

NEUROSCIENCES

comportements

mai.2012

CONSCIENCE ET NEUROSCIENCES (en construction)

Document très largement inspiré de : http://lecerveau.mcgill.ca/flash/d/d_12/d_12_p/d_12_p_con/d_12_p_con.html

PARTIE 2 : NEUROBIOLOGIE DE LA CONSCIENCE

“On ne ramènera jamais les manifestations de notre âme aux propriétés brutes des appareils nerveux pas plus qu'on ne comprendra de suaves mélodies par les seules propriétés du bois ou des cordes du violon nécessaires pour les exprimer” (Claude Bernard)

“Qu'y a-t-il de plus étourdissant que de s'apercevoir que c'est le fait même d'avoir une conscience qui rend possibles et même inévitables nos questions sur la conscience ?” (A. Damasio)

“Par ailleurs, peut-on parler de chimie de la conscience ? Cette appellation peut paraître provocatrice, mais il n'en est rien. Notre cerveau, en effet, se compose de cellules nerveuses, elles-mêmes composées de molécules et les communications synaptiques entre cellules nerveuses mettent en jeu des signalisations chimiques. Il existe donc une chimie du cerveau. Par ailleurs, on sait que nos états de conscience « changent » entre la veille et le sommeil et que l'on peut précipiter la transition vers le sommeil par des agents chimiques, comme les somnifères. Chacun sait également que lors d'une opération chirurgicale, le premier geste du médecin est de nous endormir par l'injection d'un anesthésique général qui nous fait perdre conscience. Le problème désormais posé aux neurobiologistes est d'examiner quels sont les systèmes de neurones qui possèdent la chimie particulière, par laquelle ils contrôlent nos états de conscience.” (Jean-Pierre Changeux)

DEFINITION

Qu'est-ce que la conscience ?

Une définition de Jean Pierre Changeux: «un «espace subjectif», un «milieu interne», un «espace de travail global» (Baars 1998) où les actions sont remplacées par des simulations, plans, buts & suivis d'actions, qui sont évalués d'une manière globale avec référence

- au monde extérieur,
- au soi & aux mémoires personnelles
- aux règles internalisées & aux conventions sociales...
- avec temporalité & réverbérations sur le soi de sa propre expérience »

Une première approche pour tenter de cerner ce phénomène à la fois si familier et si mystérieux est d'essayer de le définir par la négative. Autrement dit, quand n'est-on plus conscient ?

Ce peut être simplement quand on ferme les yeux : on perd alors notre expérience visuelle consciente. Ou quand on se fait arracher une dent sous anesthésie : c'est ici la conscience de la douleur qui disparaît. La conscience, c'est aussi ce que l'on perd lorsque l'on s'endort. Mais ici, c'est déjà moins simple puisque nous avons conscience de nos rêves. Ces derniers, malgré leur manque de cohérence ou leur côté fantaisiste, sont souvent vécus comme une expérience consciente intense. Ce serait donc plutôt lorsque nous atteignons les stades de sommeil profond que nous perdons réellement conscience. Et même dans ce cas, il serait plus juste de dire que nous avons alors très peu conscience, et non aucune conscience, car une mère peut entendre son enfant pleurer même durant son sommeil profond... Plusieurs caractéristiques de ce que nous appelons la conscience sont aussi progressivement perdues par les personnes souffrant de la "maladie d'Alzheimer". Celles-ci deviennent détachées de tout ce qui se passe autour et ne sont même plus sûr de leur propre identité. Voir quelqu'un dans le coma après un traumatisme cérébral a quelque chose d'encore plus troublant, parce qu'aucune manifestation consciente n'émane de ce corps pourtant vivant.

Si nous essayons de définir la conscience un peu plus directement, le premier problème qui se pose vient du fait qu'une expérience consciente n'est accessible qu'à la personne qui l'expérimente. Sans parler de la difficulté pour une personne d'exprimer verbalement avec clarté et fiabilité le contenu d'une expérience consciente subjective. C'est tout le problème de ce que l'on nomme les «qualia» ou encore la dimension phénoménologique de la conscience.

Un autre problème vient du fait que nous employons le mot conscience à différentes sauces. Cela constitue un obstacle de taille à son étude, bien que dans certains cas ces différences soient surtout des différences de degrés plutôt que de nature. Néanmoins, la confusion nous guette quand on parle de la conscience sans préciser à laquelle de ses nombreuses manifestations on veut faire référence. Car on peut utiliser le mot conscience pour désigner :

- - le fait de ne pas être endormi ou de ne pas tomber « sans connaissance »;
- - cet état qui peut être modifié par la prise de drogues ou par des troubles mentaux comme la dépression, l'anxiété généralisée, etc.;
- - le fait de porter attention à un stimulus externe particulier, comme à un obstacle qui se dresse devant nous, ou à un état mental comme un souvenir, une émotion, etc.;
- - la conscience de soi comme construction autobiographique (ou épisodique), qui nous donne le sentiment d'être la même personne que la veille;
- - notre capacité à nous diagnostiquer des intentions et des motivations suite à une introspection de nos comportements;
- - l'appréciation morale que l'on porte sur ces comportements et qui nous donne l'impression d'avoir un libre arbitre;

- - cette petite voix intérieure omniprésente mais qui ne représente pourtant qu'une infime proportion de nos processus cérébraux inconscients.

Comme si ce n'était pas encore assez compliqué, on parle aussi « d'élever la conscience » de nos concitoyens, face à des enjeux politiques par exemple. C'est ce que l'on nomme généralement la conscience morale. Elle se développe durant l'enfance, mais aussi chaque fois que le focus de l'attention passe de soi-même aux autres, à l'ensemble de l'espèce, à la planète toute entière, etc.

Nos connaissances sur ces différents sens du mot conscience sont aussi très inégales. Ainsi, plusieurs structures cérébrales contrôlant la conscience dans le sens de l'éveil sont bien connues. À l'opposé, la conscience comprise comme une expérience subjective particulière vient avec d'énormes problèmes à résoudre.

ARCHITECTURE NEURALE DE LA CONSCIENCE

Parler de la conscience au niveau cérébral, c'est d'abord se situer dans une **perspective philosophique matérialiste**, c'est-à-dire considérer que c'est le cerveau, et donc la matière, qui engendre l'esprit humain.

Ce n'est pas d'hier que le caractère subjectif de la conscience humaine intrigue et fascine. Bien avant qu'on parle de « problème difficile » de la conscience, nombre de philosophes avaient tenté d'expliquer comment la conscience subjective s'insère dans le monde objectif. D'où les multiples traditions philosophiques avec chacune leur conception du rapport entre le corps et l'esprit, conceptions qui découlent évidemment d'une vision plus large du monde que mettent de l'avant ces philosophies.

Comme il serait trop long de raconter ici l'histoire de chacune de ces traditions philosophiques, nous nous contenterons d'en résumer quatre qui ont eu de tout temps leurs défenseurs : l'idéalisme, le dualisme, le matérialisme et le mystérisme.

1. L'option idéaliste pose qu'il n'y a rien d'autre dans le monde que des expériences conscientes. Le monde matériel est donc considéré comme une simple illusion de notre conscience.

Dans sa forme radicale proposée par George Berkeley au XVIIIe siècle, l'idéalisme règle du coup le difficile problème de l'interaction matière/esprit puisque tout est esprit et qu'il n'y a plus de matière. Mais cela constitue un tel affront au sens commun que déjà plusieurs de ses contemporains rejetaient cette position. Une position qui va à l'encontre du réalisme à la base de toute la méthode scientifique mais qui est toutefois difficile à disqualifier complètement : toute preuve concrète du monde physique peut toujours être transformée en une impression de ce monde. De plus, ses avantages philosophiques sont séduisants et ont influencé toute une tradition de penseurs (Hegel, Schopenhauer, Husserl, Bergson, etc).



George Berkeley (1685-1753)

2. Ceux qui ne veulent rejeter ni l'existence du monde matériel, ni l'existence de l'esprit se réclament de la tradition dualiste. Pour eux, il existe tout simplement deux mondes, celui de la matière et celui de l'esprit. Les dualistes doivent alors expliquer comment une vie de l'esprit est possible dans un corps de chair. Se pose alors la question, très difficile pour le dualisme, de l'interaction possible entre ces deux réalités.

René Descartes pensait que les échanges entre le corps matériel et l'âme immatérielle se faisaient par la glande pinéale. Descartes avait en effet noté que cette structure semblait la seule à n'être pas bilatérale dans le cerveau, mais bien centrale et unique. Connaissant aujourd'hui l'importance de la glande pinéale pour l'horloge biologique humaine, cela peut sembler quelque peu farfelu, mais à l'époque de Descartes c'était une solution honnête à une question cruciale qui demeure le talon d'Achille des options dualistes.

3. La position matérialiste, déjà défendue dans l'Antiquité par Démocrite, Épicure ou Lucrèce, affirme qu'il n'y a rien d'autre dans le monde que de la matière. À l'instar de l'idéalisme, il s'agit donc d'un monisme (position qui n'admet l'existence que d'une seule substance), mais la substance unique est ici la matière. Par conséquent, la conscience subjective n'est que le produit des interactions neuronales de notre cerveau. Pour les tenants de sa version la plus radicale, quand nous aurons décrit le fonctionnement de tous les processus cérébraux à l'origine des différentes composantes de la conscience, nous aurons dit tout ce qu'il y a à dire sur celle-ci.



Démocrite (vers 460-370 av. J.-C.)

4. L'option mystérieuse plaide pour sa part qu'il n'y a probablement pas de solution à ce problème et que la conscience restera pour nous toujours un mystère.

Pour les tenants de cette position, le vertige que l'on ressent face au problème difficile de la conscience pourrait être dû aux capacités cognitives restreintes de notre cerveau. Nous serions ainsi incapables de nous représenter comment l'activité neurale peut produire un sentiment subjectif pour les mêmes raisons qu'il nous est impossible de retenir 100 chiffres dans notre mémoire de travail ou de visualiser un espace à 7 dimensions : à cause des limites cognitives de notre outil de pensée.

Les critiques formulées à l'endroit de chacune de ces options ont amené leurs défenseurs à raffiner chacune d'elles, ce qui a donné lieu à de nombreuses variantes, en particulier pour le dualisme et le matérialisme.

Parler de la conscience au niveau cérébral, c'est aussi reconnaître que **c'est l'activité des neurones qui est à l'origine de tous nos processus mentaux comme l'apprentissage**, la mémoire, la perception, le langage, etc. Et la conscience, qui émerge en quelque sorte de toutes les autres propriétés du cerveau, ne fait donc pas exception à cette règle.

La conscience est un :

- «phénomène, réel, naturel et biologique, littéralement localisé dans le cerveau» (Revonsuo 2001)
- «entièrement causé par des processus neurobiologiques et réalisé dans des structures du cerveau»...mais «le trait essentiel que nous devons expliquer est la subjectivité unifiée et qualitative» (Searle 2000)

Vers le milieu du XXe siècle, on vit plusieurs figures marquantes de disciplines comme la psychologie, l'informatique, la linguistique, l'anthropologie, les mathématiques et la neurobiologie se réunir lors de colloques pour tenter de mettre en commun leurs connaissances. Leur but ? Accoucher d'une nouvelle science interdisciplinaire capable de comprendre l'esprit humain dans ses multiples facettes. Vaste programme...Ce qu'on a appelé les « **sciences cognitives** », dans la foulée de ces rencontres, vise donc à mettre en commun les données de nombreuses disciplines afin de mieux comprendre des phénomènes aussi divers que la perception, le langage, le raisonnement ou la conscience.

Avant de présenter les grands courants au sein des sciences cognitives, il est bon de revenir un peu en arrière pour rappeler le contexte de leur émergence. La question du fonctionnement de l'esprit humain et de son rapport avec le cerveau et le corps ne date pas d'hier, et de nombreuses approches philosophiques ont été proposées au fil des siècles. De sorte qu'au XIXe siècle et au début du XXe, il existait une tradition de recherche en psychologie appelée structuralisme. Représentés par des chercheurs comme Wilhelm Wundt et Edward B. Titchener, les structuralistes utilisaient l'introspection pour tenter de décrire les composantes élémentaires de l'esprit humain. Une perception sensorielle reposait par exemple pour eux sur la structure des associations entre de nombreuses sensations (d'où le nom de "structuralisme"). En décrivant les combinaisons possibles de ces éléments, les structuralistes pensaient pouvoir en déduire des lois aussi générales et puissantes que celle du monde matériel. Outre le dualisme implicite de cette approche, celle-ci fut critiquée pour la difficulté de vérifier expérimentalement l'introspection qui était à la base du structuralisme. Ainsi naquit un mouvement radicalement opposé au structuralisme : le behaviorisme. Pour ses pionniers comme John B. Watson et B. F. Skinner, on ne pouvait bâtir une approche scientifique de la psychologie sur des états subjectifs de nature essentiellement privée. Au contraire, cette nouvelle psychologie devait être basée uniquement sur l'étude expérimentale du comportement (d'où le nom qui vient de « behavior », comportement en anglais), et non plus sur les jugements individuels relatifs à nos sentiments et nos états d'âme.

Parler du cerveau et de la conscience nous oblige aussi immédiatement à parler de l'inconscient. Le cerveau possède en effet une multitude de circuits spécialisés qui décodent à tout moment différents aspects de notre environnement sans que nous en ayons conscience. De la très grande majorité de nos comportements se font automatiquement sans que l'on ait conscience d'initier chaque geste. Même chose pour notre langue maternelle dont on utilise correctement la grammaire sans même nous en rendre compte. Finalement, certaines personnes souffrant de lésions cérébrales sont capables d'effectuer correctement des tâches sans en avoir conscience. En bout de ligne, force est d'admettre que la très grande majorité de notre vie est réglée par des circuits cérébraux inconscients. Malgré cela, **le flux de la conscience demeure omniprésent dans notre vie de tous les jours. Et comme nous allons le voir, ces états conscients sollicitent de vastes régions cérébrales.**

CARTOGRAPHIE CÉRÉBRALE DES ÉTATS DE CONSCIENCE

Généralités

Présentons donc d'abord quelques grandes régions du cerveau qui semblent particulièrement impliquées dans le phénomène de la conscience.

D'abord la formation réticulée, dont le niveau d'activité influence notre état de vigilance, de veille et de sommeil. Ensuite le thalamus, la gare de triage de l'information en provenance du reste du corps. Et finalement le cortex, dont l'importance est cruciale pour toutes les formes de perception et de contrôle des mouvements volontaires.

La substance réticulée Organisation interne et Fonctions

a) - Organisation interne

La substance réticulée, spécialement abondante dans le tronc cérébral, n'est cependant qu'un segment du « système réticulaire », qui s'étend depuis la moelle épinière et dans le tronc cérébral, puis atteint le thalamus, et projette ses voies les plus hautes sur la face profonde du cortex du cerveau. Cette dernière portion constitue le système réticulaire activateur ascendant (SRAA) (éveil cortical).

Au niveau de la moelle épinière, la substance réticulée est représentée par la lame VII de Rexed (lame des interneurons). Elle est appelée, à ce niveau, substance intermédiaire centrale. Ce système poly - synaptique très ancien, est présent dès les vertébrés inférieurs. C'est une structure archéo-spinale. (in Bossy - Guérin. Neuro - anatomie Springer - Verlag p. 119).

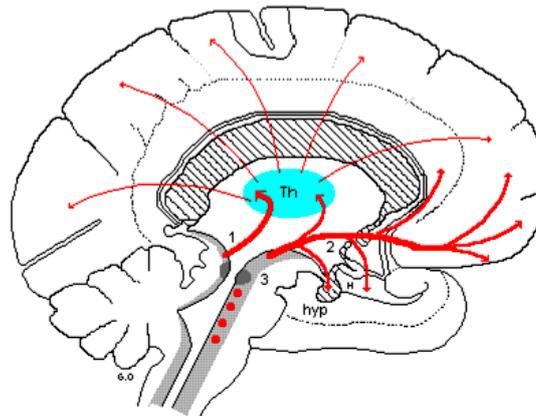
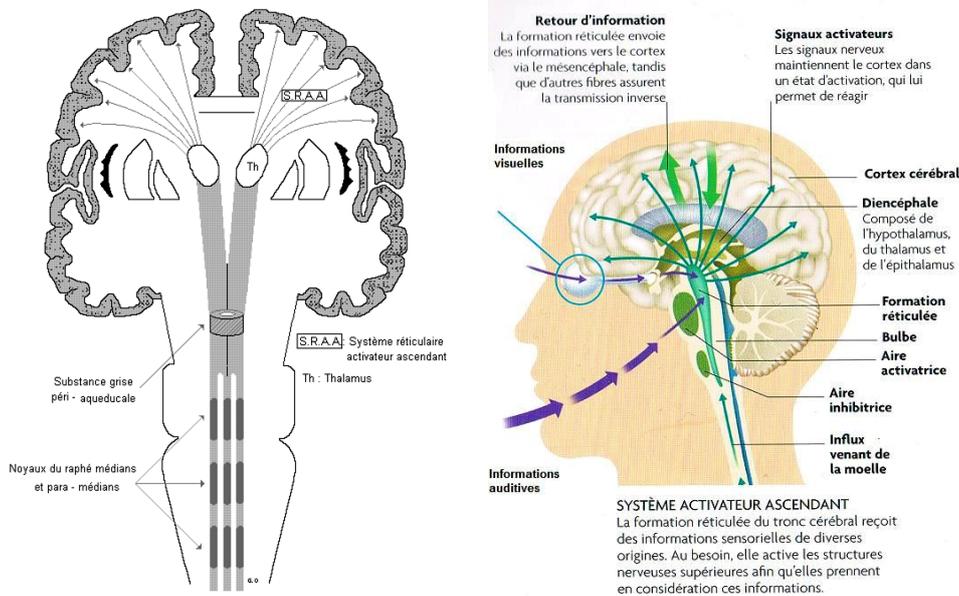
b) - Fonctions

Par ses neuro - transmetteurs, la réticulée assure la source et la régulation de l'énergie synaptique non spécifique, mais intervenant dans les systèmes moteurs, sensitifs, sensoriels et associatifs. Au niveau du Tronc cérébral, les fonctions de la substance réticulée sont spécialement importantes dans les activités somatiques et végétatives :

- Du point de vue moteur la réticulée est un centre régulateur de l'activité motrice par modulation de la transmission synaptique. Certains territoires de la réticulée (réticulée pontique) jouent un rôle de facilitation sur les voies motrices. D'autres territoires (réticulée de la moelle allongée) exercent une action inhibitrice sur les mêmes voies.
- Du point de vue sensitif et sensoriel, la substance réticulée est activatrice des perceptions. Elle joue ainsi le rôle d'un amplificateur. Les sensations sont ainsi amplifiées avant d'arriver au thalamus et au cortex.

- Du point de vue de la transmission de la douleur, la rétículoée contient plusieurs noyaux qui assurent le contrôle supra-segmentaire de la douleur et dont l'action antalgique descendante est due à la sécrétion de sérotonine. Ces noyaux s'appellent, au niveau pontique et bulbaire, noyaux du raphé, noyaux du raphé et para-médians, et au niveau du mésencéphale, substance grise péri-aqueducale (origine de la voie sérotonique descendante dont l'action est antalgique). Ces noyaux sont aussi décrits par leur nomenclature neuro-chimique de B1 à B9.
- Du point de vue psychique, elle assure la régulation et le contrôle gradué de la vigilance et du mécanisme du sommeil. Elle est aussi responsable des états comateux des traumatismes crâniens.

Globalement elle joue un rôle important, par régulation de la vigilance et des sensations douloureuses.



- 1 : Tractus tegmental central
- 2 : Faisceau médian du télencéphale
- 3 : Substance réticulée (ou Formation réticulaire)

La substance réticulée

Il s'agit d'une très longue bande de substance grise, disposée profondément en trois colonnes (médiane et para - médianes ou latérales), selon l'axe vertical du tronc cérébral. Elle est formée de nombreux petits neurones connectés entre eux réalisant un réseau plexiforme, d'où le nom de substance réticulée. Elle contient plusieurs noyaux particuliers, en situation médiane et para-médiane, dans la moelle allongée, le pont et le mésencéphale. On distingue ainsi :

au niveau de la moelle allongée : les noyaux du raphé médians et para-médians et les noyaux giganto-cellulaires (ou magno - cellulaires).

au niveau du pont : la continuation des noyaux du raphé

au niveau du mésencéphale : la substance grise péri-aqueducale.

Ces derniers noyaux sont impliqués dans la neurophysiologie de la douleur. La partie supérieure de la substance réticulée atteint le thalamus au niveau de ses noyaux non-spécifiques, dont les implications physiologiques concernent la vie végétative, l'affectivité, la mémoire et l'éveil de l'activité corticale. Cette portion haute de la substance réticulée constitue le Système réticulaire activateur ascendant (SRAA). Il faut noter ici que l'activité de la formation réticulée, tout comme celle des aires sensorielles primaires, semble être nécessaire mais non suffisante pour une expérience consciente plus élaborée. Cet autre niveau est atteint avec ce que plusieurs appellent la conscience primaire, c'est-à-dire un état de veille où nous sommes en relation avec notre environnement « ici et maintenant ». À la suite des travaux de Bjorn Merker, il semble que le tronc cérébral joue un rôle plus important qu'on ne l'aurait cru dans cette conscience primaire.

Noyaux et faisceaux dans la réticulée :

- 1 - Tractus tegmental central : faisceau dense de fibres d'association provenant du toit du mésencéphale et du noyau rouge, et atteignant le thalamus, d'une part, et l'olive d'autre part.
- 2 - Faisceau médian du télencéphale : voie réticulaire poly-synaptique qui relie le mésencéphale au lobe limbique et aux aires pré-frontales. Il véhicule des fibres noradrénergiques, dopaminergiques et sérotoninergiques. Il est donc ergotrope.
- 3 - Le locus ceruleus : situé en arrière du Tractus tegmental central. C'est un noyau adrénergique, projetant sur tout le système nerveux. Il est activateur dans les situations d'alerte et de vigilance.

4 - Les noyaux du raphé : agrégation de noyaux réticulaires, sur la ligne médiane, présents sur toute la hauteur du tronc cérébral. Ils produisent de la sérotonine (5-HT). Ils ont un rôle inhibiteur dans la transmission de la douleur, ainsi que les noyaux suivants.

5 - Les noyaux para-médians et magno-cellulaires, au niveau bulbaire.

6 - La substance grise péri-aqueducule, au niveau mésencéphalique.

Parmi les noyaux les plus importants du tronc cérébral impliqués dans le système d'éveil, on retrouve donc :

- La formation réticulée mésencéphalique, qui se projette massivement sur les noyaux thalamiques, qui vont ensuite influencer tout le cortex. Son rôle en est un de désynchronisateur du cortex au sens large, favorisant l'éveil mais aussi le sommeil paradoxal. Il s'agit de l'ancien « système réticulé activateur ascendant » qui est maintenant considérée comme une simple partie du réseau de l'éveil.
- Les noyaux mésopontins cholinergiques, qui se projettent également sur le thalamus. L'acétylcholine produite par ces noyaux exerce une double action : elle diminue l'activité du noyau réticulaire thalamique appartenant au système du sommeil ; et elle active les neurones thalamocorticaux impliqués dans l'éveil.
- Les noyaux réticulés bulbaire magnocellulaires, dont les neurones sont cholinergiques ou à aspartate/glutamate, est à l'origine à la fois de la voie réticulo-thalamo-corticale et de la voie réticulo-hypothalamo-corticale. Ses projections vont donc sur la formation réticulée mésencéphalique et les noyaux mésopontins cholinergiques ainsi que sur le télécéphale basal et l'hypothalamus postérieur.
- Les noyaux du locus coeruleus, situés dans la partie dorsale du pont, et dont les projections noradrénergiques influencent des structures cérébrales comme le thalamus, l'hippocampe et le cortex. L'activité du locus coeruleus est maximale chez le sujet éveillé et actif, réduite durant un éveil calme, encore plus réduite en sommeil lent, et complètement abolie en sommeil paradoxal.
- Les noyaux sérotoninergiques du raphé antérieur (ou supérieur), qui projettent de la sérotonine vers l'hypothalamus et le cortex. Actifs pendant l'éveil, l'effet global des noyaux du raphé antérieur est éveillant et, contrairement aux autres groupes aminergiques, leur lésion non seulement n'entraîne pas de somnolence, même passagère, mais provoque une insomnie prolongée de plusieurs jours. Cette apparente contradiction viendrait du fait que ce système, qui innerve l'hypothalamus antérieur au niveau de l'aire préoptique et l'horloge circadienne située dans le noyau suprachiasmatique, semble mesurer la durée et l'intensité de l'éveil. L'éveil pourrait ainsi provoquer éventuellement sa propre inhibition par rétroaction négative. En d'autres termes, le fait d'être éveillé durant un certain temps conduit au sommeil.

L'ensemble de ces structures du tronc cérébral reçoit des collatérales des afférences sensorielles et végétatives qui participent ainsi au maintien de leur activité. Il s'agit d'un réseau complexe dont l'excitation pharmacologique d'un élément amène l'activation de tous les autres. Cette organisation redondante explique aussi pourquoi l'inactivation d'un seul système est suivie, après quelques jours, d'une récupération complète de l'éveil. Aucune des structures décrites, prise isolément, n'est donc indispensable à l'activation corticale.

Le thalamus organisation interne

Damasio désigne pour sa part ce niveau de conscience sous l'expression de « conscience noyau ». Celle-ci dépendrait selon lui principalement du cortex cingulaire et des noyaux intralaminaires du thalamus. Des expériences ont en effet démontré que la destruction bilatérale de la partie centromédiane des noyaux intralaminaires du thalamus abolit la conscience, produit un coma, ou cause d'autres états proches de la mort cérébrale. De plus, cette région du thalamus est également l'un des principaux sites d'action des substances anesthésiantes et des drogues anti-psychotiques. Ce n'est pas d'hier que le thalamus est impliqué dans des modèles de la conscience. Déjà dans l'une des premières hypothèses sur la conscience, celle de Francis Crick en 1984 et de son hypothèse du projecteur thalamique ("thalamic searchlight hypothesis", en anglais), le thalamus contrôlait quelle région du cortex devenait le point focal de la conscience. Une idée semblable, mais plus sophistiquée, était reprise plus récemment par Rodolfo Llinas qui fait l'hypothèse que les oscillations de certains neurones thalamiques servent en quelque sorte de rythme de base sur lequel se synchronisent les oscillations corticales des différentes modalités sensorielles pour former une image unifiée de l'environnement. Un peu comme un chef d'orchestre qui donne la mesure à ses musiciens (voir l'encadré). Une solution originale au problème de liaison ou, selon l'expression anglaise consacrée, du « binding problem ».

Les interactions thalamo-corticales sont impliquées dans la génération des oscillations neuronales à travers différentes régions du cortex. En ce sens, le thalamus agit un peu comme le chef d'orchestre d'une symphonie dont les musiciens seraient répartis dans l'ensemble du cortex. Il ne joue pas à leur place, mais les coordonne et leur impose une cadence. Sans le thalamus, le cortex pourrait sans doute avoir des îlots de synchronie, mais il ne serait pas capable de lier les différentes propriétés d'une perception en un concept cohérent.

Cette métaphore aide aussi à comprendre pourquoi il est vain de rechercher un quelconque siège ou centre de la conscience dans le cerveau. Le chef d'orchestre thalamique a beau imposer son rythme, celui-ci ne serait rien sans les musiciens corticaux qui interprètent chacun leur partition sensorielle. C'est de la coordination de tout cela que naît la cohérence de la symphonie ou, si l'on veut, de l'objet de conscience.

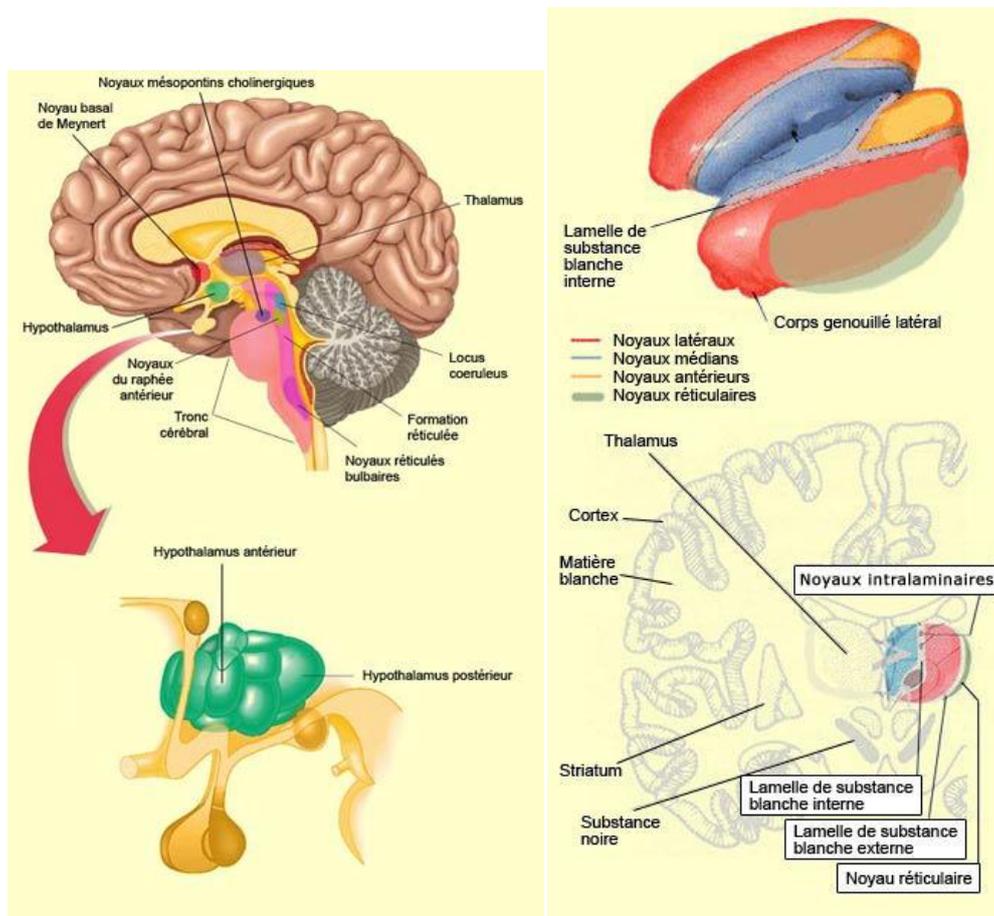
Le thalamus est très bien situé pour contrôler les inputs qui vont au cortex. Parmi les différents noyaux thalamiques, le noyau réticulaire est connu pour exercer une modulation inhibitrice sur les autres noyaux sensoriels spécifiques du thalamus. Il contribue ainsi à la sélection des inputs sensoriels susceptibles d'atteindre le cortex, et donc notre conscience.

Il contribue ainsi à ce que l'on appelle les « systèmes d'interruption attentionnels ». De tels circuits nerveux thalamiques sont donc capables de favoriser un input particulier au détriment de plusieurs autres. C'est le cas par exemple d'un stimulus ayant une forte signification pour quelqu'un (comme son propre nom par exemple) qui réussit à se frayer un chemin à travers de nombreux autres stimuli auditifs et atteindre ainsi la conscience de cette personne.

À ce type d'activation « de bas en haut » qui serait sous contrôle du tronc cérébral, de l'amygdale ou encore les systèmes associés à la perception de la douleur, on oppose un autre type d'activation dite « de haut en bas » qui serait sous contrôle des fonctions exécutives du cortex frontal et opérerait selon certains auteurs par l'entremise du cortex cingulaire antérieur.

Les interactions thalamo-corticales sont impliquées dans la génération des oscillations neuronales à travers différentes régions du cortex. En ce sens, le thalamus agit un peu comme le chef d'orchestre d'une symphonie dont les musiciens seraient répartis dans l'ensemble du cortex. Il ne joue pas à leur place, mais les coordonne et leur impose une cadence. Sans le thalamus, le cortex pourrait sans doute avoir des îlots de synchronie, mais il ne serait pas capable de lier les différentes propriétés d'une perception en un concept cohérent.

Cette métaphore aide aussi à comprendre pourquoi il est vain de rechercher un quelconque siège ou centre de la conscience dans le cerveau. Le chef d'orchestre thalamique a beau imposer son rythme, celui-ci ne serait rien sans les musiciens corticaux qui interprètent chacun leur partition sensorielle. C'est de la coordination de tout cela que naît la cohérence de la symphonie ou, si l'on veut, de l'objet de conscience. Le thalamus est souvent comparé à une gare d'aiguillage parce que tous les signaux sensoriels (excepté ceux de l'olfaction), doivent y faire escale avant d'atteindre le cortex. Le cortex envoie lui aussi de nombreuses connexions en retour vers le thalamus. La plupart des noyaux du thalamus sont des noyaux dits «spécifiques» parce que leurs neurones font des connexions à une région relativement circonscrite du cortex (par exemple, le corps genouillé latéral dont les neurones projettent au cortex visuel primaire).



http://fr.wikipedia.org/wiki/Thalamus_humain

Le thalamus possède également des noyaux «non spécifiques» qui envoient des projections diffuses dans de vastes régions corticales. Les noyaux intralaminaires, situés dans la lamelle de substance blanche interne, sont un bon exemple de noyau non spécifique. Pour compléter cette vue d'ensemble du thalamus, ajoutons qu'un seul noyau, le noyau réticulaire qui enveloppe le thalamus dans sa partie latérale, n'envoie pas de projection directement au cortex. Il participe toutefois aux boucles de rétroaction thalamo-corticale en recevant des inputs du cortex et en envoyant des outputs au noyau dorsal du thalamus. Ces « boucles thalamo-corticales » en sont venues à jouer un rôle important dans pratiquement toutes les théories neurobiologiques qui tentent d'expliquer les états de conscience supérieurs. Car les niveaux de conscience inférieurs dont on vient de parler ne sont en quelque sorte que des conditions préalables aux niveaux supérieurs de la conscience humaine, ceux de la conscience réflexive et de la conscience de soi.

La conscience réflexive, cette impression que « c'est moi qui perçois », est souvent présentée comme condition nécessaire à la conscience de soi, c'est-à-dire le sentiment d'être soi-même et pas un autre. Cette dimension autobiographique implique que nous puissions nous représenter des expériences conscientes dans le passé ou le futur, et nécessite donc la contribution de la mémoire et de nos fonctions supérieures permettant la conceptualisation abstraite et la planification. On peut donc s'attendre à ce que les régions cérébrales reconnues pour être impliquées dans ces fonctions, en particulier dans les lobes frontaux et pariétaux, soient sollicitées par cette conscience de soi. Et c'est ce que montrent effectivement certaines études qui se sont penchées spécifiquement sur cette question.

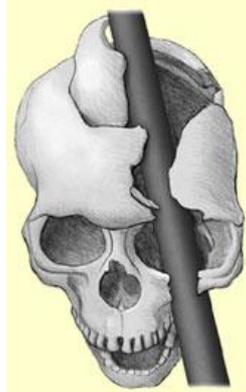
Conscience et cortex préfrontal

À partir de là, des auteurs comme Damasio distinguent une forme de conscience très primitive qu'il nomme le proto-soi et qui correspond davantage à une perception d'instant en instant de l'état émotionnel interne du corps. Cet état est associé à l'activité de structures comme la formation réticulée, l'hypothalamus ou les aires somatosensorielles. La formation réticulée est d'ailleurs aussi associée à la conscience dans le sens minimal de l'éveil. La protubérance, les noyaux du raphé et le locus coeruleus sont aussi des structures impliquées dans le simple maintien de l'éveil.

Pour qu'il y ait conscience, il semble donc qu'il doive y avoir échange ou résonance entre différentes régions du cerveau. On le voit, les phénomènes conscients n'émergent pas d'un endroit unique dans le cerveau mais sont le fruit d'un système impliquant de multiples régions cérébrales. D'ailleurs, quand le cerveau d'un individu subit des lésions localisées, sa conscience peut être modifiée, mais elle s'évanouit rarement complètement.

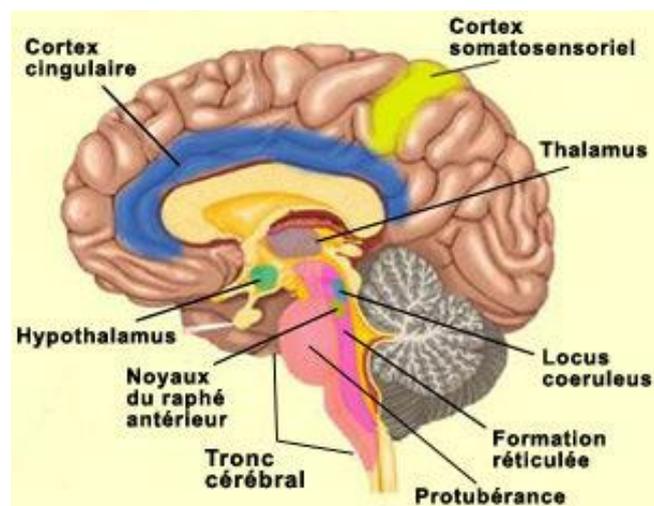
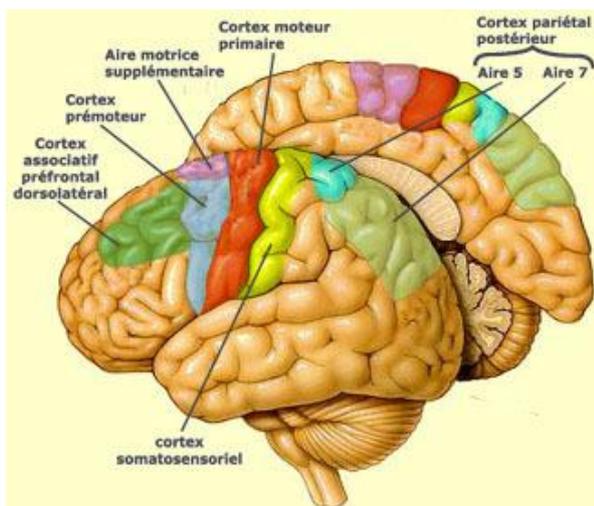
La conscience ne semble également surgir que lorsque des aires dites «supérieures» comme le cortex frontal, qui est relié aux circuits de l'émotion et de la prise de décision, sont activées.

En avant des lobes frontaux se trouvent les lobes préfrontaux qui reçoivent d'innombrables connexions des autres régions du cerveau humain. Les voies visuelles ventrales et dorsales en provenance des lobes temporaux et pariétaux y aboutissent, pour ne citer que celles-là. Il est difficile de définir clairement le rôle du cortex préfrontal. Mais il semble être impliqué dans la détermination de la séquence temporelle nécessaire pour une action donnée. Les patients ayant souffert d'une lésion au cortex préfrontal à qui l'on demande de reproduire une série de mouvements ont par exemple tendance à reproduire les bons mouvements mais dans le mauvais ordre. Dans des tests où on leur demande de montrer différents usages pour un objet donné, ils font preuve d'une grande rigidité comportementale et une répétition excessive des comportements. En se cantonnant à l'usage le plus commun de l'objet, c'est comme s'ils échouaient à inhiber cet usage le plus commun pour laisser venir les autres. Ces personnes aux lobes préfrontaux endommagés, comme le célèbre cas de Phineas Gage (voir la figure ci-dessous), peuvent aussi réagir de manière stéréotypée à la vue d'un objet, même si le contexte social est inapproprié. À la vue d'une brosse à dent, ils peuvent par exemple la prendre et se mettre à se brosser les dents, même s'ils sont chez quelqu'un d'autre et que la brosse ne leur appartient pas. Quand le caractère déplacé de leur comportement leur est souligné, ils deviennent confus ou inventent simplement une histoire justifiant leur comportement. Parce qu'ils sont ainsi à la merci des moindres déclencheurs environnementaux, les personnes ayant un déficit aux lobes préfrontaux ont beaucoup de difficulté à formuler des plans et à les suivre. Ils peuvent aussi avoir des problèmes de mémoire quand la remémoration implique une stratégie de recherche. Et ils manquent bien souvent de spontanéité, en plus d'être plutôt indifférents à soi-même et aux autres. Et malgré tout, leur intelligence générale est intacte, de sorte qu'ils peuvent répondre correctement à des questions théoriques ou factuelles, mais ne vont pas souvent initier une conversation ou demander de l'information.



Le 13 septembre 1848, un ouvrier américain des chemins de fer, Phineas Gage, eut le crâne traversé par une barre de fer suite à une explosion. Contre toute attente, Gage se remit de son accident, mais son comportement changea radicalement. L'étude de ses lésions permit de mieux comprendre les fonctions du lobe frontal. Source: Joan M.K. Tycko. http://fr.wikipedia.org/wiki/Phineas_Gage

Le cortex préfrontal est la partie antérieure du cortex du lobe frontal du cerveau, située en avant des régions prémotrices. Cette région est le siège de différentes fonctions cognitives dites supérieures (notamment le langage, la mémoire de travail, le raisonnement, et plus généralement les fonctions exécutives). C'est aussi la région du goût et de l'odorat. C'est l'une des zones du cerveau qui a subi la plus forte expansion au cours de l'évolution des primates jusqu'aux hominidés.



Le cortex moteur est situé à l'arrière du lobe frontal, juste avant le sillon central qui sépare le lobe frontal du lobe pariétal. On subdivise le cortex moteur en deux grandes aires, l'aire 4 et l'aire 6. L'aire 4, que l'on désigne aussi comme le cortex moteur primaire, forme une mince bande qui longe le sillon central alors que l'aire 6 s'étend immédiatement en avant de l'aire 4. L'aire 6 est plus large et se subdivise encore en deux sous-régions distinctes (aire prémotrice et aire motrice supplémentaire).

Tout état conscient est un phénomène global impliquant l'activation de nombreuses régions du cerveau. Cela étant dit, on connaît certaines structures cérébrales participant davantage à certains types de phénomènes conscients.

Ainsi, l'aspect "contrôle volontaire et donc conscient du mouvement" et l'aspect "perception consciente des propriétés d'un objet ou de ses qualia" impliquent l'activation de différentes régions cérébrales. Dans la méditation axée sur la relaxation par exemple, ces deux aspects tendent d'ailleurs à se dissocier, avec un sentiment moindre de l'expérience du contrôle moteur conscient chez le sujet mais une augmentation de son expérience sensorielle.

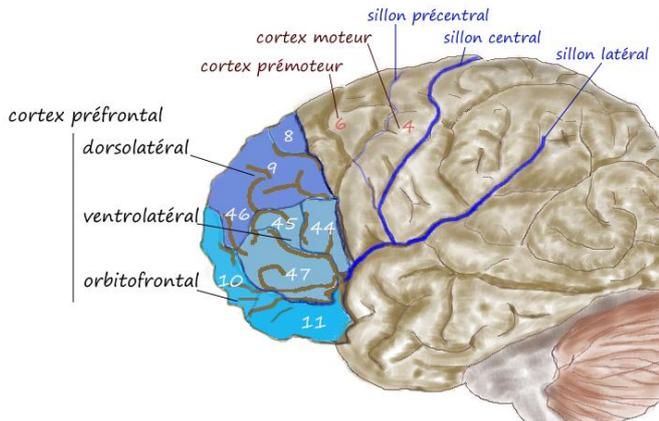
Les expériences d'imagerie cérébrale sur les états méditatifs confirment cette expérience subjective au niveau cérébral en montrant par exemple une augmentation d'activité dans l'hippocampe, le lobe pariétal antérieur et le lobe occipital, des régions reconnues comme étant actives dans le traitement de l'information visuelle et somatosensorielle.

Dans les années 1940, Wilder Penfield a effectué plusieurs opérations pour enlever des foyers épileptiques chez des patients anesthésiés localement et donc conscients durant l'opération. Avant de procéder à l'excision d'une zone corticale, Penfield appliquait des stimulations électriques à différents endroits sur le cortex pour être certain de ne pas enlever de régions importantes impliquées dans la

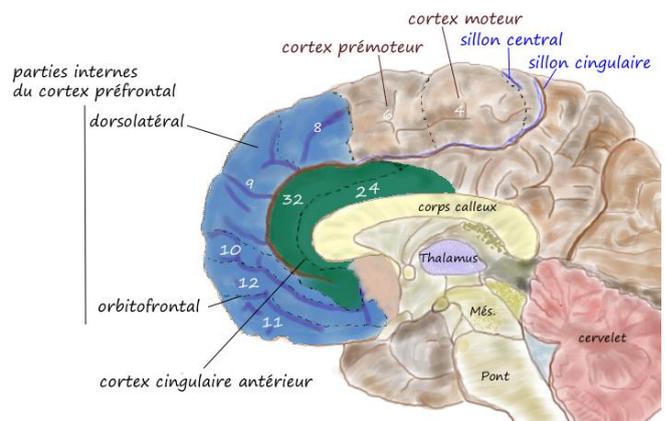
parole par exemple. Lorsqu'il stimulait ainsi le cortex moteur primaire de ces patients, les membres correspondants bougeaient, mais les patients affirmaient que ces mouvements étaient involontaires et non intentionnels.

Ces expériences ont donc clairement démontré qu'en ce qui a trait aux mouvements, leur aspect volontaire ne dépend pas du cortex moteur primaire.

L'aire prémotrice et l'aire motrice supplémentaire, quant à elles, sont situées juste en avant du cortex moteur primaire. L'activation de certains groupes de neurones de ces régions produit des mouvements plus spécifiques de nos membres. Mais encore ici, on est loin de pouvoir affirmer que ce sont ces régions qui « décident » d'effectuer tel ou tel mouvement.



Vue latérale du cortex préfrontal, face externe de l'hémisphère gauche



Vue médiale du cortex préfrontal

Grâce aux techniques d'imagerie cérébrale, on peut aussi voir les étapes qui mènent à l'émergence d'une image mentale consciente. Par exemple, quelles régions du cerveau sont sollicitées en premier, et quelles sont les autres qui s'activent ensuite pour avoir une perception visuelle consciente ?

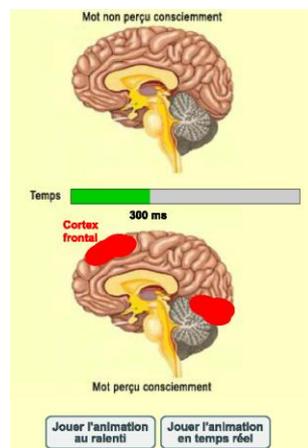
Pour répondre à cette question, Claire Sergent, Sylvain Baillet et Stanislas Dehaene ont réussi à suivre l'évolution de l'activité nerveuse lorsqu'un mot brièvement projeté sur un écran est perçu consciemment ou non. Cette prise de conscience dépend de la durée de la projection : une durée courte d'environ un quart de seconde n'est pas perçue consciemment, mais une durée plus longue de l'ordre de trois quart de seconde, elle, va l'être. Ouvrir l'animation suivante :



BSR-2012.02.01-18.04.27.avi

Qu'observe-t-on alors dans le cerveau lorsque l'on projette un mot brièvement ou plus longuement ? Que le mot soit perçu ou pas, les 275 premières millisecondes (ms) sont identiques : seul le cortex visuel est activé. Cela correspond bien au traitement modulaire bien connu du cortex visuel. Mais par la suite, selon que le mot est rapporté comme ayant été vu consciemment ou non, l'activité cérébrale diffère.

Quand le mot est vu consciemment, l'activation est largement amplifiée et réverbérée d'abord à travers le cortex frontal (dès 275 ms), ensuite préfrontal (dès 300 ms), cingulaire antérieure (dès 430 ms) et finalement pariétal (dès 575 ms). Mais lorsque le mot n'est pas vu consciemment, l'activation demeure localisée dans le cortex visuel et s'éteint progressivement jusqu'à ce que toute activité cesse à partir de 300 ms.



Aperçu de l'image à 300 ms extraite de l'animation ci-dessus

Définition

Il existe trois possibilités pour définir le cortex préfrontal :

- le cortex frontal possédant une couche IV granulaire
- la zone de projection du noyau médiodorsal du thalamus
- la zone du cortex frontal dont la stimulation n'évoque aucun mouvement

En 1935, Jacobsen utilisa le terme de "préfrontal" pour désigner la zone du frontal contenant une couche IV granulaire (avec des cellules étoilées et pyramidales) en opposition des aires motrices et prémotrices, agranulaires¹. Dans la classification de Brodmann, le cortex préfrontal regroupe les aires 8, 9, 10, 11, 44, 45, 46, 47 sur la face latérale, et 12, 32, 24 sur la face médiale (J. Fuster) mais pour compliquer les choses, toutes ces aires ne sont pas strictement granulaires puisque 44 est dysgranulaire, les aires 11 caudale et 47 orbitale

sont agranulaires. Pour J. Fuster, un des obstacles majeurs au critère architectonique, est la grande variabilité de la cytoarchitectonique d'espèce à espèce et entre individus d'une même espèce.

La définition du préfrontal comme zone de projection du noyau médiodorsal du thalamus repose sur les travaux de Rose et Wollsey (1948) qui ont montré que ce noyau se projetait sur les parties antérieures et ventrales du cerveau des non primates. Cette région qualifiée de "orbitofrontale" par ces auteurs fut nommée semble-t-il, la première fois de "préfrontale" par Akert, qui en 1964, suggéra que ce critère soit utilisé pour définir les zones homologues du cortex frontal des primates et non primates. Cette définition a l'avantage d'établir des homologies en dépit du manque de cortex granulaire frontal chez les non primates. Elle est encore largement acceptée actuellement, bien que des études de tracés récents aient montré que les projections du noyau médiodorsal ne soient pas restreintes au cortex granulaire du cortex des primates. Pour sauver la définition il a été suggéré que le cortex préfrontal soit défini comme la région du cortex ayant les connexions réciproques les plus fortes avec le noyau médiodorsal du thalamus.

La troisième définition du préfrontal comme la zone du cortex frontal dont la stimulation ne provoque pas de mouvement observable, avait été utilisée par David Ferrier en 1890. Cette définition n'est, elle non plus, pas exempte de défauts, puisque les zones électriquement silencieuses du frontal comprennent des zones granulaires et agranulaires.

Subdivisions

Au sein des aires préfrontales, on distingue :

- le cortex préfrontal dorsolatéral (dlPFC) situé sur la face externe (la partie visible du cerveau vu de côté). Cette région dorsolatérale est impliquée dans un réseau qui permet l'élaboration de processus cognitifs. Il joue un rôle majeur dans la planification et les fonctions exécutives.
- le cortex ventrolatéral
- le cortex frontal inférieur (dont le cortex orbitofrontal) qui est situé sous les régions dorsolatérales et au-dessus des orbites oculaires
- le cortex frontal médial et cingulaire antérieur qui est situé le long de la scissure interhémisphérique et au-dessus et en avant du corps calleux.

La table ci-dessous donne les différentes subdivisions du cortex préfrontal, face latérale. Le terme *dorsolatéral* a été utilisé pour renvoyer aux aires 8, 9, 46 au sens restreint, ou à ces mêmes aires plus les aires 44, 45, 47 latérale, au sens large.

Cortex préfrontal (Fuster 2008), aires de Brodmann											
aire 8	aire 9	aire 46	aire 44	aire 45	latéral 47	orbital 47	aire 11	aire 10	aire 12	aire 24	aire 32
dorsolatéral						orbitofrontal, ventromédian, basal, orbital	aire 11	frontopolar, antérieur, rostral	orbitofrontal	cingulaire antérieur	
dorsolatéral											
dorsolatéral postérieur	mi-dorsolatéral	ventrolatéral									

Roger Gil dans son ouvrage de Neuropsychologie propose un autre découpage du cortex frontal. Il garde l'aire 4 de Brodmann pour l'aire motrice mais étend le cortex prémoteur, puisque outre l'aire 6, il inclut l'aire 8 (aire de coordination oculomotrice), l'aire 44 pars opercularis et 45 pars triangularis du gyrus frontal inférieur, impliquées respectivement dans le traitement phonologique et sémantique du langage (Poldrack et al. 1999) ainsi que l'aire motrice supplémentaire à la face interne de l'hémisphère. Le cortex préfrontal est caractérisé par le fait que sa lésion entraîne des manifestations désignées sous le nom de « syndrome frontal ». Il est divisé en trois parties :

Cortex précentral (G. Gil 2008) aires de Brodmann									
aire 9	aire 10	aire 46	aire 11	aire 12	aire 25	aire 32	aire 47	aire 24	aire 32
dorsolatéral			orbitaire ou ventrale				interne ou mésiale		

Connexions

Afférences

Le cortex préfrontal établit d'importantes connexions :

- - avec les régions sous-corticales : thalamus, sous-thalamus, mésencéphale et système limbique
- - avec de nombreuses aires corticales sensorielles associatives

Les voies principales arrivant sur le cortex préfrontal sont celles du noyau médiodorsal du thalamus.

Chez les primates, le noyau médiodorsal se décompose en :

- - une composante médiale, dite magnocellulaire, en raison de la présence de cellules de grandes tailles. Cette composante est mieux représentée chez les primates ayant une plus grande ancienneté phylogénétique
- - une composante latérale, dite parvocellulaire, en raison de la présence de petites cellules, et mieux représentée chez les espèces plus récentes.

Ces deux composantes ont des projections différentes sur le cortex :

- - la partie magnocellulaire se projette sur le cortex préfrontal orbitaire et médial
- - la partie parvocellulaire se projette principalement sur le (nouveau) cortex préfrontal latéral.

En outre :

- - le pars paralamellaris, un segment latéral du noyau se projette sur l'aire 8 de Brodmann, l'aire de coordination oculo-motrice.
- - les parties caudale et dorsale du noyau se projettent sur les aires médiales

Ces projections médiodorsales sur le cortex préfrontal représentent 80% des projections thalamo-préfrontales, le reste provient du noyau ventral antérieur VA et du noyau intralaminaire rostral. Il existe aussi des afférences qui ne passent pas par le thalamus. On connaît ainsi des afférences directes du tégumentum du tronc cérébral, du pont, de l'hypothalamus et de l'amygdale.

En résumé, le cortex préfrontal reçoit directement ou indirectement, des informations venant de l'hypothalamus, du sous-thalamus, du mésencéphale, du système limbique et du cervelet.

Le cortex préfrontal est aussi interconnecté avec d'autres régions corticales. Dans la région latérale du préfrontal, convergent des informations de nature visuelles, auditives et somatiques alors que la région orbitomédiale reçoit des informations olfactives, gustatives en plus des informations auditives (et accessoirement visuelles et somatiques). En gros, la collecte d'informations sensorielles servent au cortex préfrontal latéral à organiser et exécuter des actions dirigées vers un but, celles récoltées dans le préfrontal orbitomédial servent aux réactions émotionnelles.

Efférences

Suivant un principe général de connectivité, la plupart des afférences sont réciproques : le cortex préfrontal envoie donc des informations aux structures qui lui en envoient. Il y a cependant une exception constituée par les ganglions de la base vers lesquels il envoie des efférences non réciproques.

Fonctions

Le cortex préfrontal latéral et en particulier les aires de Brodmann 9 et 46 (dorsolatéral) est associé à l'élaboration de processus cognitifs complexes. Il joue un rôle dans le contrôle exécutif tel que la planification et le raisonnement déductif (changement de l'ensemble des règles en cours set-shifting, résolution de problèmes complexes, récupération de souvenirs en mémoire à long terme, stratégies d'organisation et mémoire de travail). On a observé par imagerie médicale l'activation de cette région au cours de tâches de planification comme dans le jeu des "tours de Londres".

Le cortex orbitofrontal (aire 12 et 13) est impliqué dans les processus affectifs et motivationnels à savoir le contrôle du système limbique : inhibition, codage de la valeur motivationnelle d'un stimulus, prise de décisions et contrôle de l'action basée sur la récompense, contrôle de l'humeur, comportement social.

Le cortex cingulaire antérieur (aire 24, 25, 32) est impliqué dans l'autogénération des comportements, le contrôle des fonctions autonomes, l'initiation de la récompense, l'intention, l'inhibition, le traitement du conflit ou de l'erreur.

Des modèles neurobiologiques de la conscience, comme celui de l'espace de travail global, prédisent que les contenus conscients sont largement distribués dans le cerveau. C'est ce que confirment de nombreuses expériences en imagerie cérébrale, notamment celles de Stanislas Dehaene et ses collaborateurs, qui ont observé que l'allongement de la durée de présentation d'un mot sur un écran juste au-delà de son seuil de perception conscient s'accompagne d'une augmentation importante de l'activité des aires frontales, préfrontales, cingulaires antérieures et pariétales.

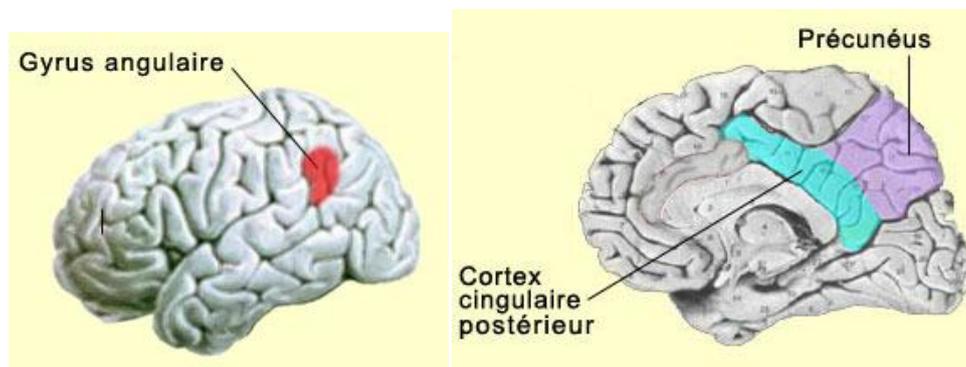
http://www.unicog.org/publications/SergentBailletDehaene_AtentionalBlinkConsciousness_NatNeurosci2005.pdf

Les inputs sensoriels conscients produiraient donc une activité cérébrale bien plus étendue que des stimuli inconscients comparables et l'activation soudaine des lobes frontaux et pariétaux serait la signature typique d'une perception consciente.

Mais cette conscience perceptuelle, certains diraient cette conscience primaire, n'est pas le seul sens que l'on donne au mot conscience. Il est donc nécessaire de bien définir de quel niveau de conscience on parle quand on essaie de lui associer des structures cérébrales. Par exemple, la première condition nécessaire pour qu'il y ait possibilité de traitement conscient des stimuli sensoriels extérieurs est d'être dans un état de vigilance approprié (par exemple être éveillé plutôt qu'endormi).

Ceci dit, il semble que ces niveaux supérieurs de la conscience impliquent également d'autres structures cérébrales dont le rôle demeura longtemps méconnu, entre autres parce que certaines d'entre elles sont situées en profondeur dans le cerveau, ce qui les rendaient difficilement accessibles. Une difficulté qui a pu être contournée avec les techniques d'imagerie cérébrale. C'est ainsi que le gyrus angulaire, le précunéus et le cortex cingulaire antérieur, souvent très actifs dans un état conscient de repos, feraient partie d'un réseau fonctionnel rendant possible la conscience de soi.

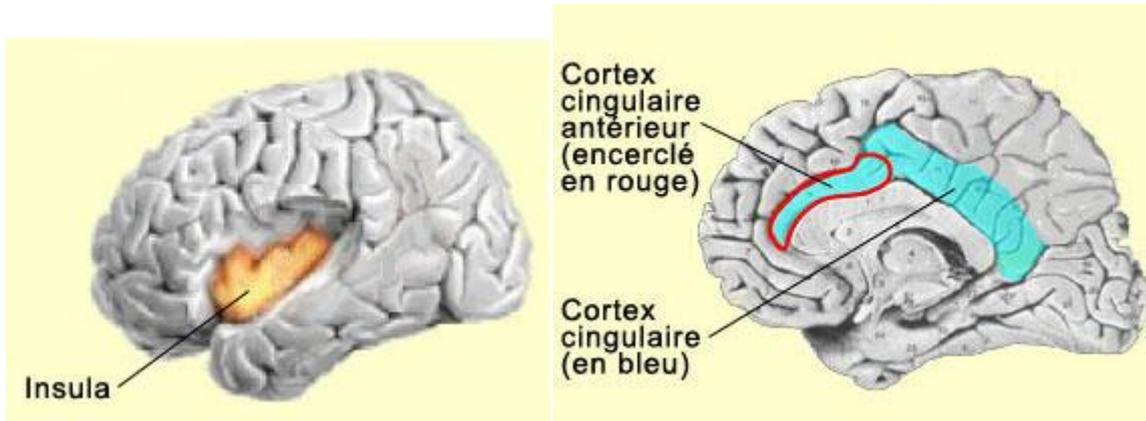
Le cas du précunéus, la partie postéro-médiane du lobe pariétal, est particulièrement révélateur. Cette région montre le plus haut taux d'activité nerveuse au repos de toutes les régions cérébrales impliquées dans ce qu'on appelle «l'état de repos» (où le sujet a généralement les yeux clos et un rythme alpha sur son EEG, mais également lorsqu'il «regarde passivement» une cible simple comme un « + »). À l'inverse, l'activité du précunéus est aussi connue pour diminuer dans des tâches qui ne font pas référence à soi-même. Par conséquent, il a été proposé que l'activation du précunéus ainsi que du cortex cingulaire postérieur qui lui est intimement connecté, est corrélée au sentiment d'être soi et à l'impression d'être un « agent ».



D'après Wheatley et al. 2007.

Cette hypothèse s'accorde aussi avec les études ayant démontrée une baisse d'activité dans le cortex pariétal postéro-médian dans de nombreux états de conscience altérée, comme le sommeil, l'anesthésie ou l'état végétatif. D'autres études ont également mis en évidence une baisse d'activité dans le précunéus et le cortex cingulaire postérieur lorsque le sujet est sous hypnose, un état de conscience également modifiée. Enfin, le précunéus semble aussi jouer un rôle dans l'imagerie visuo-spatiale. Certaines expériences montrent par exemple que le précunéus est plus actif durant l'imagerie motrice d'un mouvement du doigt que durant la réelle exécution de ce mouvement, ce qui semble indiquer encore ici une propension à se représenter son propre corps dans l'espace.

L'insula est une autre région du cerveau longtemps restée méconnue à cause de sa position en profondeur dans les replis du cortex. Et comme elle n'était pas non plus associée aux fonctions dites « supérieures », cela la rendait moins intéressante aux yeux de ceux qui s'intéressaient à l'étude de la conscience. Mais cette indifférence s'est transformée en un vif regain d'intérêt à la suite des travaux de Antonio Damasio et de son hypothèse des marqueurs somatiques qui fait la part belle à l'insula.



D'après Wheatley et al. 2007.

L'insula, aussi appelé cortex insulaire, produirait donc un contexte émotionnel adéquat pour une expérience sensorielle donnée. Elle est d'ailleurs bien située pour intégrer de l'information relative à l'état du corps et rendre cette information disponible pour des processus cognitifs et émotionnels d'ordre supérieur. L'insula reçoit par exemple des inputs sensoriels «homéostatiques» par l'entremise du thalamus, et elle envoie des outputs à plusieurs structures reliées au système limbique, comme l'amygdale, le striatum ventral et le cortex orbitofrontal. L'insula est aussi déjà bien associée aux processus de douleur ainsi qu'à plusieurs émotions de base comme la colère, la peur, le dégoût, la joie ou la tristesse. Sa portion la plus antérieure est considérée comme faisant partie du système limbique. L'insula serait aussi grandement impliquée dans les désirs conscients, comme la recherche active de nourriture ou de drogue. Ce qu'il y a de commun dans tous ces états, c'est qu'ils affectent le corps entier en profondeur. Un constat qui tend à renforcer son rôle probable dans la représentation que nous nous faisons de notre propre corps ainsi que dans l'aspect subjectif de l'expérience émotionnelle. Enfin, l'insula humaine, et à un moindre degré celle des grands singes, aurait deux innovations évolutives qui lui permettrait de porter la lecture de notre état corporel à un niveau inégalé chez les autres mammifères. D'abord la partie antérieure de l'insula, et plus particulièrement de l'insula de l'hémisphère droit, serait davantage développée chez les humains et les grands singes que chez les autres espèces animales. Ceci permettrait un décodage plus précis de nos états viscéraux, et donc par exemple à une simple mauvaise odeur de devenir un sentiment de dégoût, ou encore au toucher d'une personne aimée de se transformer en sentiment de délice. L'autre modification majeure à notre insula est la présence d'un type de neurone que l'on retrouve seulement chez les grands singes et l'humain.

Il s'agit de grandes cellules nerveuses allongées en forme de cigare appelées VEN. De plus, on ne retrouve ce type de neurone que dans l'insula et le cortex cingulaire antérieur. Ces neurones font des connexions avec diverses parties du cerveau, ce qui serait un atout essentiel pour les fonctions supérieures qu'on attribue à ces deux structures cérébrales.

Ceci nous amène justement à dire quelques mots sur le cortex cingulaire antérieur qui joue lui aussi un rôle d'interface important entre l'émotion et la cognition, plus précisément dans la transformation de nos sentiments en intentions et en actions. Il est impliqué dans des fonctions supérieures comme le contrôle de soi sur ses émotions, la concentration sur la résolution d'un problème, la reconnaissance de nos erreurs, la promotion de réponses adaptatives en réponse à des conditions changeantes. Des fonctions qui toutes impliquent un lien étroit avec nos émotions. Lorsqu'on pique un sujet avec une aiguille, son cortex cingulaire augmente son activité, si bien qu'on réfère souvent à ces neurones comme aux « neurones de la douleur ». Détail pour le moins intéressant, William Hutchison et ses collègues de l'Université de Toronto ont montré en 1999 que ces mêmes neurones du cortex cingulaire vont également s'activer lorsque le sujet voit quelqu'un se faire piquer avec une aiguille. Pour ce type de neurones, appelés neurones miroirs, il n'y a donc pas de frontière entre soi et l'autre...

Les primates, et donc les humains, sont des créatures hautement sociales. Connaître les intentions des autres a de tout temps été crucial pour notre survie. Voilà pourquoi nous sommes passé maître, peut-être avec l'aide des neurones miroirs, dans l'art de la simulation interne de l'esprit des autres. Certains, comme V.S. Ramachandran, suggèrent même que cette capacité à décoder les états d'esprits d'autrui aurait été la première à évoluer et qu'elle aurait été par la suite appliquée à nous-même, pour devenir ce que nous appelons la conscience de soi. Et pour Ramachandran, non seulement les neurones miroirs mais toutes les aires qui contribuent au langage, comme celle de Wernicke située dans le lobe temporal par exemple, seraient des joueurs incontournables dans cette aventure. Une importance du langage que l'on retrouve dans plusieurs modèles de cette conscience supérieure, dont celui de Michael Gazzaniga, connu pour son travail avec les patients au «cerveau divisé». Mais si Gazzaniga localise dans l'hémisphère du langage «l'interprète» qui nous rendrait conscient de nous-même, d'autres comme Edelman affirment que la conscience n'est le fait d'aucune structure précise du cerveau.

Plusieurs pensent que la conscience de soi serait le résultat d'une pression évolutive et culturelle, et donc pas seulement le produit du monde physique qui nous entoure mais surtout des individus avec qui l'on communique. D'où l'hypothèse d'une coévolution possible entre nos capacités d'abstraction symbolique liées au langage et cette conscience de soi. V.S. Ramachandran suggère par exemple qu'un nouvel ensemble de structures cérébrales aurait évolué durant l'hominisation pour pouvoir transformer les outputs des aires sensorielles primaires en ce qu'il appelle des « métareprésentations ». Autrement dit, au lieu de produire de simples représentations sensorielles, le cerveau s'est mis à créer « des représentations de représentations » qui vont rendre possible la pensée symbolique. Et c'est sous cette forme bonifiée que l'information sensorielle deviendrait plus aisément manipulable, notamment pour le langage. L'une des structures cérébrales impliquées dans la création de

ces métareprésentations serait le lobule pariétal inférieur, l'une des régions les plus jeunes, évolutivement parlant, de notre cerveau. Le lobule pariétal inférieur se subdivise en gyrus angulaire et gyrus supramarginal chez l'humain où ces structures ont une taille considérable. Juste à côté se trouve l'aire de Wernicke qui est unique à l'être humain, et qui est associée à la compréhension du langage. Pour Ramachandran, l'interaction de l'aire de Wernicke du lobule pariétal inférieur, en particulier le droit, et du cortex cingulaire antérieur, est fondamentale pour générer des métareprésentations à partir des représentations sensorielles, donnant ainsi lieu aux qualia et au sentiment d'un « soi » qui ressent ces qualia. Mais si l'hémisphère droit, à cause de son implication dans l'image globale du corps, est très important pour générer ce sentiment d'être « soi », l'hémisphère gauche, celui qui est spécialisé dans le langage chez la grande majorité des gens, semble être à sa façon tout aussi essentielle à ce que nous appelons la conscience de soi.

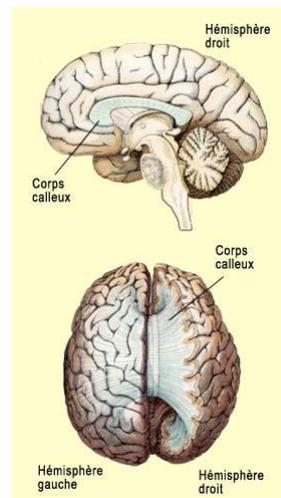
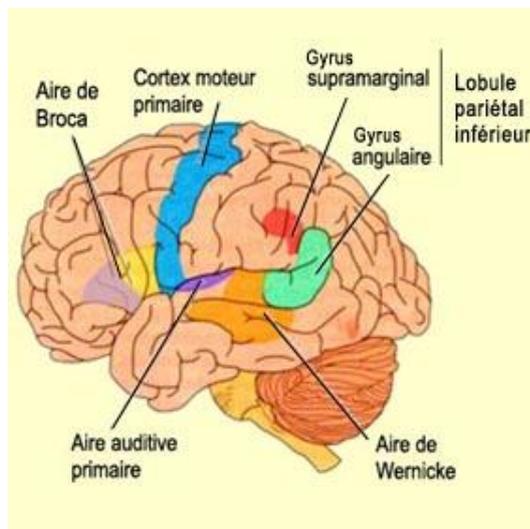
L'aire 46 de Brodmann, située dans le cortex frontal, est activée par un large éventail de tâches et semble bien placée pour coordonner nos pensées conscientes. En relation avec l'ensemble des régions cérébrales, l'aire 46 pourrait nous aider à basculer d'une pensée à une autre en favorisant certains patterns d'activation globaux au détriment des autres. En effet, le contenu particulier d'une pensée, « ce qu'on a à l'esprit » comme on dit couramment, est associé au contenu de la **mémoire de travail**. La mémoire de travail est cette mémoire temporaire que l'on utilise pour le calcul mental, pour garder le fil de notre pensée quand on fait de longues phrases ou qu'on avance des arguments compliqués, ou encore pour évaluer différentes possibilités durant une partie d'échecs.

Cette mémoire de travail est souvent décrite comme étant constituée d'un **processeur central** («central executive», en anglais), identifié à l'aire frontale 46, et de deux principaux systèmes auxiliaires «esclaves». Le premier est une mémoire visuo-spatiale qui met en jeu plusieurs régions de l'hémisphère droit. Ce sont les **images mentales**, ces figures que l'on peut «s'imaginer dans notre tête» et qui nous sont très utiles pour résoudre des problèmes de configuration spatiale.

Le second système auxiliaire est une mémoire sonore ou «boucle phonologique». C'est le **discours intérieur**, cette petite voix que l'on utilise constamment pour se parler à soi-même et qui active pour sa part des **régions de l'hémisphère gauche servant à décoder le langage**. Mais que ce soit l'un ou l'autre des deux systèmes qui est sollicité, le processeur central des lobes frontaux est toujours activé.

Pour tenter de mieux cerner le rôle complexe du **cortex frontal**, certains utilisent la métaphore d'un comité exécutif qui serait composé de cinq membres représentant chacun un sous-comité de régions plus postérieures ou sous-corticales.

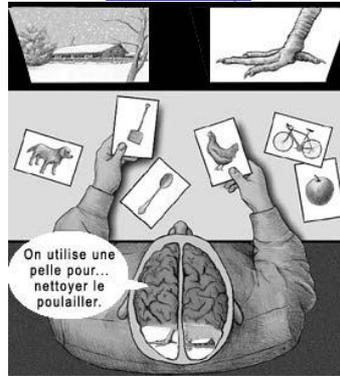
Le premier membre est le «**Perceveur**». Situé surtout dans la partie latérale ventrale de l'hémisphère frontal droit, il est l'extension frontale de la **voie ventrale de la perception** centrée sur l'objet. Un second membre est le «**Verbalisateur**». Dominant du côté de l'hémisphère gauche dans sa partie latérale ventrale, il est l'extension frontale **des circuits du langage**. Le troisième membre du comité est le «**Motivateur**». Situé dans la région ventrale médiane du cortex orbito-frontal, il est la prolongation corticale de voies sous-corticales incluant l'**amygdale** et représentant le monde selon des motivations émotionnelles. Le quatrième membre, «**l'Attentif**», occupe la partie dorsale médiane ainsi que le cortex cingulaire antérieur. Il est l'extension frontale d'une voie sous-corticale impliquant l'**hippocampe**. Il se représente le monde en coordonnées spatio-temporelles et peut diriger l'**attention** vers des événements internes et externes. Finalement le cinquième membre est le «**Coordonnateur**» (ou **processeur central**, voir l'encadré précédent). Il est localisé dans la région dorsale latérale du cortex frontal. Il s'agit de l'extension frontale de la **voie dorsale** qui se représente le monde par rapport à des coordonnées centrées sur le corps ce qui lui permet d'exercer un contrôle sur les mouvements volontaires et la **mémoire de travail**.



D'après Hubel, D. (1988). Eye, Brain, and Vision .

C'est en tout cas ce que tendent à montrer les expériences faites avec des personnes au «cerveau divisé» («split-brain», en anglais). Ces personnes ont subi une opération consistant à sectionner complètement le corps calleux, gros faisceaux de fibres nerveuses reliant les deux hémisphères cérébraux, pour empêcher la propagation de crises d'épilepsie d'un hémisphère à l'autre. Après l'opération, ces individus retrouvent une vie convenable et ne montrent pratiquement pas de séquelles apparentes dans la vie quotidienne suite à la séparation de leurs deux hémisphères. Mais en condition expérimentale où l'on peut présenter certains stimuli à un seul des deux hémisphères, de troublantes dissociations ont pu être observées. En fait, lorsque le cerveau est divisé, il semble que la conscience le soit aussi ! Michael Gazzaniga a mis en évidence plusieurs situations où les deux hémisphères cérébraux des patients à cerveau divisé entrent en conflit (voir la capsule expérience ci-bas pour des exemples). De façon générale, si l'on envoie un stimulus visuel à l'hémisphère droit via l'œil gauche, le sujet affirme n'avoir rien vu mais peut identifier l'objet parmi d'autres si on lui donne à palper avec la main gauche (sous contrôle de ce même hémisphère droit), sans toutefois pouvoir le nommer. Tout se passe comme s'il y avait deux individus dans la même personne; un premier qui dépend de l'hémisphère gauche et peut prendre la parole; et un second qui dépend de l'hémisphère droit, qui est privé de parole, mais qui fait la preuve qu'il perçoit et agit en conséquence si on l'interroge correctement.

Lorsque le patient est mis dans une situation où ses deux hémisphères entrent en conflit, il utilise les facultés langagières de l'hémisphère gauche pour se parler à lui-même, allant même parfois jusqu'à forcer l'hémisphère droit à obéir à ses commandes. Quand cela s'avère impossible, l'hémisphère gauche va souvent rationaliser ou réinterpréter la séquence d'événements de manière à rétablir une impression de cohérence au comportement du patient. C'est ce phénomène qui a amené Gazzaniga à proposer l'existence d'un « interprète », ou si l'on veut d'un « soi narratif » dans le cortex frontal gauche non seulement des patients au cerveau divisé mais également chez tous les êtres humains.



**Ce que répond un patient au cerveau divisé lorsqu'on lui demande d'expliquer pourquoi sa main gauche prend la pelle
D'après Joan M.K. Tycko**

Cet interprète nous raconterait constamment une histoire cohérente construite à partir de nos actions, nos émotions et nos pensées. Ce serait en quelque sorte la « colle » permettant de mettre ensemble les différents éléments de notre histoire personnelle et de nous donner l'impression d'être un agent rationnel.

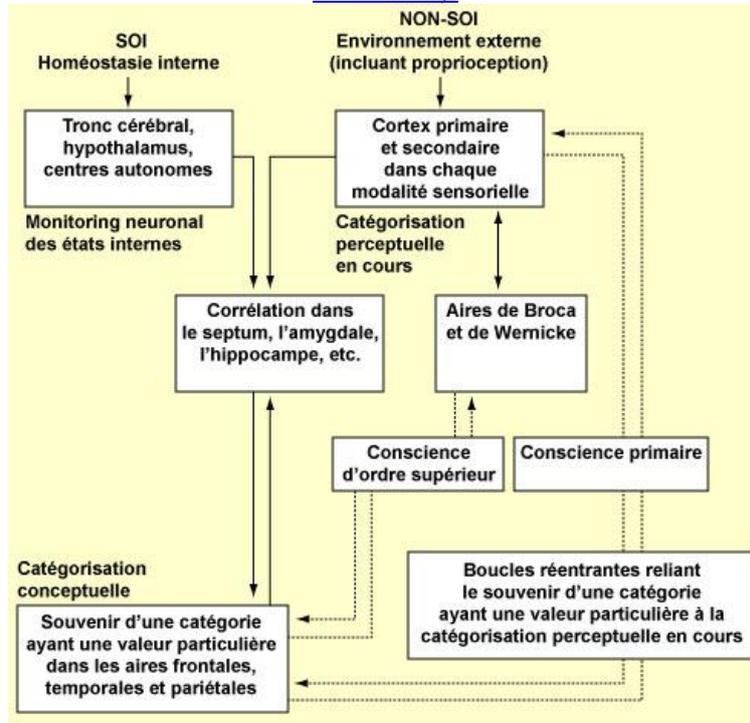
En fait, pour Gazzaniga, il est même possible que l'hémisphère droit ait aussi son propre interprète. Même s'il ne parle pas, cet observateur de l'hémisphère droit serait capable de mieux comprendre l'ironie, les blagues et d'autres stratégies émotionnelles. Chacun de ces deux interprètes contrôlerait également les mouvements volontaires des membres du côté opposé du corps. Est-ce qu'un patient au cerveau divisé possède alors deux consciences ? Et chez la personne normale, y'aurait-il également ces deux consciences qui seraient cependant intimement reliées pour nous donner cette impression de n'être qu'une seule et même personne ? La présence d'un « interprète », d'une espèce d'observateur dans le cerveau, ne fait en tout cas pas consensus et certains, comme Daniel Dennett, l'ont fortement critiqué. Chose certaine, les expériences avec les cerveaux divisés ont fait couler beaucoup d'encre et n'ont pas fini d'en faire couler...

Ceci dit, si certains modèles neurobiologiques de la conscience ciblent des structures particulières du cerveau comme le lobe pariétal inférieur ou mettent plutôt l'accent sur un hémisphère en entier, d'autres en contrepartie affirment carrément que la conscience n'est le fait d'aucune structure précise du cerveau. Rappelons que l'étude des bases neurobiologiques de la conscience a souvent été abordée comme celle de toute autre fonction, c'est-à-dire en analysant la contribution de différentes régions cérébrales ou de différents groupes de neurones. Mais plusieurs ont critiqué cette approche conventionnelle qui, selon eux, n'est pas pertinente pour étudier une fonction aussi globale que la conscience. Ils rappellent d'une part que des dommages à pratiquement n'importe quelle structure cérébrale a des effets sur la conscience. Et d'autre part, que des lésions localisées affectent la conscience, mais l'anéantissent rarement complètement. Un autre fait, souligné par Gerald M. Edelman et Giulio Tononi, est que les circuits de notre cerveau sont très redondants (« massively degenerate », en anglais) et que plusieurs circuits peuvent accomplir la même fonction.

Edelman et Tononi font donc partie de ceux qui appuient l'idée que le cerveau en entier aurait son mot à dire dans les processus conscients. Leur modèle vise à expliquer deux caractéristiques de la conscience qui leur semblent fondamentales : le fait que chaque état de conscience est un tout indivisible, et qu'en même temps chaque personne peut choisir à tout moment entre d'innombrables états conscients. En d'autres termes, leur modèle veut rendre compte de l'unité de la conscience et de sa complexité. Comme la plupart des neurobiologistes qui tentent de modéliser la conscience, Edelman et Tononi se voient eux aussi contraints de distinguer au moins deux grandes formes de conscience, la conscience primaire et la conscience d'ordre supérieur.

Edelman considère la conscience primaire dans la perspective du « **darwinisme neuronal** » un concept qu'il a développé dans le cadre de sa théorie plus générale de la sélection des groupes neuronaux. Selon cette théorie, deux processus évolutifs ont lieu dans notre cerveau. Le premier lors de son **développement**, alors qu'une compétition darwinienne s'établit entre des populations de neurones dont les connexions ne sont contraintes que partiellement par les gènes. Et le second, qui est un processus d'apprentissage aux mécanismes similaires mais qui se déroule de manière plus modérée durant toute notre vie. Grâce à ces deux processus, le cerveau, qui naît avec une surabondance de connexions neuronales, ne conserve que celles qui sont suffisamment stimulées. Le modèle d'Edelman s'accorde avec les expériences de Libet qui démontrent que même si une réponse comportementale peut survenir très rapidement après une stimulation thalamique, l'expérience consciente associée prend environ une demie seconde à apparaître. Pour Edelman et Tononi, ce délai est dû aux longues « boucles rétroactives » qui relient différentes aires distantes dans le cerveau et qui doivent être « fermées » pour que naisse l'impression consciente.

Pour Edelman, la « **boucle rétroactive** » diffère de ce que l'on appelle plus généralement la **rétroaction**. Celle-ci se produit dans une boucle simple et bien déterminée où les effets reviennent agir sur les causes, pour par exemple en corriger les erreurs. La boucle rétroactive, elle, se développe dans des systèmes ayant subi une sélection et à travers de multiples voies parallèles où l'information n'est pas déterminée à l'avance. Comme la rétroaction cependant, une boucle rétroactive peut être locale (à l'intérieur d'une même carte ou **assemblée de neurones**) ou globale (parmi plusieurs cartes ou des régions cérébrales entières). La conscience primaire que nous partageons avec plusieurs autres animaux est celle qui permet de prendre conscience de la situation dans laquelle nous nous trouvons. Elle fait appel à une mémoire à court terme qui rend possible le « présent remémoré », pour employer l'expression d'Edelman. Lorsqu'un stimulus est reçu par l'organisme, il y a formation de cartes perceptuelles constituées d'assemblées de neurones dont les connexions réciproques sont renforcées. Il en résulte un système de « cartes neuronales », chacune responsable de nos différentes possibilités perceptuelles, qui sont issues d'un processus sélectif appelé « Darwinisme neuronal » par Edelman (voir le premier encadré). Quand le cerveau reçoit une nouvelle stimulation, plusieurs de ces cartes vont être activées et vont s'envoyer des signaux mutuels. La conscience primaire naîtrait de l'interaction de différentes assemblées neuronales codant pour différentes propriétés d'un objet. Interaction qui se ferait surtout par l'entremise de connexions réciproques formant des boucles qui peuvent unir des groupes de neurones parfois très éloignés dans le cerveau. La conscience primaire dépendrait donc à chaque instant de l'activité parallèle et récursive à l'intérieur et entre des régions du thalamus et du cortex. Même s'ils ne cherchent pas à faire une association trop étroite entre certaines structures cérébrales et les états conscients, Edelman et Tononi reconnaissent tout de même l'importance indéniable des boucles thalamo-corticales dans l'émergence de la conscience, bien qu'ils accordent moins d'importance à la synchronisation neuronale en tant que telle qu'à la signification fonctionnelle de ces boucles. La conscience d'ordre supérieur, qui émerge durant l'homínisation, dépendrait elle aussi de ces « boucles rétroactives » entre des assemblées de neurones. Mais des boucles qui se situeraient à plus grande échelle dans le cerveau, en particulier entre les aires corticales associées au langage et celles associées aux concepts abstraits. L'explosion des capacités sémantiques qui s'ensuit permettrait alors l'émergence du concept de soi, et donc la considération de la conscience primaire à la lumière du passé et du futur. Autrement dit, l'émergence d'une conscience d'avoir conscience, ce qui est la définition de la conscience d'ordre supérieur. Concrètement, tout cela serait rendu possible par la constitution d'un « noyau dynamique », c'est-à-dire une vaste assemblée de neurones en réarrangement constant, mais qui maintient une continuité et est aussi capable d'intégration à travers la complexité (les deux caractéristiques principales de la conscience dont ce modèle veut rendre compte). En d'autres termes, le noyau dynamique permettrait de rendre compte du fait qu'à tout moment, il n'y a qu'un seul objet conscient, mais que la conscience peut passer très rapidement d'un objet à l'autre. Tout comme Llinás ou Freeman, Edelman et Tononi insistent donc sur l'aspect dynamique de leur noyau qui réfère ici non pas à une structure anatomique stable mais bien à un pattern d'activité éphémère impliquant les neurones de différentes régions du cortex à un moment donné. Et comme à tout moment, le noyau dynamique peut impliquer des régions du cerveau complètement différentes, cette hypothèse évite donc de devoir désigner une région cérébrale particulière, ou un type de neurone particulier, ou encore une fréquence d'activité neuronale particulière qui serait associée à nos états de conscience. À la place, ce modèle propose qu'une activité neuronale participe à un état conscient si elle se trouve incluse, au moment où cet état est conscient, dans le noyau dynamique. Cette hypothèse a donc beaucoup de chose en commun avec les théories de l'espace de travail global, bien qu'elle s'en distingue par le fait qu'un contenu n'est pas rendu conscient simplement parce qu'il est rendu disponible au reste du système. Dans l'hypothèse du noyau dynamique, il n'y a pas l'équivalence entre accessibilité et conscience que l'on retrouve dans les théories de l'espace de travail global. Bien que les neurones de ce système dynamique interagissent principalement entre eux, ils influencent et sont influencés par d'autres structures cérébrales. En effet, même si le modèle de la conscience d'Edelman et Tononi, contrairement à d'autres, ne cherche pas à mettre certaines régions du cerveau « en vedette », plusieurs structures cérébrales y sont mentionnées comme jouant un rôle important.



C'est le cas bien entendu du thalamus et du cortex qui participent à la formation des boucles rééchantillonnées. Mais c'est aussi le cas des noyaux du tronc cérébral dont les axones remontent dans de vastes régions du cerveau, et qui relâchent de manière diffuse des neurotransmetteurs comme la noradrénaline, la sérotonine, l'acétylcholine ou la dopamine. Le seuil d'activation des différentes assemblées de neurones du cortex sera alors déterminé par ces systèmes de neuromodulation diffus (Edelman parle en anglais de « diffuse ascending value systems »). Certains neurones de ces noyaux neuromodulateurs vont par exemple être en activité tonique quand l'animal est éveillé et l'arrêt de cette activité va contribuer à plonger l'animal dans le sommeil. D'autres vont produire une activité phasique quand quelque chose de nouveau ou d'important pour l'animal apparaît dans l'environnement. Par exemple, les neurones du locus coeruleus relâchent dans la majorité des structures cérébrales une bouffée de neuromodulateurs, dans ce cas-ci de la noradrénaline, dès qu'un animal entre dans un nouvel environnement ou que quelque chose d'inusité survient. Ces neuromodulateurs peuvent donc modifier l'activité de vastes populations de neurones. Ils peuvent également changer la probabilité que des synapses se renforcent ou s'affaiblissent en réponse à une activité neuronale donnée. Ces systèmes de neuromodulateurs sont donc extrêmement bien conçus pour amplifier un type d'activité cérébrale au dépens d'un autre.

Enfin, la capacité de choisir entre de nombreux inputs ceux qui ont une certaine importance relativement à l'histoire individuelle d'une personne constitue avantage adaptatif certain. L'hippocampe, qui a co-évolué avec le cortex et interagit avec lui pour produire ce que l'on appelle une mémoire épisodique, joue probablement un rôle clé dans ce processus.

Mazoyer et ses collaborateurs ont effectué une méta-analyse de plusieurs expériences d'imagerie cérébrale. Dans chacune de celles-ci, l'activité cérébrale des sujets effectuant des tâches diverses avait été comparée à l'activité cérébrale des sujets dans un état conscient au repos. La recherche de **conjonctions entre ces états de repos** dans les différentes expériences a mis en évidence un réseau d'aires cérébrales activées conjointement durant l'état de repos conscient. Ces aires cérébrales comprennent les deux **gyrus angulaires**, le **precuneus antérieur gauche**, le **cortex cingulaire postérieur**, la région médiane gauche du **cortex frontal**, le **cortex cingulaire antérieur**, le **sulcus médian frontal** et le **sulcus supérieur gauche**, et finalement le **cortex frontal inférieur gauche**.

Un réseau reflétant le contenu et la gestion des pensées conscientes

Mémoire de travail: rappel et maintien de pensées sous forme d'images, d'épisodes, de langage, d'émotions...

Exécutif: manipulation du contenu de la mémoire de travail; inhibition et sélection des pensées, motivation, contrôle des émotions

Mazoyer et al., Brain Res Bull 2001

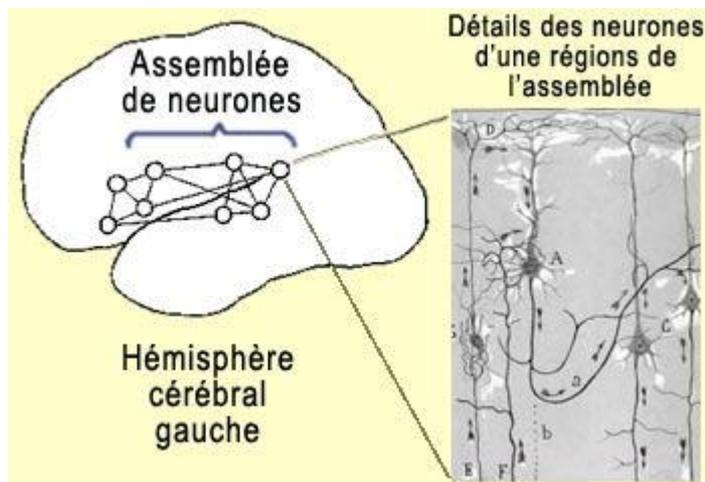
Ces résultats suggèrent que l'activité cérébrale durant l'état de repos conscient dépend d'un large réseau d'aires corticales associatives **pariétales** et **frontales**. De plus, pour les auteurs de l'étude, ces régions peuvent être organisées autour de deux grands axes fonctionnels : d'une part un **réseau pariéto-frontal** lié à la **mémoire de travail de type épisodique** et activé en partie par les émotions; et d'autre part un **système exécutif** situé dans le **lobe préfrontal gauche** et qui supervise le réseau pariéto-frontal.

La plupart des [modèles neurobiologiques de la conscience](#) mettent l'emphase sur l'activité thalamocorticale. Une voie alternative donne au contraire un rôle fondamental aux structures sous-corticales. **Bjorn Merker**, le plus ardent promoteur de cette alternative, rappelle qu'être conscient ne signifie pas obligatoirement avoir une conscience de soi. On peut définir une [conscience primaire](#) (ou un « affect primaire » pour employer le vocabulaire de [Panksepp](#)) comme une capacité à intégrer des sensations de l'environnement avec les objectifs et les émotions du moment d'un individu dans le but de guider son comportement. Et pour Merker, cette conscience primaire dont on ne peut exprimer les contenus verbalement serait le fruit de l'activité de structures sous-corticales. Il suggère par exemple que le [collicule supérieur](#), en plus de coordonner les mouvements des yeux, de nous permettre de porter attention à quelque chose et d'intégrer l'information en provenance de différentes modalités sensorielles, pourrait également générer une simulation de notre monde sensoriel, simulation qui correspondrait à ce qu'on appelle la conscience primaire. Les structures sous-corticales qui intéressent Merker correspondent donc à la partie supérieure du tronc cérébral qui va [du toit du mésencéphale à la base du diencéphale](#) ainsi que d'autres structures sous-corticales comme la zona incerta, le thalamus ventral et [les systèmes de neuromodulation diffus du tronc cérébral](#). Ces structures sous-corticales permettraient d'intégrer l'information massivement distribuée dans le cortex au [mode d'opération séquentielle et à capacité limitée](#) de ces régions du tronc cérébral. Et c'est justement ce mode d'opération singulier qui donnerait à la conscience primaire les propriétés qu'on lui reconnaît et qui sont nécessaires pour choisir un comportement unique et cohérent. Ces structures sous-corticales joueraient donc un peu le rôle d'un entonnoir capable de ramener la multitude de processus à l'oeuvre dans le cortex à un seul processus conscient adapté pour la [prise](#) de décision en temps réel dans le monde. Dans ce contexte, Merker pense que le consensus tacite considérant le cortex cérébral comme « l'organe de la conscience » pourrait s'avérer être tout simplement une erreur. Certains ont réagi à ces propos en précisant que le cortex cérébral pouvait être considéré davantage comme « l'organe de la conscience conceptuelle et du raisonnement », et que cela n'était pas [remis](#) en question par les observations de Merker sur la conscience primaire et les structures sous-corticales. N'empêche, les considérations de Merker, comme celles sur des enfants [hydranencéphales](#), pourraient avoir des conséquences bien concrètes. L'hydranencéphalie est la plus sévère des anomalies de développement du cerveau et se différencie de l'hydrocéphalie par l'absence totale de cortex. Le fait que des enfants hydranencéphales sourient et rient d'une manière tout à fait humaine et différente des autres primates est pour Merker une preuve que le tronc cérébral n'est pas seulement [une relique reptilienne](#) oubliée dans les soubassements du cerveau. Pour lui, le tronc cérébral humain est spécifiquement humain. Les définitions médicales de la mort cérébrale basées sur l'absence d'activité corticale seraient ainsi fortement remises en question. Les médecins ne pourraient plus, à tout le moins, assumer que les individus hydranencéphales n'ont pas besoin de médicaments antidouleurs ou d'anesthésie durant des opérations chirurgicales d'envergure. En bout de ligne, ces observations suggèrent que des mécanismes sous-corticaux prennent part de façon importante dans ce qu'on appelle l'état conscient, et qu'une description globale des phénomènes conscients ne peut être confinée aux boucles thalamocorticales seulement.

COMMENT UNE IDEE CONSCIENTE VIENT-ELLE A NOTRE ESPRIT ?

Et par quels mécanismes notre conscience passe-t-elle d'une idée à une autre ? Les modèles neurobiologiques de la conscience offrent des pistes de réponse intéressantes à ces questions vieilles comme le monde.

Il faut ici rappeler deux choses. D'abord que ces modèles se situent philosophiquement dans un cadre matérialiste. Ensuite que l'hypothèse générale de cette approche est qu'il existe des « corrélats neuronaux » de la conscience, autrement dit que tout changement dans nos états mentaux amène forcément un changement dans nos états neuronaux.



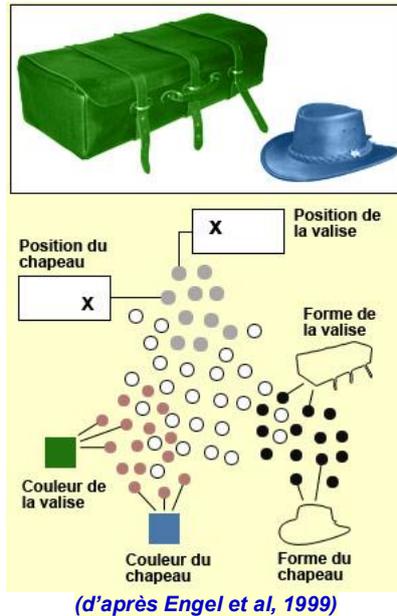
Concrètement, la plupart de ces modèles s'entendent sur le fait que tant nos perceptions que nos concepts plus abstraits correspondent à de vastes réseaux ou « assemblées de neurones » dont l'activité obéit à une dynamique complexe. La plupart des modèles reconnaissent également que le cerveau traite à tout moment beaucoup plus d'information que celles dont nous sommes conscients. On n'a qu'à penser au système visuel et à la fausse impression que nous avons d'avoir conscience de toute la scène qui est devant nous alors que nous ne faisons l'expérience consciente que d'une faible proportion seulement de celle-ci. Qu'est-ce qui nous permet alors de faire une différence entre la multitude de données traitées inconsciemment et l'unique contenu de conscience à un moment donné ? Il faut en effet rappeler qu'il ne peut y avoir qu'une seule chose à la fois dans notre conscience, même si celle-ci peut alterner très rapidement entre différents contenus. En terme neuronal, notre question devient : quelle assemblée de neurones deviendra celle dont on peut associer l'activité à une pensée consciente à un moment donné ? Les différentes assemblées de neurones entrent donc d'une certaine façon en compétition pour passer dans la porte étroite de la conscience. Suffit-il alors de dire que ce sont les assemblées de neurones les plus actives qui formeront le contenu de notre conscience ?

Un problème de taille survient quand on essaie d'expliquer ainsi la différence entre le conscient et l'inconscient seulement en terme d'importance de l'activité neuronale. C'est que l'activité d'un neurone, qui s'exprime concrètement par la fréquence des influx nerveux émis par ce neurone, est déjà utilisée par le cerveau pour représenter l'intensité des stimuli (le fait qu'il y ait plus ou moins de lumière ou qu'un son soit plus ou moins fort, par exemple). Il doit donc forcément y avoir un autre mécanisme par lequel on sélectionne un contenu conscient car la fréquence de l'influx nerveux ne peut pas à la fois indiquer l'intensité d'un stimulus et s'il est conscient ou non. Comment le cerveau ferait-il alors pour distinguer un stimulus intense mais inconscient (les paroles de la chanson qui joue très fort dans un bar mais auxquelles on ne porte pas attention) d'un stimulus moins intense mais conscient (les mots doux qu'on nous chuchote à l'oreille et auxquels nous sommes on ne peut plus attentif) ? Il doit donc y avoir un autre mécanisme qui permette au cerveau d'intégrer à la fois l'importance objective d'un stimulus et de distinguer entre les représentations conscientes et inconscientes.

Ce mécanisme devra aussi rendre compte d'un autre problème qui n'en a pas l'air d'un lorsque l'on ignore comment se fait le traitement de l'information sensorielle dans notre cerveau, mais qui devient un véritable casse-tête quand on en tient compte. Cette difficulté découle du fait que notre cerveau traite en parallèle, grâce à de nombreux circuits spécialisés, différentes propriétés des objets perçus.

Prenons l'exemple d'une personne qui regarde un chapeau. Des aires visuelles distinctes, situées dans le cortex occipital, vont traiter en même temps différentes propriétés du chapeau. Certaines vont être sensibles au contour du chapeau, d'autres à sa couleur, d'autres à sa forme, d'autres à sa texture, d'autres à sa localisation dans l'espace, etc. On voit déjà poindre le problème à l'horizon :

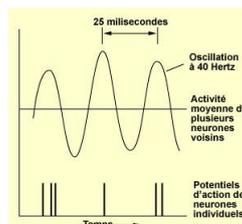
comment le cerveau va-t-il s'y prendre pour intégrer toutes ces propriétés décodées à différents endroits et pour nous donner cette perception subjective d'un seul objet, en l'occurrence ici un chapeau ?



Mais les choses peuvent être encore plus compliquées. Qu'arrive-t-il par exemple lorsque l'on voit une valise verte à côté d'un chapeau bleu par exemple ? Nos aires visuelles de la couleur enregistrent le bleu et le vert, celles de la forme un rectangle et une forme plutôt arrondie, celle de la position un objet à gauche et un objet à droite, etc. Mais où les caractéristiques d'un même objet sont-elles mises ensemble pour former la perception consciente et distincte que l'on a de chacun des deux objets, sans en mélanger les caractéristiques ? Voilà qui pose problème. Un problème de liaison ou, selon l'expression anglaise consacrée, un «binding problem». Ce problème de liaison des différentes propriétés d'un objet en une seule perception consciente et cohérente est intimement lié au phénomène nous permettant de sélectionner quelles assemblées de neurones quittent l'inconscient pour accéder à la conscience. Parmi les propositions s'adressant à ces deux problèmes, la synchronisation des oscillations neuronales est certainement l'un des mécanismes les plus débattus. D'autres sont allés encore plus loin en ajoutant un deuxième système de synchronisation temporelle au premier.

Le problème de liaison pose la question de savoir comment on peut avoir une perception consciente cohérente et unifiée d'un objet sachant que ses différents attributs sont traités dans des régions distinctes du cerveau ? Une première solution serait de dire que tous ces différents signaux vont converger vers un groupe ou même une cellule unique qui représenterait cette perception consciente. Car il faut bien reconnaître qu'on observe dans le cerveau, malgré la prépondérance des circuits en parallèle, une certaine forme de convergence à mesure que l'on s'éloigne des aires corticales primaires pour aller vers les aires dites « associatives » du cortex. Plusieurs de ces aires ont été identifiées dans le cortex frontal, temporal antérieur ou pariétal inférieur. Mais on s'entend pour dire qu'il ne s'agit pas de lieux où des représentations seraient emmagasinées, tout au plus y aurait-il certains « codes » capable de reconstruire les fragments d'activations distribuées ailleurs dans les aires sensori-motrices du cortex. De même, il est vrai que l'on retrouve certains neurones situés au sommet de la hiérarchie du cortex visuel qui répondent spécifiquement aux visages et même aux visages vus selon un certain angle. Ces neurones nous aident certainement à reconnaître les visages puisque lorsqu'un accident cérébro-vasculaire les détruit, l'individu souffre de prosopagnosie, c'est-à-dire qu'il devient incapable de reconnaître les visages, même de ses proches.

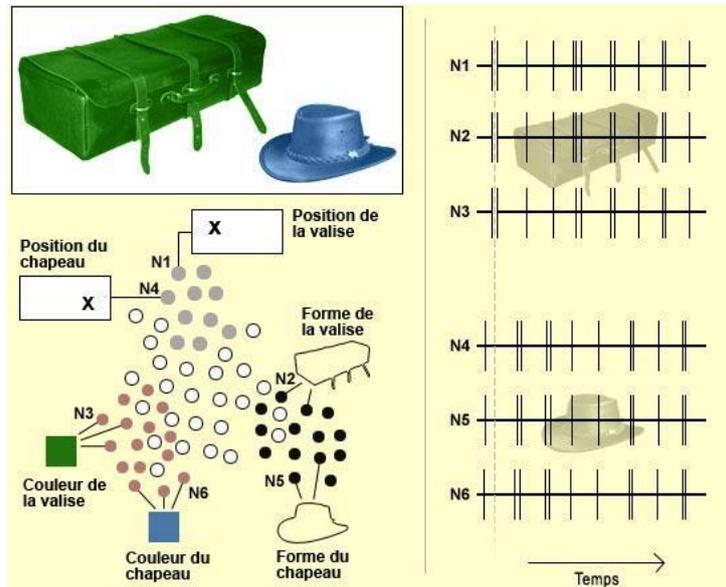
Mais l'unification de nos perceptions par la convergence, outre quelques cas particuliers comme la reconnaissance des visages qui a eu de tout temps une immense importance adaptative, s'avère une voie trop fragile, coûteuse et en bout de ligne inefficace qui ne semble pas avoir été retenue par l'évolution. Alors s'il n'y a pas un seul lieu où toute l'information relative à un objet converge pour devenir consciente, peut-être y aurait-il un seul temps ? C'est l'autre grande voie, qui semble plus prometteuse pour solutionner le problème de liaison, celle qui pose, grosso modo, que des neurones qui sont actifs en même temps «perçoivent la même chose». En termes plus précis, c'est tout le domaine de la synchronisation temporelle de l'activité neuronale.



(d'après Francis Crick, 1994)

Christof von der Malsburg fut l'un des pionniers, au début des années 1980, à explorer l'hypothèse qu'une activité synchronisée des neurones traitant différentes propriétés d'un objet pourrait être la clé du problème de liaison. Andreas Engel et Wolf Singer ont par la suite confirmé le bien-fondé de cette hypothèse. Plusieurs de leurs expériences semblent en effet indiquer que les objets représentés dans le cortex visuel le sont effectivement par des assemblées de neurones faisant feu simultanément. Pour reprendre l'exemple d'une valise verte posée à côté du chapeau bleu, chacun des deux objets sera représenté par une vaste assemblée de neurones dans le cerveau. Chaque assemblée comprendra des neurones capables de détecter différents attributs de chaque objet, comme la couleur, le mouvement ou l'orientation de ses lignes et contours, etc. Et c'est par la synchronisation de ces différents neurones codant pour ces différents attributs que serait obtenue l'image cohérente et unifiée de la valise.

Quant aux neurones codant les différents attributs du chapeau (N4, N5, et N6 dans la figure ci-dessous), ils feront également feu en synchronie pour fournir une image unifiée du chapeau mais, comme l'illustre la ligne pointillée, le feront de manière décalée dans le temps par rapport à l'assemblée de neurones codant pour la valise (N1, N2, et N3). Et c'est ainsi que nous pourrions percevoir consciemment deux objets distincts qui se détachent d'un fond lui aussi distinct (qui serait représenté par une troisième assemblée de neurones), et non un amalgame de lignes et de couleurs indifférencié.



Francis Crick et Christof Koch allaient pousser encore un cran plus loin l'idée de la synchronisation temporelle en proposant que cette activité synchronisée, lorsqu'elle se fait entre 35 et 75 hertz (Hz), pourrait être le corrélat neuronal de la perception visuelle consciente. Dans les années 1980, l'étude du cortex visuel du chat avait en effet révélé qu'un grand nombre de neurones pouvaient faire feu en même temps avec un rythme allant de 35 à 75 Hz environ, rythme que l'on désigne généralement par l'expression « oscillations gamma » ou simplement « oscillations à 40 Hz ».

De nombreuses études subséquentes tant chez l'animal que chez l'être humain ont démontré que cette fréquence élevée d'oscillation de l'activité neuronale est reliée de près à l'intégration perceptuelle, à la construction de représentations cohérentes et à des processus d'attention sélective. Crick et Koch ont donc développé une théorie où la clé de la perception consciente se trouve non seulement dans la synchronisation de l'activité neuronale mais dans la synchronisation d'activité neuronale oscillant à des fréquences avoisinant les 35 à 75 Hz.

En résumé, selon cette hypothèse :

- si deux neurones oscillent de manière synchrone dans le spectre gamma (autour de 40 Hz), alors ces deux neurones contribuent à une même représentation consciente;
- si deux neurones oscillent de manière synchrone en dehors du spectre gamma, alors ils contribuent à une même représentation qui n'est pas consciente (par exemple, un objet du champ visuel auquel on ne porte pas attention);
- si deux neurones sont actifs mais ne montrent pas de cycles oscillatoires ou oscillent mais ne sont pas synchronisés, alors ils représentent des attributs qui ne sont pas liés ou qui sont liés à différentes représentations.

Crick et Koch pensent aussi que cette formation d'assemblées transitoires de neurones oscillant à l'unisson autour de 40 Hz ne s'effectuerait pas qu'au niveau du cortex visuel mais pourrait recruter des neurones dans tout le cortex. Dans ce cas, la couleur et la forme de l'objet ne seraient pas les seuls paramètres qui seraient associés. Il y aurait également toutes sortes d'autres caractéristiques rattachées à l'objet comme l'odeur, le goût, les émotions, etc., l'ensemble formant ainsi une représentation consciente complète de l'objet observé.

Voilà donc un mécanisme élégant par lequel le cerveau pourrait distinguer, parmi toutes les représentations ayant été liées, celles qui sont conscientes de celles qui ne le sont pas.

Crick et Koch avaient d'abord proposé, à la fin des années 1980, que la synchronisation des oscillations proches de 40 Hz était un mécanisme suffisant pour assurer l'émergence d'une perception consciente. Au début des années 2000, ils ont nuancé leur position en affirmant que les phénomènes conscients semblent être issus d'une compétition entre différentes « coalitions » de neurones (voir l'encadré ci-bas) où les coalitions gagnantes déterminent le contenu de la conscience à un instant donné. Et ce qui leur semble plus plausible maintenant à propos de la synchronisation des oscillations à 40 Hz, c'est qu'elle pourrait être le mécanisme par lequel se résout cette compétition, en favorisant la sélection d'une assemblée particulière. Cette notion de compétition de tous les instants entre assemblées de neurones rejoint d'ailleurs le plus récent concept de « noyau dynamique ».

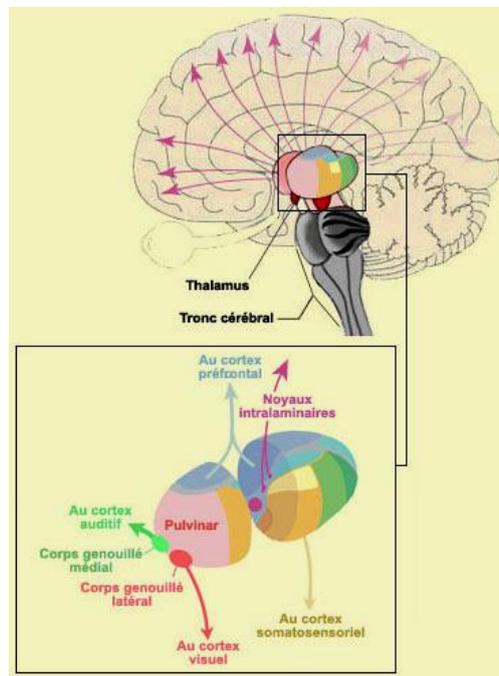
Engel et Wolf croient eux aussi que la synchronisation, bien que nécessaire, ne serait pas suffisante pour générer la conscience. Pour eux, l'information devrait aussi entrer dans une forme de mémoire à court terme, une suggestion qui renvoie ici à quelque chose de semblable à un espace de travail global. On le voit, l'hypothèse de la synchronisation des oscillations autour de 40 Hz, bien qu'elle apporte indéniablement quelque chose de plus à notre compréhension de la conscience, n'est pas le fin mot de l'histoire. Elle a par exemple connu d'autres développements intéressants, notamment en ce qui concerne le mécanisme de sélection des représentations conscientes parmi les représentations inconscientes.

Le problème de savoir comment on se représente différents objets avec chacun les caractéristiques qui lui sont propres, le fameux "binding problem", s'éclaire, du moins en partie, grâce au phénomène de la synchronisation neuronale autour de 40 Hz. Mais cela ne nous dit pas comment la représentation d'un objet donné devient consciente alors que les autres demeurent inconscientes. Autrement dit, qu'est-

ce qui détermine laquelle des nombreuses assemblées de neurones oscillant à diverses fréquences (et correspondant à diverses représentations d'objets différents) va entrer dans l'attention consciente d'une personne.

Durant les années 1990, Rodolfo Llinas et ses collègues ont effectué une série d'études détaillées sur les interactions thalamocorticales qui leur ont permis de développer une théorie qui à la fois intègre les données de l'état conscient de veille et du rêve, s'attaque au problème de liaison, et fournit un critère pour déterminer quelle représentation consciente va être sélectionnée à un moment donné.

Le modèle de Llinas, bien que proche de plusieurs autres, est toutefois unique en ce qu'il propose une solution originale à cette dernière question. Llinas et ses collaborateurs ont élaboré leur modèle en utilisant une technique d'imagerie cérébrale très sensible appelée magnétoencéphalographie (MEG) (voir capsule outil). Grâce à cet appareil capable de mesurer indirectement les courants électriques dans le cerveau, Llinas a observé des oscillations en phase qui parcourent le cortex de sa partie antérieure à sa partie postérieure. Chacune de ces ondes dure environ 12.5 millisecondes (ms) et est suivie d'un repos de 12.5 ms, pour un temps total de 25 ms pour un cycle. Ce cycle se produit donc environ 40 fois par seconde et l'on retrouve donc ici les oscillations gamma à 40 Hz associées au problème de liaison des attributs d'un objet.



Ces oscillations seraient apparemment produites par les noyaux non spécifiques du thalamus, comme les noyaux intralaminaires, dont les projections traversent le cortex de l'avant à l'arrière.

Le modèle de Llinas s'appuie donc sur l'interaction entre deux types d'oscillateurs. D'une part, ce système de projections thalamiques diffus responsable de l'onde qui balaie le cortex et fournit 40 fois par seconde un «contexte» à la perception consciente. Et d'autre part, l'autre système bien connu qui relie les noyaux thalamiques spécifiques à ceux des aires corticales spécialisées correspondantes et qui contribue à la liaison des différents attributs d'un même objet. Ce sera, par exemple, le corps genouillé latéral qui reçoit des connexions de la rétine de l'oeil et projette à son tour à l'aire visuelle primaire du cortex occipital. Décrite sommairement, l'hypothèse de Llinas est que les assemblées de neurones qui correspondent à un contenu conscients sont celles qui oscillent en phase non seulement entre elles pour lier ensemble les différentes caractéristiques d'un objet, mais qui oscillent en plus en phase avec le balayage oscillatoire non spécifique. Llinas a pu montrer que la présence de ces cycles est corrélée à des expériences conscientes cohérentes : elles surviennent continuellement durant l'éveil et le rêve mais pas durant le sommeil profond.

On observe par exemple une robuste activité neuronale autour de 40 Hz durant l'éveil, lorsque le sujet s'adonne à une tâche cognitive quelconque. Durant l'éveil, les deux familles d'oscillateurs sont donc couplés, et les circuits spécifiques répondent aux signaux externes. Durant le rêve, ils sont couplés, mais les noyaux spécifiques ne répondent pratiquement pas aux signaux externes. Les contenus conscients proviennent de l'interne, des souvenirs emmagasinés par le cerveau (voir encadré). Finalement dans le sommeil profond, les deux familles d'oscillateurs sont découplées et il n'y a pas de contenus conscients.

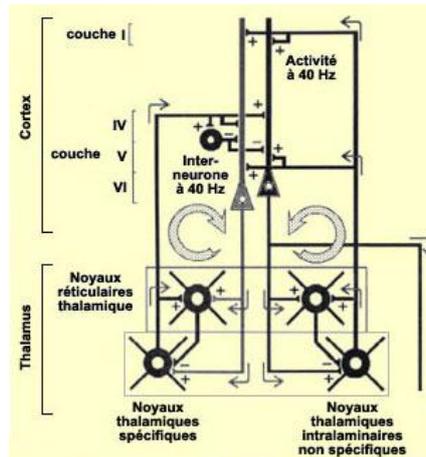
Certaines expériences ont aussi démontré qu'un son strident va, chez l'être humain éveillé, interrompre l'onde de balayage non spécifique et en repartir une nouvelle, alors que durant le sommeil paradoxal ce même son va produire une réponse corticale mais sans remettre à zéro l'onde de balayage. Ceci pourrait correspondre au fait qu'un tel stimulus va attirer notre attention consciente quand on est éveillé mais pas quand on est en sommeil paradoxal (et encore moins durant le sommeil profond où l'onde de balayage est absente ou considérablement réduite).

Dans une autre série d'expériences, les sujets entendaient une paire de clics sonores séparés par un intervalle allant de 3 à 30 millisecondes (ms). Les sujets étaient capables de distinguer les deux clics quand ils étaient séparés de 13 ms ou plus. Avec des intervalles plus courts, ils percevaient seulement un clic. Les enregistrements faits durant l'expérience avec le MEG révélaient par ailleurs que les intervalles plus courts que 12 ms produisaient une seule remise à zéro du balayage oscillatoire, alors que les plus longs intervalles en produisaient deux. Ces résultats semblent donc mettre en évidence un caractère discret plutôt que continu de la conscience, avec la durée de 12 ms étant le «quantum de la conscience», c'est-à-dire l'unité temporelle de base de l'expérience consciente.

L'équivalent dans un contexte naturel pourrait être par exemple une personne qui marche sur la rue en réfléchissant. Son cerveau génère alors des oscillations à environ 40 Hz. Tant que les représentations mentales s'accordent avec l'environnement extérieur, le cerveau continue de mettre la scène à jour selon un rythme stable. Mais si un chien menaçant aboie près de la personne, le cycle de 40 Hz est

abruptement remis à zéro pour incorporer le nouveau stimulus dans l'ensemble de la scène pour que la nouvelle information puisse être prise en compte.

Chaque onde qui balaie le cortex en 12,5 ms crée ainsi une nouvelle image, mais ces images s'enchaîneraient si rapidement qu'elles nous semblent continues, comme les images fixes d'un film génèrent un mouvement apparemment fluide lorsqu'elles défilent assez rapidement.



DES EFFETS QUANTIQUES À LA BASE DE LA CONSCIENCE?

La plupart des hypothèses qui tentent de faire des liens entre notre conscience subjective et ce qui se passe dans notre cerveau le font au niveau des neurones ou des assemblées de neurones. L'expression consacrée pour décrire cette démarche, les « corrélats neuronaux de la conscience », exprime d'ailleurs très bien ce postulat qui veut que la clé des processus conscients réside dans l'activité de nos cellules nerveuses.

Et de fait, l'activité des neurones et les liens qu'ils entretiennent entre eux se retrouvent au cœur de nombreux modèles comme ceux impliquant par exemple les boucles thalamo-corticales, les oscillations synchrones à 40 Hz ou encore l'influence des noyaux intralaminaires du thalamus sur la synchronisation neuronale.

Mais il existe de nombreuses théories qui tentent de relier le fonctionnement de notre conscience à des structures moléculaires et même aux effets si particuliers de la physique quantique de l'infiniment petit. Il est en effet probable que de plus en plus de mécanismes en deçà du niveau neuronal vont être découverts à mesure que nos techniques d'investigation de l'infiniment petit se raffinent. Et il ne sera pas surprenant de découvrir que certains de ces nouveaux mécanismes auront une influence sur notre conscience.

Une première molécule qui pourrait bien avoir un rôle dans les mécanismes de la conscience est le récepteur NMDA. Il s'agit d'une protéine sur laquelle se fixe le glutamate, ce neurotransmetteur excitateur relâché dans les synapses d'un grand nombre de neurones. Cette grosse molécule en forme de canal est donc insérée dans la membrane du neurone qui reçoit le neurotransmetteur, et son ouverture, suite à la libération du glutamate dans la fente synaptique, va mettre en branle toute une série de réactions biochimiques, qui va aboutir à une plus grande efficacité de cette synapse.

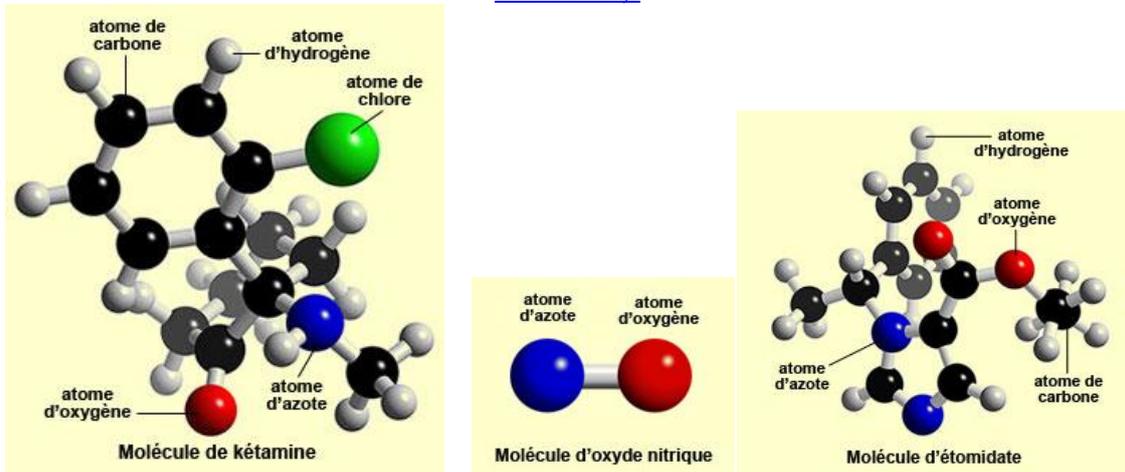
Les récepteurs NMDA sont donc une composante de premier plan du mécanisme par lequel nos neurones peuvent créer des associations durables entre eux en renforçant leurs connexions réciproques, ce qui permet la création de ce que l'on appelle les assemblées de neurones. Et comme ces assemblées sont des acteurs importants de bons nombres de modèles neurobiologiques de la conscience, il semble tout à fait pertinent d'assigner au récepteur NMDA un rôle non négligeable dans nos processus conscients.

Et c'est ce que fait le neurobiologiste allemand Hans Flohr en suggérant que les synapses qui ont des récepteurs NMDA sont celles qui peuvent le mieux se renforcer lorsque l'organisme détecte des régularités dans son environnement. Flohr rappelle également qu'une substance anesthésiante comme la kétamine, bloque l'effet excitateur normal du glutamate sur les récepteurs NMDA et provoque la perte de conscience.

Une autre substance anesthésiante, l'oxyde nitrique (le « gaz hilarant »), qui est pourtant une molécule d'un type complètement différent de la kétamine, agit ailleurs sur la chaîne de réactions induite par le récepteur NMDA pour produire en bout de ligne des effets semblables. Par conséquent, Flohr en conclut que le fonctionnement normal du récepteur NMDA et de ses seconds messagers est nécessaire à la conscience.

Plusieurs objections ont cependant été faites à cette approche qui n'implique pas ici d'effets quantiques en tant que tel. Certains ont rappelé que le fonctionnement normal d'innombrables mécanismes moléculaires, et pas seulement du récepteur NMDA, est nécessaire au bon fonctionnement de la conscience. D'autres ont fait remarquer que le bon fonctionnement des synapses à NMDA est aussi important pour les processus inconscients ou encore à la formation d'assemblées de neurones ne participant pas à des processus réflexifs.

Une autre grande objection vient du fait que d'autres substances anesthésiantes fonctionnent assez différemment de la kétamine ou de l'oxyde nitrique. L'étomidate, par exemple, endort en potentialisant les récepteurs GABA. Selon l'hypothèse de Flohr, il faudrait que l'étomidate inhibe indirectement les récepteurs NMDA, ce dont on n'a pas de preuve. Et même si c'était le cas, les deux drogues devraient avoir les mêmes effets anesthésiants. Mais ce n'est pas le cas non plus, l'étomidate n'ayant pas les mêmes effets analgésiques que la kétamine.



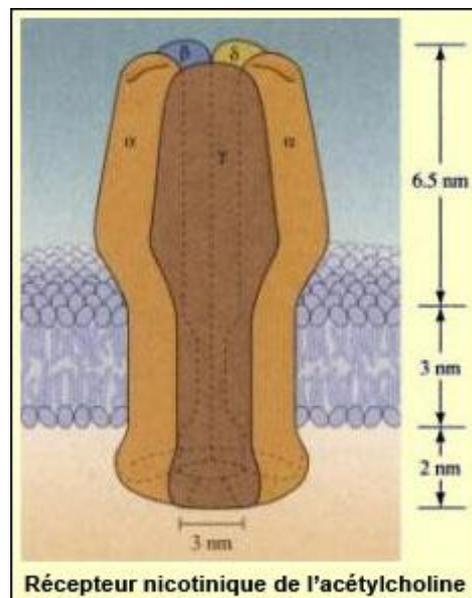
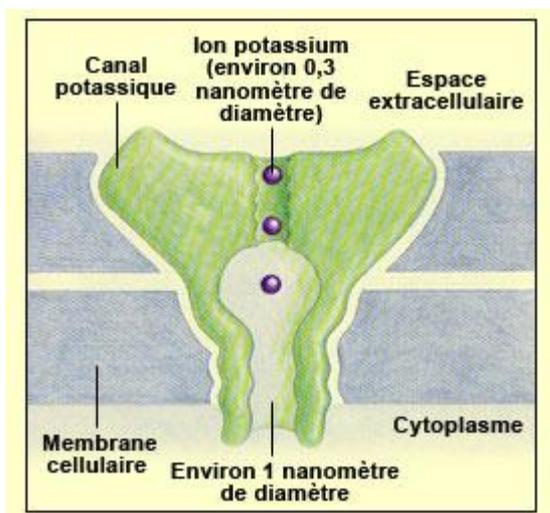
On voit poindre ici un problème encore plus vaste qui découle du fait que d'innombrables substances peuvent nous rendre inconscient. Or elles le font de manières si différentes qu'il faut admettre que l'état inconscient qu'elles induisent n'est pas simplement le manque d'une chose qu'on appellerait « la conscience ». Donc s'il est vrai qu'en science on peut généralement tenter de comprendre une chose en regardant les effets de son absence, force est d'admettre qu'avec la conscience, cette démarche s'avère bien incomplète.

Les approches cherchant à relier la conscience à des phénomènes moléculaires sont multiples. On y retrouve par exemple la proposition de Flohr et de l'implication possible des récepteurs NMDA dans nos processus conscients. Mais il existe une autre grande famille de théories explicatives de la conscience à partir de l'infiniment petit: celles qui s'inspirent des principes de la physique quantique.

Certaines ne sont que spéculatives et ne font allusion aux étranges propriétés quantiques que de manière métaphorique. Bien qu'elles puissent inspirer de nouvelles pistes susceptibles d'être par la suite testées expérimentalement, elles ne représentent pas de réels progrès scientifiques tant qu'elles demeurent de vagues analogies. Mais d'autres approches utilisent la théorie quantique actuelle pour modéliser concrètement des mécanismes physiologiques et psychologiques associés à la conscience. Par exemple, Beck et Eccles ont suggéré dans les années 1990 que le caractère probabiliste de la relâche des vésicules de neurotransmetteurs dans la fente synaptique serait d'origine quantique. Pour eux, la taille extrêmement petite des sites où se fait l'exocytose des vésicules synaptiques contenant les neurotransmetteurs permettrait à l'incertitude quantique d'y jouer un rôle.

Eccles décrit des structures appelées « dendrons » formées de groupes d'une centaine de dendrites de neurones pyramidaux du cortex. La conscience agirait en liant réciproquement chaque dendron à l'unité d'expérience mentale, ou « psychon », qui lui est associé. Et c'est l'action du psychon sur les dendrons qui provoquerait l'augmentation de la probabilité de relâche des vésicules synaptiques dans les synapses excitatrices de ces dendrites.

Comme on peut le constater, il s'agit d'une hypothèse dualiste en ce qu'elle suppose deux mondes distincts. La physique quantique au niveau des vésicules synaptiques joue ici un peu le rôle de la glande pinéale de Descartes, c'est-à-dire le lieu d'interaction entre les deux mondes. Il n'est pas inintéressant de rappeler que, bien qu'il ait reçu le prix Nobel de médecine en 1963 pour ses importantes découvertes sur les mécanismes synaptiques, Eccles était un catholique pratiquant qui n'a jamais caché sa foi en une âme humaine d'origine divine.



De toutes les théories sur la conscience faisant appel à la physique quantique, celle qui a la plus longue histoire fut proposée par John von Neumann dans les années 1930, puis reprise par Eugene Wigner dans les années 1960, et perfectionnée encore un peu plus par Henry Stapp à partir des années 1980. Dans sa monographie de 1955 sur les bases mathématiques de la physique quantique, von Neumann abordait la difficile question de la mesure dans le cadre de la théorie quantique, le fameux principe d'incertitude de Heisenberg (voir l'encadré). En effet, à mesure que l'on va vers l'infiniment petit, plus on se rend compte que ce que l'on appelle la réalité tend vers un état plus potentiel que réel, suggérant que le seul fixité qu'il puisse exister à ce niveau provient de l'acte même d'observation qui détermine en

quelque sorte un état particulier au détriment des autres. D'où l'idée de Von Neumann qui veut que ce qu'on appelle « l'observateur » d'une mesure puisse être considéré aussi bien comme l'instrument de mesure que comme le cerveau humain qui constate cette mesure. D'autres vont aller plus loin en affirmant que c'est la conscience humaine qui complète véritablement la mesure quantique, donnant à cette dernière un rôle crucial dans l'établissement de cette mesure quantique.

Inspiré par ces prédécesseurs, Stapp développe sa propre interprétation de cette approche. Sa proposition se base sur le principe d'incertitude appliqué aux canaux ioniques dans les neurones, canaux dont l'ouverture va aboutir à la relâche de neurotransmetteurs dans la fente synaptique. Et comme ce sont ces synapses qui déterminent nos pensées par le jeu des assemblées de neurones, Stapp pense que des effets quantiques au niveau de ces canaux ioniques pourraient influencer nos pensées conscientes. Pour appuyer son hypothèse, il rappelle que pour un canal ionique de 1 nanomètre de diamètre (soit 10^{-9} mètre), l'incertitude sur la vitesse est de l'ordre de 1 mètre par seconde selon le principe de Heisenberg. Pour Stapp ces effets sont suffisants pour donner lieu à une superposition d'états quantiques que la conscience serait capable de réduire à un seul état classique macroscopique. Pour le dire plus simplement, Stapp pense que les ondes quantiques s'effondrent quand des cerveaux intelligents sélectionnent parmi les alternatives quantiques certaines d'entre elles pour décider de leur comportement futur. Cette interprétation de la mécanique quantique est donc également une théorie de la conscience dans la mesure où ce sont les parties du cerveau impliquées dans l'effondrement de l'onde quantique qui seraient celles qui participent à la conscience. La conscience humaine aurait ainsi la capacité singulière de pouvoir faire s'effondrer l'onde quantique. Autrement dit, pas seulement la capacité de décrire la réalité physique, mais aussi de l'influencer. Et donc d'influencer, en particulier, l'activité du cerveau lui-même. Stapp n'essaie donc pas tant d'expliquer en terme quantique comment peut se constituer la conscience mais la prend plutôt comme quelque chose qui est donné au départ et qui peut influencer un phénomène quantique comme l'effondrement de la fonction d'onde. Et pour lui, cette façon de voir permettrait d'expliquer deux choses essentielles. D'abord la fonction adaptative de la conscience humaine qui serait d'éliminer les réalités alternatives pour nous permettre de mieux orienter nos actions. Et ensuite le libre arbitre si cher aux êtres humains. On peut dire qu'il s'agit là d'une version plutôt radicale de ce que les neurobiologistes qui travaillent sur l'attention appellent les mécanismes « top down ». Une version en tout cas trop poussée pour les matérialistes réductionnistes qui la rejettent. Tout au plus peut-on y discerner, disent certains commentateurs, des points de convergence vers l'approche matérialiste de la « théorie du double aspect ».

D'autres théories postulant des effets quantiques à la base de la conscience trouvent la théorie quantique actuelle incomplète et misent sur des développements futurs de celle-ci pour rendre compte de leurs intuitions. C'est le cas, par exemple, du modèle de Penrose et Hameroff.

On peut distinguer deux grands niveaux d'explication en physique : le niveau familier que nous utilisons tous les jours pour décrire les objets à grande échelle; et le niveau quantique utilisé pour décrire l'infiniment petit gouverné par l'équation de Schrödinger. Ces deux niveaux sont complètement déterministes et calculables. Toutefois, au niveau quantique, des états superposés sont possibles, alors qu'à notre niveau macroscopique, un seul de ces multiples états ne peut exister. Ce qui explique pourquoi, quand nous faisons une observation à notre niveau familier, les niveaux superposés doivent « s'effondrer » en une seule et unique possibilité.

C'est en s'appuyant sur cette interprétation classique de la mécanique quantique que des physiciens comme Wigner en sont venus à une proposition étonnante, à savoir que c'est la conscience qui pourrait provoquer cet effondrement de la fonction d'onde et déterminer ainsi les contenus conscients. Plusieurs auteurs comme Henry Stapp ont par la suite élaboré des modèles sophistiqués autour de cette idée. Mais d'autres, comme le physicien et mathématicien anglais Roger Penrose, prennent leurs distances d'avec ces interprétations conventionnelles de l'effondrement de la fonction d'onde. Pour Penrose, elles ne sont que des approximations qui devront être raffinées par des développements futurs de la théorie quantique.

C'est donc dans cette optique qu'il propose sa théorie de la « réduction objective ». Il s'agit d'un nouveau processus décrit comme étant de nature gravitationnelle mais non locale, c'est-à-dire avec la possibilité d'effets à distance. Pour ces raisons, il serait capable de lier des choses éloignées dans l'espace, rendant possible une cohérence quantique à grande échelle et des phénomènes « non computables » que notre cerveau pourrait exploiter.

Mais où exactement ces phénomènes pourraient-ils avoir lieu dans notre cerveau ? Penrose s'appuie ici sur la proposition de l'anesthésiologiste américain Stuart Hameroff selon laquelle la conscience émerge de la cohérence quantique au niveau des microtubules. Ces derniers sont, comme leur nom l'indique, de minuscules petits tubes faits de protéines que l'on retrouve dans toutes les cellules de notre corps, y compris les neurones. Les microtubules forment en quelque sorte le cytosquelette des cellules, participent à la division cellulaire ainsi qu'au transport des organites à l'intérieur des cellules.

Les microtubules sont composés de dimères de tubuline dont l'enroulement en spirale produit un petit tube d'environ 25 nanomètres de diamètre. Ces molécules de tubuline peuvent être dans deux états différents, soit allongé soit contracté, ce qui pourrait provenir, selon Hameroff, d'une superposition d'états quantiques.

Penrose et Hameroff s'intéressent aux microtubules parce que leur petite taille et leur structure protéinique en spirale fourniraient les conditions essentielles pour orchestrer les effondrements quantiques. Les processus de cohérence quantique doivent en effet demeurer raisonnablement isolé de l'environnement extérieur pour se produire, une condition que rempliraient selon eux les microtubules.

Ce modèle pourrait expliquer, affirment leurs auteurs, plusieurs caractéristiques fondamentales de la conscience. La possibilité d'effets à distance de la « réduction objective » pourrait ainsi rendre compte de l'unité de la conscience et l'indétermination quantique serait à l'origine du libre arbitre.

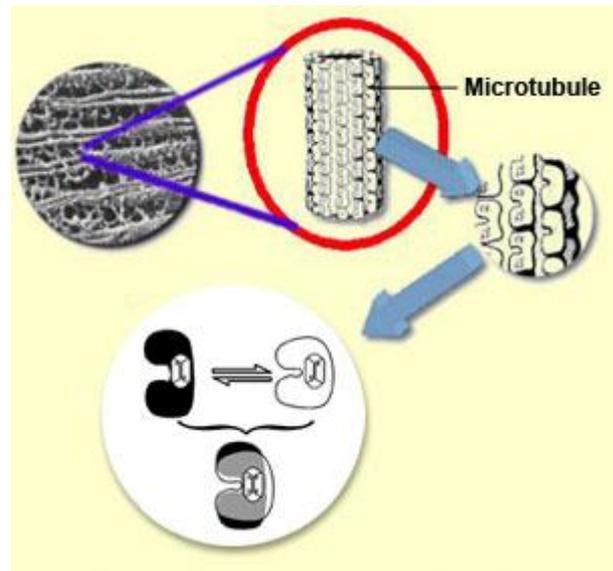
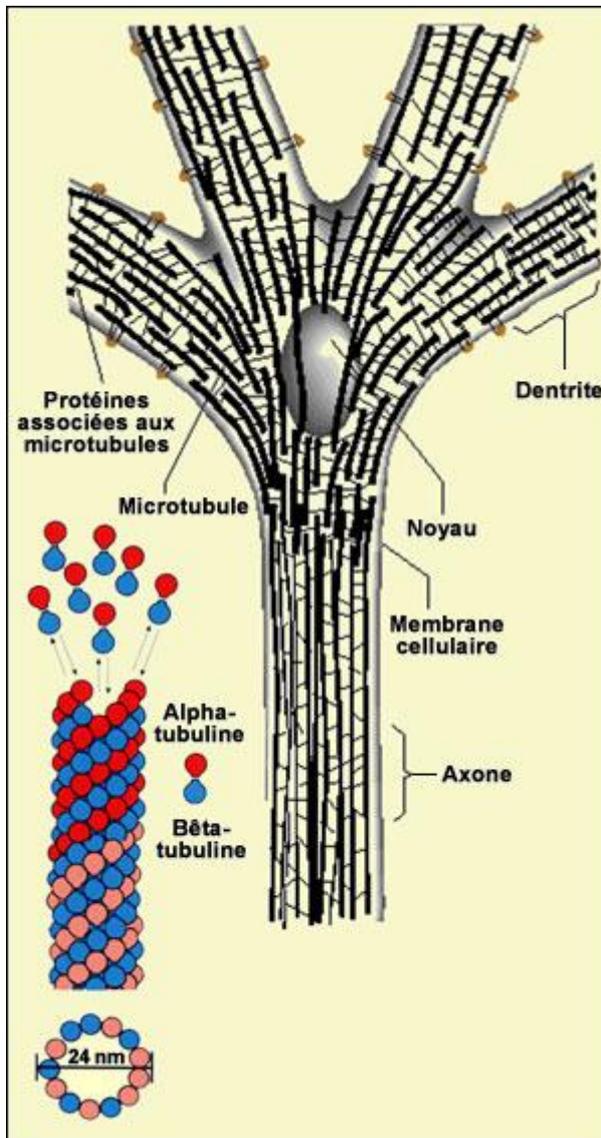
Penrose ajoute que sa théorie pourrait même aider à comprendre les étranges résultats de l'expérience de Libet. Car pour lui, lorsque le raisonnement classique au sujet de la séquence temporelle des événements nous mène à des conclusions contradictoires (comme d'avoir l'impression d'influencer le passé pour des échelles de temps de l'ordre de la demie seconde), cela constitue à ses yeux une forte indication que des effets quantiques sont à l'œuvre.

Le modèle de Penrose et Hameroff a subi de sérieuses critiques, notamment des philosophes Rick Grush et Patricia Churchland. Ces derniers soulèvent plusieurs objections qui les amènent à rejeter le modèle dans son ensemble. Ils rappellent d'abord que les microtubules se retrouvent dans toutes les cellules animales et végétales, et pas seulement dans les neurones du cerveau humain. Ils affirment aussi que des substances chimiques qui sont connues pour détruire les microtubules semblent ne pas avoir d'effets importants sur la conscience. Ils rappellent que plusieurs substances anesthésiantes agissent sans affecter les microtubules. Et soulignent finalement qu'il n'y a aucune évidence que les microtubules sont impliqués dans d'autres phénomènes provoquant des changements majeurs dans les états de conscience comme le cycle éveil – sommeil.

Au plan strictement de la physique, une critique classique est celle de Max Tegmark qui affirme que la température est trop élevée dans le cerveau pour que les particules élémentaires demeurent dans des états superposés suffisamment longtemps pour que les processus neuronaux puissent en bénéficier. Grush et Churchland ajoutent que les microtubules ne peuvent atteindre les conditions de pureté et d'isolation requis par la théorie de Penrose. Pas plus, selon eux, que les effets quantiques ne pourraient être transmis d'un microtubule à l'autre comme il le faudrait pour expliquer l'unité de la conscience. La théorie de Penrose ne fournit pas non plus d'explications valables aux yeux de Grush et Churchland sur la manière dont les effets quantiques pourraient interagir avec les neurones ou les neurotransmetteurs quand les microtubules sont supposés être isolés de leur environnement.

Une autre objection s'adresse à l'une des forces du modèle de Penrose et de Hameroff qui est, selon ses auteurs, de pouvoir rendre compte de l'unité de la conscience. Mais si cette impression de l'unité de notre conscience s'avérait une illusion comme d'autres le croient, encore une fois les explications fondées sur la non localité et la cohérence quantique perdraient de leur pertinence.

D'autres se sont demandés si la théorie de Penrose et Hameroff avait finalement vraiment quelque chose à voir avec la conscience ou si elle ne se contentait pas de remplacer le mystère de l'expérience subjective par un autre mystère, celui de la cohérence quantique dans les microtubules.



Grush et Churchland sont même allés jusqu'à se demander si la popularité du modèle de Penrose et Hameroff ne viendrait pas du fait que la réduction de la conscience à de simples corrélats neuronaux a toujours eu quelque chose de dégradant pour certaines personnes alors que l'alternative quantique permet de conserver une part de mystère réconfortant dans la conscience.

Ceci dit, il est de mise de rappeler ici une célèbre citation de Niels Bohr. Le père de la physique quantique et professeur de Werner Heisenberg dit un jour à un jeune physicien : « Nous reconnaissons tous que votre théorie est folle. La question qui nous divise est de savoir si elle est assez folle pour avoir une chance d'être vraie. »

ÉTATS DE CONSCIENCE

Parmi les états de conscience, on peut distinguer des états normaux, des états altérés (par des maladies, des traumatismes ...) et des états modifiés (par des psychotropes ...). Les états normaux de conscience existent à l'état d'éveil et cessent durant le sommeil. Dans l'état normal, on distingue plusieurs niveaux de conscience. Les principaux niveaux sont :

- La conscience primaire ;

- La conscience réflexive ;
- La conscience de soi.

Ils sont caractérisés par un fonctionnement normal du métabolisme cérébral, et par l'intégrité des structures impliquées dans la conscience.

Les états altérés de conscience sont consécutifs à des traumatismes, des lésions ou des maladies qui ont endommagés la structure cérébrale. Les principaux états altérés sont :

- L'évanouissement ;
- La conscience minimale (fluctuation ou forte diminution de l'état de conscience) ;
- L'état végétatif (existence d'un état d'éveil, mais sans perception. Le métabolisme cérébral est diminué parfois jusqu'à 70% du niveau normal) ;
- Le coma (absence de conscience, d'éveil, de sensibilité et de motilité, avec une conservation relative des fonctions réflexes et végétatives).

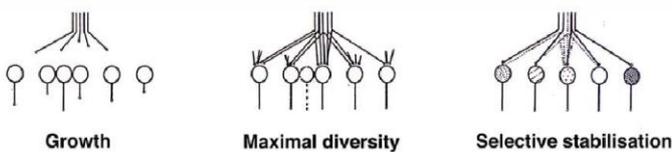
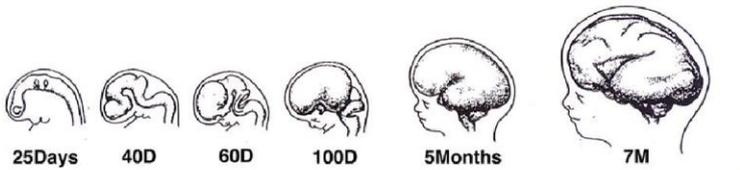
Les états modifiés de conscience sont en général transitoires, et proviennent de la consommation de substances psychotropes, ou d'activités particulières (hypnose, transe, méditation ...). Durant ces états, les sensations, les perceptions, les émotions et le psychisme sont modifiés.

LE CERVEAU DE L'HOMME SYNTHÈSE DE MULTIPLES EVOLUTIONS

EVOLUTION DES ESPÈCES: génomme humain-millions d'années



DEVELOPPEMENT ONTOGÉNÉTIQUE: épigénèse-jours, années



DYNAMIQUE DE LA PENSÉE: efficacités synaptiques-1 à 100 ms

EVOLUTIONS SOCIALES ET CULTURELLES: efficacités synaptiques & mémoires extracérébrales- 100 ms à milliers d'années

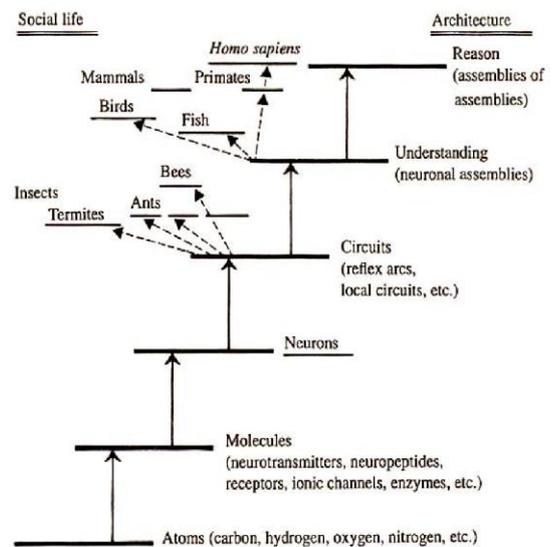
Niveaux de conscience

En comparant en particulier les capacités cognitives de différentes espèces animales, il apparaît différents niveaux de conscience :

- La conscience primaire (consciousness), au sens général, qui serait l'état le plus primaire et le plus basique du phénomène de conscience (représentation consciente de l'environnement et du corps du sujet). La plupart des animaux seraient limités à ce niveau de conscience ;
- La conscience introspective ou réflexive, qui correspondrait à une représentation consciente des représentations (être conscient d'avoir conscience) ;
- La conscience de soi (self-awareness), qui serait un état supérieur de conscience, où le psychisme accède à une connaissance claire et immédiate, non seulement de son activité, mais en plus de son identité propre et singulière, et tel que l'auteur de sa propre activité (capacité du sujet à se percevoir comme étant l'auteur de ses pensées). Seul les hominidés et les dauphins auraient accès à ce niveau de conscience. La conscience de soi est à distinguer de la reconnaissance de soi (self-recognition), capacité cognitive – généralement inconsciente – d'un organisme à se reconnaître à partir d'informations sensorielles olfactives, auditives, visuelles, etc.

Processus conscients et inconscients

HIÉRARCHIE ET PARALLÉLISME



Changeux & Connes 1989
Changeux & Dehaene 1989

**multiples évolutions emboîtées
 du niveau moléculaire aux fonctions cognitives
& à la conscience,
 ainsi qu'à la vie sociale & culturelle**

L'étude de la conscience met en évidence un fait remarquable : la plupart des processus du système nerveux sont inconscients (au sens cognitif). C'est le cas de tous les processus réalisés par la moelle épinière et le tronc cérébral incluant :

- tous les processus du système nerveux autonome (respiration, digestion, thermorégulation, osmorégulation, etc.) ;
- tous les processus dits « réflexes » (réflexe d'étirement croisé, réflexe stapédien, réflexe de préhension, etc.).

Mais c'est également le cas de nombreux processus cérébraux effectués par les structures plus complexes du prosencéphale, dont tout particulièrement le néocortex :

- tous les processus dits « automatiques » (lecture, conduite d'un véhicule ...) ;
- la capacité de perception et de localisation d'un stimulus tactile ;
- les ajustements précis des mouvements liés à la coordination visuo-motrice ;
- la « décision » de l'exécution d'un acte moteur ;
- certains processus cérébraux liés à des réactions émotionnelles de peur ;
- la reconnaissance des visages est un processus au moins partiellement inconscient ;

Le cerveau de patients ayant une hémionégligence traite cependant l'information visuelle présentée dans le champ « négligé ». Après lésion du cortex visuel, le cerveau reste capable de localiser inconsciemment des objets dans le champ visuel (phénomène de la « vision aveugle »). Dans la pathologie appelée prosopagnosie, la reconnaissance consciente d'un visage est impossible, mais les réactions physiologiques indiquent que le visage vu est inconsciemment reconnu. Certaines données montrent qu'apparemment le traitement du stimulus perçu emprunte le même chemin, que la perception soit « consciente » ou « inconsciente »³.

Les expériences les plus intéressantes concernent la prise de décision. Lors d'une expérience où des personnes devaient appuyer sur un bouton dès qu'elles ressentaient un stimulus tactile les chercheurs observent qu'« Alors que 500 ms sont nécessaires pour répondre consciemment à un stimulus tactile d'une intensité proche du seuil, il suffit de 100 ms pour donner une réponse motrice (appuyer sur un bouton) à ce même stimulus. Toutefois, le sujet aura l'impression d'avoir appuyé sur le bouton après avoir senti le stimulus, référant ainsi son mouvement à une expérience consciente ultérieure. »

Toutes ces données, provenant de personnes normales et de cas cliniques, montrent que la conscience n'est pas nécessaire pour la plupart des processus cérébraux. Ainsi, la conscience ne peut pas être considérée comme une étape nécessaire à l'accomplissement de certaines opérations, ni comme l'attribut systématique de certains secteurs du fonctionnement mental.

Ces données montrent l'existence d'une dissociation entre les processus cérébraux et la conscience. Le phénomène de « conscience » n'interviendrait pas dans le fonctionnement des processus cérébraux mais aurait une fonction cognitive supérieure de contrôle de l'action en cours. D'après Libet B. :

- « Le processus « conscient » de l'action, conséquence secondaire du processus « inconscient » initial, pourrait avoir pour fonction, selon, d'autoriser la poursuite, ou au contraire de suspendre l'action en cours de préparation. »

NEUROBIOLOGIE DE LA CONSCIENCE

En analysant les données expérimentales (EEG, etc.) et cliniques (coma, etc.), les régions cérébrales suivantes seraient impliquées dans l'état de « conscience » :

- La formation réticulée ;
- Le thalamus (apparemment les noyaux intralaminaires) ;
- Le cortex préfrontal ;
- Le gyrus cingulaire postérieur ;
- Le précunéus et le cortex rétrospinal.

Les connexions fonctionnelles entre les régions cérébrales suivantes seraient également impliquées dans la « conscience » :

- Entre le cortex préfrontal gauche et le précunéus ;
- Entre les noyaux thalamiques intralaminaires et le précunéus.

En tenant compte des connaissances actuelles sur les fonctions respectives de ces différentes régions, il semble possible de regrouper ces structures neurales en deux grands types :

- 1) les structures qui auraient une fonction d'activation du cortex cérébral, et
- 2) les structures directement impliquées dans la genèse du phénomène de « conscience ».

Les structures qui auraient une fonction d'activation du cortex cérébral, à savoir la formation réticulée pontique et les noyaux intralaminaires du thalamus, appartiennent à un système relativement bien connu, le système activateur ascendant. Ces structures ne seraient pas directement impliquées dans le processus de « conscience », mais auraient un rôle indirect, par l'activation généralisée du néocortex. Un haut niveau d'activité du cortex serait une condition nécessaire mais non suffisante à l'émergence de l'état de « conscience ». Les structures directement impliquées dans la genèse du phénomène de « conscience » semblent toutes être des structures corticales associatives, organisées en réseaux.

Les données provenant de l'étude de cerveaux dédoublés après section du corps calleux (Split brain) indiquent que les régions corticales les plus cruciales à l'état de « conscience » seraient situées dans l'hémisphère dominant ou langagier. Ces données, couplées à celles obtenues sur des patients en état de coma et montrant l'importance des connexions fonctionnelles entre le précunéus et le cortex préfrontal gauche et l'importance du précunéus et du gyrus cingulaire postérieur, semblent indiquer que les structures clés de l'état de « conscience » seraient un ou des réseaux de circuits spécialisés localisés dans les régions préfrontales et corticales associatives postérieures de l'hémisphère dominant ou langagier.

Enfin, des données expérimentales obtenues sur des sujets en état de repos indiquent que certaines des régions cérébrales impliquées dans la « conscience » seraient phylogénétiquement récentes.

Toutes ces données permettent de supposer, avec une bonne probabilité d'exactitude, que le phénomène de « conscience » serait dépendant de réseaux spécifiques associant les régions cérébrales les plus récentes et complexes, c'est-à-dire les aires corticales associatives polymodales, dans l'hémisphère dominant.

En conclusion, la conscience n'existerait que chez les primates ayant un système nerveux très développé et elle apparaîtrait progressivement dans l'enfance, consécutivement au développement des réseaux de neurones connectant entre elles les régions les plus

complexes du cerveau (aires associatives polymodales). Sous toutes réserves, la fonction de la conscience serait le contrôle supérieur des activités cérébrales les plus complexes.

Il semblerait, en fonction des données actuellement disponibles, que les structures neurales dont l'organisation spécifique serait à l'origine du phénomène de conscience seraient un ou des réseaux de circuits spécialisés, phylogénétiquement récents, localisés dans les régions frontales (cortex frontal) et dans les régions corticales associatives postérieures (précunéus et gyrus cingulaire postérieur) de l'hémisphère dominant ou langagier (l'hémisphère gauche chez 95 % des personnes).

Au niveau fonctionnel, pour qu'il puisse exister la conscience d'un objet spécifique, il faudrait, à la fois, que le module cérébral qui traite de cet objet soit intensément et durablement actif (durée supérieure à 250 ms), et, en plus, que les réseaux de circuits spécialisés localisés dans les régions frontales et corticales associatives postérieures de l'hémisphère dominant ou langagier soient également et simultanément actifs.

Pour donner un exemple, la vision consciente d'un objet impliquerait une activité intense et supérieure à 250 ms dans le cortex occipital (qui est le cortex visuel) et également dans le réseau impliqué dans la conscience (le cortex frontal, ainsi que le précunéus et le gyrus cingulaire postérieur de l'hémisphère dominant).

APPROCHES META-SCIENTIFIQUES DE LA CONSCIENCE

Face à l'inconnu, plusieurs approches de la conscience existent pour tenter de comprendre la conscience. L'une, issue du matérialisme, ne postule pas de projet divin ou autre dans la conscience. Cette approche est bien représentée par Richard Dawkins. Une autre admet, dans différentes variantes, l'existence d'un éventuel monde immatériel, ou d'un « monde des idées ». C'est celle de Denys Turner, John Eccles, Roland Omnès ou Alain Connes. Une troisième est celle de Daniel Dennett. Pour être complet, il convient de citer aussi celle de Roger Penrose, pour l'originalité de ses vues qui se démarquent des trois précédentes (il admet l'existence d'un monde des idées, tout en le faisant entrer dans un cadre physique/mathématique, donc in fine matérialiste). Les approches hors matérialisme pur restent considérées comme marginales.

Contexte matérialiste

L'hypothèse où tout ce qui est observé dans l'univers peut s'expliquer sans faire appel à une intervention divine ou spirituelle est appelée matérialisme. Dans cette conception, tout ce qui existe est formé de matière. La science opère dans un cadre matérialiste. D'après le darwinisme, l'être humain est le produit d'un processus d'évolution par sélection naturelle. On peut donc supposer que la conscience est un caractère ayant été acquis car il apportait un avantage sélectif. Au cours de l'évolution, elle serait devenue nécessaire pour assurer la survie en milieu hostile.

Le scientifique, dans sa tentative d'expliquer la conscience, la définit comme étant une fonction du cerveau. Il existe alors deux possibilités :

- Le cerveau étant considéré comme un simple système de traitement de l'information, la conscience serait alors ce qui pilote son fonctionnement.
- Il existe des propriétés de la matière que les scientifiques n'ont pas encore découvertes et qui peuvent expliquer le phénomène de la conscience.

La conscience en tant que logiciel

Cette possibilité est très utilisée dans les films de science-fiction où l'on présente, par exemple, des ordinateurs qui absorbent pendant un certain temps les connaissances de certaines personnes dont le corps reste inanimé durant le temps du transfert.(exemple Avatar)

Des chercheurs comme Ray Kurzweil ont envisagé la possibilité d'une survie de l'être humain par le transfert de l'ensemble de son contenu mental dans des réseaux de neurones artificiels dans la perspective que la conscience suivrait ce transfert. Dans de tels scénarios, la conscience est perçue comme un logiciel qui aurait la capacité de quitter le corps pour être transféré sur un autre support, ordinateur ou corps artificiel.

Cette hypothèse amène une question : un logiciel peut être recopié. Que se passerait-il si le logiciel conscience était dupliqué sur plusieurs supports en plusieurs exemplaires ? Si la conscience est un logiciel, il devient possible de créer des ordinateurs conscients (à titre d'exemple, le roman : Destination vide). Si un programmeur pouvait créer un ordinateur si puissant qu'il en devienne conscient, que serait-il capable de faire ? Un programme informatique est une suite d'instructions. La suite d'instructions va-t-elle créer dans l'ordinateur qu'il soit conscient de sa propre existence ? Ou ne sera-t-il capable que de mimer la conscience ?

Cette approche pose un certain nombre de problèmes fondamentaux, soulevés notamment par Roger Penrose.

De la même manière qu'un système formel est fondamentalement limité dans les propositions qu'il peut démontrer (voir Théorème de Gödel), une machine de Turing (sur laquelle un logiciel s'exécute) est également fondamentalement limitée : un ensemble important de problèmes ou de propositions seront inaccessibles à un logiciel donné. Or, l'esprit humain se distingue précisément par sa capacité à constamment dépasser ses limites.

On peut noter également les échecs récurrents de l'intelligence artificielle à émuler une conscience¹⁴, même élémentaire, malgré des puissances de calcul toujours en croissance exponentielle.

La conscience en tant que propriété de la matière

Dans l'hypothèse où la conscience n'est pas un logiciel mais en restant dans la perspective matérialiste, il reste l'hypothèse qu'il existe des propriétés de la matière que les scientifiques n'ont pas encore découvertes. Ces propriétés permettraient à la matière, dans une certaine configuration, de générer le phénomène de la conscience. La mécanique quantique semble à l'heure actuelle être la théorie la plus favorable à la naissance d'une hypothèse pouvant expliquer comment la matière peut générer le phénomène de la conscience car :

Les phénomènes quantiques permettent d'envisager d'implémenter des « algorithmes » qui seraient non implémentables sur des machines de Turing, qui possèdent les limitations soulignées au paragraphe précédent (voir aussi ordinateur quantique).

L'aspect non encore totalement élucidé de la décohérence quantique permet d'imaginer que celle-ci pourrait être influencée par des paramètres cachés, qui pourraient être source de conscience (l'état des neurones serait ainsi influencé par ces paramètres cachés)

Johnjoe Mac Fadden pense que la conscience est une propriété des champs électromagnétiques générée par le cerveau humain.

Roger Penrose explore la possibilité que la conscience puisse être générée par des superpositions quantiques à grande échelle, notamment situées dans les microtubules constitutifs du cytosquelette des neurones.

André Maurois, dans Les Silences du colonel Bramble, compare le fonctionnement de la conscience à un ministère : chaque soir ses employés le quittent pour aller dormir, reviennent le matin, sont renouvelés intégralement tous les quarante ans par le jeu des départs en retraite, et pourtant il s'agit bien du même ministère sans qu'il existe pour autant d'âme immatérielle du ministère.

Contexte spiritualiste

La difficulté à expliquer la conscience dans un contexte matérialiste conduit à l'hypothèse que la conscience est, peut-être, la caractéristique de quelque chose qui n'est pas matériel. Cette nouvelle conception permet d'éviter certaines des difficultés rencontrées dans le contexte matérialiste, mais pose d'autres problèmes théoriques car elle implique qu'il existe une partie de l'existential qui n'a pas encore été abordée par la physique. L'avantage d'une telle conception est de se dire que si la conscience n'appartient pas au corps physique, elle peut ainsi survivre au renouvellement matériel évoqué plus haut. Et si la conscience survit au renouvellement matériel du corps, il y a des chances qu'elle survive à la destruction finale de celui-ci qu'est la mort physique. On peut aussi supposer que la conscience après la mort réintègre un autre corps puisque certains hypnotiseurs prétendent avoir amené certaines personnes à se rappeler leurs vies précédentes sous hypnose.

Un des problèmes soulevés par une conception spirituelle de la conscience est de savoir comment celle-ci communique avec le corps physique. Comment la volonté peut-elle agir sur le corps en induisant des influx nerveux dans les nerfs. Sir John Eccles, prix Nobel de physiologie en 1963, invoque la mécanique quantique en postulant l'hypothèse selon laquelle l'esprit interviendrait en modifiant la probabilité d'émission du transmetteur chimique. Le champ de probabilité en physique quantique par l'indétermination qu'il génère au niveau physique permettrait au monde spirituel de contrôler le monde physique.

CONSCIENCE ET PERCEPTION DU TEMPS

La perception du temps semble très liée aux émotions. Lors d'une expérience désagréable, le temps semble s'écouler plus lentement, alors que lors d'une expérience agréable, le temps semble s'écouler plus rapidement. Cette constatation nous mène à nous poser une question fondamentale. Puisque l'écoulement du temps nous paraît si différente selon les moments, qu'en est-il de l'écoulement réel du temps indépendamment de nous ?

Nous avons une sensation de l'écoulement du temps, mais cette sensation étant différente selon les moments, nous pouvons penser que l'écoulement du temps que nous croyons réelle n'est peut-être qu'une illusion, une sensation programmée dans notre cerveau. À quelle vitesse le temps peut-il s'écouler si nous-mêmes avons une perception si variable de son écoulement ?

Frank Tipler introduit une notion de temps subjectif qui se distingue du temps physique. Selon Tipler, une unité de temps subjectif correspond à une information traitée (l'esprit étant considéré comme un système de traitement). La sensation d'écoulement du temps serait donc différente selon la quantité d'information que l'esprit humain est en mesure de traiter et donc dépendrait du stade d'évolution de celui-ci.

Des considérations en théorie des cordes amènent à penser que le temps physique ne s'écoule pas. La conscience parcourrait le temps qui est figé, un peu comme une voiture parcourt une route.

La situation se complique lorsque l'on se place dans le cadre de la théorie d'Everett. Dans ce cadre, l'évolution du monde n'est pas linéaire mais arborescente. À chaque instant l'évolution emprunte simultanément toutes les possibilités prévues par la mécanique quantique, et on peut alors légitimement se poser la question de savoir ce qu'il advient de la conscience individuelle. Notre conscience se divise-t-elle aussi pour coexister simultanément dans des mondes parallèles ? Paul Jorion répond négativement à cette question. Selon lui, la conscience emprunterait le chemin d'évolution qui est le plus favorable pour elle.

HISTOIRE DE L'ETUDE DE LA CONSCIENCE

Descartes localisait la conscience dans la glande pinéale.

Sigmund Freud localisait la conscience sur la couche externe du cerveau. La couche interne, selon lui, correspondait à l'inconscient.

Plus récemment le prix Nobel Roger Sperry, après avoir sectionné le corps calleux et la commissure antérieure reliant les deux hémisphères du cerveau dans le but de soulager les personnes atteintes de l'épilepsie, constata une forme de dédoublement de la conscience. Une des deux consciences était verbale et analytique et semblait correspondre à l'hémisphère gauche du cerveau. L'autre conscience, plus subjective, semblait correspondre à l'hémisphère droit du cerveau. Roger Sperry en déduisit que la conscience n'est pas localisée à un endroit particulier dans le cerveau. Selon lui, c'est comme si toutes les parties du cerveau y contribuaient de concert.

POUR LIRE LES REFERENCES, CONSULTER :

[http://fr.wikipedia.org/wiki/Conscience_\(biologie\)#cite_ref-laureys_7-0](http://fr.wikipedia.org/wiki/Conscience_(biologie)#cite_ref-laureys_7-0)

SUR BENJAMIN LIBET ET LA "RETRODATATION CONSCIENTE" 26.10.08

<http://we-the-mutants.blogspot.com/search?q=soon>

Dans la discussion récente (voir ci-dessous) d'un article consacré à l'offensive spiritualiste dans le domaine neuroscientifique, un commentateur évoquait les expériences de Benjamin Libet . Les travaux du neurophysiologiste Benjamin Libet (1916-2007) figurent parmi les plus commentés dans la littérature philosophique et scientifique sur la conscience. Ils ont été résumés et vulgarisés par le chercheur dans un essai publié à la fin de sa carrière (Libet 2004). Les deux idées que l'on voit le plus souvent évoquées sont les suivantes : tout stimulus prend environ 500 ms (une demi-seconde) pour accéder à la conscience du sujet, mais la sensation du stimulus semble subjectivement « rétrodatée » (back-referred) pour éviter un fossé d'une demi-seconde entre l'expérience et la conscience ; il existe pareillement un fossé de 500 ms entre les premières manifestations neurales d'un acte volontaire et la conscience de l'intention de l'acte. Le premier point a suscité d'abondants commentaires car il suggère que la conscience serait capable de « remonter le temps » et, plus généralement, que les états mentaux n'obéissent pas à la même physique que les états neuraux. Cette interprétation dualiste fut notamment soutenue par Eccles (1977) et Penrose (1989). Le second point repose à nouveaux frais la vieille question du libre arbitre, puisqu'il semble affirmer que nos actes volontaires sont déterminés inconsciemment.

Pour obtenir ces résultats concernant la rétro-estimation temporelle de la conscience, Libet et son équipe ont mis au point des protocoles précis, dans les années 1960. Des sujets volontaires, atteints ou non de troubles selon les expériences, subissaient de courtes

stimulations électriques sur la main ou directement sur une partie du cerveau (cortex somatosensoriel, lemniscus médian ou thalamus). L'intensité et la durée de ces stimulations étaient soigneusement mesurées. Dans le même temps, le volontaire devait analyser la conscience de ses sensations. Pour l'estimer temporellement, ce volontaire observait un oscilloscope dont les points lumineux dessinaient un cercle en une seconde. En indiquant aux expérimentateurs à quel point de la trajectoire circulaire le stimulus était subjectivement perçu, il permettait de mesurer à 50 ms près l'émergence de la sensation consciente. Dans l'expérience la plus citée (Libet 1979), le sujet reçoit une stimulation corticale directe, dont il a conscience après 500 ms. Puis dans un second temps, il reçoit cette stimulation corticale et, 200 ms plus tard, une stimulation sur le doigt. Au lieu de ressentir consciemment une seconde sensation à 700 ms (200 ms de décalage pour le doigt + 500 ms de temps d'accès à la conscience), le sujet affirme ressentir la stimulation du doigt avant celle de la zone corticale. D'où l'idée d'une rétrodatation par la conscience. 500 ms peuvent paraître un délai très court, mais le potentiel d'action d'un neurone dure 2 à 3 ms. Libet a suggéré comme hypothèse que le premier potentiel évoqué par les neurones en fonction d'un stimulus, qui apparaît environ après 25 ms, servirait de point de repère pour la rétrodatation consciente.

Ces expériences de Libet sur la rétrodatation ont pour principale faiblesse de ne pas avoir été répliquées par d'autres équipes. Ce qui rend du même coup étrange ou prématurée l'avalanche de commentaires qu'elles ont suscitée. Et cela d'autant que plusieurs chercheurs ont souligné, tardivement, des faiblesses méthodologiques en se penchant sur les données des papiers originaux (Gomes 1998, 2002, Klein 2002, Pockett 2002). Parmi celles-ci, on notera les points suivants (brièvement résumés) :

1. seuls 3 sujets (stimulation corticale) et 2 sujets (stimulation thalamique) ont été testés, dans des conditions différentes (implants permanents dans le cas thalamique, provisoires dans le cas cortical, une stimulation visuelle au lieu d'une stimulation tactile pour l'un des trois cas corticaux). Les stimulations périphériques (peau, vue) et centrales (corticales ou thalamiques) différaient (tantôt série de pulsions faibles, tantôt pulsion forte) d'une expérience l'autre sans contrôle sur leurs latences en fonction de l'intensité ;
2. en psychophysique, la sensation d'un sujet est décrite par une fonction psychométrique répartie autour du point moyen d'égalisation subjective (point où la valeur est jugée aussi souvent plus importante que moins importante par rapport à la valeur réelle du stimulus) selon une certaine pente. L'analyse des données brutes de Libet sur les 5 sujets suggère que l'incertitude de cette fonction temporelle est équivalente à l'asynchronie observée. Des distorsions temporelles de 100 ms étant couramment rapportées sur des stimulations synchrones concernant deux sens, vue et toucher (Spence et al. 2001), il ne paraît pas incongru qu'une stimulation tactile et une stimulation corticale / thalamique « artificielle » présente des variations plus importantes, la fonction psychométrique de la seconde ayant une pente faible ;
3. plus fondamentalement, les premiers travaux de Libet sur la stimulation directe du cortex somatosensoriel (Libet 1964) montrent que le seuil de 500 ms permettant « l'adéquation neurale » est atteint selon des conditions précises (intensité, durée, nombres d'électrodes et surface corticale concernée), mais ne forme pas pour autant un seuil absolu. Une sensation peut par exemple être ressentie entre 100 et 500 ms si la fréquence de la stimulation électrique est de 15 Hz (mais il faut de 500 ms à 1 s pour 8 Hz). Par ailleurs, cette expérience originale met en évidence un effet de facilitation : après une première série, les neurones réagissent plus facilement dans un délai de 30s à 4 mn. Et chaque impulsion semble un pas cumulatif vers un seuil d'excitabilité. Si une stimulation liminale met 500 ms à atteindre le seuil de sensation, une stimulation supraliminale mettra moins de temps. Le problème, notamment souligné par Susan Pockett, est que Libet parlera dans tous ses travaux ultérieurs d'une condition « normale » de 500 ms pour provoquer une sensation consciente, alors que la « normalité » en question est arbitraire (c'est simplement la durée nécessaire sur la base de l'intensité liminale pour un emplacement cortical et un faible nombre de sujets, dans des conditions n'ayant rien de naturel puisqu'une électrode est placée directement sur le cortex du patient) ;
4. il faut ajouter que la rétrodatation peut aussi être analysée comme un souvenir déformé par la mémoire de travail, soit une distorsion cognitive sans rapport avec une mesure objective du temps par la conscience (Dennett 1991).

Il paraît donc difficile de considérer les expériences de Libet sur la rétrodatation consciente des stimulations neurales inconscientes comme une base solide pour inférer une révision drastique des rapports entre états cérébraux et états mentaux. Le chercheur a assurément ouvert une voie pertinente d'observation et d'analyse, mais celle-ci demande à être reprise et approfondie, à la lumière notamment des progrès en électrophysiologie et imagerie cérébrale.

Concernant le second aspect des travaux de Libet (décalage entre le déclenchement neural inconscient d'une action volontaire et la conscience d'engager l'action), je ne m'étendrai pas ici dans la mesure où le sujet est moins troublant pour les partisans de l'identité psychoneurale, et qu'il demanderait de longs développements sur les équivoques associées à la notion de libre arbitre. D'autant que des travaux récents (Soon et al. 2008, commenté ici voici quelques mois) font état d'un décalage de 7 secondes entre les toutes premières manifestations neurales d'une décision et sa conscience chez le sujet, ce qui va bien au-delà de 500 ms observés par Libet, ou d'autres (D. Wegner, M. Jeannerod, etc.).

RÉFÉRENCES :

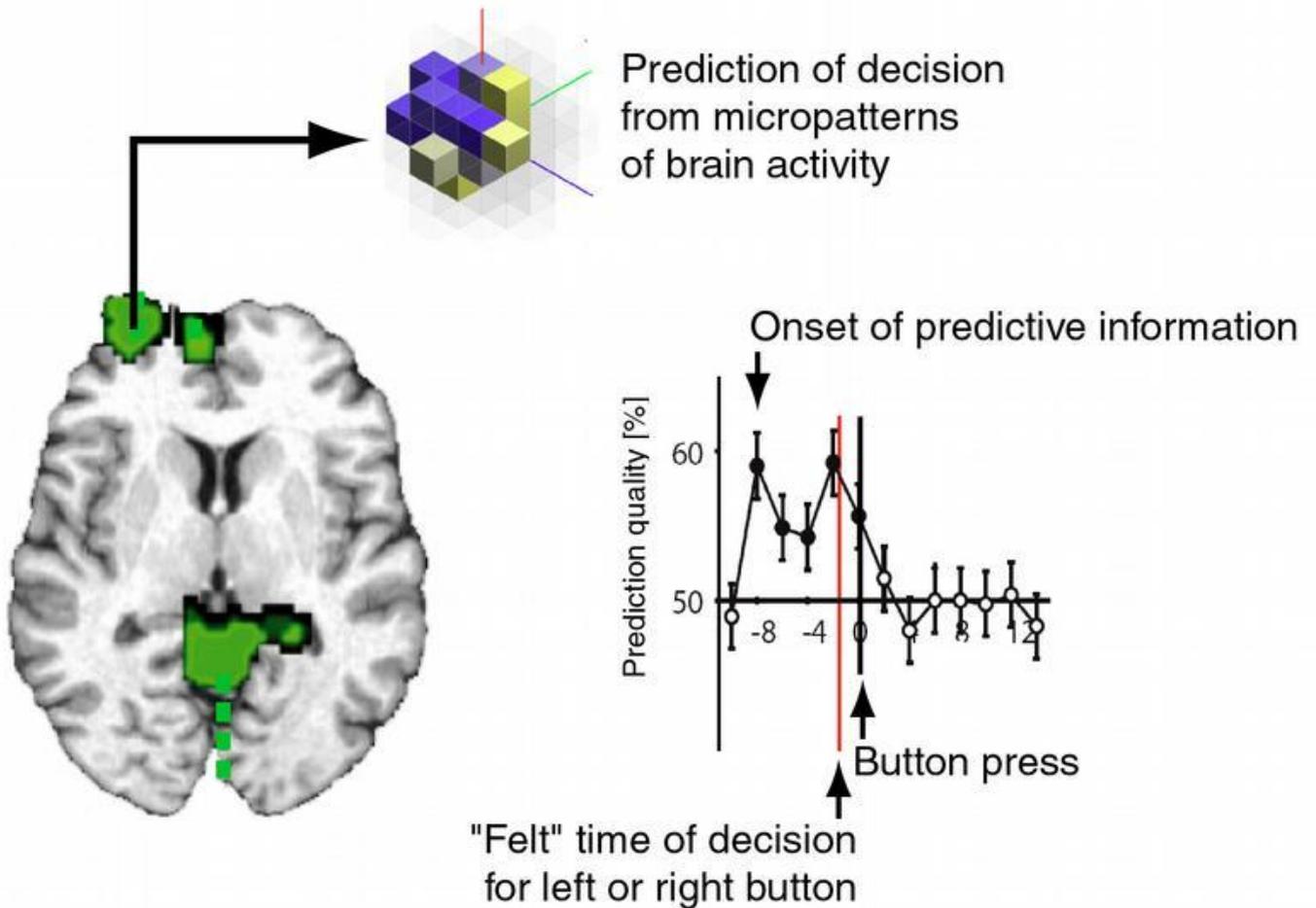
- Dennett D. (1991), *Consciousness Explained*, Penguin Books, Londres, New York (trad. fr. : *La conscience expliquée*, Odile Jacob, Paris).
- Gomes G. (1998), *The timing of conscious experience: A critical review and reinterpretation of Libet's research*, *Consciousness and Cognition*, 7, 4, 559-595
- Gomes G. (2002), *Problems in the timing of conscious experience*, *Consciousness and Cognition*, 11, 2, 191-197.
- Klein S.A. (2002), *Libet's temporal anomalies: A reassessment of the data*, *Consciousness and Cognition*, 11, 2, 198-214.
- Libet B. et al. (1964), *Production of threshold levels of conscious sensation by electrical stimulation of human somatosensory cortex*, *Journal of Neurophysiology*, 27, 546-578.
- Libet B. et al. (1979), *Subjective referral of the timing for a conscious sensory experience*, *Brain*, 102, 193-224.
- Libet, B. et al. (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, 623-642.
- Libet B. (2004), *Mind Time. The Temporal Factor in Consciousness*, Harvard University Press, Cambridge, Londres.
- Penrose R. (1989), *The Emperor's New Mind*, Oxford University Press, Oxford.
- Pockett S. (2002), *On subjective back-referral and how long it takes to become conscious of a stimulus: A reinterpretation of Libet's data*, *Consciousness and Cognition*, 11, 2, 144-161.

Popper K.R., J.C. Eccles (1977), *The Self and its Brain*, Springer-Verlag, Berlin.

Spence C. et al. (2001), Multisensory prior entry, *Journal of Experimental Psychology. General*, 130, 4, 799-832.

7 secondes d'inconscience... Le libre-arbitre au scanner 15.4.08

John-Dylan Haynes et ses collègues ont examiné en imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf) le cerveau de 14 volontaires prenant une décision simple (appuyer sur un bouton situé à gauche ou à droite). Les volontaires devaient signaler le moment où leur décision était faite, pendant que le scan examinait en détail la signature cérébrale de chaque processus de décision. Par la suite, les examinateurs ont été capables de prédire (grossièrement, 60% de réussite au lieu de 50% dus au seul hasard) le choix que feraient les volontaires sept secondes avant leur décision consciente. Ce qui suggère que l'essentiel de la formation d'un choix conscient se situe hors du domaine de la conscience. Dans les années 1980 et 1990, les travaux de Benjamin Libet avait déjà montré que plusieurs dixièmes de secondes séparent la perception cérébrale et la perception consciente d'un état cognitif ou sensitif. L'amélioration des moyens d'observation du cerveau depuis cette date semble donc considérablement élargir le délai.



Faut-il y voir une remise en cause du libre-arbitre ? Pas forcément, du moins pas la plus significative (il y a bien d'autres travaux sur les biais cognitifs non conscients affectant nos jugements). D'abord, il faudrait des analyses plus complètes et plus détaillées - on n'est pas très loin ici du pile ou face en terme d'efficacité prédictive -, par exemple analyser des cas où le sujet change consciemment de décision au dernier moment. Mais surtout, seule une vision naïve du libre-arbitre en fait une instance séparée des processus cérébraux, capable à tout moment de les modifier dans tel ou tel sens. Si le libre-arbitre existe, ce qui reste bien sûr à démontrer, cela concerne plutôt ce qui se passe après avoir appuyé sur le bouton, c'est-à-dire la manière dont un individu modifie progressivement ses choix futurs en fonction de ses choix passés.

Référence :

Soon C.S. et al. (2008), Unconscious determinants of free decisions in the human brain, *Nature Neuroscience*, online pub., doi:10.1038/nm.2112.