyo**, à chaque pas δt il est obligé de rejoindre un seul des N vertex adjacents au vertex où il se trouve.

Tout cela tient à dire que l'analyse des choix qu'on fait au niveau de la modélisation est fondamentale pas seulement pour la détermination des états limites, mais pour la détermination de la dynamique à chaque pas, ce qui devient intéressant lorsqu'on s'intéresse à clarifier les mécanismes d'interaction entre processus qu'on suppose avoir lieu à l'intérieur de la dynamique globale.

2.5 CORRESPONDANCES DE L'ANALOGIE

2.5.1 CONSIDERATION SUR LES DYNAMIQUES SYNCHRONES

La prise en compte de la dynamique quantique comment un processus tout simplement stochastique est très fortement discutée dans le débat contemporain, mais quand même on retient intéressante la considération suivante.

Si l'on considère les matrices stochastiques **Wsyn**, **Wasyr**, **Wasyo** données au 2.4.1 par analogie avec la matrice de densité ρ^{\wedge} donnée au 1.4.3, il ne peut pas échapper une différence fondamentale : dans le cas de la dynamique neuronale asynchrone on pénètre du fait à l'intérieur des règles de causalités et effet de chaque pas dynamique (lorsque on donne un critère sur les mises à jour *possibles* des états). Dans le cas synchrone, on ne pose pas de distinctions et on laisse la dynamique « d'environnement » agir comment mieux elle croit, et

du même on fait dans le cas quantique. Du fait donc, la dynamique qu'on suppose dans le cas quantique est une dynamique synchrone. Le fait que dans le cas neuronal on est capable quand même de se poser la question sur le type de dynamique à utiliser mérite plus d'attention : fondamentalement ceci est possible car on est capable d'étudier macroscopiquement l'entité et les mécanismes qui donnent naissance à la transmission d'information neuronale et donc, enfin, à gérer la dynamique des états. Dans le cas quantique ceci n'est pas possible: on est justement à l'intérieur de ce qu'on a appelé h_{COG} dans le 1.5.2.

Il devient donc intéressant d'étudier les correspondances qu'on peut tirer entre le cas quantique et le cas d'une dynamique *synchrone* neuronale. Ceci devient un des points d'interface entre les deux domaines qu'on résumera dans le paragraphe conclusif 2.6.

2.5.2 SYSTEMES, APPAREILS DE MESURE ET ENVIRONNEMENT DANS **WSYN**, **WASYR**, **WASYO**

Voici une deuxième correspondance de l'analogie entre le problème de la mesure quantique et la dynamique d'un réseau neuronale qu'on essayera de valider:

Du fait, la matrice de densité d'un système quantique globale permet de voir l'action des sous systèmes entre eux : on peut avoir appareil de mesure et phénomène à mesurer, sous systèmes en interaction entre eux, processus de mesure en concurrence sur un certain sous système ou même entre eux...

Donc, une des matrices **Wsyn**, **Wasyr**, **Wasyo** représentent enfin dans le cas cognitif ce qu'est la matrice de densité pour un système quantique globale, et il devient intéressant de tracer à l'intérieur des **Wsyn**, **Wasyr**, **Wasyo** des enjeux similaires au cas quantique. C'est clair que les divers processus qu'on a appelé $\Xi^{(\mu)}(t)$ au 2.3.3 sont les candidats à prendre le rôle des processus qu'on appellera $\Omega^{(\mu)}(t)$ - pour mettre en évidence qu'on doit passer d'une notation en termes de dimensions SGN^N à $2^{\wedge}SGN^N$ - qu'on considère ici en correspondance avec les divers systèmes/processus processus quantiques. C'est ici qu'on va trouver –peut-être– les intrications entre processus « sujet » et « objet » qu'on adresse dans le titre de ce travail. Ou –peut-être– trouvera-t-on plusieurs sujets en concurrence, ceci représentant le cas d'une plurivalente interprétation d'une certaine « objet » ou « percept ».

2.5.3 INFORMATION/MESURE D'INFORMATION

Troisième correspondance : dans le cas quantique on aborde en littérature le problème de l'information transmissible entre appareil de mesure et phénomène (ou entre des processus quantiques quelconques), par exemple dans [18]. On peut voir des enjeux similaires sur la transmission de l'information entre les processus $\Omega^{(\mu)}(t)$ du cas neuronal. Au fait, c'est

exactement cela la mesure d'information la plus générale qu'on peut mettre lorsque l'on s'intéresse à la transmission et à l'interprétation de l'information dans le cas d'un système cognitive basé sur un réseau neuronale.

On note ici un fait très intéressant: dans [25] on adresse les problèmes liés à la mesure en cosmologie quantique et on pose justement la considération que dans le cas de l'Univers il n'existe pas un observateur externe: on ne peut pas considérer un système à mesurer *et* un appareil de mesure (pour ne pas parler de l'environnement), tout doit être joué à l'intérieur; dans [26] on se pose la question si on a vraiment besoin des observables comment des postulats ou on peut modéliser la mesure comment une interaction tout simplement (considération d'ailleurs retraceable dans [17]). On pourrait intégrer ici les deux considérations dans le cas d'une *cosmologie cognitive* –qu'on est en fait en train d'adresser ici–, où l'Univers n'est rien d'autre qu'une des matrices **Wsyn**, **Wasyr**, **Wasyo**. Donc la question est la suivante : « On a besoin de modéliser les $\Omega^{(u)}(t)$ comme des processus de mesure, ou il suffit tout simplement de les considérer des processus quelconques interagissant entre eux ? »⁵²

Une autre considération sur la taille de « l'Univers cognitif » se pose lorsqu'on considère la dynamique couplée de deux ou plusieurs êtres cognitifs: on devra évaluer si on peut en effet déterminer un couplage au niveau des **Wsyn**, **Wasyr**, **Wasyo** respectives lorsque il existe une barrière (q'on a appelé d'heterogeneité avant) représentée par les interfaces de communication d'information (quelle elle soit) qu'on peut construire entre les entités. Un couplage existe certainement, mais il devient intéressant – par exemple- saisir les temps caractéristiques d'action de cet couplage par rapport à la dynamique interne de chaque être, et déterminer les types d'influences qu'il peut engendrer. Rien n'empêche de considérer des couplages entre un être et l'environnement en générale, ou une machine, ou une entité pas nécessairement cognitive dans le sens qu'on l'entend typiquement^{53, 54}.

2.5.4 COMPOSITION DE **J** ET PASSAGE AUX **WSYN**, **WASYR**, **WASYO**

Il est *fondamental* donner à ce point un lien entre une analyse en termes des configurations « abstraites » des états du réseau neuronal - gères par les **Wsyn**, **Wasyr**, **Wasyo** donnés au 2.4.1 - et le substrat physique du réseau, que donne origine à cette

⁵² Quand même, ce serait intéressant rechercher le correspondant d'un trou noir en cosmologie cognitive.

⁵³ Ou même entre des entités pas nécessairement cognitives les deux... ou enfin une entité toute seule, plus ou moins globale.

⁵⁴ A ce propos on pourra demander à l'auteur de ce mémoire le texte « Fast Interfaces et le Aerodynamic Smart Skin System » (soumission refusée au Colloque des Jeunes Chercheurs 2003, Paris, thématique #3 "Comment l'outil (dé)forme-t-il la main qui l'utilise ?")

dynamique. En d'autres mots, il devient *fundamental* tracer les effets que les évidences physiques du substrat physique neuronale ont sur les **Wsyn, Wasyr, Wasyo**.

Cela permettra de donner un possible encadrage de modélisation (parmi les plusieurs existantes) à toutes les évidences expérimentales q'on détermine par moyen des expériences en MRI sur des sujets exécutants certaines taches, par moyen des études neurodynamiques plus ou moins invasifs, par moyen clairement des études neuroanatomiques sur le système nerveux et par moyen de quant d'autres outils les sciences cognitives ont développé.

On peut considérer la (2.1) dans sa forme matricielle

$$(2.11) \mathbf{s}(t+1) = \sigma(\mathbf{J}(t) \mathbf{s}(t) - \mathbf{b}(t))$$

ou $\sigma : \mathbb{R}^N \rightarrow \text{SGN}^N$ cette fois (n.b. $\sigma = [\sigma(h_1 - b_1), \sigma(h_2 - b_2), \dots \text{etc}]'$)

Donc on doit passer encore une fois d'une représentation au niveau de vecteur d'état à une représentation au niveau de vecteur de configuration, cette fois en mettant plus l'accent sur les influences du substrat physique subjacent. Les (2.8-10) donnent les moyens de conversion d'une notation à l'autre. On va s'intéresser ici à la matrice des **J**, q'on peut penser comment le résultat d'une composition matricielle des **J₁, J₂ ...** ou chaque **J_i** représente les connexions internes d'une aire cerebrale et les termes hors les blocks diagonaux de **J** résultant comment les projections d'une aire sur une autre, et donc s'intéresser par exemple à l'étude des dynamiques plus ou moins jointes résultant dans les **Wsyn, Wasyr, Wasyo**. Peut être on pourrait considérer une matrice **Wsyn** réalisée comment on réalise la matrice de densité d'un mélange statistique des états (1.1a): des **Wsyn₁, Wsyn₂, ...** réalisées à partir des **J₁, J₂ ...**

On peut examiner les rôles des synapses inhibitrices ou excitatrices selon des **J⁻** et **J⁺** et les traduire sur les **Wsyn, Wasyr, Wasyo**. Du même, on peut examiner en forme suffisamment transparent les rôle de **J** lorsque l'on superpose à la dynamique « vite » du réseau une dynamique « d'apprentissage » (selon règles comment la loi de Hebb, etc. ou l'on considère dans la (2.11) un **J(t+1) = J(t) + F s(t)**, **F** une matrice tenant en compte la règle d'apprentissage), etc..

Encore une fois, ce sont des idées q'on devrait encadrer dans l'état de l'art de la modélisation des réseaux neuronales pendant le travail de thèse.



2.6 CONCLUSION

Dans l'hypothèse posée ici que le cerveau est complètement décrit par un réseau dynamique de neurones, l'univers des connaissances objectives et subjectives est le réseau dynamique. Dans cet unique univers la pluralité des processus –soient eux le résultat d'une interface cerveau– monde ou effectivement externes- constitue l'objet aussi bien que le sujet connaissant.

L'autonomie des processus qu'ont lieu à l'intérieur d'un réseau neuronale n'est pas absolue: dans la réalité du cerveau la dynamique neuronale réelle donne les corrélations entre les processus internes et externes et elle est le lieu de formation du processus cognitive. On est donc intéressé à étudier la contribution que des processus distincts donnent à la constitution du processus cognitive globale.

On trouve donc ici l'analogie fondamentale avec l'intrication phénomène/sujet connaissant approprié au processus d'observation en Mécanique Quantique.

Ce travail à essayée de rapprocher les interfaces entre ces deux disciplines et a esquissé des possibles correspondances au niveau de modélisation qu'on devra évaluer :

remarques	Cas Quantique	Cas Neurale
	Espace de phase	Espace de phase
R1	Opérateurs de mesure ou de dynamique	Les $\Omega^{(\mu)}(t)$
	Dynamique de Schrödinger (ou en forme équivalente la $i\hbar(\partial/\partial t)\rho^\wedge = [H^\wedge, \rho^\wedge]$)	La dynamique synchrone sur les $\Omega^{(\mu)}(t)$
R2	Concurrence des processus à l'origine du problème de la mesure	Concurrence entre les processus $\Omega^{(\mu)}(t)$
R3	Indétermination quantique et indétermination statistique	Causes de imprédictibilité ou d'évolution probabiliste
	Indétermination sur les observables	Indétermination cognitive (selon 1.5)
	Transmission de l'information au cours du processus de mesure	Transmission de l'information au cours de l'interaction entre les $\Omega^{(\mu)}(t)$
 Et combien d'autres correspondances on sera capable d'en tirer 		

- R1- Opérateurs et $\Omega^{(\mu)}(t)$: si dans le cas quantique la succession des mesures est le seul phénomène accessible, de même dans le cas neural la dynamique des processus est la seule ontologie cognitive.
- R2- Concurrence des processus : Le résultat de la concurrence des processus au cœur du problème de la mesure quantique trouve sa correspondance sur la concurrence des divers processus $\Omega^{(\mu)}(t)$
- R3- Indétermination/Imprédictibilité : L'analogie est possible car l'approche statistique est efficace dans les deux cas

La validation finale de l'analogie, sa réfutation, les thématiques qu'on tirera du débat, l'éclaircissement exhaustif de ses interfaces sur CIM et sur le débat scientifique contemporain seront l'objet d'un travail suivant de thèse -si possible.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] G. Longo, "Complexité et information morphologiques" (CIM) LIENS, CNRS – École Normale Supérieure, Paris <http://www.di.ens.fr/users/longo/CIM/projet.html>
- [2] J. P. Crutchfield, "Information and its metric" in *Nonlinear Structures in Physical Systems - Pattern Formation, Chaos and Waves* (L. Lam and H. C. Morris, eds.), (New York), p. 119-130, Springer-Verlag, 1990. <http://citeseer.nj.nec.com/crutchfield90information.html>
- [3] Van Gelder, T. (1998) "The dynamical hypothesis in cognitive science" *Behav. Brain Sci.* 21, 615--665 <http://citeseer.nj.nec.com/vangelder97dynamical.html>
- [4] Longo G. "The Constructed Objectivity of Mathematics and the Cognitive Subject" *In* "Quantum Mechanics, Mathematics, Cognition and Action - Proposals in Epistemology." (M. Mugur-Schachter ed.), Kluwer, 2002
- [5] Longo G. "The reasonable effectiveness of Mathematics and its Cognitive roots" To appear in "New Interactions of Mathematics with Natural Sciences" (L. Boi ed.), Springer, 2003
- [6] Longo G. "Space and Time in the foundation of Mathematics, or some challenges in the interaction with other sciences", Invited Lecture at the First American Mathematics Society / SMF meeting, Lyon, July 2001 (to appear)
- [7] F.Bailly, G.Longo. "Objective and Epistemic Complexity in Biology". Invited lecture, International Conference on Theoretical Neurobiology, National Brain Research Centre, New Delhi, INDIA, February , 2003
- [8] B. Edmonds, "Syntactic Measures of Complexity" PhD thesis, University of Manchester, 1999. <http://www.cpm.mmu.ac.uk/~bruce/thesis>
- [9] Barford, "Experimental Measurements: Precision, Error, Truth." Ed. Addison-Wesley

- [10] Cohen-Tannoudji C., Diu B., Laloë F. « Mécanique Quantique », Hermann, Vol 1&2
- [11] R. Feynman “The Feynman Lectures on Physics” vol N.3 “Quantum mechanics”, Addison Wesley
- [12] R. Omnès « Comprendre la mécanique quantique », EDP Sciences, 2000
- [13] F. Tarantelli « Appunti di Chimica Teorica »
<http://king.thch.unipg.it/~franc/ct/node13.html>
- [14] G.L. Beccaria, “Dizionario di linguistica” (Dictionnaire de linguistique), Einaudi, 1996
- [15] F. De Bernardinis “Robert Altman”, L’Unità/Il Castoro, Il Castoro Cinema, Ed. Il Castoro S.r.l., 1995
- [16] Landauer R. “The physical nature of information” Discussion, Physics Letters A, Volume 217, Issues 4-5, 15 July 1996, Pages 188-193.
<http://www.sciencedirect.com/science/article/B6TVM-3VSR078-1/2/d799df66bfee56739463ca23e48d4119>
- [17] von Neumann, J. “Mathematische Grundlagen der Quantentheorie”, Springer, Berlin, 1932; von Neumann, J. “Mathematical foundations of quantum mechanics”, Princeton University Press, 1955, translated from the German edition by R. T. Beyer
- [18] Barndorff-Nielsen O. E, Gill R. D., Jupp P. E. “On Quantum Statistical Inference” (2001)
<http://citeseer.nj.nec.com/446782.html>
- [19] Philipona D., O’Regan K., Nadal J.P. « Is there something out there? Inferring space from sensorimotor dependencies ”, to appear in Neural Computation 2003
- [20] E. Angeleri « Introduzione alla Teoria dell’Informazione Quantistica », Polo Universitario di Crema, Italia. Téléchargeable à partir de
<http://www.crema.unimi.it/Web2.asp?ID=1170&Area=2>

- [21] S. Lloyd, “Computational Capacity of the Universe“, Phys. Rev. Lett. 88, 237901 (2002)
<http://ojps.aip.org/getabs/servlet/GetabsServlet?prog=normal&id=PRLTAO000088000023237901000001&idtype=cvips&gifs=yes&jsessionId=915871054480759531>
- [22] T. A. Stoffregen, B. Bardy “On specification and the senses” Behavioral and Brain Sciences, 2001
- [23] M. Tegmark “The Importance of Quantum Decoherence in Brain Processes”, Phys Rev E July 2 1999, telechargeable à partir de <http://arxiv.org/pdf/quant-ph/9907009>
- [24] D.J. Amit “Modeling Brain Function: the world of attractor neural networks”, Cambridge University Press, 1992
- [25] J. Finkelstein “On the Definition of Decoherence” Phys.Rev. D 47 (1993)
<http://arxiv.org/abs/gr-qc/9301004>
- [26] E. Joos “Elements of Environmental Decoherence” <http://arxiv.org/abs/quant-ph/9908008>

REMERCIEMENTS

J'aimerais bien remercier Prof. Giuseppe Longo pour m'avoir donné confiance et m'avoir laissé développer une thématique d'aussi vaste que la présente, plus consonne à mon esprit et à ma façon de voir les choses, même si souvent désordonné (ou *entangled?*). Je remercie le RISC, Relais d'Information sur les Sciences de la Cognition CNRS UMS 2551, <http://web.ccr.jussieu.fr/~risc/>, son directeur Prof. J. Lorenceau et la secrétaire M.me Nicole Morain pour m'avoir pratiquement hébergé et laissé utiliser les ressources de la salle étudiants H4.02 pendant tout l'année de DEA SciCo, et aussi l'ESPCI pour m'avoir donné un environnement me faisant rappeler la Physique à chaque pas (le RISC est situé dans l'enceinte de l'ESPCI). Je remercie Prof. Luca Peliti et le chercheur Riccardo Mannella pour m'avoir donné des éclaircissements techniques sur des questions de physique. Je remercie Nathalie (Natacha) Radtchenko pour m'avoir donné la bonne impulsion de m'inscrire à ce DEA, sans laquelle je n'aurais pas suivi ce parcours. Je remercie l'environnement du DEA pour les idées et la formation qu'il m'a donné, et mon ami Vincent Spehner pour les discours académiques en *termes informels* que l'on s'est échangé pendant un moment critique de nos travaux. Je remercie mes amis Bastien Guerry et Nil Geisweiller en ce qui concerne la correction de ma forme d'exposition en français qu'on peut séparer (*décohérer*) des concepts traités à l'intérieur, et encore une fois Nil pour les dialogues absolument géniales qu'on avait il y a quelque temps, qui font aussi partie de l'origine de ce travail. Je remercie ma famille pour le soutien qu'elle m'a donné et pour la formation de base que j'ai reçu pendant mon enfance.



*Je suis dans l'eau. Dessous moi, l'abîme : un bleu absolu, totale.
Dizaines et dizaines de mètres de mer, de descente vers des
gouffres inconnus, à l'intérieur des pressions étourdissantes.
Mais tout cela est résumé en un seul mot : bleu. Ce bleu qui
s'écoule sous mes palmes, que je vois déjà embrasser mes
jambes, absorber mon corps, dominer mes pensées. Un bleu qui
enveloppe et cerne tout. Un bleu dans lequel je suis grandi.
Mais aussi un bleu assourdissant, enivrant, puissant. Et aussi :
un bleu inexorable jusqu'à l'agression, à la violence. Un bleu
qui ne pardonne pas : mais pas par banale cruauté ou froid
cynisme : tout simplement car il ne peut pas.
Mon corps est prêt, mon esprit concentré : je vois que le label au
bout de la mer est sur le label d'un nombre. Je ne sais pas de
quel nombre il s'agit, ça n'a pas d'importance ; cela ne change
rien s'il est écrit 108 ou 113..*

Francisco « Pipin » Ferreras

This document was created with Win2PDF available at <http://www.daneprairie.com>.
The unregistered version of Win2PDF is for evaluation or non-commercial use only.