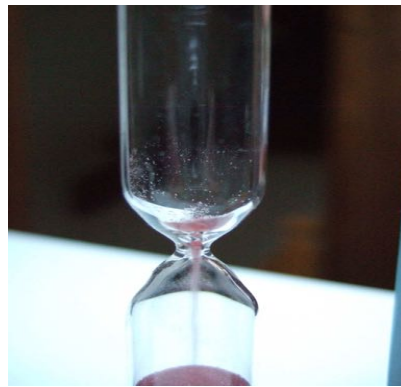


PENSER LE TEMPS

DE LA PHYSIQUE A LA BIOLOGIE

MARC-WILLIAMS DEBONO

Comment penser un temps dont la nature paradoxale, l'origine, la direction sont si controversés par la physique expérimentale ? La dynamique des systèmes non linéaires, en particulier vivants, et la plasticité cérébrale donnent des pistes de recherche sur la nature intrinsèque du temps. Sur le plan biophysique, il correspond à la corrélation entre une horloge et l'évolution d'un système dynamique. Sur le plan psychologique, il est lié à l'émotion qualitative de l'instant. Quant à la réponse, elle est peut-être finalement dans l'homme, à la fois observateur, sujet d'expérience et conscience interactive de l'univers.



LE PARADOXE DU TEMPS

Du clepsydre à l'horloge atomique un pas considérable semble être atteint. Pourtant connaît-on mieux le temps¹ ? La question reste posée à tous les niveaux d'observation. En effet, tandis que la physique spatiale newtonienne laissait peu à peu la place à la relativité spatio-temporelle d'Einstein, la science du vivant demeurait et demeure toujours péremptoire sur un point: l'irréversibilité du temps. De fait, si le second principe de la thermodynamique de Clausius (démontrant la valeur des systèmes à entropie croissante) corréle bien avec l'observation du biologiste et de chacun d'entre nous, un

¹ Le débat ouvert dans cet article est issu des nombreuses interrogations suscitées par les découvertes récentes en physique, en biologie ou en neurosciences sur la notion récurrente et controversée de temporalité. Il interroge en particulier les deux versants naturels associés à cette notion que sont le temps objectif et le temps subjectif d'une part, et le lien paradoxal unissant le temps des atomes au temps des neurones d'autre part. Seront ainsi tour à tour abordés le temps du cerveau et les aspects cognitifs liés à la genèse de notre perception du temps.

paradoxe demeure : c'est la constatation d'une réversibilité temporelle au niveau élémentaire.

Le paradoxe du temps recoupe ainsi l'interrogation du physicien et du biologiste puisqu'il faut passer du déterminisme newtonien où le temps est absolu et le futur prévisible aux équations de la mécanique quantique n'indiquant qu'un futur possible. Est-ce l'évolution du vivant et en particulier le cerveau de l'homme qui aurait introduit la flèche du temps ? C'est peu probable, car la formation de l'univers nous préexistait et s'est construite, sinon dans le temps, au moins avec lui. Est-ce la réduction de l'univers en un point singulier à la base du temps cosmologique (big-bang) qui constitue la première horloge ? On connaît mal la nature exacte du temps des origines², surtout lorsqu'on s'approche de la constante de Planck (10^{-43} sec.). Quant au modèle standard de l'évolution cosmologique, il indique bien un âge et une flèche du temps pour la plupart des spécialistes. Cependant, il pose des problèmes théoriques liés à son caractère déterministe et ne satisfait pas certaines écoles qui réfutent le lien entre l'expansion de l'univers et son devenir, autrement dit la flèche du temps³.

Est-ce enfin la nature du temps qui est purement illusoire comme le suggérerait Einstein ? C'est en tout cas la position de beaucoup de physiciens et ce qui les différencie des biologistes, à savoir que pour les premiers, le temps ou plus précisément son déroulement n'existe pas: il est linéaire et n'a pas de sens, tandis que pour les seconds, l'histoire s'inscrit dans le temps. On ne peut donc répondre clairement à ces questions aujourd'hui, dont certaines présupposent une asymétrie du temps lui-même. Toutefois,

² En dehors du fait qu'il était probablement de nature logarithmique lors des premiers instants de la naissance de l'univers, où on le définit comme une singularité absolue. Le télescope Hubble a notamment permis de mesurer le rayonnement fossile et de dater la naissance de l'univers à environ quinze milliards d'années. La mesure réelle a été réalisée environ 300000 ans après la naissance réelle de l'univers. Elle est à l'origine du modèle du big-bang qui en réalité ne définit pas l'origine de l'univers mais sa génération, et des régions extrêmement denses et hyper-gravitationnelles que constituent les trous noirs.

³ Il s'agit notamment de l'école de Bruxelles dirigée par Ilya Prigogine.

cela appelle à faire d'emblée des distinctions entre la nature intrinsèque du temps qui semble invariante et son déroulement, sa durée⁴ qui est indissociable notre histoire.

Une deuxième considération est que le cerveau est une représentation du monde, et inversement, autrement dit, c'est à travers lui que nous appréhendons la réalité⁵. Ainsi, n'avons nous pas l'ombre d'un doute sur le fait que le présent sépare le passé de l'avenir. Or, en dehors de la thermodynamique, qui nous assimile à des systèmes thermiques évoluant vers une mort certaine, donc projetant un avenir, la physique classique n'admet pas d'orientation temporelle. Cela est confirmé par la relativité restreinte qui ôte tout caractère d'absolutisme au temps. Quant à la géométrisation de l'espace-temps, ou le fait que sa plasticité (ou courbure) soit liée à la matière-énergie qu'il contient, elle généralise la théorie relativiste⁶. L'espace-temps y constitue un ensemble indissolublement lié, et le temps ne peut être divisé en présent, passé et futur.

L'avènement de la physique quantique qui a suivi cette grande découverte a brusquement inversé la tendance, en balayant nos certitudes quant au futur, car elle ne raisonne qu'en terme de potentialité et a des propriétés (la dualité et la non-localité) incompatibles avec le monde que nous côtoyons : nous sommes toujours nous-même et dans un lieu à la fois⁷. De plus, elle admet, comme en thermodynamique, une forme d'irréversibilité qui dépend non pas d'une coordonnée dans l'espace (masse, position,

⁴ Bergson (Nobel 1927) a en particulier décrit cette différence entre la durée du phénomène mental et du temps de projection de cette durée dans l'espace physique.

⁵ Cette notion de plasticité cérébrale et de représentation active du monde est explicitée et étendue aux autres domaines de la réalité: plastique de la vie, du temps, du langage ou de la relation, dans un ouvrage de l'auteur: (Debono, 1996) dont certains extraits ont été utilisés ou réactualisés pour cet article.

⁶ Les astronomes utilisent fréquemment l'équivalence entre temps et géométrie de l'espace. C'est ainsi qu'a été mesuré le rayonnement fossile permettant de donner un âge à l'univers. Le temps y est assimilé au rayon de l'univers. Il décrit son expansion, est purement géométrique et asymétrique confirmant la relativité, c'est à dire la présence d'un espace euclidien à 4 dimensions circonscrivant l'espace-temps dont la gravité n'est qu'une propriété. D'autres hypothèses comme celle de l'univers sans bord d'Hawking sont également des conceptions géométriciennes et intemporelles.

⁷ Il s'agit de la dualité onde-particule où un élément est théoriquement dans ces deux états à la fois et de la propriété de non-localité indiquant qu'un électron n'a pas de localisation à l'intérieur de l'atome qu'il occupe (Klein, 1998).

vitesse), mais de la fonction d'onde de Schrödinger. Fonction qui est réversible et déterministe par elle-même, mais devient indéterminée lors d'une mesure⁸.

Ce probabilisme et ces interférences quantiques ne sont apparemment pas compatibles avec ce que nous observons au niveau biologique. Cependant, à partir du moment où cette réalité quantique est indiscutable, nos organes des sens, composés des mêmes atomes, devraient percevoir l'environnement à travers elle. Cette contradiction logique entre une évolution aristotélicienne strictement causale⁹ et un univers quantique indéterminé, entre des lois fondamentales invariables et une évolution macroscopique irréversible, n'a eu de cesse de produire l'échafaudage de principes physiques conciliateurs et heurtant le moins possible le sens commun¹⁰. Parmi ceux-ci, l'exploitation des singularités admises par la relativité générale comme les bords de l'espace-temps ou les fluctuations du vide quantique originel¹¹. Nous allons essayer d'en décrypter les fondements à l'échelle du temps des neurones, qui fait appel à des mécanismes différents mais à des principes voisins, c'est à dire à même de dépasser ces contradictions.

On peut toutefois légitimement se demander à ce stade de la description en quoi ces paradoxes apparents concernent la science du vivant? En premier lieu parce que ce sont nous, les hommes, qui ressentons le plus la flèche du temps. Ensuite, parce que les physiciens s'adressent essentiellement à des systèmes simples (telle une oscillation pendulaire) mais qui ont comme particularité de tenir compte de la présence de l'observateur. Enfin, parce que les cellules vivantes sont des systèmes autonomes et

⁸ L'observateur ou l'appareil de mesure va en effet évaluer la probabilité qu'une particule donnée passe d'un état *a* à un état *b* dont la superposition est annihilée par le système de mesure lui-même. Il y a dans ce cas "réduction du paquet d'ondes", puisqu'une seule des potentialités du système s'actualise. En d'autres termes, la particule n'existerait pas en soi, mais serait révélée par l'opération. Le fameux chat de Schrödinger est mort-vivant en mécanique quantique alors que nous l'observons dans un seul état: mort ou vivant (Schrödinger, 1986).

⁹ Bien qu'Aristote ce soit interrogé sur les deux termes d'une contradiction A et non-A, et ait envisagé la temporalité dans l'optique du changement.

¹⁰ La Recherche 349, 2002.

¹¹ C'est le cas de la mécanique probabiliste de Boltzmann (macro-états résultants) et de la réversibilité quantique de Bohr, Heisenberg ou Schrödinger. Ainsi, pour décrire une simple oscillation pendulaire, on remarquera qu'il faut déjà tenir compte d'un ensemble irréductible de trajectoires et non de comportements individuels.

complexes, la plupart du temps situés hors de l'état d'équilibre thermodynamique, c'est à dire là où Clausius décrit l'entropie maximale d'un système donné.

LE TEMPS DES NEURONES

A l'échelle du temps des neurones, cette complexité est grandement accrue. En effet, le cerveau, loin de se comporter en machine de Turing, permet la coexistence de chaos déterministe, de bio-oscillateurs neuronaux et de fonctions intégratives élevées. Quel biochimiste n'a pas perçu dès l'échelle cellulaire cette autonomie individuelle qui fond littéralement dans la structure puis dérive vers l'effet biologique ? L'observation de la capacité d'une molécule d'ADN de quelques milliardièmes de grammes ou du nombre de traits adaptatifs uniques contenus dans le génome des mammifères (environ 10^{13}) suffit à illustrer la richesse de la biodiversité naturelle.

Au niveau de description biophysique, c'est une membrane perméable et hautement sélective qui permet à la cellule de lutter efficacement et en permanence afin d'inverser le second principe de la thermodynamique. Cette lutte pour le maintien d'un état de *déséquilibre stable* (due à une asymétrie de concentration ionique entre le milieu intérieur et extérieur) est réalisée grâce à plusieurs systèmes physico-chimiques électifs, énergétiques et en grande partie électrogènes. Au déterminisme des perméabilités membranaires s'oppose ainsi une autonomie locale liée au déclenchement des phénomènes d'excitabilité des cellules animales. Ces caractéristiques d'autonomie et de *déséquilibre stable* seront déterminantes pour la mise en place des structures organisées et en particulier du système nerveux.

En effet, la cellule nerveuse possède des capacités de communication en temps réel ou de transfert de l'information très élaborés qui conduisent à la production d'actions coordonnées de plus en plus intégratives dans l'évolution. Ces activités unitaires, qu'il est

possible de mimer par des réseaux formels (capables d'apprentissages minimaux, de chaînage et de reconnaissance de formes mais inaptes à la compréhension de notions de sens usuels) conduisent de façon très schématique aux différents processus perceptifs, cognitifs et à la conscience que nous en avons.

La logique binaire des ordinateurs, aussi performante soit elle, est en revanche à ce jour incapable de raisonner. C'est pourquoi les informaticiens en viennent à utiliser des systèmes à logique floue et auto-évolutive (appliqués aussi bien à l'électroménager qu'aux réseaux neuronaux artificiels) plus aptes à saisir paradoxes et notions de sens commun. Il y a donc des paliers du réel, que le monde du vivant ne transgresse pas, mais au contraire stratifié. Le système nerveux permet ainsi une transmission rapide et hautement structurée des signaux. La communication intercellulaire est réalisée par l'intermédiaire de jonctions synaptiques électriques (*gap junctions*) et surtout chimiques qui seront, selon le médiateur et les perméabilités membranaires en jeu, tantôt excitatrices tantôt inhibitrices.



Figure 1 : Synapse

Les synapses contactent également les cellules spécialisées d'organes périphériques sensoriels ou moteurs. Dans le cas classique des synapses neuromusculaires, le neuromédiateur (acétylcholine) est libéré par quanta stockés dans les vésicules

synaptiques¹². Bien que la transmission synaptique puisse être de nature purement électrotonique, elle nécessite en effet souvent un partenaire chimique qui est libéré au niveau de la membrane pré-synaptique et agit localement sur l'élément post-synaptique¹³.

On perçoit ainsi au niveau élémentaire¹⁴ une grande cohésion d'ensemble qu'il est intéressant de situer dans une perspective évolutive. En effet, nous observons clairement qu'une évolution de type dynamique non-linéaire ainsi qu'une sensibilité au milieu s'observent dès l'étape bio-moléculaire. Cette variabilité s'accompagne d'une remarquable stabilité ou conservation de structure dans l'échelle phylogénétique pour certaines familles de récepteurs aux hormones ou aux neurotransmetteurs. Cette autonomie est amplifiée au niveau des membranes neuronales où le *déterminisme des perméabilités membranaires est inséparable du système probabiliste d'ouverture et de fermeture des milliers de canaux ioniques* qui sont couplés directement ou indirectement aux récepteurs membranaires.

Le neurone seul en tant qu'entité répond donc à la fois à cette évolution et aux lois physiques liées aux générateurs d'oscillations et à la cybernétique de Wiener. Des modèles mathématiques appliqués aux neurones font le lien entre les propriétés biophysiques des membranes que nous avons brossé, et celles des systèmes intégrés. Des travaux classiques montrent en effet clairement la présence d'oscillations régulières spontanées au niveau de l'olive cérébelleuse inférieure qui répondent localement à la dynamique du chaos et des

¹² Katz (1966) a montré dans les années cinquante que le nombre de quanta éjectés était strictement proportionnel au nombre de molécules de transmetteur libéré par chaque potentiel d'action.

¹³ Ce médiateur chimique se lie spécifiquement à un récepteur protéinique qui, une fois occupé, peut interagir avec une enzyme membranaire et produire un messenger intracellulaire (l'AMP cyclique) à partir du carburant énergétique qu'est l'ATP. Dans d'autres cas, une cascade d'événements intracellulaires est mise en jeu par l'intermédiaire de protéines transductrices (les protéines G), dont il existe plusieurs formes excitatrices et inhibitrices. Elles activent des effecteurs et sont capables d'intervenir non seulement comme amplificateurs, mais également en tant que commutateurs temporels pour l'ouverture et la fermeture des canaux ioniques (annexe 2). Enfin, le déclenchement du signal peut-être directement lié au flux d'ions traversant la membrane post-synaptique du neurone et sa nature dépendra de l'espèce ionique entrant en jeu. Interviennent également des interactions trophiques entre les neurones et les cellules gliales, dont le rôle reste à être précisé. La coordination de tous ces mécanismes conduit à un effet biologique précis. On sait en particulier que la migration d'une enzyme cytoplasmique (la protéine kinase C) vers la membrane cellulaire induit des modifications structurelles durables qui vont déclencher et faciliter les décharges neuronales. L'organisation topographique de ces décharges dépend de la localisation des cibles dont l'activation synaptique sera notablement allongée et la trace mnésique stabilisée. Elle implique des régulations géniques et des nouvelles synthèses de protéines vers les synapses concernées.

systèmes non linéaires, avant de se transformer en macro-états cohérents, fonctionnels et déterminés au niveau général (assemblées de neurones et structure cérébrale)¹⁵. Ces neurones nucléaires sont ainsi capables soit seuls, soit couplés de façon électrotonique à leur voisin, de se synchroniser localement puis d'être mis en phase cohérente afin d'aboutir au comportement intégré et synchrone de réseaux neuronaux entiers. La mise en jeu de ces deux degrés de synchronisation (locale et globale) conduit selon les auteurs aux états émergents et complexes qui caractérisent nos actes conscients, sans affecter la dimensionnalité du système.

*Tout est donc dans le regard que l'on porte*¹⁶. La continuité apparente de l'onde recueillie en surface (EEG, MEG : annexe 2) est ainsi comme en physique des quanta le reflet de discontinuités basiques et de cascades d'événements énergétiques (mesures intracellulaires). De façon parallèle, la *discontinuité structurelle* que l'on décrit [connexions interneuronales discontinues, juxtaposition des neurones au niveau synaptique, ramifications non continues les unes par rapport aux autres] est relayée par une continuité jonctionnelle (synaptique).

¹⁴ Protéines portées par la membrane des récepteurs cérébraux, communication inter- et intracellulaire...

¹⁵ Makarenko et Llinas, 1998.

¹⁶ Autrement dit, si on place une électrode au niveau du cerveau, elle "verra" différemment selon son positionnement, sa morphologie sa composition et son "acuité" (système d'amplification utilisé). Ainsi, ce prolongement de l'œil reflétera des courants macro- ou microscopiques figurant le niveau biologique interrogé: intracellulaire (cellule entière ou organites: enregistrement de canaux uniques ou de potentiels mitochondriaux: annexe 2), ensembles neuronaux intégrés (couches de cellules: enregistrements multicellulaires), structure cérébrale donnée (cervelet, hippocampe, noyaux centraux), cerveau entier (EEG, imagerie fonctionnelle: annexe 3). Il suffira ensuite de mettre des lunettes adaptées, les activités électriques globales du cerveau correspondant à un instantané sommant algébriquement l'activité de milliers de potentiels synaptiques dans le temps (eux-mêmes sous-tendus par le système probabiliste de milliers de récepteurs-canaux). Ces activités sont aujourd'hui analysables aussi bien en terme unitaire (potentiel d'action d'un neurone ou d'un groupe de neurones enregistrés *in vitro* ou *in vivo*) que de cartographie de l'ensemble de l'activité cérébrale.

LE TEMPS DU CERVEAU

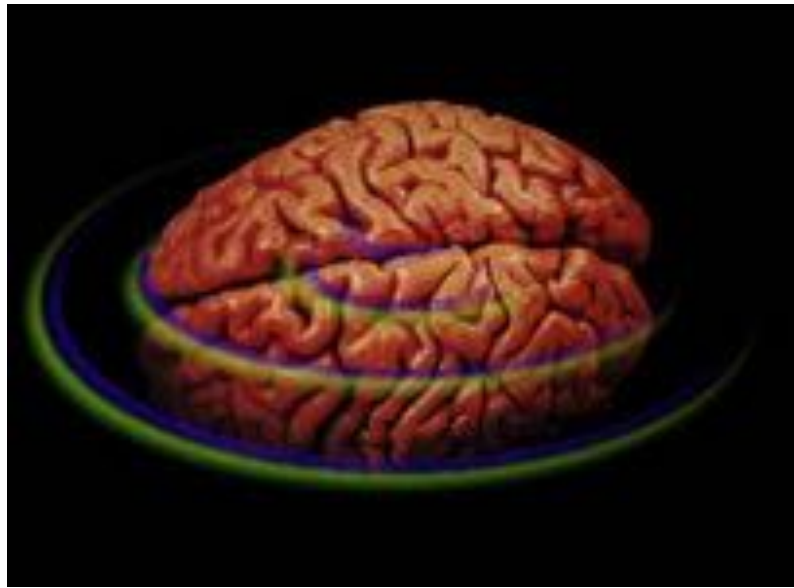


Figure 2 : Cerveau

Si on aborde le problème de la complexité à l'échelle du cerveau, ce qui frappe le plus n'est pas l'ordre de grandeur du réseau neuronal (environ 10^{11} neurones et 10^{14} contacts synaptiques dans un cerveau adulte), bien qu'il soit impressionnant, mais la très grande plasticité de ce réseau (annexe 1). En effet, l'ordre de la complexité croissante apparaît au biologiste dès l'observation de la plus simple des bactéries ou de la constitution de la molécule d'ADN. Comme nous le savons, cette mesure corrèle hélas parfaitement avec l'ordre de l'entropie croissante définie par Clausius nous rappelant l'irréversibilité du temps biologique.

L'unité de perception cérébrale ou de l'expérience cognitive est soutenue grâce à la coopérativité de systèmes temporels continus et discontinus. Le traitement discontinu s'opère: 1) grâce à des fenêtres de discriminations atemporelles correspondant au temps biologiquement nécessaire pour discriminer deux stimuli consécutifs et leur relation d'ordre (de 1 à 30 ms); 2) par l'intermédiaire de réseaux neuronaux oscillants balayant le cortex cérébral à haute fréquence (40 Hertz). Ces circuits résonnants définissent des intervalles de 30 à 40 ms dans le système visuel (Gray et Singer, 1989) et de 12.5 ms au niveau thalamocortical (Llinàs et Ribary, 1993; 2001).

Ils existent aussi dans le cortex auditif, moteur ou frontal, nous permettant de percevoir les intervalles de temps entre deux sons, deux mouvements ou deux événements. Ainsi, les oscillateurs de certains noyaux cérébelleux ont un rôle important dans la perception du rythme des mouvements. L'enchaînement de gestes complexes nécessite un réglage extrêmement fin de cette horloge et la perception du corps entier. S'il est perturbé, la discrimination du temps écoulé entre deux sons sera altérée, indiquant le rôle crucial du cervelet dans la corrélation entre signaux moteurs et sensoriels (Ito, 1984).

Les décharges à 40 hertz décrites par Llinàs et Ribary s'amplifient pendant les phases de sommeil paradoxal sous-tendant le rêve. L'auteur les qualifie de "*quantum de conscience*". Il propose plus précisément que les boucles thalamo-corticales spécifiques définissent le contenu de l'acte cognitif, tandis que les circuits non spécifiques (comme le complexe intralaminaires) fournissent le lien où le liage temporel de cet acte, réalisant ainsi une expérience cognitive unique (le stimulus étant interne dans le cas du rêve). Selon cette interprétation, la conscience serait le fruit de la co-activation de ces deux systèmes résonnants à 40 Hertz. Des auteurs comme Hubel pensent que ce liage ou *binding* permettrait d'échapper aux oscillations lentes non spécifiques et redondantes, l'éveil améliorant notablement le rapport signal/bruit détecté¹⁷.

Le traitement continu des informations est probablement responsable de l'impression subjective de continuité et de présent immédiat que nous ressentons tous. Selon les travaux du psychophysicien Pöppel (1972, 1981), elle repose sur un processus intégratif de *binding* des segments temporels durant environ 3 secondes. Pour d'autres auteurs, ces valeurs peuvent atteindre plusieurs dizaines de secondes, et faire intervenir des horloges internes¹⁸ jouant le rôle de mémoires temporelles identifiées (notamment en électrobiologie sous forme de "variations contingentes négatives" durant plus de 200 ms).

¹⁷ Prix Nobel avec Wiesel (1962) pour ses travaux sur la vision binoculaire.

¹⁸ La présence d'une horloge cérébrale interne reste encore posée. Cependant, de nombreux arguments scientifiques (cf. ref. suivantes.), dont la mise en évidence de cibles pharmacologiques de tels mécanismes ou de leurs corrélats électrophysiologiques (variation contingente négative ou V.C.N., onde P 300), sont en faveur de l'existence d'horloges délocalisées. (Church et. Broadbent, 1990).

Notre unité de perception du moment présent, qui passe, dure ou est passé (temps subjectif) pourrait ainsi être dû à la co-gestion de ces temporalités continues et discontinues. Certains neurobiologistes estiment toutefois qu'une propagation séquentielle ou phasique du potentiel d'action (chaque synapse ou circuit local supplémentaire implémentant un délai à l'ensemble du processus) est suffisante pour expliquer le fonctionnement en temps réel du cerveau (Block, 1990; Miall, 1992). Cela paraît discutable, sachant, comme on vient de le montrer, que les mécanismes de traitement du code temporel ne semblent pas uniformes mais plutôt multimodaux. Il suffit de prendre l'exemple des séquences temporelles codées dans l'échelle de quelques dizaines de millisecondes (< 0.5 sec.) où les délais biologiques de transmission d'informations différentes en même temps sont peu réalistes.

Hopfield et Brody (2000, 2001) qui ont étudié ces phénomènes pour la reconnaissance de mots parlés brefs penchent pour une synchronisation collective transitoire rapide, qui sera ensuite détectée individuellement par une cellule (avec une courte constante de temps). Autrement dit, le premier mot d'une série ne serait reconnu qu'après avoir été encodé dans une séquence ou un schéma spatio-temporel précis. Cette intégration sensorielle concorde avec une bouffée d'ondes EEG de fréquence gamma, dont on a précédemment vu qu'elles accompagnent les synchronisations de réseaux. L'auteur montre ainsi clairement que la détection du décalage temporel est complexe comparé à l'intégration d'informations spatiales par notre cerveau¹⁹.

Les travaux de Libet (1991) traitant également du temps biologique le plus bref pour avoir une expérience sensorielle consciente (< 0.5 sec), posent le problème du temps du cerveau face aux événements conscients et inconscients. Ils indiquent que l'intention d'effectuer un acte moteur entraîne une activation des aires motrices plusieurs centaines de millisecondes (environ 350 ms) avant que le mouvement réel n'ait lieu. Ils montrent également la différence existant entre le *temps subjectif* associé au contenu mental d'un événement et le *temps objectif* lié aux délais du circuit sensoriel activé. Ces deux modes

temporels se chevauchent clairement dans toute tâche cognitive liée aux émotions réelles comme projetées (simulation virtuelle) en activant le cortex moteur correspondant. Cette plasticité motrice associative concerne autant l'acte moteur que sa représentation mentale dans l'espace-temps²⁰. Ce schéma [acte moteur vécu dans le cerveau] est fréquemment utilisé par les sportifs de haut niveau qui anticipent l'action et mémorisent tout un enchaînement d'actes à venir. Les travaux récents d'A. Sirigu et al. illustrent parfaitement la plasticité motrice au niveau du champ visuo-moteur où les douleurs classiquement associées au membre fantôme ont pu disparaître chez des patients ayant eu des stimulations visuelles du cortex sensori-moteur qui créent une illusion de mouvement²¹.

LA MEMOIRE DU TEMPS

Plus généralement, on peut précisément mesurer *l'efficacité synaptique dans le temps* et son lien aux processus d'apprentissage ou de mémorisation. L'acquisition durable d'informations est liée à des modifications: 1) moléculaires et biochimiques, 2) structurelles (en particulier des terminaisons dendritiques) et 3) temporelles puisqu'il y a potentialisation à court ou long terme (*short or long term potentiation*: STP-LTP) de l'activité synaptique. Une structure cérébrale est en particulier (mais pas uniquement) le siège de la mémorisation, il s'agit de l'hippocampe où ces phénomènes de LTP liés à certains récepteurs post-synaptiques sont très bien décrits²².

En outre, des recherches récentes décrivent au moins un niveau d'intégration cérébral supplémentaire. C'est à dire qu'on ne constate plus seulement des modifications de l'efficacité synaptique locale, comme c'est le cas pour la LTP, mais qu'une régulation synaptique plus

¹⁹ En effet, l'auteur donne l'exemple d'une image codée par la rétine qui sera directement analysée dans un champ réceptif visuel restreint avant de suivre des voies anatomiques balisées à différents étages et d'être intégrée par le cortex visuel.

²⁰ M-W Debono, Communication aux Journées Internationales de Posturologie sous le haut patronage de l'Université Tor Vergata, Rome, Mars 2005.

²¹ P. Giroux, A. Sirigu "Illusory movements of the paralyzed limb restore motor cortex activity". Neuroimage 20 Suppl 1:S107-11, 2003.

²² Il s'agit des récepteurs *glutamatergiques* représentant un des plus importants neuromédiateurs endogènes du cerveau dont N-Méthyl-D-Aspartate ou NMDA est un des sous-types majeurs. Bliss et Lomo (1973) ont

globale (modulation en fréquence ou de conformation moléculaire) modulerait la première, en induisant un effet inverse (ici une dépression synaptique à long terme ou LTD) pour un même stimulus (Ito, 2001). Cette "plasticité de la plasticité" décrit ainsi un étage de plus dans la construction interactive de l'individu (Abraham et Bear, 1996).

La plasticité cérébrale (annexe 1) est en particulièrement illustrée par l'ensemble des processus mnésiques associés aux différents types de traitements spatio-temporels que l'on a évoqué: locaux (STP-LTP), globaux (réseaux neuronaux coopératifs, interconnectivité, LTD) et la plasticité cognitive. Selon le degré d'implication de l'un et/ou l'autre de ces étages, différentes sortes mémoires vont intervenir : spatiale, déclarative, procédurale, émotive, sémantique, "du visage", etc... Ces mémoires sont liées à nos perceptions (visuelle, auditive, olfactive...) et font intervenir, selon les auteurs, soit des états de mémoire modulables, dissociés, indépendants et multiples, soit au contraire des traces mnésiques liées qui seraient réactivées lors d'un événement singulier et en particulier d'une émotion ²³. Dans ce cas, les souvenirs enfouis resurgissent et une nouvelle trace émerge, qui se construit sur la base des traces antérieures, mais d'une expérience nouvelle.

Le facteur temps y est donc prégnant et articulé à l'histoire affective de l'individu. Des structures cérébrales souvent mises en jeu lors d'une émotion, comme le cortex préfrontal et l'hippocampe et l'amygdale, y sont fortement impliquées. Il est intéressant de relever que dans cette hypothèse due aux sciences cognitives, *l'oubli correspondrait à une difficulté à différencier une trace parmi d'autres*, tandis que dans des modèles plus comportementaux, on assimile volontiers les déficits mnésiques importants à une saturation maximale de la LTP. La LTD serait quant à elle susceptible de désaturer ce système, attribuant un rôle important à la fonction de l'oubli ²⁴.

notamment montré les premiers qu'une stimulation brève à haute fréquence induisait une augmentation notable et durable de l'efficacité de la transmission synaptique coorespondait à la LTP.

²³ La dissociation peut être liée aussi bien à l'humeur (euphorie, dépression), l'environnement (agressif, stimulant, amoureux), la prise de drogues ou de psychotropes, qu'à certaines pathologies altérant les systèmes de dépendance, d'apprentissage et de mémoire. Dans ce cas, certains systèmes de neurotransmission majeurs (sérotoninergique ou cholinergique) sont atteints. (Versace et al., 2001).

Une dernière considération, plus globale, concerne la synchronisation probable des *pacemakers* cérébraux par des oscillateurs chronobiologiques de durée définie. En effet, la plupart des recherches menées à ce niveau montrent qu'il n'existe pas une horloge unique dans le cerveau qui suit les rythmes circadiens, mais différents niveaux de perception du temps (Scibler et Sassone-Corsi, 2003). Ces marqueurs temporeux ont eu des évolutions distinctes. Ils incluent un ensemble de gènes organisés en boucle d'autorégulation et d'horloges décentralisées respectant les niveaux d'organisation centraux et périphériques²⁵. Apparaît donc à nouveau ici la notion de mesure du temps et d'observateur, qui, comme en physique quantique, a son importance dans l'appréhension du temps psychologique.

LA COMPLEMENTARITE : PLUS DE PARADOXE TEMPS ?

Cet article montre que lorsque l'on veut essayer de comprendre le fonctionnement du cerveau, il faut tenir compte, non seulement de sa spécificité, mais aussi d'observations fondamentales décrites par les sciences de l'atome ou de l'univers. C'est le cas de l'irréversibilité des systèmes complexes, et d'un cerveau dont on a vu qu'il fonctionne, dès l'étape neuronale, avec une dynamique de type chaos déterministe. C'est également le cas de l'irréversibilité de l'acquisition d'informations dans les processus de mémorisation ou de la décroissance de l'entropie des phénomènes accumulant de l'information, démontrés en physique expérimentale.

²⁴ La Recherche, Numéro spécial, " *La mémoire et l'oubli* ", 344, 2001.

²⁵ On sait plus précisément depuis les années soixante qu'une horloge cérébrale interne est localisée au niveau de l'hypothalamus (noyau suprachiasmatique). Des travaux récents effectués chez un poisson, montrent que les cellules rénales ou cardiaques de ce vertébré isolées *in vitro* contiennent des photorécepteurs qui répondent à des variations artificielles de la lumière en oscillant de façon circadienne, indépendamment du système nerveux central (Cermakian et al., 2001). Différents gènes *horlogers* (clock, cycle, tim...) ont été identifiés, notamment chez la drosophile, confirmant la présence d'horloges périphériques individuelles (Plautz et al., 1997). Un organe aussi bien qu'un neurone isolé continuent donc de fonctionner selon les rythmes circadiens. On peut attendre des retombées importantes de ces découvertes dans le traitement du syndrome du décalage horaire et de certaines pathologies cancéreuses où les cellules apoptotiques ont des rythmes très perturbés (si elles se confirment chez l'homme). D'autres horloges liées au cycle cellulaire ou au " vieillissement programmé " sont très étudiées.

Cependant, avons nous répondu aux contradictions relevées dans l'introduction ? Le modèle de "la réalité subatomique" répond-il *stricto-sensu* à celui de "la réalité biologique" ? S'il est clair que le second n'est pas réductible au premier, on peut en tout cas l'analyser à l'aide de théories ouvertes plutôt que de cloisonner les disciplines. En effet, de nombreuses données expérimentales issues des travaux de physiciens confortent cette position, permettant de relativiser et d'extrapoler cette approche temporelle du cerveau conscient²⁶. La théorie relativiste d'Einstein implique l'apparition d'une quatrième dimension spatiale: "le temps imaginaire". Dans ce cas, passé et futur sont indistincts selon les lois de réversibilité physique. Ces lois s'opposent à priori à celles de notre réalité consciente. On ne peut revenir en arrière ou se souvenir d'évènements futurs. Pourtant, si comme l'a montré Hawking (1988)²⁷, le temps est déterminé dans notre cerveau par la flèche entropique, alors ces deux lois seraient conciliables et élimineraient le paradoxe temporel apparent.



La mécanique quantique décrit, quant à elle, des fonctions d'onde en terme statistique et en dégage une amplitude qui est en revanche déterministe. Poincaré avait déjà relevé ce paradoxe (systèmes à résonance) qui fut clairement énoncé par Shroedinger⁷ et son fameux chat à propos de l'étonnante contradiction entre une organisation atomique unique et parfaitement ordonnée au niveau des structures chromosomiques et les lois de probabilité quantique. Depuis,

²⁶ Approche qui ne peut être que partielle, pour ne pas dire parcellaire puisqu'on connaît relativement bien le cerveau aujourd'hui, encore très peu la structure réelle du temps, et quasiment pas du tout la nature de la conscience.

²⁷ Hawking décrit en substance la trivialité du second principe de la thermodynamique en ces termes: "le désordre croît avec le temps parceque nous mesurons le temps dans la direction où le désordre s'accroît".

succédant à l'école de Copenhague, initiée par Bohr²⁸, plusieurs théories se sont affrontées qui tentent de concilier interférences quantiques et irréversibilité à l'échelle macroscopique. L'une d'entre elle, dite de la décohérence, est considérée aujourd'hui comme particulièrement pertinente. Elle stipule que la réduction du paquet d'ondes s'opère parce que l'objet quantique n'est pas isolé et interagit avec le milieu. Autrement dit, *l'observateur* ou le système de mesure est le facteur déclenchant et assurerait la transition entre l'état macroscopique résultant, celui que nous observons dans notre monde, et celui du niveau quantique.

Autre approche majeure, la théorie à symétrie temporelle brisée de Prigogine (1980, 1988) qui propose d'inclure la flèche historique du temps dans un schéma qui tient compte à la fois du rôle essentiel de l'observateur et de la dynamique classique. Cette théorie, outre le fait qu'elle confirme la nature dissymétrique des bio-molécules, introduit l'irréversibilité au niveau quantique et montre que la présence d'un système organisé peut rompre la symétrie temporelle ou la réversibilité observable au niveau atomique. Ce n'est plus l'observateur, mais l'événement quantique qui dans sa temporalité propre réduit le paquet d'ondes et détruit la superposition quantique. Il n'y a plus de système quantique réellement réversible. L'univers y a un âge et une flèche du temps. Il n'y aurait donc plus de réel paradoxe du temps comme on l'a dit dans l'introduction, mais une seule direction temporelle, les lois naturelles dictant seulement une potentialité d'action.

Ainsi, lorsqu'on décrit le temps du cerveau, il faut garder en mémoire: 1) l'interaction primordiale existant entre le niveau physique et le niveau biologique, 2) la nécessaire présence d'une complémentarité entre le temps objectif et subjectif, 3) l'aspect proprement qualitatif lié à l'émotion, la perception des couleurs ou du temps qui passe (temps psychologique). Nous avons répondu au premier point en citant les théories résolvant le paradoxe apparent entre le temps biologique et le temps quantique. Examinons les deux points suivants.

²⁸ Bohr avait abordé cette dualité sur le thème de la complémentarité onde-corpuscule.

LA DYNAMIQUE TEMPOROSPATIALE DU CERVEAU

Comme on l'a vu, la cellule vivante est un système en déséquilibre stable et qui relève d'une dynamique de type chaos déterministe. Cela reflète des lois d'évolution non linéaires d'une part, et le fait que la flèche du temps s'y actualise plutôt que d'y être prédéterminée. Le temps des neurones montre de même cette double appartenance de tout tissu vivant à l'irréversibilité du temps biologique et à une plasticité structurelle permettant un remaniement permanent des configurations synaptiques dans l'espace et le temps. Cette complémentarité est retrouvée à l'échelle organique où l'on a décrit un cerveau qui gère le chaos grâce au déterminisme des connexions synaptiques organisées en réseaux, est éminemment plastique et permet le libre arbitre dont nous faisons tous preuve (Debono, 2002).

Pour la plupart des auteurs, il est en effet à présent acquis que les systèmes neuronaux ont des propriétés dynamiques non linéaires capables de supporter le comportement chaotique comme mode opérationnel. Il en résulte aussi bien des descriptions nouvelles du couple [micro-état neuronal - macro-état fonctionnel] qui peuvent être expérimentées au niveau local (cellulaire) comme global (analyse de Fourier des EEG), que des interprétations plus audacieuses. Ainsi, le physicien Hopfield (1982, 1996) remarquant que si on applique le calcul par attracteur aux réseaux neuronaux, la mémoire de rappel (souvenir) s'interprète comme l'attraction d'un système dynamique vers un état de pseudo-équilibre (ré-émergence du souvenir), ce qui n'est pas le cas des autres types mnésiques qui pourraient constituer des bassins attracteurs identiques à des morceaux de mémoire stockés en parallèle²⁹.

²⁹ Autrement dit, sans être gênés par le bruit synaptique, en analogie au bruit thermique des spins. Ces réseaux ont une mémoire adressable et fonctionneraient selon un processus asynchrone et parallèle comme les réseaux de neurones. Ils sont capables de réutiliser d'anciens algorithmes pour former de nouvelles représentations.

Bien que des horloges circadiennes puissent influencer le temps du cerveau, les échelles de temps y sont parfaitement corrélées, de façon à assurer une unité de perception de l'instant comme le rappel de mémoires du passé. Ces mémoires cérébrales, soutenues par d'autres mémoires non biologiques comme l'écriture sont, bien entendu, irréversibles, autrement elles disparaîtraient. *Quant au futur, il dépend probablement de cette liberté fondamentale qui nous rend indépendant et irréductible à un système fini, malgré notre tendance thermodynamique irréversible.*

Les travaux que nous avons évoqués à propos du rôle fonctionnel de l'oubli durant le sommeil paradoxal alimentent considérablement cette hypothèse, montrant la nécessité d'un mécanisme de désaturation des mémoires cérébrales¹⁸. Le rêve servirait entre autre à désapprendre. Les processus cérébraux consisteraient à éliminer certaines interactions synaptiques au niveau du cortex cérébral, ce qui aurait pour conséquence d'estomper la trace du rêve inconscient au réveil. Mimés par des réseaux neuronaux, ces approches montrent que l'inversion de la fonction d'apprendre (*reverse learning*) augmente la performance grâce à l'effacement spatial et temporel de certains réseaux qui libèrent de la place dans la mémoire encombrée du cerveau (Hopfield et al., 1983).



Figure 3

A l'actif de cette hypothèse, l'absence de phases de sommeil paradoxal observé chez certains animaux, dont deux espèces de dauphins, ayant un cerveau de grande taille (Crick et Mitchison, 1983, 1995). D'autres travaux plus récents sur la mémoire épisodique et les relations entre LTP et phase des rêves dans l'hippocampe (Poe et al., 2000), sont consistants avec le fait que les circuits neuronaux seraient restructurés pendant le sommeil profond grâce à une régulation des acquisitions dans le temps (renforcement des souvenirs récents et affaiblissement des plus anciens).

Une seconde approche du cerveau, plus géométricienne, s'appuie sur les travaux de Llinàs et collaborateurs, dont Herbert nous dit qu'il met au point une véritable "*théorie grand unifié du cerveau*" (Herbert, 2000). En effet, ces auteurs assument généralement que la synchronisation temporelle des circuits thalamocorticaux spécifiques et non spécifiques est à la base de la cognition et de la conscience humaine (Llinas et Ribary, 1993, 2001). Nous avons décrit le rôle temporel qu'ils attribuent aux systèmes résonnants à 40hz, notamment dans la phase de sommeil paradoxal. Une autre de leurs hypothèses, plus spatiale, stipule que le système nerveux central gère son hyperespace interne de façon à ce que les réseaux transforment les signaux d'entrée en coordonnées tensorielles (Pellionisz et Llinas, 1982). Les coordonnées d'espace-temps einsteinien y sont représentées comme un continuum sur chacun des axes perçus (structure=ordinateur et réseaux=tenseurs), tandis que les propriétés quantiques comme la non localité n'y sont pas représentées³⁰.

Si on considère ces corrélations dans l'hyperespace cérébral, la distance entre une idée - un point dans l'hyperespace interne - et une autre serait mesurable dans ce modèle ! De plus, cela indiquerait une complexification du temps lui-même, qu'il serait intéressant d'approfondir. A l'opposé, pour Pribram et Carlton (1986), la constitution holographique du cerveau, qui intègre en chaque point de l'espace cérébral la quasi totalité des informations relatives au cerveau entier, constituerait l'équivalent d'un système quantique

³⁰ La théorie du *bootstrap* de Chew et Wheeler décrit en effet les propriétés de non localité et d'auto-organisation en physique expérimentale. Elle est complétée par les travaux de B. d'Espagnat sur la non-séparabilité.

à grande échelle et impliquerait la non-localité. Toutefois, il est clair que ces hypothèses de travail n'autorisent pas d'extrapolations inconsidérées entre les acquis de la mécanique quantique et le fonctionnement du cerveau.

En résumé, pour nous, une bonne définition du temps serait de l'assimiler à la *corrélacion entre une horloge et l'évolution d'un système dynamique*. Tout système vivant y répond, non pas de façon newtonienne ou purement déterministe, mais dans une dynamique du mouvement introduite par Aristote, puis Plotin, quantifiée par des scolastiques comme Oresme ou Buridan, puis fondamentalement redéfinie par la physique moderne. Il est intéressant de constater que lorsqu'on aborde la neurobiologie sous cet angle, on va y retrouver aussi bien les approches de la dynamique non linéaire, que des interprétations purement géométriciennes du fonctionnement du cerveau, voire de la conscience.

TEMPS PSYCHOLOGIQUE ET EMOTIONS

Il est nécessaire de resituer ces approches parmi les avancées récentes des sciences cognitives ou de la psychologie expérimentale. Ce dernier point, que nous ne ferons qu'aborder, concerne en effet les questions posées par la nature du temps psychologique, dont Piaget a clairement montré l'interaction avec le temps physique dès la naissance du bébé, et les rapports cerveau-conscience. La notion de temporalité cérébrale est en effet contingente à celle de conscience temporelle des événements que nous percevons. En outre, comment nier l'impact majeur de la perception et de l'affect dans tous nos actes et ressentiments ? Le rouge et le bleu, le do et le fa, un visage familier ne sont en effet pas que des émissions spectrales, mais correspondent pour chacun de nous à des émotions intenses, subtiles et très personnelles. Différentes écoles jouent là encore, allant du réductionnisme au spiritualisme, en passant par tous les degrés intermédiaires, révélant que

nous sommes aujourd'hui bien dans l'ère du cerveau, mais en *terra incognita* pour ce qui concerne la conscience.

De fait, c'est essentiellement la conscience réflexive qui pose le problème crucial qui est de savoir comment pense-t-on, avons-nous des émotions et un sentiment de libre-arbitre avec un cerveau qui gère des processus physico-chimiques chaotiques en permanence ? Plusieurs hypothèses s'affrontent dans ce domaine, distinguant le *soft problem* (fonctionnement objectif du cerveau, activités cognitives et comportementales) du *hard problem* (distinction entre connaissance objective et sentiment qualitatif ou *qualia* rapporté à ce percept), qui constituent un grand débat en sciences cognitives qu'on ne peut développer ici³¹.

Ce que l'on peut dire, au travers de notre approche, c'est que le cerveau apprenant donne un sens à la vie car elle est intelligible. C'est un système complexe instable, donc peu prévisible, qui admet plusieurs échelles temporelles dont la complémentarité débouche sur l'unité du moi comme du temps psychologique³². Cela signifie probablement que nous reconstruisons ou déroulons l'espace comme le temps dans notre cerveau et que le temps existe peut-être hors de la conscience que nous en avons ? Cela indique aussi que non seulement les systèmes vivants interagissent avec les systèmes physiques, mais peuvent rétroagir sur eux.

³¹ Parmi celles-ci : le physicalisme, la théorie combinatoire, les systèmes modulaires, le cerveau-ordinateur, la conscience émergente, l'irréductibilité entre cerveau et conscience, les métaniveaux, etc...

NOUS CREONS LE TEMPS QUI NOUS CREE



Kant³³ n'a-t-il en effet pas défini le temps comme une *forme à priori de la sensibilité*? C'est pour lui une condition à toute expérience qui s'affranchit de la question du traitement de l'objet temps, et va dans le sens des découvertes de Planck, autrement dit de l'existence de constantes universelles. Dans cette perspective, le temps précéderait l'existence. Il ne pourrait pas être dissocié de la perception consciente, du concept. Quant à la nature intrinsèque de son fonctionnement, elle s'accorderait plus volontiers avec les théories physiques unificatrices actuelles, bien qu'on s'interroge toujours sur le sens de l'irréversibilité du monde, dont la complexité constitue un des meilleurs antidotes !

Les phénoménologues ou les philosophes du 20^{ème} siècle comme Husserl, Hegel et Heidegger ont beaucoup interrogé la temporalité et la conscience que nous en avons. Les épistémologues relancent aujourd'hui clairement le débat en posant la question du *temps zéro*. Le temps s'écoule-t-il ? Peut-on l'arrêter ? Est-ce une création de l'esprit ? D'après la relativité générale, l'origine de l'espace ne peut exister dans le temps, puisqu'il débute lui-

³² Qui est déterminé par son caractère qualitatif et individuel.

³³ Dans « La critique de la raison » éditions PUF.

même ici. Des physiciens comme Davies (2002) qui s'intéresse aux prémisses du temps ou au pré big-bang pensent que les tous premiers instants de l'univers émergent de fluctuations quantiques spontanées fondamentales. Elles ne seraient précédées par rien, autrement dit, le temps serait fini³⁴, mais n'aurait pas d'origine. Il aurait lentement élaboré sa spécificité au détriment des propriétés spatiales qui le portent. Quant au temps infinitésimal, son exploration connaît des avancées récentes notables qui permettent de sonder les limites du concevable, c'est à dire l'échelle du milliardième de milliardième de seconde ou attoseconde (Mairesse, 2003), autrement dit le temps des électrons. Cela aura sans doute des répercussions à la fois sur les théories quantiques et sur notre mesure du temps.

Dans ce cadre, on peut se demander quel est le rôle de la conscience, non pas tant dans l'intégration du phénomène temporel, qui, on l'a vu, est bien géré par le cerveau, mais dans son appréhension globale. De nombreux travaux contemporains, comme ceux de Damasio réhabilitent l'émotion en tant que ferment indispensable à la ratio. Elle serait un des paramètres clé de notre perception primaire du déroulement temporel, sans toutefois être innée³⁵. De fait, l'auteur montre que le temps de la conscience ne dépend pas que de nos horloges biologiques internes, mais est intimement lié aux émotions qui nous assaillent en permanence.

Elles sont en effet capables, en fonction de leur connotation négative ou positive, d'altérer fortement notre perception du temps (Damasio, 2002). D'autres approches des cognisciences, plus phénoménologiques, penchent, à l'instar de Husserl et Merleau-Ponty, vers une co-émergence des événements via des circuits cérébraux résonnants à grande

³⁴ Le paradoxe de Zénon spécifie en effet la notion de limite mathématique où le temps fini correspond à la somme d'un nombre infini de termes.

³⁵ Tous les parents ou éducateurs ont observé que l'acquisition de la notion de temps n'est pas innée chez l'enfant et qu'elle nécessite un long apprentissage chez les enfants. En revanche, l'innéité de la perception sensorimotrice du nourrisson semble prouvée dans la mesure où elle s'installe très tôt (environ quarante minutes après la naissance du bébé qui tente d'imiter sa mère). Les spécialistes parlent d'empathie ou de phénomène émotionnel lié à la survie.

échelle (Thomson et Varela, 2001). La conscience y circonscrirait des actes cognitifs traversant les divisions corps-cerveau-monde. Dans ce cadre, on irait dans le sens de Davies, c'est à dire d'un monde où rien n'est donné à l'avance mais qui se co-crée au fur et à mesure de l'action ou de la relation : nous créons le temps qui nous crée.

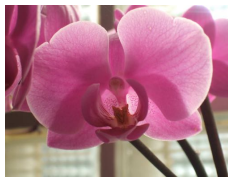
Enfin, n'oublions pas que pour les psychanalystes, aujourd'hui querellés autant par les neurosciences que par des dissensions internes, la conscience du temps n'est que la partie émergée de l'iceberg. Classiquement, la psychanalyse la lie à la théorie de l'inconscient. Néanmoins, Freud avait 'frayé' le chemin en donnant des pistes de recherche que d'autres, tels Boris Cyrulnik ont concrétisé avec la non-linéarité de la résilience et d'autres, comme François Ansermet, n'ont pas manqué de rapprocher des capacités structurelles infinies de la plasticité neuronale. Ainsi, c'est avant tout le sujet et l'expérience avec un grand E qui frayent le chemin et unissent de façon indélébile trace psychique, trace synaptique et signifiant selon Ansermet et Magistretti (2004).

Inconscient, préconscient et conscient freudiens s'y trouvent comme déliés dans une réalité pleinement vécue où la plasticité neurale trouve naturellement sa place et où le temps psychologique peut enfin se dérouler sans vergogne ou retenue. Et c'est la perception ou l'état somatique au sens de Damasio qui contribuerait activement au passage du conscient à l'inconscient. De tels ajours après des siècles d'obscurantisme, de séparation des corps, de cerveaux sans esprit et d'esprits sans cerveau sont une bouffée d'oxygène et ne font qu'appuyer le concept épistémologique de plasticité (Debono, 1996, 2007).

La plasticité de la pensée devrait ainsi être ré-appréhendée à la lumière de ses rapports avec l'inconscient, le langage et le processus d'individuation plutôt qu'uniquement sur son substrat biophysique. Le cerveau n'y est pas un simple miroir réfléchissant l'espace-temps, mais un processus plastique en devenir évolutif constant. Un processus qui permet à la conscience réfléchie d'appréhender plusieurs épaisseurs temporelles et leurs intersubjectivités. Tous ces éléments montrent que penser le temps est

une démarche philosophique difficile dont l'homme ne peut absolument pas faire abstraction. C'est aussi poser un acte qui situe une possible atemporalité mais ne la vit pas, paraît même antinomique de l'identité humaine.

Pour conclure, si l'on s'en tient au paramètre temporel, on peut dire que le temps du cerveau, incluant des traitements continus et discontinus de l'information commence à être décrypté. En revanche, si l'on s'intéresse à la teneur qualitative et affective du temps psychologique et aux représentations mentales qui l'accompagnent, à ce que l'on pourrait appeler *le temps de la pensée*, on aborde un temps qualitativement singulier, un voyage dans le temps subjectif, une épaisseur de l'instant propre aux grandes émotions et créations où la permanence se substitue à l'irréversibilité.



BIBLIOGRAPHIE

- Abraham W.C. and Bear M.F. 1996. *Metaplasticity: the plasticity of synaptic plasticity*, *Trends in Neurosciences* 4.
- Ansermet F. et Magistretti P. 2004. *A chacun son cerveau*. Odile Jacob.
- Bliss T.V. and Lomo T. 1973. *Long-lasting potentiation of synaptic transmission in the dentate area of the anaesthetized rabbit following stimulation of the perforant path.*, *J Physiol.* 232(2),331-356.
- Block R.A. 1990. *Models of psychological time in Cognitive models of psychological time*, Block R.1-35.
- Cermakian N., Sassone-Corsi P. 2001. *Rythmes biologiques: les secrets d'une horloge*, *La Recherche*, 38, 38-42.
- Church R.M. and Broadbent H.A. 1990. *Alternative representations of time, number and rate*, *Cognition*, 37,55-81.

- Crick F. and Mitchison G. 1983. *The function of dream sleep*, *Nature*, 14-20, 304 (5922):111-114.
- Crick F. and Mitchison G. 1995. REM sleep and neural nets, *Behav Brain Res*, 69 (1-2), 147-55.
- Damasio A.R. 2002. *La conscience du temps*, *Pour la Science*, 302, 110-113.
- Davies P. 2002. Avant le big-bang, *La Recherche* 349, 32-36.
- Debono M.W. 1996. *L'Ère des Plasticiens* Aubin Editeur
- Debono M.W. 2002. *Conscience et dynamique chaotique*, 3^{ème} symposium du CEOPS.
- Debono, M.W. 2005. *La représentation cérébrale de l'action*, Journées Internationales de Posturologie patronnées par l'Université tor Vergata, Rome.
- Debono, M.W. 2007. *Le concept de plasticité: un nouveau paradigme épistémologique*. Dogma, février 2007.
- Giroux, P., Sirigu, *A Illusory movements of the paralyzed limb restore motor cortex activity*. Neuroimage 20 Suppl 1:S107-11, 2003.
- Gray C. and Singer W. 1989. *Stimulus specific neuronal oscillations in orientation columns of cat visual cortex*, *PNAS*, 86, 1698-1702.
- Hawking S. 1988. *Une brève histoire du temps*, Flammarion, Paris.
- Herbert W., 2000. *Rodolpho Llinás. A grand unification theory of the brain*, *US News World Rep*. 128, 68-69.
- Hopfield J.J. 1982. *Neural networks and physical systems with emergent collective computational abilities*. *PNAS* 79 (8), 2554-2558. 1996. Transforming neural computations and representing time, *PNAS* 93 (26), 15440-15444.
- Hopfield JJ and Brody CD. 2000. *What is a moment?: cortical sensory integration over a brief interval*, *PNAS* 97(25), 1319-1324; 2001. What is a moment? Transient synchrony as a collective mechanism for spatiotemporal integration, *PNAS* 98(3):1282-1287.
- Hopfield J.J., Feinstein D.I., Palmer R.G. 1983. *Unlearning' has a stabilising effect in collective memories*, *Nature* 14-20, 304 (5922):158-159.
- Katz B. 1966. *Nerve, muscle and synapses*. Mac Graw Hill, North Holland.
- Klein E. 1998. *La physique quantique*, Dominos, Paris.
- Libet B. 1983. *Time of conscious intention to act in relation to onset of cerebral activity (readiness-potential). The unconscious initiation of a freely voluntary act*, *Brain*, 106 (3), 623-642.
- Libet B. 1991. *Conscious vs neural time*, *Nature* 352, 6330, 27-28.

- Llinàs R. and Ribary U. 1993. *Coherent oscillation characterises dream state*, *PNAS*, 90, 2078–2081.
- Llinàs R. and Ribary U. 2001. *Consciousness and the brain. The thalamocortical dialogue in health and disease*, *Ann. NY Acad Sci.*929, 16675.
- Mairesse Y. 2003. *Attosecond synchronization of high harmonic soft X-rays*, *Science* 302, p 2540
- Maĳarenko V. and Llinàs R. 1998. *Exploratory determined chaotic phase synchronisation in a neuronal system*, *PNAS*, 95, 26, 15747–15752.
- Miall R.C. 1992. *Oscillations, predictions and time in Time, action and cognition*, Maĳar F., Ponthas V., Friedman W.J. Eds., 215–227.
- Pellionisz A. and Llinàs R. 1982. *Tensor theory of brain function: the cerebellum as a space-time metric*, lecture in Biomathematics, 445.
- Pöppel 1972. *Oscillations as possible basis for time perception*, in *The study of time*, J.T. Fraser, Springer Berlin, 219–241.
- Plautz et al. 1997. *Science* 278, 1632.
- Poe G.R., Nitz D.A., McNaughton BL. and Barnes C.A., 2000. *Experience-dependent phase-reversal of hippocampal neuron firing during REM-sleep*, *Brain Research* 855 (1), 176–180.
- Pribram KH. and Carlton EH. 1986. *Holonomic brain theory in imaging and object perception*, *Acta Psychol (Amst)*, 63 (1–3), 175–210.
- Prigogine I. 1980. *Temps, physique et devenir*, Masson, Paris.
- Prigogine I. et Stengers I. 1988. *Entre le temps et l'éternité*, Fayard, Paris.
- Ruhnau E. and Pöppel E. 1991. *A directional temporal zone in quantum physics and brain physiology*, *Int. J. of Theoretical Physics*, 30, 1083–1090.
- Schibler U. et Sassone-Corsi P. 2003. *Un réseau de pacemakers circadiens*. *Biofutur* 231, 27–30.
- Schrödinger E. 1986. *Qu'est-ce que la vie ?*, C. Bourgois, Paris.
- Thomson E. and Varela F.J. 2001. *Radical embodiment: neural dynamics and consciousness*, *Trends in Cognitive Sciences*, Vol. 5, 10, 418–425.
- Versace R. et Nevers B. 2001. *Sur les traces de la mémoire*, *La Recherche* 344, 92–95.

ANNEXE 1

PLASTICITE CEREBRALE

La plasticité du cerveau est très étendue. Elle concerne aussi bien le plan spatial que temporel. Ce qu'il est important de retenir, c'est: a) que la connectivité cérébrale est beaucoup plus complexe qu'elle n'avait été envisagée par les neuronistes de l'école de Ramon y Cajal (1911); b) qu'une *dynamique antagoniste* (mécanismes inhibiteurs-exciteurs, inducteurs-répresseurs, potentiateurs-dépresseurs) ou *ternaire* (récepteur-ligand-protéine modulatrice) s'illustre dès l'échelle neuronale (MacKay, 1990); c) que sans *le déterminisme des réseaux synaptiques*, les méandres du câblage neuronal conduiraient au chaos et à l'incoordination totale; 4) que *le cerveau produit et gère en permanence ce chaos déterministe* en fonction de l'environnement et des nouvelles expériences propres à l'individu. Décrivons quelques exemples caractéristiques: *Morphogenèse*: Certaines voies synaptiques sont directement déterminées par le développement (Diertelen-Lièvre et al., 1990) et mettent fortement en jeu la plasticité neuronale, puisqu'une expérience de courte durée entraîne des modifications profondes et durables des structures synaptiques. Des molécules morphorégulatrices (Edelman and Cunningham 1990) comme les protéines du cytosquelette MAP2 interviennent ainsi directement dans la morphogenèse neuronale ainsi que la facilitation des interconnexions entre neurofilaments et microtubules (Aoki and Siekevitz, 1982). La structure même des gènes montre de nettes discontinuités et ceux-ci ont des fonctions de régulation primordiales une fois les gènes exprimés, c'est à dire pendant le développement de l'individu. Le rôle des facteurs de transcription des protéines à homéodomaine dans la morphogenèse de structures et infrastructures (croissance axonale) cérébrales a en particulier montré que ces protéines sont également exprimées ou modifiées pendant le développement de l'adulte (Prochiantz, 1997, 2000). Ainsi, le cerveau est-il capable sous l'influence des stimuli de l'environnement de remodeler tout ou partie des connexions nerveuses essentielles. Cela a notamment été étudié pour ce qui concerne la plasticité du système visuel chez le chat et le singe (Hubel et Wiesel, 1962) où des périodes-clés de l'évolution ont été déterminées ainsi que des colonnes de dominance oculaire identifiées. Ces exemples pourraient être multipliés, car chaque fonction cérébrale fait intervenir un niveau d'intégration spécifique et élevé. Le cervelet, dont la structure est une des mieux connue, assure par exemple aussi bien le rythme des mouvements que l'apprentissage moteur. Il a une organisation corticale lamellaire dont la géométrie est parfaitement orchestrée par les cellules de Purkinje, leurs fibres afférentes et efférentes (Llinás et Sugimori, 1980). Le réseau cérébelleux constitué avec ses noyaux profonds et leurs projections, un système complexe ayant un répertoire de conductances ioniques étendu (Gardette et al., 1985), qui sous-tend aussi bien les phénomènes de LTD associés à l'apprentissage moteur (Ito, 2001) que des réseaux d'oscillateurs localisés dans l'olive inférieure. Les circuits cortico-nucléaires du cervelet pourraient fonctionner de manière analogue aux boucles thalamo-corticales qui régulent les informations provenant de l'ensemble du cerveau. L'ensemble, soutenu par une mémoire procédurale liée à certains types de mouvements et à la perception des coïncidences d'évènements, aboutit à une excellente coordination motrice dans l'espace et le temps (Ito, 1984). La plasticité cérébrale dans son ensemble est ainsi beaucoup plus grande qu'on le pensait, il y a encore une décennie. En effet, on savait classiquement que les neurones étaient les seules cellules à ne pas se reproduire, mais qu'en revanche les connexions synaptiques étaient très modulables, notamment jusqu'à l'adolescence. On sait à présent que la plasticité du réseau est très étendue chez l'adulte avec un très faible taux de neurones perdus chez le sujet âgé et des capacités accrues de repousse synaptique après lésion et/ou greffe de tissu (notamment embryonnaire). Des

cellules souches multipotentes ont récemment été identifiées dans le cerveau adulte (hippocampe et bulbe olfactif) du primate et de l'homme (Eriksson et al., 1988). Leur rôle est discuté, mais il n'est pas exclu qu'elles soient liées à une régénération neuronale au sein du système nerveux mature (y compris dans certaines régions corticales) et que l'apprentissage les stimule (Gould et al., 1999; Shors et al., 2001). L'étendue de la plasticité motrice après greffe ou stimulation visuelle est évoquée dans le texte avec les travaux de Sirigu (2003). Enfin, de nombreux modèles expérimentaux mimant les maladies neurodégénératives, tels les cultures de neurones ou les animaux transgéniques, donnent aujourd'hui des espoirs quant au traitement et à la récupération des fonctions sensori-motrices ou mnésiques après lésion. Ainsi, chez des souris présentant des signes cliniques associés à la pathologie Alzheimer (plaques séniles, surexpression de la protéine APP) voit-on clairement à côté des déficits mnésiques, une altération de la plasticité synaptique de la région hippocampique (Chapman et al., 1999).

Aoki C. and Siekevitz P. 1985. Ontogenetic changes in the cyclic adenosine 3'5'-monophosphate stimuable phosphorylation of cat visual cortex protein 2 (MAP2): Effect of normal and dark rearing and of exposure to light, *Journal of Neuroscience*, 5, 9, 2465-2483.

Chapman P.F., White G.L., Jones M.W., Cooper-Blacketer D., Marshall V.J., Irizarry M., Younkin L., Good MA., Bliss T.V., Hyman B.T., Younkin S.G., Hsiao KK. 1999. Impaired synaptic plasticity and learning in aged amyloid precursor protein transgenic mice, *Nature Neuroscience*, 2(3), 271-276.

Diertelen-Lièvre F., Duprat A.-M., Le Douarin N. 1996. La biologie du développement: sources et perspectives, *Médecine/Sciences*, 12, 67-75.

Edelman G.M. and Cunningham B.A. 1990. *Morphoregulatory Molecules*, Wiley, The Neurosciences Institute Publ. Ser.

Eriksson P.S., Perfilieva E., Bjork-Eriksson T., Alborn A.M., Nordborg C., Peterson D.A., Gage F.H., 1998. Neurogenesis in the adult human hippocampus, *Nature Med* 4(11),1313-1317.

Gardette, R., Debono, M.W., Dupont, J.L. and Crepel, F. 1985. Electrophysiological studies on postnatal development of intracerebellar nuclei neurons in rat cerebellar slices maintained in vitro. I/ Postsynaptic potentials; II/ Membranes Conductances. *Develop. Brain Res.* 19, 47-55 & 20, 97-106.

Gould E., Beylin A., Tanapat P., Reeves A., Shors T.J., 1999. Learning enhances adult neurogenesis in the hippocampal formation, *Nature Neurosci* 2(3), 260-5265.

Hubel D.H. and Wiesel T.N., 1962.. Receptive fields, binocular interaction and functional architecture in the cat's visual cortex, *J. Physiol.* (London) 160, 106-154.

Ito, M. 1984. *The Cerebellum and Neural Control*. New York: Raven, 1984.

Ito M. 2001. Cerebellar long-term depression: characterisation, signal transduction, and functional roles, *Physiol Rev.* 81(3):1143-1195.

Llinas R. and Sugimori M. 1980. Electrophysiological properties of in vitro Purkinje cell somata in mammalian cerebellar slices, *J. Physiol* 305, 171-195.

MacKay M. 1990. Agonist potency and apparent affinity: interpretation using classical and steady-state ternary-complex models, *Trends in Pharmacological Sciences*, 11.

Prochiantz A. 1997. Morphologic plasticity as a component of cognition. *Encephale*, 23, 15-18.

Prochiantz A. 2000. Early events in the development of the nervous system. *Bull. Acad Natl Med*, 184 (6), 1145-1152.

Râmon y Cajal S. 1911. *Histologie du système nerveux de l'homme et des vertébrés*. Vol. 2, Maloine, Paris.

Shors T.J., Miesegães G., Beylin A., Zhao M, Rydel T., Gould E. 2001. " Neurogenesis in the adult is involved in the formation of trace memories", *Nature* 410(6826),372-376.

ANNEXE 2

IMAGERIE CÉRÉBRALE

L'activité veille-sommeil ou les différentes tâches cognitives sont quantifiables par différentes techniques non invasives comme les EEG spectraux, la magnéto-encéphalographie (MEG) et l'imagerie fonctionnelle cérébrale (1). L'EEG et la MEG mesurent respectivement des variations du potentiel électrique et magnétique. Elles permettent de localiser les générateurs neuronaux, les aires de projection sensorielles ou motrices et la circulation de l'information dans le cerveau. Leur précision est plus temporelle (étude des rythmes et fréquences de décharge neuronales) que spatiale, comparé à la très haute résolution des méthodes d'imagerie anatomique ou fonctionnelle (résonance magnétique nucléaire - IRM - et tomographie par émission de positons - PET). Les techniques d'imagerie fonctionnelle cérébrale ont quant à elles une résolution spatiale beaucoup plus fine que les mesures électrophysiologiques. Elles mesurent l'hémodynamie (variations de débit sanguin régional) ou la consommation énergétique du cerveau (métabolisme glucidique) associées à une activité mentale et/ou cognitive. Bien que plus indirectes, elles ont l'avantage de permettre une visualisation précise des régions activées lors du déplacement d'un bras, d'un calcul mathématique ou de l'émotion suscitée par la reconnaissance du visage d'une personne connue. Les travaux récents associent MEG et imagerie fonctionnelle permettant une résolution temporelle inférieure à la milliseconde ! Ces techniques se complètent et évoluent notablement. Des études multipolaires utilisant des RMN en champ intense et des IRM dotés d'aimants très puissants (de 3 à 7 tesla) permettront sans aucun doute au centre Neurospin de favoriser l'émancipation des capacités cognitives du cerveau et de faire de grands progrès dans la compréhension de l'autisme ou des pathologies neurodégénératives au 21^{ème} siècle.

Renault B, Garnero, L. 1996. Les perspectives de l'imagerie fonctionnelle cérébrale électrique et magnétique, *Médecine/Sciences*, 12, 119-122.

Le Neurospin a été inauguré en France en 2006.

ILLUSTRATIONS

Toutes les photos sont de l'auteur sauf les figures suivantes dont les originaux sont référencés ci-dessous :

Figure 1: Synapse en 3D illustrant la communication entre les neurones dans le cerveau humain, sur la base de données scientifiques réelles. Image de Graham Johnson récompensée dans le cadre du [Concours de visualisation scientifique et technique](#) (site web de science mag.org) organisé aux Etats-Unis par le magazine *Science*.

Figure 2 : image du cerveau présentée sur le site : pages.videotron.com/aidant/page2.html

Figure 3 : [Les nymphes des eaux, Paul Delvaux \(1938\)](#) présenté sur le musée d'art virtuel de cgfa : <http://cgfa.sunsite.dk/d/delvaux2.jpg>

