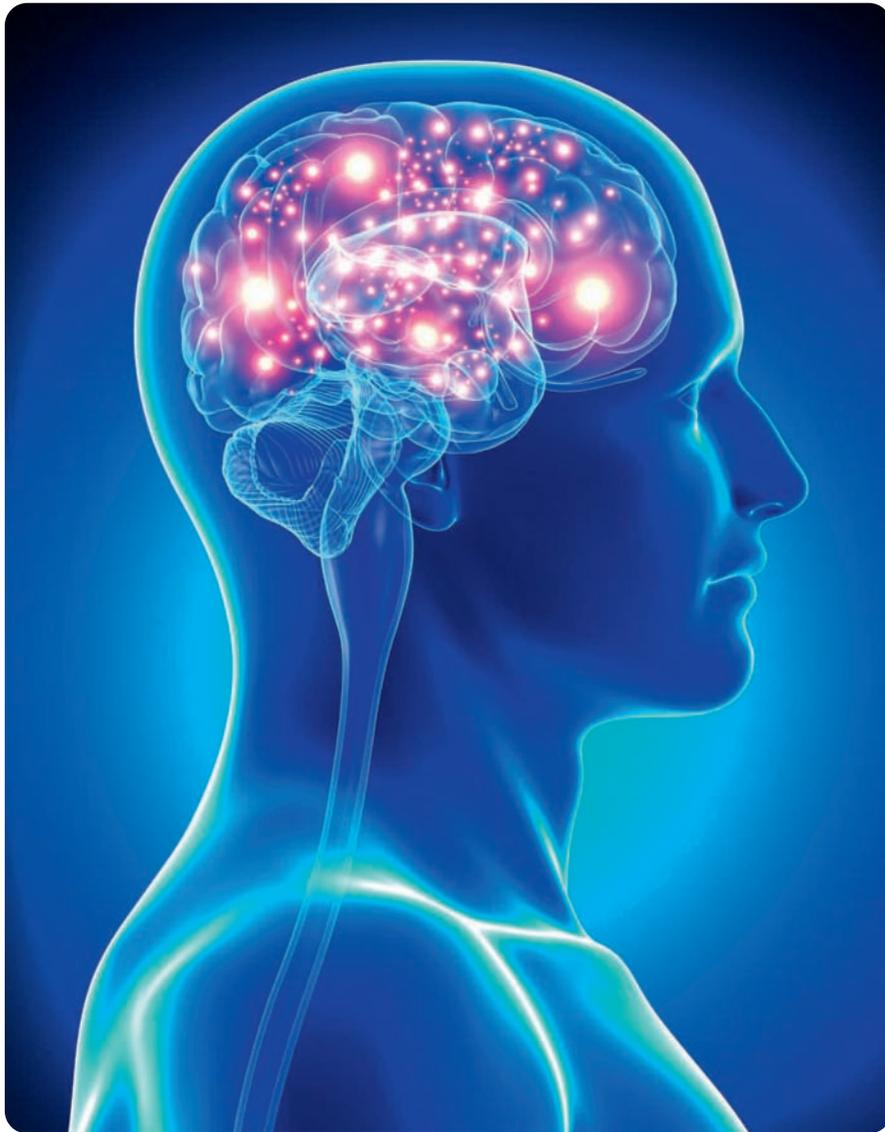


Dans les secrets du cerveau



Vendredi 11 octobre 2013
Collège des Bernardins – Paris



Dans les secrets du cerveau

Colloque organisé par Sciences du Vivant et Société
Sous la présidence de Messieurs Alain Mérieux et Jean-Pierre Claveranne
Le 11 octobre 2013 au Collège des Bernardins (Paris)



somm

SOMMAIRE

Sciences du Vivant et Société	5
Les intervenants	6
La prodigieuse évolution du cerveau : De l'émergence de la pensée conceptuelle vers l'intelligence artificielle	7
Evolution de la cognition : de l'Australopithèque à Homo Sapiens ...	10
Le cerveau adulte : un chantier perpétuel !	23
Les bases cérébrales de la sociabilité	37
La mémoire cérébrale sous l'éclairage de la théorie de l'information..	51
Débat.....	68

Sciences du Vivant et Société



A l'initiative de leurs deux présidents, Messieurs **Alain MÉRIEUX** et **Jean-Pierre CLAVERANNE**, les Fondations Mérieux et Bullukian se sont associées pour favoriser la réflexion entre les différents acteurs concernés par l'évolution de la science et son impact potentiel sur la société.



Les thèmes choisis pour ces réflexions concernent les applications des découvertes scientifiques et leurs conséquences potentielles dans les domaines de la santé de l'alimentation et de l'environnement.

Ces découvertes scientifiques vont, sans aucun doute, façonner notre société par leurs applications.



Monsieur **Jean-Pierre DECOR**, ancien directeur scientifique d'Aventis Agriculture, membre de l'Académie d'Agriculture de France et président ou administrateur de plusieurs organismes scientifique et grandes écoles, a été chargé d'organiser cette réflexion sous forme de colloques et de rencontres.

Ces événements se déroulent dans des lieux particulièrement appropriés à ce type de débat comme le centre de conférences des Pensières, sur les bords du lac d'Annecy ou le Collège des Bernardins à Paris.

Les intervenants

Henry de LUMLEY

Membre de l'Académie des Inscriptions et Belles-lettres
Directeur de l'Institut de Paléontologie Humaine
1 rue René-Panhard
75013 Paris
iph@mnhn.fr



Pierre-Marie LLEDO

Chef d'Unité à l'Institut Pasteur
Directeur de Recherche au CNRS
25-28 rue du Docteur Roux
75015 Paris
Pierre-marie.lledo@pasteur.fr



Angela SIRIGU

Directeur de Recherche
Centre de Neurosciences Cognitives
CNRS, UMR 5229
67 Boulevard Pinel
69675 Bron
sirigu@isc.cnrs.fr



Claude BERROU

Membre de l'Académie des Sciences
Professeur à Télécom Bretagne
655 Avenue du Technopole
29280 Plouzane
claude.berrou@telecom-bretagne.eu



Jean-Pierre DECOR

Président de l'ENSC de Montpellier
Membre de l'Académie d'Agriculture de France
Fondation Mérieux
17, rue Bourgelat
69002 Lyon
decor.isv@wanadoo.fr



« La prodigieuse évolution du cerveau : De l'émergence de la pensée conceptuelle vers l'intelligence artificielle »

Vendredi 11 octobre 2013

Modérateur

Dr Jean-Pierre DECOR, président de l'ENSC de Montpellier
Membre de l'Académie d'Agriculture de France.



Dr Jean-Pierre DECOR

Mesdames,
Messieurs, bonjour.

Tout d'abord je
souhaiterais vous
rappeler les finalités
de ce colloque ainsi
que l'objectif de ces
réunions annuelles.

La science exerce une grande influence dans la société. C'est un fait avéré. Les technologies qui en sont issues sont de plus en plus rapidement intégrées dans la vie des êtres humains.

Parfois, la science, constitutive de progrès, est paradoxalement perçue comme facteur de risque. Les usages faits des découvertes scientifiques provoquent quelquefois une grande méfiance ; c'est par exemple la situation des cultures génétiquement modifiées aujourd'hui.

Comment rapprocher science et société alors qu'elles tendent à s'éloigner l'une de l'autre ?

Dès les années 80, c'était la tâche à laquelle s'étaient attachés le Docteur Charles MERIEUX et le Baron Edmond de ROTHSCHILD en créant l'Institut des sciences du vivant. Les thèmes choisis concernaient

les applications des découvertes scientifiques relatives au vivant et à leurs conséquences potentielles dans le domaine de la santé, de l'alimentation et on pourrait ajouter aujourd'hui de l'environnement.

En 2010, lors de l'arrêt des activités de mécénat de la Baronne Edmond de ROTHSCHILD, vice-présidente de l'Institut des Sciences du Vivant, il a été décidé de maintenir une instance de dialogue et de discussion sur ces sujets.

Ainsi, les Fondations Mérieux et Bullukian, sous l'impulsion de leurs présidents respectifs, MM. MERIEUX et CLAVERANNE, ont décidé de continuer à travailler et à discuter sur ces sujets.

Cette réflexion s'organise sous forme de débat dans des lieux appropriés, comme le Collège des Bernardins. Ils font l'objet de compte rendu sous forme de brochure et sur le site internet (<http://www.institut-vivant.org>).

Cette après-midi, nous allons aborder le fonctionnement du cerveau humain. Il s'agit du plus grand défi scientifique et même philosophique de notre époque. Il constitue l'ultime frontière avec la biologie moderne.

Aujourd'hui, des connaissances considérées comme acquises sont remises en cause. Par exemple, l'influence du sommeil sur les

« La prodigieuse évolution du cerveau : De l'émergence de la pensée conceptuelle vers l'intelligence artificielle »

connexions neuronales. On considérait que le sommeil les renforçait en codant les souvenirs ; ainsi les réceptions apprises laborieusement le soir et qu'on retrouvait facilement le matin ou les problèmes difficiles à résoudre le soir et qu'on résolvait le lendemain. En fait, ce phénomène est dû, au contraire, à l'affaiblissement pendant le sommeil des connexions non essentielles tout en préservant certains circuits neuronaux pour éviter une consommation excessive d'énergie.

En 2005, nous avons organisé un colloque relatif au cerveau malade, et sur les espoirs suscités par les différentes thérapies. Il avait été constaté que, mis à part quelques succès ponctuels, le manque de connaissance était un gros handicap pour développer des thérapies plus efficaces.

Depuis 2005, la situation ne s'est pas améliorée :

On a assisté au désengagement quasi général des grandes sociétés pharmaceutiques pour la recherche de nouvelles molécules sur le système nerveux central. Plusieurs centres dédiés à cette recherche ont été fermés.

De plus, avec le vieillissement progressif de la population, on constate une augmentation régulière du nombre de démences séniles, en particulier la maladie d'Alzheimer.

Enfin, la croissance de la consommation de cannabis, voire sa dépénalisation malgré les alertes sur les risques psychologiques liés à

cette consommation en particulier au niveau de l'adolescence, constitue un risque à long terme.

En réponse à toutes ces questions, les pouvoirs publics ne sont pas restés inactifs, spécialement en Europe et aux États-Unis. De grands programmes ont été initiés ayant pour objectif la compréhension des mécanismes cérébraux :

- Blue Brain Project en 2005

- SyNAPse en 2008 ;

- Human Brain Project en 2013 : 1,9 milliard d'euro, sur 10 ans, c'est la somme allouée par la Communauté européenne à ce projet de simulation numérique du cerveau ;

- American Brain Initiative en avril 2013 aux USA : 100 millions de dollar, comme enveloppe de départ pour le projet de cartographie du cerveau.

La recherche sur le cerveau est particulièrement difficile. Elle nécessite une approche multidisciplinaire : génétique, biologie cellulaire, physiologie, imagerie, bio-informatique, anatomie, clinique, sciences du comportement.

Cette compréhension est toutefois essentielle. Si on veut espérer un développement rationnel de nouveaux concepts thérapeutiques et même l'identification de mécanismes d'action de ces médicaments potentiels.

« La prodigieuse évolution du cerveau : De l'émergence de la pensée conceptuelle vers l'intelligence artificielle »

Vouloir faire le point des connaissances sur le cerveau en une réunion de 4 heures serait tout à fait irréaliste. D'ailleurs, certains aspects vous sont déjà familiers, comme les techniques d'imagerie fonctionnelle mettant en évidence les zones d'activité du cerveau. Seulement, quelques aspects moins connus ou plus récents seront développés.

Voici brièvement la présentation de ces quatre exposés :

- Dans le premier on va découvrir que le cerveau est le seul organe de notre corps qui a connu une si grande évolution. Il nous a progressivement différenciés de l'animal en créant notre humanité. C'est un long cheminement passionnant de découvertes que va retracer le professeur Henry de LUMLEY. -

- Le docteur Pierre Maris LLEDO a découvert que contrairement à ce qui a été généralement admis, le cerveau n'a pas acquis une structure définitive à la fin de notre adolescence. De nouveaux neurones peuvent, sous certaines conditions, se former tout au long de notre existence. Pour créer ces nouveaux neurones, il va nous conseiller quelques règles à adopter.

- Grâce à leur cerveau, les hommes ont tissé des liens sociaux et se sont organisés en communauté (famille, clan, tribu, nation). Quels sont les fondements neurologiques de ces comportements sociaux ? C'est le docteur Angela SIRIGU qui nous fera part de ses découvertes dans ce domaine.

- Enfin, on va aborder un problème du futur, à savoir l'intelligence artificielle. Le professeur BERROU nous expliquera que le temps où le cerveau humain pourra créer une machine pensante capable de le supplanter n'est pas très lointain.

Evolution de la cognition : de l'Australopithèque à Homo Sapiens

Pr Henry de LUMLEY

Directeur de l'Institut de Paléontologie humaine
Membre de l'Académie des Inscriptions et Belles-lettres

Dr Jean-Pierre DECOR.- Cher Henry de LUMLEY, votre carrière est un véritable monument. C'est une gageure de vouloir la résumer en quelques mots.

Après un doctorat de sciences naturelles à l'université de Marseille, vous êtes entré au CNRS où vous êtes devenu directeur de recherche où vous avez constitué une équipe consacrée à la préhistoire et aux hominidés fossiles en particulier. A ce titre, vous avez dirigé de nombreuses fouilles archéologiques. Vous avez pris part à la construction de nombreux musées de préhistoire en France et à l'étranger, activités qui vous ont rendu célèbre.

En 1981, vous êtes devenu professeur au Muséum d'Histoire Naturelle dont vous avez été ensuite le directeur.

Vous avez également dirigé le laboratoire de préhistoire du Musée de l'Homme et de l'Institut de Paléontologie humaine.

Vous participez encore à des fouilles sur divers continents en Chine, en Ethiopie, en Géorgie...

Vous êtes membre de plusieurs académies de l'Institut de France.

Vous êtes auteurs de nombreux articles et ouvrages. Récemment vous avez coordonné l'ouvrage : « *L'Univers, la Vie, l'Homme : Émergence de la conscience* ». C'est un très beau livre paru aux éditions du CNRS.

Cette longue carrière a été couronnée par de nombreux prix scientifiques, et distinctions

honorifiques. J'en ai noté une particulière : vous êtes commandeur de l'Ordre du Soleil levant au Japon.

Nous allons vous écouter nous raconter cette belle histoire :

L'évolution de la cognition de l'Australopithèque à l'Homo sapiens, à savoir quand la bipédie est devenue humaine.

Pr Henry de LUMLEY

Bonjour Mesdames,
bonjour Messieurs.

Je tiens tout d'abord à remercier M. DECOR de m'avoir convié à ce colloque pour vous parler de l'évolution de la cognition. J'étais en Chine, lorsqu'il m'a appelé au téléphone, pour me demander de participer aujourd'hui à ce colloque. Il m'a même proposé le titre de mon exposé :

« L'évolution de la cognition : de l'Australopithèque à l'Homo Sapiens ».

Je vais donc vous présenter les grandes étapes de l'évolution morphologique et culturelle de l'Homme pendant des millions d'années. Je vais essayer de donner une définition de l'Homme. Il peut y en avoir beaucoup en relation avec les différentes étapes de cette évolution.



Evolution de la cognition : de l'Australopithèque à Homo Sapiens

D'ailleurs, que vous vous adressiez à un paléontologue, à un biologiste, à un géologue, à un philosophe ou un théologien, ils vous donneront des réponses très différentes.



- La bipédie

La première étape : c'est l'acquisition de la bipédie. Elle a permis la libération de la main. Les mains bougeant, elles s'associent à la pensée. Il y a une liaison entre le cerveau qui ordonne et la main qui agit.

Le premier témoignage de la bipédie est un crâne fossile trouvé dans un désert au nord du Tchad. Il a été daté de 5 millions d'années par plusieurs méthodes : la bio-chronologie qui prend en compte l'état de l'évolution des faunes et celle des isotopes cosmogéniques.

Ce crâne est très différent du nôtre. On pourrait dire au premier abord qu'il a appartenu à un grand singe. Il a une capacité crânienne de 350 cm³ tout à fait comparable à celle des Chimpanzés.

Le trou occipital *foramen magnum*, qui fait communiquer le cerveau avec la moelle épinière,

est situé parfaitement sous le crâne. Cela signifie que le crâne était posé au sommet de la colonne vertébrale et qu'il devait marcher debout.

Nous avons ainsi la preuve que, depuis 5 millions d'années, des primates ont acquis la station érigée bipède. Nous avons appelé ce crâne : *Sahelanthropus tchadensis* ou plus familièrement *Toumai* qui veut dire espoir de vie en Tchadien.

A Toumai, succède beaucoup d'autres fossiles, en particulier *Ardipithecus ramidus*, trouvé dans la moyenne vallée de l'Aouache en Ethiopie qui date de 4,5 millions d'années. Il marchait aussi debout. C'était un petit bonhomme haut de 80 cm. C'était le contemporain des australopithèques, en particulier la forme appelée *Australopithecus anamensis*.

Cependant, sa station érigée bipède n'était pas parfaite. Si on étudie les articulations, il restait occasionnellement arboricole. On a la preuve que les australopithèques marchaient debout, *Australopithecus afarensis* a laissé des traces d'empreinte de pieds.



Elles se situent en Tanzanie sur le site de Laetoli à l'ouest du volcan Kilimandjaro. Il s'agit de trois individus qui marchent les uns à côté des autres. Il y a deux adultes à droite : la personne qui est derrière met ses pieds dans

Evolution de la cognition : de l'Australopithèque à Homo Sapiens

les empreintes de pas du premier. A gauche, il y a un enfant. Ces empreintes étaient recouvertes de cendres volcaniques qui ont permis leur datation à 3,7 millions d'années.

On distingue très bien le gros orteil, l'alignement des autres orteils, la voûte plantaire. En avançant, ils mettaient leur pied droit à gauche du pied gauche et leur pied gauche à droite du pied droit. Ils marchaient ainsi, car ils n'avaient pas une station érigée bipède parfaite ; ils se dandinaient pour tenir debout et de temps en à autre ils grimpaient à un arbre. Aujourd'hui, plus personne ne marche ainsi, sauf les mannequins pour se donner un style.

Marcher debout est certes une condition nécessaire pour être un Homme, mais peut-être pas une condition suffisante. Les paléontologues les appellent plutôt des hominidés. Ils n'ont pas encore droit au titre d'Homo ; ce sont *Sahelanthropus*, *Ardipithecus*, *Australopithecus*.

Entre 4 millions d'années et 1,5 millions d'années, il y a beaucoup de rameaux parallèles qui acquièrent des cerveaux de plus en plus volumineux, ils marchent debout, et sont occasionnellement arboricoles.

Le moulage endocrânien, donne une idée de la surface du cerveau. Elle n'est pas parfaite, car entre l'endocrâne et le cerveau, il y a les méninges. C'est comme si on faisait le moulage d'une ossature après l'avoir recouverte d'un voile.

Toutefois, on peut conclure que, chez les australopithèques, il n'y a ni l'aire de Broca ni l'aire de Wernicke qui sont les sièges du langage. Ils n'avaient donc pas la possibilité de parler.

De plus, chez les australopithèques il n'y a pas de trace d'outils manufacturés.

L'extrême usure de leurs dents montre qu'ils n'étaient pas mangeurs de viande. Ils étaient essentiellement végétariens ; ils consommaient des fruits, des racines et beaucoup de graminées.

Dans une deuxième étape, alors que les australopithèques n'ont pas disparu, apparaissent d'autres rameaux plus évolués appelés les *homo habilis*.

- L'invention de l'outil

Ils vont inventer l'outil et sans doute adopter le langage articulé. Ils ont leur crâne plus haut, le front est fuyant, encore bien différent du nôtre. La face se projette en avant du crâne. Ils ont une capacité crânienne qui dépasse 750 cm³. On a parfois appelé ce volume le « Rubicon cérébral ».

L'étude du moulage endocrânien des *homo habilis* met en évidence les aires du langage. La différence essentielle de moulage entre un homme et un chimpanzé correspond aux aires de Broca et de Wernicke.

Chez les australopithèques, la base du crâne était parfaitement horizontale. A partir des *homo habilis*, la base du crâne se fléchit. Le crâne va s'enrouler autour d'un axe qui passe par les oreilles. La face va s'engloutir sous le crâne. Au cours de l'évolution, le crâne va devenir de plus en plus court, de plus en plus large, de plus en plus haut, de plus en plus rond. Schématiquement on pourrait dire que le crâne passe de la forme d'un ballon de rugby à la forme d'un ballon de football.

Evolution de la cognition : de l'Australopithèque à Homo Sapiens

Cette flexion dans la base du crâne va entraîner la descente du larynx et du pharynx avec la mise en place de la caisse de résonance pour émettre des sons articulés.

Lors de fouilles dans des sites très anciens, on n'a jamais découvert de parole fossile ! Toutefois, si toutes les conditions anatomiques pour un langage articulé étaient réunies, pourquoi s'en seraient-ils privés ?

A ce stade ils inventent l'outil manufacturé. Les singes, chimpanzés ou gorilles utilisent des objets comme outils. Il s'agit de l'utilisation d'un objet pour une action immédiate.

L'outil s'inscrit dans un projet. On conçoit un modèle. C'est l'émergence de la pensée conceptuelle en fonction d'un projet futur. L'outil s'inscrit dans une chaîne opératoire. On va chercher de la roche pour fabriquer l'outil, parfois jusqu'à 400 mètres dans la rivière.

Dans une rivière où il y avait 30 % de galets de granite, 30 % de galets de schiste et 30 % de galets de basalte, ils ne ramassaient que des galets de quartz, ils faisaient de la pétrographie !



Dans les rivières, il y a surtout des galets ronds ou ovales. Ils cherchaient spécialement des galets cubiques avec un méplat pour plus facilement faire partir des éclats en les tapant.

Ils avaient un campement de base contrairement aux australopithèques. Et dans ce camp, par des stratégies de débitage très élaborées, ils transformaient le bloc de matière première en suivant un modèle conçu à l'avance en fonction d'un projet.

Il est difficile de faire ces outils manufacturés et d'apprendre ces stratégies de débitage seulement par la simple imitation. La transmission de ce savoir-faire, devaient se faire par le langage.

Ces outils servaient à récupérer de la viande. A cette époque, le climat s'étant asséché, des savanes, de plus en plus immenses, occupaient le paysage, donc de plus en plus d'herbivores, en particulier des antilopes, des gnous, des zèbres. Et s'il y a beaucoup d'herbivores, il y a également beaucoup plus de carnivores.

Il y a deux carnivores redoutables : la panthère géante et le tigre à dents de sabre qui abattaient ces grands herbivores et les dévorent partiellement ; ne pouvant pas récupérer la viande entre les côtes avec leurs dents ils abandonnaient les charognes.

Deux autres prédateurs rentrent alors en compétition pour avoir accès à la carcasse : les *homo habilis* de seulement 1,20 m de haut et la hyène géante.

Ainsi, en Tanzanie, au Kenya et en Ethiopie, on trouve des squelettes entiers d'hippopotames, d'éléphants, d'antilopes.

Evolution de la cognition : de l'Australopithèque à Homo Sapiens

Autour de ces squelettes, il y a des petits éclats pour récupérer la viande et des coprolithes d'hyènes qui démontrent la compétition entre l'*homo habilis* et l'hyène géante pour l'accès à la carcasse.

L'invention de l'outil est extrêmement importante. L'Homme a introduit, dans l'histoire de l'univers et dans l'histoire de la vie, la dimension culturelle.

Un des plus anciens outils de l'histoire de l'humanité a été trouvé dans la rivière Gona dans le nord-est de l'Éthiopie. Il date de 2 550 000 ans et était situé entre deux couches de dépôt volcanique. Les dépôts inférieurs datent de 2,6 millions d'années, les supérieurs de 2,5 millions d'années. C'est un galet avec un méplat. En tapant dessus, ils ont pu aménager une arête tranchante.

Ces hommes ont inventé l'outil, ont acquis le langage articulé. Ils ont pour la première fois des campements de base sur lesquels ils s'installent. C'est une nouvelle étape dans l'évolution de l'Homme. Ils mangent de la viande. Ils ne sont pas encore capables de chasser. Ils sont charognards.

C'est parce qu'ils ont inventé l'outil qu'ils peuvent manger de la viande et réciproquement ... L'outil est extrêmement lié à la consommation de viande.

Il traduit l'émergence, il y a 2 550 000 ans, de la pensée conceptuelle : Être capable de concevoir un modèle et de le réaliser en fonction d'un projet !

Ainsi, l'*homo habilis* doit avoir droit au titre d'Homme. En inventant l'outil et en acquérant le langage, il a débuté l'extraordinaire aventure

culturelle de l'Homme qui va se prolonger pendant 1,5 million d'années et qui va sûrement continuer.

- La chasse

Une nouvelle étape, toujours en Afrique, vers 1,5 million d'années : les Hommes deviennent chasseurs. On peut bien distinguer les campements d'hominidés charognards et d'hominidés chasseurs.

Dans un campement de charognards, on retrouve des animaux de tous les âges. Dans celui de chasseurs, on trouve surtout une forte proportion d'ossements de jeunes adultes.

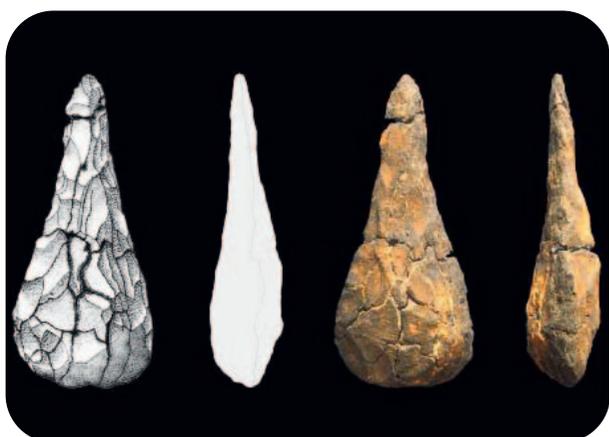
Les inventeurs de la chasse sont les *homo erectus*. C'est l'homme de Tautavel datant de 450 000 ans. Il est un peu plus proche de nous. Il a un crâne un peu plus haut, un front un peu moins fuyant. Il a quand même toujours un bourrelet au-dessus des orbites, une face toujours un peu prognathe c'est-à-dire en avant du crâne. Le cerveau est plus important. Les plus anciens *homo erectus* ont un cerveau de 800 cm³ et celui de 450 000 ans mesure 1 100 cm³.



Evolution de la cognition : de l'Australopithèque à Homo Sapiens

Un chasseur a besoin de grands couteaux. Un petit éclat ne permet pas de couper le poitrail d'un zèbre ou d'une antilope. Ils inventent alors des outils beaucoup plus élaborés, taillent de gros éclats avec un long tranchant et obtiennent un biface.

Le biface est l'outil caractéristique des cultures acheuléennes portées par les *homo erectus*. Il a deux tranchants latéraux. C'est le couteau du chasseur. Il est pointu. Cela permet de percer, d'ouvrir le poitrail de l'animal. Les grands bords latéraux permettent de découper.



C'est une pièce extraordinaire, elle est parfaitement symétrique : bilatérale et bifaciale. Elle a été taillée en cornéenne, trouvée à Tautavel et date de 580 000 ans. La cornéenne est un schiste métamorphisé. Il n'y en a pas à Tautavel. Ils ont dû aller chercher dans la vallée de l'Agly à une dizaine de kilomètres cette roche qui a une couleur argentée pour fabriquer cette pièce particulièrement soignée.

Sa fonctionnalité n'est pas liée à sa belle couleur ou à sa parfaite symétrie. C'est déjà une recherche du sens de la beauté, l'émergence du sens de l'harmonie, du sens de l'esthétique.

Cela pourrait être une nouvelle définition de l'Homme. Le sens de la beauté est vraiment une caractéristique de l'Homme.

Un autre biface, très beau, trouvé dans la vallée de la Somme, à Saint-Acheul, le site classique, éponyme des cultures acheuléennes, est l'oeuvre des *homo erectus*. Ce magnifique silex est parfaitement symétrique. C'est le témoignage de l'émergence du sens de l'esthétique, il y a 1,5 million d'années avec les premiers peuples chasseurs.



Nous allons passer à une nouvelle étape : la domestication du feu. Elle est très récente dans l'histoire de l'humanité.

Les australopithèques sont végétariens. Les *homo habilis* sont mangeurs de viande, mais charognards. Les premiers *homo erectus* depuis 1,5 million d'années sont mangeurs de viande, mais ils mangent de la viande crue, car ils n'ont pas domestiqué le feu.

Les plus anciens témoignages du feu se situent vers 400 000 ans. Il a été inventé à la limite nord des zones tempérées chaudes de la planète. Avant sa domestication, les *homo erectus* ne pénétraient pas dans les zones tempérées froides.

Evolution de la cognition : de l'Australopithèque à Homo Sapiens

Ainsi, pendant les périodes glaciaires en Europe, les hommes se repliaient sur les berges de la Méditerranée, en Italie et en Espagne. Pendant les périodes interglaciaires, ils pouvaient remonter plus haut, notamment en Belgique et en Angleterre.

- Le feu

Un foyer aménagé a été trouvé près de Nice. Il date de 400 000 ans. Il se compose d'une fosse de 25 cm de diamètre, remplie de cendres. L'analyse de ces cendres montre que ces feux étaient entretenus avec des brindilles mais surtout alimentés avec des herbes marines provenant d'une rizière côtière. Il était protégé par un petit muret de pierres ou de galets.



Les premiers foyers aménagés connus datent d'environ 400 000 ans. On en a découvert en Chine à Zhoukoudian aussi à Vertesszöllös en Hongrie qui datent de 380 000 ans. En Bretagne, dans le Finistère à Menez-Dregan il y a un foyer de 400 000 ans.

A Tautavel, il y a différents dépôts qui vont de 700 000 à 100 000 ans.

Dans les couches dont l'âge est compris entre 700 000 et 400 000 ans, il n'y a jamais d'os brûlés, jamais de charbon de bois, pas de

endre, pas de pierre éclatée par le feu. En revanche, dans les couches au-dessus d'un plancher datant de 400 000 ans, on peut voir des os brûlés et quelques charbons de bois, des cendres et des pierres éclatées par le feu.

Le feu a été domestiqué à la limite nord des zones tempérées chaudes de l'Eurasie vers 400 000 ans.

Le feu éclaire et permet à l'homme de pénétrer dans les cavernes. Il réchauffe et a permis à l'homme de conquérir de nouveaux territoires en pénétrant dans les zones tempérées froides de la planète. Il a servi à faire cuire la viande.

Avant 400 000 ans, l'espérance de vie ne dépassait pas 25 ans. Exceptionnellement, à Tautavel, on a trouvé la mandibule d'une dame extrêmement âgée qui avait franchi les générations, elle était morte à 40 ans.

Lorsque l'homme a domestiqué le feu, il a allongé son espérance de vie car le fait de cuire la viande a fait reculer les parasitoses. Le feu a permis d'améliorer la fabrication des outils. Dans le site d'Achelua^[2] près d'Hambourg, on a mis à jour des épées en bois, des javelots de 2,20 mètres de long dont la pointe avait été durcie au feu ; le lignite ayant rendu possible la conservation du bois.

Le feu est aussi un facteur de convivialité. Après une partie de chasse au rhinocéros, des histoires sont racontées autour du feu et au cours du temps, l'éléphant, le rhinocéros, le bison deviennent de plus en plus gros, monstrueux, l'éléphant devient gros comme une montagne et le chasseur qui l'avait tué un héros. C'est ainsi que sont nées les traditions culturelles régionales, la notion d'ancêtres...

Evolution de la cognition : de l'Australopithèque à Homo Sapiens

À partir de 400 000 ans, les préhistoriens mettent en évidence les traditions culturelles régionales bien caractéristiques ; c'est une nouvelle étape dans l'évolution de la cognition et de la langue.

- Les balbutiements de la pensée symbolique

En Espagne à 10 km au nord-est de Burgos dans la Sierra d'Atapuerca se trouve la grotte de la Cueva Mayor. À 400 mètres de l'entrée, dans un aven de 15 mètres de profondeur, ont été trouvés 3 500 ossements d'*Homo erectus* européen (*Homo Heidelbergensis*) correspondant aux squelettes complets de 28 individus. Aucun ossement n'est brisé au moment de la mort, mais seulement par le poids des terres. Ces ossements sont caractérisés par des cassures bien lisses, hélicoïdales, spiroïdales. Ces individus ont été jetés dans le fond de l'aven à l'état de cadavre. Il n'y a pas d'individus très jeunes, peut-être parce qu'ils se conservent mal. Il y a quelques individus de neuf ans, des ossements d'individus féminins de 15 ans correspondant à l'âge des premiers accouchements. La plupart ont entre 18 et 25 ans avec un individu de 30 ans.

Ces âges correspondent à la mortalité naturelle de l'époque. Il ne s'agit pas d'un groupe tombé dans la grotte, ces individus ont bien été jetés à l'état de cadavre. En effet, les médecins légistes ont mis en évidence qu'un cadavre logé dans un véhicule pour faire croire à une mort accidentelle a des os qui ne cassent pas. En revanche, les os d'un individu vivant dont le véhicule tombe au pied de la falaise se cassent. La faculté de médecine de Marseille a étudié ce phénomène.

Le fait que les os soient intacts montre qu'il s'agit de 28 défunts jetés au fond de l'aven.

Tous les sites préhistoriques présentent de nombreux ossements (cerfs, cheval), des outils taillés. Or, cet aven ne contient que 3 500 restes d'*Homo erectus* fossiles, sauf un magnifique biface taillé dans une roche rouge qui provient de 30 km plus loin. Il a été sélectionné, taillé avec beaucoup de soin et présente une belle symétrie bilatérale. Il n'a jamais servi comme le prouve le bord de l'arête analysée aux rayons X ; elle présente de tous petits enlèvements. Il s'agit manifestement d'une offrande funéraire.

On est en présence du plus ancien rite funéraire de l'histoire de l'Homme. Ce site date de 300 000 ans. Ce sont donc les premiers balbutiements de la pensée symbolique.



- La naissance de l'angoisse métaphysique : Les premières sépultures

À partir de 100 000 ans, l'homme s'interroge sur sa place dans l'histoire de l'univers et de la vie. Il refuse la mort, veut poursuivre sa route dans l'au-delà. Il enterre le défunt, creuse une fosse, dépose le corps.

L'homme de La Chapelle-aux-Saints datant de 45 000 ans a été découvert dans la grotte de La Vache au sud de Brive. Il a été déposé dans la fosse, posé sur le dos, genoux repliés

Evolution de la cognition : de l'Australopithèque à Homo Sapiens

sur la poitrine, avec un thorax de renne et un pied de bison, des offrandes, de la nourriture pour le voyage dans la vie future. C'était l'homme de Néandertal. Il est déjà plus proche de l'homme contemporain, son crâne est plus haut, son front moins fuyant. Il possède toujours un bourrelet au-dessus des orbites et une mandibule dont la symphyse n'est pas trop fuyante. Sa capacité crânienne est comparable à celle des hommes modernes.



L'homme de Néandertal a été ainsi le premier à enterrer ses morts. C'est la naissance de l'angoisse métaphysique, l'émergence de la pensée religieuse, une autre étape dans l'évolution de la cognition et des hominidés.

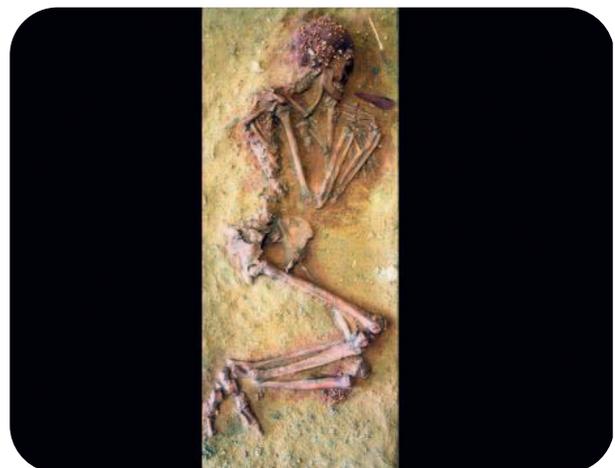
- L'explosion de la pensée symbolique : l'homme moderne

Nous allons passer à une autre étape plus récente qui se situe aux environs de 35 000 ans : l'explosion de la pensée symbolique.

Pour la première fois, les hommes vont avoir une paroi verticale au-dessus des orbites abritant les lobes frontaux du cerveau, siège de la pensée associative, d'où l'explosion de la pensée symbolique.

A partir de 30 000 ans, avec l'Homme moderne apparaissent toutes sortes d'éléments liés aux rites funéraires.

Sur la photo suivante, figure une femme morte à l'âge de 37 ans il y a 24 000 ans. A cette époque, l'espérance de vie est plus grande. Elle a été enterrée dans une des grottes de Grimaldi dans la baie de Menton en Italie, juste après la frontière, au pied la falaise de Baoussé-Roussé. Elle est couchée sur le côté gauche. Elle porte une coiffe cousue sur une résille, constituée de coquilles marine de cyclopes perforées et bordée par un bandeau de canines de cerf. Un bloc d'hématite avait été placé dans sa bouche. Elle avait un jambelet au-dessus du mollet gauche et un poinçon taillé dans un os de cheval avait été placé au-dessus de sa tête.



La parure est hautement symbolique. C'est une invention caractéristique de l'homme moderne. Cette sépulture est saupoudrée d'ocre rouge venant de très loin. Les analyses par spectrométrie infrarouge ont permis de démontrer que ces ocres rouges viennent des Alpes apuanes situées à 250 km. Il devait y avoir du troc, car ce n'est pas au moment de sa mort qu'ils sont allés les chercher.

Evolution de la cognition : de l'Australopithèque à Homo Sapiens

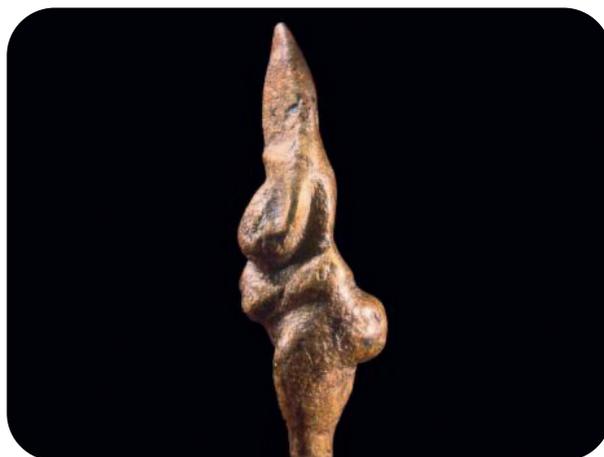
Non seulement la parure se développe, mais aussi l'art pariétal. Une des fresques de la grotte Chauvet en Ardèche, près de Vallon-Pont-D'arc, présente de magnifiques chevaux. Il y a 30 000 ans, dans le domaine de l'art, les hommes ont tout inventé ; le maître qui opérait dans la grotte Chauvet est à l'égal de celui de Lascaux 16 000 ans plus tard ou de Léonard de Vinci, de Michel-Ange, l'un des plus grands maîtres de l'art de tous les temps. Il invente la polychromie, trouve des astuces pour montrer le mouvement car on a l'impression que les chevaux avancent, il donne l'idée de la perspective. Il avait inventé la peinture au pinceau, au pochoir, le dégradé, l'estompage.

Lascaux date de 16 000 ans, à mi-chemin entre la grotte Chauvet et nous. Elle contient une fresque extraordinaire représentant un bison, traversé par une grande sagaie, perdant ses entrailles. Face à lui, est représenté un personnage à tête d'oiseau qui est culbuté, en érection, ithyphallique, avec un propulseur à crochet surmonté d'un oiseau. Un propulseur à crochet semblable a été retrouvé dans un site magdalénien au Mas d'Azil en Ariège.

Cette scène a été retrouvée cinq fois dans le Périgord, dans la grotte de Villars par exemple. Cela correspond à une tradition, une pensée mythique. Le récit derrière cette tradition nous échappe, mais nous voyons se développer la pensée unique.

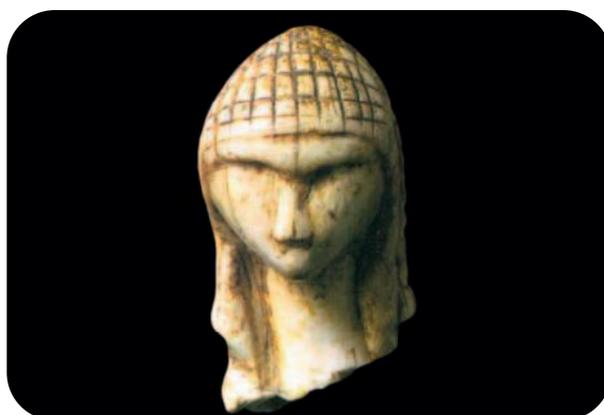
À cette époque, dans toute l'Europe depuis l'Atlantique jusqu'à l'Oural, outre la parure et l'art pariétal, se développe l'art mobilier. Cidessous une figurine féminine trouvée près du lac de Savignano en Italie. Elle a des formes avantageuses : gros seins, gros ventre, grosses fesses, grosses cuisses. En revanche,

la tête et les pieds n'avaient pas d'importance. Ce sont des symboles de fécondité.



Cela montre la grande uniformité de ces cultures gravettiennes. On trouve la même figurine féminine dans les grottes de Grimaldi à proximité de la grotte où a été enterrée la dame du Cavillon. Elle présente aussi de gros seins, un gros ventre, de grosses cuisses mais la tête et les pieds ne sont pas trop soignés.

Dans la figurine de la dame de Brassempouy, la tête est plus soignée. On l'appelle la dame à la capuche.



En plus de l'art pariétal, de l'art mobilier, voici une flûte en os d'oiseau de plus de 30 000 ans. Elle est taillée dans un os de vautour, avec des perforations. Un ami allemand en a trouvé une semblable dans une grotte du sud de l'Allemagne à Holfestz(?). Il a pris un os de

Evolution de la cognition : de l'Australopithèque à Homo Sapiens

vautour de la même taille, a formé des trous aux mêmes endroits et a composé une partition qu'il a enregistré sur disque ...



Depuis 30 000 ans, ces hommes modernes vivent de cueillette, de chasse et de pêche. Ce sont les premiers à utiliser la pêche. Dans les niveaux moustériens des grottes de Grimaldi, on trouve beaucoup de faune, d'ossements de grands mammifères, mais jamais d'ossements de poissons. Les premiers hommes modernes pratiquaient la pêche mais seulement en rivière (saumon, truite).

- Les premiers peuples pasteurs et agriculteurs

À partir du Xe millénaire, l'homme ne vit plus seulement de cueillette, de chasse et de pêche, il devient producteur de nourriture, agriculteur et pasteur.

Ces premiers peuples pasteurs et agriculteurs vont entraîner la sédentarisation.

Un village a été trouvé dans l'Hérault, près de Montpellier, sur le site de Conquest^(?). Dans les pays où la pierre est prédominante, les maisons sont construites en pierre ; dans ceux où il n'y a pas de pierre, comme dans la vallée de l'Aisne dans le nord de la France, les maisons sont alors construites en bois.

Les hommes deviennent agriculteurs et pasteurs ; l'agriculteur garde les moutons, le cultivateur cultive des céréales. Ils se sédentarisent et s'installent. Les premiers

peuples agriculteurs apparaissent au Xe millénaire dans le sud de l'Anatolie (Chaptahu^(?) par exemple). Ils cultivent du blé, de l'orge, des légumineuses (pois chiches, lentilles). Ils élèvent des moutons et des chèvres.

D'autres cultivateurs apparaissent dans le nord du Tchad autour d'un du grand lac et cultivent du mil. En Chine du sud ou en Thaïlande, ils élèvent des moutons, des cochons et cultivent du riz. En Chine du nord, vers le VIIIe millénaire, ils cultivent du millet. En Amérique centrale, aux VIII-VIe millénaires, ils cultivent de la pastèque, de la courge, du piment et surtout du maïs.

Entre le XXe et VIIIe millénaire avant Jésus-Christ, des peuples qui n'ont eu aucun moyen de se rencontrer, de communiquer entre eux et de s'imiter deviennent producteurs de nourriture pour subvenir à leurs besoins.

S'installe alors une hiérarchie sociale. Il faut un berger pour garder les moutons, un cultivateur pour planter le blé et l'orge. Le cultivateur a besoin de petites herminettes. Les plus âgés se mettent à polir la pierre avec des pierres de roche dure pour fabriquer des haches polies. Il faut que les champs soient arrosés et pour cela des ingénieurs pour creuser les canaux et amener l'eau. Il faut écraser le grain, donc un meunier. Pour conserver les graines ou les laitages, on invente la céramique et l'on fabrique des pots. Les moutons donnent beaucoup de laine et on invente le filage et le tissage.

Pour que cela fonctionne, il faut des chefs. Apparaissent les premiers chefs. Pour qu'ils soient obéis, il faut des soldats. Puis, il faut qu'il pleuve au bon moment, surtout en été quand les terres se dessèchent et que les troupeaux sont assoiffés. Il faut donc des prêtres pour

Evolution de la cognition : de l'Australopithèque à Homo Sapiens

parler avec les dieux afin qu'ils envoient la pluie au bon moment.

L'organisation sociale va devenir de plus en plus complexe. Va alors naître la guerre car ceux qui ont bien cultivé la terre ont rempli leurs vases de graines, ont des moutons en abondance. Là où l'ingénieur a été mauvais et les champs mal arrosés, il n'y a plus rien et ceux qui n'ont rien fabriquent des pointes de flèche pour s'emparer de ces ressources. C'est ainsi qu'est née la guerre.

Dans ces civilisations apparaît, vers le IV^e millénaire, la fonte du cuivre. Les hommes connaissaient le cuivre, le martelaient et fabriquaient des aiguilles, des pendeloques. Un jour, ils savent le fondre. C'est une découverte très importante car le cuivre devient pâteux vers 1 580 degrés. Or, aucun feu naturel ne monte au-delà de 800 degrés.

Les hommes de cette époque ont eu une idée extraordinaire, ils ont mis un godet en pierre dans un foyer, le cuivre natif dans le godet, recouvert le feu de pierre. Ayant inventé la poterie, ils ont placé dans le foyer un tube en argile et à son bout un soufflet en peau de mouton par lequel ils ont insufflé de l'air. Au bout d'une demi-heure, le feu devient vert : le cuivre est fondu et peut être coulé dans un moule. Ils fabriquaient ainsi de belles haches en cuivre. Ces objets n'étaient pas fonctionnels, mais purement culturels car au bout du troisième coup, le tranchant était tout aplati.

Puis, un homme va avoir l'idée d'ajouter de l'étain et va ainsi fabriquer du bronze. C'est la naissance de la métallurgie.

C'est vers 3 300 avant notre ère, que l'homme va inventer des idéogrammes. Ces derniers ont

été trouvés à Sumer, entre le Tigre et l'Euphrate, avec l'écriture cunéiforme. A la même époque en Égypte dans le delta du Nil apparaissent les hiéroglyphes égyptiens. A la même époque, dans le sud de la France à 80 km au nord de Nice, dans la montagne sacrée du Bégo, à Tende, ont été relevées 4 150 roches gravées sur lesquelles sont inscrits plus de 100 000 signes dont 40 000 figuratifs (des idéogrammes) qui nous transmettent les préoccupations économiques des premiers peuples métallurgiques.

Le mont Bégo culmine à 2 850 mètres d'altitude. Certaines roches évoquent le dieu taureau, d'autres une figure célèbre, emblème de la vallée des Merveilles et de notre musée de la préhistoire à Tende. Cette figure représente un corps difforme ; les cornes se transforment en bras levés terminés par des mains qui brandissent des poignards. C'est le dieu Bégo, le dieu de l'orage qui brandit la foudre et dispense la pluie fertilisante afin qu'au printemps, le retour de la végétation apporte l'abondance aux humains.



C'est l'invention de l'écriture qui a permis de transmettre des messages à travers l'espace et le temps. C'est une nouvelle étape dans l'évolution de la cognition et de la culture.

Evolution de la cognition : de l'Australopithèque à Homo Sapiens

- La noosphère

Nous vivons actuellement, la noosphère. Avec nos ordinateurs portables, nous pouvons être en contact avec toutes les bibliothèques du monde, toutes les encyclopédies. Pour l'illustrer, j'ai choisi la ville de Dubaï.



Je vous remercie de votre attention.

Le cerveau adulte : un chantier perpétuel !

Dr Pierre-Marie LLEDO

Chef d'unité à l'Institut Pasteur,
Directeur de recherche CNRS

Dr Jean-Pierre DECOR.- Avant d'être chercheur, du fait de vos origines, vous avez failli être footballeur, puis, en qualité d'ancien élève de l'École Normale Supérieure, vous avez failli être enseignant.

Heureusement pour le plus grand bénéfice de la science, vous êtes devenu le brillant chercheur que nous allons écouter.

Dès 1991, vous obtenez la médaille de bronze du CNRS. En 2001, vous devenez directeur de recherche à l'Institut de neurobiologie Alfred Fessard et en 2011, directeur du laboratoire Gènes Synapses et Cognition au CNRS puis également chef de l'Unité « Perception et Mémoire » de l'Institut Pasteur.

Il faut noter que vous n'avez pas tout à fait renoncé à l'enseignement ; vous étiez ce matin même à l'Institut Pasteur en train de dispenser un cours. Vous êtes également professeur invité à la prestigieuse université d'Harvard.

Membre de nombreuses sociétés savantes dont l'Académie Européenne des Sciences, auteur de nombreux articles et ouvrages dont « Le cerveau sur mesure » écrit avec Jean-Didier Vincent, vous avez été lauréat entre autre du prix de l'Académie nationale de médecine en 2005.

Je vais vous céder la parole et nous allons découvrir comment notre cerveau continue à évoluer et à se construire tout au long de la vie.



Dr Pierre-Marie LLEDO

Bonjour à tous.

Je tiens à remercier M. DECOR pour le choix de ce thème qui va être le fil directeur de cet après-midi, à savoir le cerveau, son évolution, et vers quoi nous tendons grâce à

l'impact du numérique sur notre cerveau.

Je tiens également à le remercier pour les efforts qu'il a développés afin de fournir les informations nécessaires et réunir tous ces intervenants.

Je vais essayer de me situer entre les deux interventions, celle sur l'évolution de la cognition, de la conscience que nous venons d'écouter et celle sur la partie du cerveau dédiée au souci de l'autre.

Pour cela, j'ai choisi comme fil directeur : le cerveau un vaste chantier ! Si vous connaissez un peu la Sagrada Familia à Barcelone avec ses perpétuels échafaudages, c'est l'idée que j'aimerais que vous ayez en quittant cette salle : notre cerveau est une sorte de Sagrada Familia, un chantier permanent qui ne devra jamais s'arrêter.

Nous verrons ce qui nourrit ce chantier.

L'idée que le cerveau, après un certain âge, atteint sa pleine maturité puis reste plus ou moins figé est un mythe, une croyance qu'il faut abandonner. Aujourd'hui on s'aperçoit des

Le cerveau adulte : un chantier perpétuel !

multiples facettes de sa plasticité et de la capacité qu'a notre cerveau à être reconfiguré.

Nous avons entendu beaucoup parler de l'utilisation de l'outil. Peut-être peut-on y voir déjà les traces d'une certaine facette de l'humanité.

Une autre sera celle que je vais essayer d'illustrer maintenant, c'est la possibilité, qu'après avoir inventé l'outil, son utilisation façonne en retour nos circuits cérébraux.

Ainsi dans un dessin de Martin Escher, le père des surréalistes plus connu pour ses dessins d'escaliers qui n'en finissent pas de monter. Ici, le thème est d'illustrer le fait que l'utilisation de l'outil, en retour modifie notre cerveau.

On peut même parler d'un effet Azerty en psychologie expérimentale. La ligne diagonale TGB sur le clavier fait en sorte que vous puissiez taper des mots avec la main droite ou avec la main gauche. A partir d'une liste d'une centaine de mots qui se tapent de la main gauche ou de la main droite, cet effet Azerty consiste à demander à l'opérateur de donner une balance affective aux mots qu'il tape. Si c'est avec la main droite, la balance affective sera toujours supérieure à 5 sur une échelle de 0 à 10. En revanche, si les mots sont tapés avec la main gauche, on sera dans une balance inférieure à 5.

Des cicatrices affectives, des états d'âme peuvent ainsi naître du seul fait d'utiliser un clavier et vivre des frustrations...

On le sait, l'invention de l'écriture a eu une répercussion importante sur notre cerveau, essentiellement sur ce que l'on appelle la mémoire de travail. Cette mémoire va être divisée par 3 quand on la compare à celle de

nos cousins primates non humains qui ne connaissent pas encore l'usage de l'écriture.

L'utilisation de nos outils a des effets énormes sur la vitesse d'évolution des capacités cognitives. Elles vont aller maintenant en augmentant de façon exponentielle. Nous commençons déjà à appréhender l'impact du numérique sur l'émergence de nouvelles fonctions cognitives.

Il est extraordinaire d'observer que dans tous les sites de la planète, lorsque le cerveau atteint une certaine complexité au cours de l'évolution, de façon pratiquement simultanée, il a pu inventer l'écriture. De son utilisation, d'autres propriétés émergentes vont naître dans le cerveau.

En guise de plan, je vous propose ces trois parties qui consistent à discuter et à voir ensemble les propriétés de plasticité du cerveau, quel que soit l'âge du sujet. En effet, dans les cerveaux les plus avancés dans l'âge que nous ayons pu étudier de façon *post mortem* après les avoir découpés en tranches, on a pu observer des neurones nés quatre ou cinq semaines avant le décès de la personne. Par exemple la présence de neurones juvéniles peut s'observer dans un cerveau de 89 ans.

En relation avec cela, quand vous écoutez à la radio Jean d'Ormesson, Michel Serres, Michel Rocard ou Stéphane Hessel, vous comprenez que l'on a affaire à des éternels adolescents qui se posent des questions et qui se nourrissent de la complexité du monde dans lequel nous évoluons.

Plutôt que d'être réfractaires à cette complexité, ils s'en nourrissent.

Le cerveau adulte : un chantier perpétuel !

Nous allons voir ensemble l'histoire de la pensée et comment fonctionne notre cerveau. Il y a eu quelques croyances erronées que j'appelle des neuro-mythes, que la neuroscience d'aujourd'hui ne confirme pas.

Comprendre son cerveau, c'est répondre à l'injonction de Socrate "*connais-toi toi-même*" et c'est aussi répondre à la question posée plusieurs fois dans le précédent exposé, qu'est-ce qui caractérise l'humanité, quels sont les traits de l'humain. Il y a probablement quelques particularités que nous aborderons quand nous verrons la construction du cerveau.

Le paradoxe du cerveau humain est celui de naître trop tôt. Nous sommes tous des grands prématurés d'un point de vue du fonctionnement de notre cerveau. Nous naissons avec un déficit gestationnel de quatre mois environ. Mais cela va nous donner une grande liberté pour façonner notre cerveau en fonction de la niche écologique dans laquelle nous allons naître et évoluer. Si l'on naît en Chine, le fait d'écouter du mandarin va faire que certains circuits vont pouvoir être sollicités et que l'on pourra apprendre le chinois sans avoir un déterminisme génétique.

Ainsi le déterminisme génétique va s'effacer pour laisser place à une transmission culturelle.

Ce cerveau n'est pas fini. Que faudra-t-il apporter pour nourrir ce chantier ? C'est la culture, la transmission sociale. L'ordre génétique s'efface devant la transmission sociale.

Nous verrons enfin quelques exemples précis qui illustrent les capacités de remodelage de ce cerveau adulte en fonction de l'utilisation que l'on en fait.

- L'aspect historique

Je n'ai pas le temps d'entrer ici dans les détails, mais je glane au hasard de mes interventions toutes sortes de croyances. On lit souvent dans les magazines pseudo-scientifiques l'idée que l'on n'utilise que 10 % de notre cerveau. Cela flatte l'orgueil humain car on se dit que le jour où l'on va réveiller les 90 % qui sommeillent, cela va barder !

Nous le verrons au travers d'un prochain exposé, « nous sommes déjà au maximum de nos performances cognitives ». Nous ne pouvons pas utiliser davantage notre cerveau, ne serait-ce que pour des raisons de disponibilité d'énergie. Notre cerveau pèse environ 2 % du poids corporel. L'énergie absorbée par cet organe est d'environ 30 %, et même 50% chez l'enfant. Il y a déjà un problème d'apport énergétique. On ne peut pas avoir une activité mentale plus que ce que le corps nous permet de disposer d'un point de vue apport énergétique. C'est une des raisons pour lesquelles nous avons tendance à somnoler après manger car le cerveau rentre en compétition avec un système tout aussi énergivore : le système digestif. Cet état de « défaut » d'apport énergétique durera environ 45 minutes et la somnolence est bienvenue dans ce contexte.

Nous verrons dans la dernière partie, d'un point de vue des mécanismes de prise de décision, ce qu'il advient quand on est dans cet état de cerveau automatique plutôt que celui qui caractérise le cerveau pondéré.

J'aimerais attirer votre attention sur le mythe selon lequel nous naissons avec un quota de neurones puis qu'après un certain âge, le cerveau perdrait cette capacité à produire des neurones sur lequel on n'est pas tous d'accord

Le cerveau adulte : un chantier perpétuel !

et sur lequel les pédopsychiatres se sont beaucoup penchés.

Cette croyance est fautive à condition d'apporter cinq facteurs permissifs qui permettront au cerveau, quel que soit son âge, de produire des neurones. Il ne s'agit pas de voir la naissance de neurones n'importe où et n'importe comment. Il y a des foyers bien précis qui ont une relation très étroite avec certaines formes de mémoire, notamment la mémoire spatiale, mais pas uniquement la mémoire, en fait toute la sphère de l'affect.

- Neurogénèse

Les conditions qui nous permettent de produire de nouveaux neurones, quel que soit notre âge, font l'objet de travaux que je conduis actuellement en partenariat avec des psychiatres et neurologues. Ces nouveaux neurones apparaissent dans deux régions bien précises appelées l'hippocampe par analogie avec le cheval marin et la zone sub-ventriculaire.

- 1 - La première condition à remplir est celle d'être exposé à un éternel apprentissage qui permet de s'émerveiller devant la complexité du monde dans lequel nous évoluons. Plutôt que d'être réfractaire, il faut s'ouvrir sur cette complexité du monde dans lequel nous évoluons pour s'en nourrir. Le premier point est ce facteur de l'émerveillement qui fait écho à ce que disait Aristote : "*La sagesse commence avec l'émerveillement*", c'est-à-dire soyez sage, émerveillez-vous devant la complexité au sens défini par Edgard Morin.

- 2 - Autre condition à satisfaire : savoir lutter contre la pollution sonore et visuelle. Je m'arrête un peu pour définir ce que je veux dire ici par pollution sonore et visuelle.

Par exemple, ce n'est certainement pas aujourd'hui dans cette salle que nous en aurons ! Par pollution sonore et visuelle, il faut entendre toutes les stimulations que votre cerveau reçoit, et qu'il lui permettent de savoir mais non de comprendre. Les spécialistes de l'information nous disent que depuis l'invention de l'écriture, 3 500 avant Jésus-Christ jusqu'aux années 2000, sur une période de 5 500 ans, l'humanité a produit sur la planète 5 hexabytes, soit 5 000 000 000 gigabytes. Entre 2000 et 2012, 5 hexabytes sont produits tous les deux jours et depuis 2013, 5 hexabytes sont produits toutes les dix minutes.

C'est cela, la pollution sonore et visuelle, je l'appelle "*l'infobésité*". Votre cerveau se trouve bombardé d'informations sans lui donner du sens. C'est la grande différence entre *savoir* et *comprendre*. J'ai un téléphone portable, il peut se mettre à vibrer dans ma poche pour m'informer qu'il y a un tsunami à Fukushima qui a produit 20 000 morts. Je fais quoi avec cette information ? Pas grand-chose, si ce n'est qu'elle peut être anxiogène. Comme le programme de ma journée est chargé, je vais aller d'action en action et ne suis pas conscient que je possède cette information. Pourtant, elle va faire partie ce que les psychiatres appellent des états d'âme, cette forme d'état mentaux qui nous accompagnent sans en être conscient (la mélancolie par exemple). Cette succession d'états d'âme négatifs que je risque d'empiler dans la journée fait, qu'à 4 heures de l'après-midi, je reçois le mail habituel un peu alarmant de mon conseiller bancaire par exemple et cette fois je tape du poing, je verse dans les émotions fortes parce que je ne suis pas conscient d'avoir accumuler cet empilement d'états d'âme négatifs au préalable.

Il faut savoir lutter contre toute information qui vous parvient, qui vous fait savoir sans

Le cerveau adulte : un chantier perpétuel !

comprendre. Quand vous avez la faiblesse de prendre ces magazines que l'on vous donne gratuitement avant de monter dans un métro, refusez-les dorénavant, car c'est de la pollution visuelle dans le sens où l'on vous informe seulement.

Il vaut mieux avoir l'esprit qui restera inoccupé entre trois stations de métro par exemple parce que dans cet état là, vous êtes dans l'introspection, c'est à dire un processus qui permet de rendre conscients nos états d'âmes.

Nous avons entendu parler tout à l'heure de la capacité du cerveau humain à se projeter dans le futur. Sénèque disait "*Il n'y a pas de vent favorable pour celui qui ne sait où il va*". Cela fait partie de l'éthique aujourd'hui, mais la possibilité de nous projeter dans le futur est aussi un des traits de l'humanité. Cette projection dans le futur est réalisée en général pour simuler la récompense à venir. Cette simulation de la récompense à venir s'appelle le *désir*. Quand vous consommez l'acte que vous aviez simulé dans le passé et que cet acte est enfin arrivé, cela engendre le *plaisir*.

On pourrait beaucoup parler sur le fait que notre société moderne ne soit plus permissive au désir, mais plutôt au plaisir et on a là un grave problème de la dépendance qui peut se voir sous l'angle où le désir et le plaisir deviennent concomitants : "Je veux quelque chose, sur mon portable avec la bonne application, en trois coups de pouce, j'ai cet objet qui peut arriver dans ma boîte aux lettres en 24 heures au plus tard. J'ai vu ce livre, je ne vais plus chez le libraire faire une démarche pour m'enquérir sur tel auteur ; Amazon.com, et j'ai le livre dans ma boîte aux lettres." Je suis dans la consommation, dans le plaisir immédiat plutôt que le désir.

Cette culture de l'instantané doit être contrée. Nous devons développer une attitude très proactive pour lutter contre la pollution sonore et visuelle.

- 3 - La troisième condition est d'éviter l'usage chronique des psychotropes, famille de molécules inventées en France par le professeur Laborie. Vous pouvez prendre un somnifère ou un anxiolytique quand vous avez des bouffées d'anxiété. Je ne condamne ici que l'attitude qui consiste à prendre sur plusieurs décennies des somnifères et autres anxiolytiques.

On sait aujourd'hui que sur le plan épidémiologique, le facteur de susceptibilité permettant de voir apparaître une maladie neurodégénérative est multiplié par 7 quand un individu a consommé ces médicaments, de façon consécutive, sur plusieurs décennies.

En matière de santé mentale, il faut savoir traiter le fond et la forme. Savoir utiliser cette camisole chimique quand on traite la forme, c'est aussi commencer à envisager de traiter le fond : Pourquoi est-on anxieux ?

- 4 - Quatrième point qu'il faudra satisfaire pour que ce cerveau puisse conserver sa capacité de plasticité tout au long de la vie, c'est éviter la sédentarité. Cela a été dit, avec la bipédie, on invente le voyageur, la personne qui va savoir se transporter, l'explorateur.

Avec l'activité physique, il y a un effet direct car lorsque l'on engage une activité physique, nos muscles vont inciter les terminaisons nerveuses à agir par la libération de facteurs chimiques que l'on appelle des facteurs trophiques. C'est un effet local. Mais si l'activité physique dépasse plusieurs minutes, cette action locale deviendra plus générale au travers d'une

Le cerveau adulte : un chantier perpétuel !

action systémique et donc pourra alors agir sur le cerveau. C'est l'effet direct.

Il y a deux effets indirects de l'activité physique sur notre cerveau. Avec l'activité physique, on augmente le rythme cardiaque et la ventilation. En conséquence on augmente l'oxygénation de cet organe extrêmement énergivore. Par ailleurs quand je parle d'énergie, il s'agit de l'oxydation du glucose, il faut donc de l'oxygène.

La troisième conséquence positive de l'activité physique passe de façon indirecte par la psyché. Quand on s'impose de monter des escaliers où il y a des papiers gras, des vieux journaux, du chewing-gum, alors qu'il y a un escalator pimpant neuf, on est en train de se donner un signal positif : "tu vois combien je l'aime, je suis prêt à payer le prix". C'est un effet positif qui passe par la psyché, sur l'estime de soi.

Il faut aider les dépressifs par l'action physique, qu'ils se réapproprient leur corps en les invitant

à se raser, se laver ou se maquiller. On agit ainsi sur leur estime de soi.

- 5 - Je termine par ce cinquième point. J'aurais pu commencer par celui-ci, tant c'est probablement le plus important et cela fera la transition avec la prochaine intervention.

Une partie de notre cerveau est tournée vers l'autre, qui va s'activer quand, en face de nous, nous avons une personne qui va saisir la tasse de thé ou qui va nous regarder dans les yeux.

Une partie de notre activité mentale dépend de l'autre. Attention danger : quand on prend sa retraite et qu'on finit par faire dans son grenier des maquettes, sans activité psychique tournée vers l'autre.

Ainsi, quand ces cinq conditions sont réunies, on voit sans aucun doute la plasticité du cerveau perdurer.

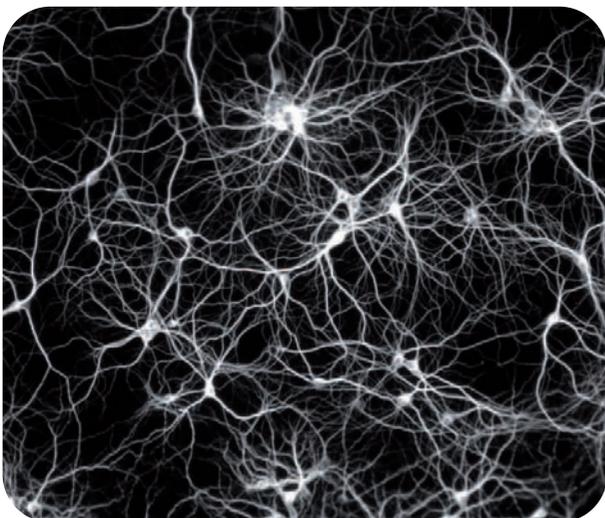


Le cerveau adulte : un chantier perpétuel !

- Genèse du cerveau

Abordons la construction du cerveau et examinons comment « le chantier » continue même à l'âge adulte. Je vous invite en « *terra incognita* » comme disaient nos anciens. En effet, quand on part dans l'exploration de cette matière molle, on est face à une « *terra incognita* ». Il faut rester modeste, car on connaît encore peu de choses sur le fonctionnement de ce cerveau.

On a affaire à l'objet le plus complexe que l'on connaisse dans la nature. Qu'il soit créé par la nature ou un être divin, il est constitué de 86 milliards de neurones avec au minimum 10 000 contacts par neurone. Si vous combinez ces deux chiffres, vous arrivez à ce calcul de 10^{15} contacts qui ont des capacités et des vitesses de transmission de l'information extrêmement rapides (de l'ordre de la microseconde). Il faut quelques centaines de microsecondes pour que ces contacts puissent s'engager dans une action mentale.



Vous imaginez l'information qui va être traitée et pouvoir être gérée. C'est vraiment un défi. Je passe sur d'autres paramètres physiques comme par exemple 176 000 km de fibres myélinisées dans notre cerveau.

Quand vous voyez un neurone avec les contacts, la métaphore du cerveau avec l'ordinateur ne tient plus, car ces contacts sont des éléments labiles en fonction de l'utilisation. Le fait de pratiquer le Sudoku, la peinture ou apprendre le japonais, des circuits vont s'engager et vont voir quelques contacts se stabiliser et d'autres au contraire seront éliminés physiquement. La variable d'ajustement dans notre cerveau est donc le nombre de contacts établis par neurone.



Il y a une relation entre le rêve, la mémoire et la consolidation de la trace d'une information que l'on va saisir quand on est éveillé. Cette trace que l'on va traiter lorsqu'on est conscient viendra se stabiliser avec le sommeil et certainement durant le rêve.

- L'expansion du cortex

Pourquoi sommes-nous devant ce défi de devoir maintenir ce chantier permanent ? Il y a une expansion énorme entre le volume du cerveau du macaque et celui d'*homo sapiens*.

Vu que nous avons tendance à vouloir avoir la grosse tête, nous allons être expulsés trop tôt pour passer par les voies naturelles, avant que ce cerveau n'atteigne sa taille normale, d'autant plus que la bipédie a entraîné une modification des os du bassin.

Le cerveau adulte : un chantier perpétuel !

Le cerveau du singe est construit à 90 % *in utero*. Il va finalement avoir un circuit établi en fonction des plans de l'architecte, à savoir les gènes. Il appartient à une espèce qui a hérité de certains gènes qui font que, devant des prédateurs, un macaque fait des vocalises spécifiques et montera dans un arbre si c'est un félin. Si c'est un rapace, il se cachera. En fonction des cris des congénères c'est-à-dire ceux avec qui il partage ses gènes, il comprend le signal. S'il n'appartient pas à la même espèce, il ne peut comprendre. C'est spécifié génétiquement, il s'agit de clones. Tout le monde se ressemble et comprend le même langage.

Chez l'Humain, l'ordre génétique va s'effacer devant l'ordre social et culturel parce que nous allons avoir un cerveau qui va continuer de se construire lorsque nous allons nous retrouver dans la niche écologique où nous allons grandir et elle contribuera à la construction du cerveau.

C'est le fait d'un double paradoxe. Nous naissons trop tôt avec un cerveau inachevé. Le deuxième paradoxe est que nous ne sommes même pas pressés de rattraper le retard. Cette construction du cerveau va perdurer et perdurera autant que nous saurons satisfaire les cinq conditions précédentes et probablement la plus importante : le désir. Ce dernier est certainement un des moteurs qui va maintenir cette fonctionnalité, cette capacité à nous adapter : rester des êtres désirants. On le voit très bien dans les sujets pathologiques atteints de dépression très sévère : le désir est une force vitale, lorsqu'il disparaît c'est la mort qui ronge.

- Notre cerveau est flexible

Nous sommes nés avec un cerveau inachevé et nous avons ce cerveau qui garde la capacité à se reconfigurer en fonction de l'usage que l'on en fait.

Les changements physiologiques dans notre cerveau sont essentiellement le nombre de contacts. Lorsque les neurones se trouvent saturés de contacts, c'est l'efficacité de ces contacts qui peut changer, car ils ne sont pas complètement fiables. Ils fonctionnent avec des règles de probabilité, donc vous pouvez augmenter leur efficacité.

Enfin, il existe des arrangements structurels qui vont faire le lien avec le prochain exposé. Pour illustrer les arrangements structurels, il ne s'agit plus de changements microscopiques, mais de territoires du cerveau que la nature n'avait pas prévu de mettre à l'interface. Après un long apprentissage, des projections à longues distances sont créées.

Pour illustrer ces arrangements structurels, j'ai choisi Glenn GOULD.



Le cerveau adulte : un chantier perpétuel !



Je n'ai pas les images de son scanner, mais ses enregistrements jouant l'Aria des variations de Goldberg. Le premier quand il avait 25 ans et un autre enregistrement effectué 22 ans plus tard. Cela pour illustrer les arrangements structurels lorsque le cerveau est capable à distance de venir chercher de l'information.

(Bande sonore)

Vous avez ressenti deux enregistrements différents. Le second est plus lent que le premier. Le premier enregistrement de 1959 faisait 1 mn 47 et le second de 1981 dure plus de 3 minutes. Glenn GOULD a décidé de prendre une liberté sur la partition. En écoutant ce second enregistrement, vous ressentez entre deux notes du blanc qui est utilisé ici pour faire passer une information d'ordre émotionnel.

Dans le premier enregistrement, on a un expert qui a su, au niveau du cortex, établir des autoroutes et relier le cortex visuel avec le cortex moteur. Pour les professionnels, cet enregistrement est celui vers qui tout le monde devrait tendre.

C'est l'enregistrement fidèle à la partition, tel que Bach l'avait écrit pour M. GOLDBERG qui souffrait d'insomnie.

Pour Glen GOULD, il a fallu plus de 20 ans pour qu'il puisse prendre beaucoup de liberté avec l'information siégeant dans son cortex, et qu'il aille chercher l'information sous-corticale qui gère nos émotions.

Au travers de deux notes, Glen GOULD voit une notion affective et il en profite pour nous la témoigner. Avec les émotions, il y a une dimension importante : la contagion. Les émotions se transmettent.

Quand vous allez au cinéma, même si cela ne vous fait pas rire, à force d'entendre rire autour de vous, vous allez finir par rire vous-même. L'inverse est vrai aussi. Vous pouvez être le plus paisible au monde. Si vous allez sur un stade de foot et que tout le monde crie : « à mort l'arbitre », vous allez vous surprendre à un moment donné à crier vous-même « à mort l'arbitre ». C'est une dimension importante qu'on doit également mettre dans les critères de l'humanité : le partage des émotions.

Au travers de l'exemple de Glen Gould, j'ai voulu illustrer l'importance de l'expérience, de l'apprentissage. La nature n'avait pas prévu de mettre, entre deux points noirs sur des portées, une valence affective. Pourtant, Glen Gould a été capable de venir chercher dans ses territoires sous-corticaux de l'information pour impacter ses décisions rationnelles (et corticales) avec une valence émotionnelle puis nous la transmettre.

C'est ce que l'on peut appeler le charisme, le leadership d'une personne. Ce n'est pas seulement quelqu'un qui sait travailler avec son cortex plus vite que tout le monde. C'est aussi quelqu'un qui sait convaincre qu'il a raison. Je me demande si les hommes politiques aujourd'hui sont conscients de cette notion.

Le cerveau adulte : un chantier perpétuel !

- La neuroplasticité

Une autre étude a montré qu'avec des enfants de 7 ans inscrits au conservatoire, examinés à 7 puis à 14 ans, on observe par imagerie fonctionnelle un épaissement de deux territoires : celui qui gère l'audition et l'autre la planification du geste.

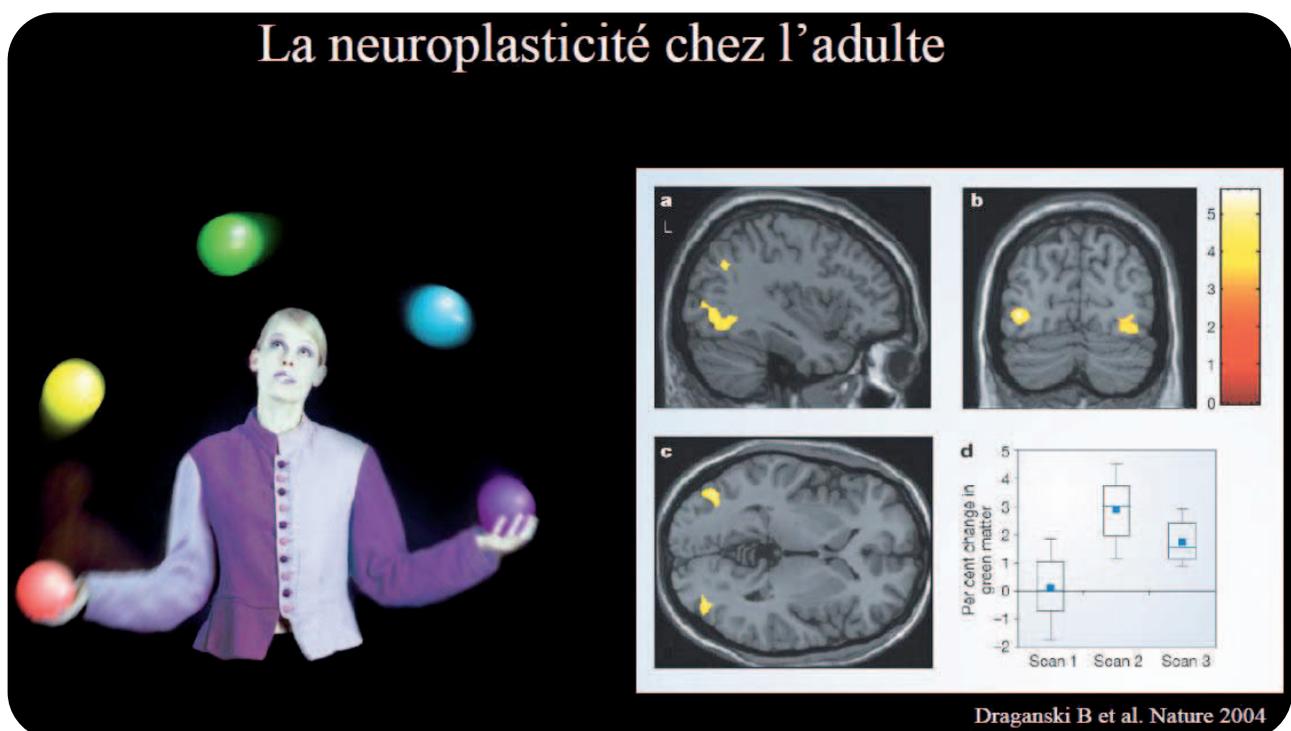
Finalement, mettre nos enfants dans des systèmes d'éducation modifie la construction de leur cerveau.

On peut continuer les expériences et prendre maintenant des adultes. Il s'agit de jongler à la maison tous les soirs durant 5 minutes pendant trois mois. Ce sont des personnes ayant entre 25 et 65 ans. Trois mois

d'apprentissage ont suffi pour que certains territoires (coordination de la vision et planification du geste) se développent. On observe une augmentation de la consommation d'oxygène reflétant d'une activité qui a pu se développer.

Quand on demande aux personnes de poser les balles et de revenir trois mois plus tard, ce qui est gagné l'est définitivement. On reste toujours au-dessus de la ligne de base.

Il est à noter qu'on n'observe pas ces variations de circuit dues à l'apprentissage chez les personnes atteintes de dépression sévère ou d'anxiété. C'est une preuve de l'importance du bien-être dans la possibilité, ou pas, de se reconfigurer.



(La neuroplasticité chez les seniors)

Le cerveau adulte : un chantier perpétuel !

La même expérience a été faite chez les seniors de plus de 75 ans. Même à cet âge, le fait de jongler à la maison tous les jours a des effets positifs. Cela a augmenté significativement les territoires impliqués dans le jonglage.

Le problème est qu'un arrêt entraîne, trois mois plus tard, une valeur au-dessous du niveau initial. Quand il y a de la construction, il faut en même temps de la déconstruction.

Pour avoir de la construction dans notre cerveau, il faut être proactif, agir. Le jour où vous posez vos balles, cette construction s'arrête immédiatement. La déconstruction qui avait également augmenté dans sa vitesse parce que vous aviez augmenté la construction, après l'arrêt, avec une certaine inertie, continue. C'est la raison pour laquelle il y a comme un coût à payer de cette

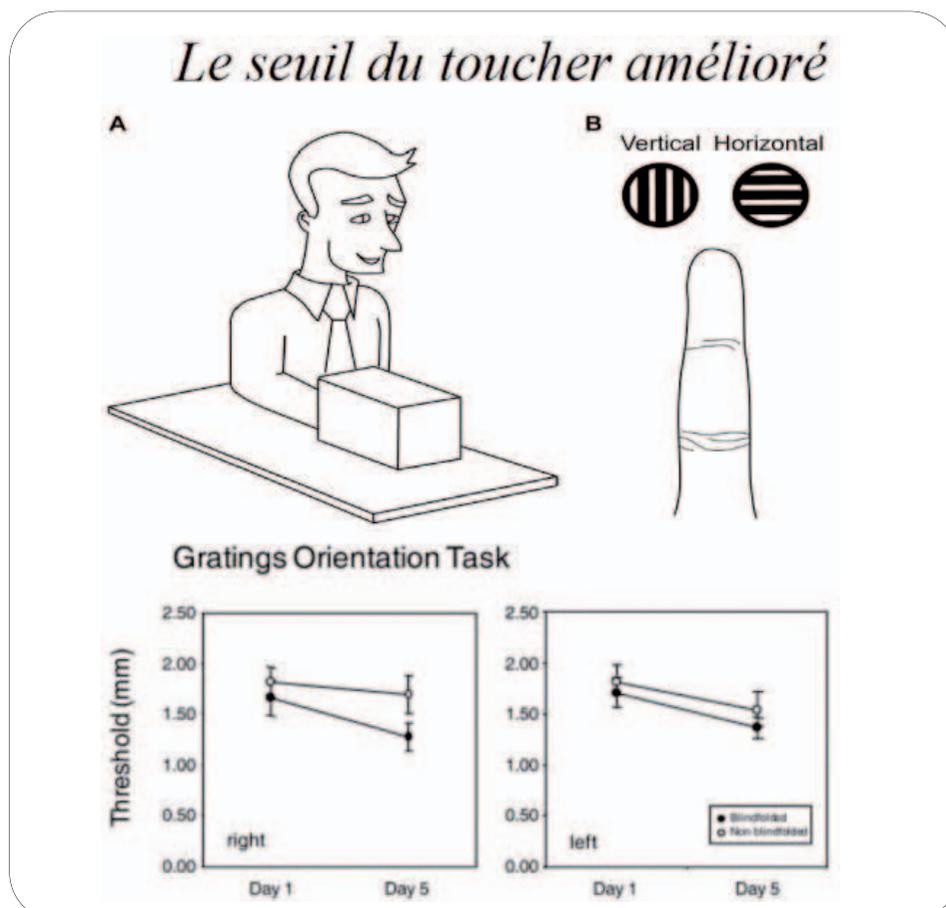
augmentation au préalable chez les seniors.

Le côté optimiste de l'affaire est que cela bouge de nouveau, quand on est toujours dans le bien-être.

Ce que je vous ai dit là est vrai pour trois mois, mais aussi pour un essai de 5 jours dans l'expérience suivante.

Des individus portent des masques. Ils sont plongés dans la cécité temporaire 5 jours et 5 nuits.

Le premier jour, on leur demande de mettre leur main dans une boîte au bout de laquelle il y a un anneau, sur lequel des bandes de velours sont collées. On leur demande la position de ces bandes : horizontale ou verticale. Ensuite, on tourne de 5, 10 degrés, etc. et on leur demande un compte rendu verbal.



Le cerveau adulte : un chantier perpétuel !

Le premier jour, entre les aveugles temporaires et les voyants, tout le monde part avec le même seuil de sensibilité. Cinq jours après la cécité, le seuil de sensibilité des aveugles temporaires s'est bien amélioré.

Ainsi en mettant le doigt sur une simulation, la région correspondante s'active. Lorsque ces personnes plongées dans la cécité utilisent leur doigt, elles activent deux modules en même temps ; celui de la vision a été préempté.

Cela n'existe pas chez les personnes qui sont soumises au stress chronique. Le cortisol est une hormone qui va figer ce cerveau et on ne verra pas apparaître ce genre de possibilité de redistribution des circuits.

Jusqu'où cela va-t-il ?

Cela va jusqu'à la possibilité aujourd'hui de faire travailler le cerveau humain avec des machines comme vous allez le voir sur cet enregistrement.

Lorsqu'une personne est plongée dans le syndrome de l'enfermement (cf. livre « *le scaphandre et le papillon* »), après avoir eu un accident vasculaire placé au niveau du tronc cérébral, plus aucune information de l'activité mentale ne peut être transmise au niveau des membres et des muscles. Elle n'a plus possibilité d'intervenir sur le monde qui l'entoure.

Une personne dans ce cas, après un apprentissage de six années, a été capable, par la pensée, de pouvoir faire bouger un bras robotique placé à côté d'elle. C'est vraiment une révolution. Pour cela, elle a créé de nouvelles capacités cognitives dans son cerveau.

On a franchi une révolution qui est la transformation de la pensée en action et à

distance. Jusqu'à présent, c'était du domaine de tordeur de cuillères au cirque. Aujourd'hui, c'est possible.

Cette personne a été choisie selon des critères bien rigoureux, avec en premier lieu le désir. Elle pouvait être adepte dans le passé de la méditation. Elle n'était pas forcément frustrée de ne pas avoir le dernier iPhone 5S ! C'est une question de gestion de l'introspection, des frustrations.

Cette personne : pour la première fois depuis 15 ans, a eu la capacité de boire quand elle voulait. Son expression faciale a témoigné de l'intensité de ses émotions.

Qu'est-ce qui nourrit ce cerveau qui ne demande qu'une chose : d'être un peu bousculé ?

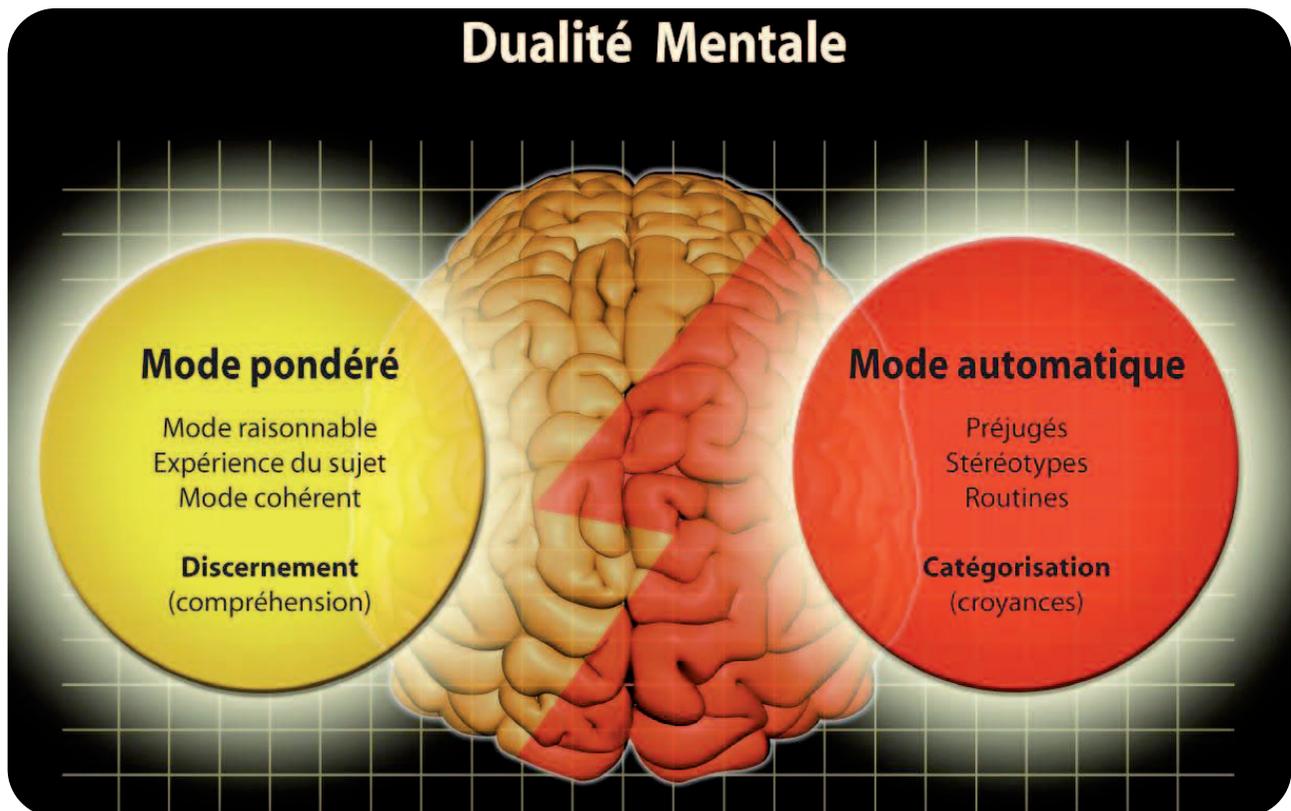
Au cours de la journée il y a différents rythmes de l'activité électrique. Il y a des régimes où on est éveillé, mais moins concentré. Il faut lutter contre l'infobésité. Il faut comprendre et non savoir. Comprendre est faire du régime gamma. Savoir, croire qu'on sait, c'est du régime bêta.

- Dualité mentale

Il existe deux dualités mentales : le mode pondéré par exemple, je cherche à comprendre, je viens aux cycles de conférences organisées par M. DECOR et le mode automatique je regarde TF1, le journal télévisé.

Le monde pondéré va être le mode raisonnable, cohérent. Je saisis l'information, je la traite, je prends des décisions qui seront évidemment toujours cohérentes. Même si le contexte varie, ma décision finale est toujours la même.

Le cerveau adulte : un chantier perpétuel !



Dans le mode automatique, on tombe dans le mode des préjugés, des stéréotypes. On croit savoir et on se trompe à tous les coups. Dans ce dernier mode, aucune forme de plasticité ne peut s'exprimer.

- Effet d'ancrage

Voici un exemple de votre cerveau qui fonctionne en mode automatique. Je vous demande de fermer les yeux et de vous concentrer sur les trois derniers chiffres de votre numéro de portable. Maintenant, je vous demande de choisir entre les 4 choix suivant

A=78 B=843 C=1162 D=1354

la date de naissance de Gengis Khan, le premier empereur de Mongolie.

85 % des personnes donneront la réponse B, car elle a trois chiffres. En fait, le résultat est 1162.

Un autre effet de cerveau automatique : comment rendez-vous cette opération possible en sachant qu'il y a un déplacement d'un bâton à faire ?

I = IX- III

Une autre expérience de cerveau automatique, je demande aux personnes de donner trois traits à la photo d'une jeune fille : la beauté, l'intelligence et l'ambition. Il y a petite lumière verte qui en trois secondes passe à l'orange et les personnes doivent répondre avant le rouge.

Le cerveau automatique fonctionne dans certaines conditions et notamment quand on n'a pas le temps. C'est le cerveau de la béatitude : on est fier de soi, car on connaît la réponse. Le seul problème est que, de temps en temps, le contexte change...

Résultats : quand je présente la photo avec un prénom italien, pour la beauté, on lui met 8/10.

Le cerveau adulte : un chantier perpétuel !

Si elle s'appelle Sarah, on lui met 3/10. En revanche, pour l'intelligence, on croit que l'italienne ne peut pas être belle et intelligente !

(On aura tout à l'heure un contre-exemple de cette croyance...)

C'est le cerveau automatique qui fonctionne. Il nous fait croire qu'on sait. Si on filme les personnes qui font ce test, elles sourient, car elles l'estiment par conséquence facile.

Pour la photo accompagnée d'un prénom irlandais, on ne connaît pas, on ne prend pas de risque, donc on lui attribue la note de 5 / 10. On voit ici opérer le domaine des stéréotypes, des croyances.

Le mode automatique fonctionne quand on n'a pas le temps, quand notre attention diminue. Après deux nuits blanches, la troisième journée, on fonctionne en automatique. On croit tout savoir. On répond toujours de façon erronée à toutes les questions. Les accidents de la route ont lieu la plupart du temps sur le trajet du travail, car c'est le trajet qu'on emprunte tous les jours et le cerveau est en routine.

Autre exemple, donnez une paire de dés à vos enfants avec l'injonction suivante : je veux la somme la plus forte. Dans tous les cas, la personne lance les dés avec énergie. Vous faites entrer une autre personne et vous lui demandez la somme la plus faible. Dans tous les cas, la personne lance tout doucement les dés. Dans ce cas, la croyance voudrait qu'un physicien, dont on ne se rappelle plus du nom, ait inventé une loi physique qui relie le résultat final des dés avec l'inertie avec laquelle vous jetez les dés. Devant le hasard, on invente des lois !

Le même phénomène se produit dans les groupes homogènes, comme nos politiciens. Ils sont majoritairement issus de l'ENA, qu'ils soient de droite, ou de gauche, ils sont formés par le même moule. Les ministres qui viennent de la société civile, qui ne pensent pas comme l'ensemble sont les premiers à sauter. Ils empêchent de fonctionner en cerveau automatique c'est à dire le mode opératoire qui rassure.

En guise de conclusion, je vous laisse cette phrase empruntée à Goethe :

*« Traiter les gens comme s'ils étaient ce qu'ils devraient être et vous les aiderez ainsi à devenir ce qu'ils peuvent être. »
C'est cela la plasticité cérébrale !*

Les bases cérébrales de la sociabilité

Dr Angela SIRIGU

Directeur de Recherche
Centre de Neurosciences Cognitives

Dr Jean-Pierre DECOR.- Chère Angela, vous êtes directeur de recherche au CNRS et directeur de l'équipe de neurophysiologie de l'Institut des Sciences cognitives de Lyon Bron.

Pour vous présenter, j'ai choisi, en introduction, de lire un extrait d'un grand magazine féminin. Le titre de l'article est : « *Angela SIRIGU, créatrice de lien* »,

Avec en sous-titre : « *portrait de la neuroscientifique, élue chercheur de l'année 2012 pour la recherche sur les maladies mentales.* »

« *Cette travailleuse acharnée, qui passe ses week-ends au labo, esquisse une enfance scolaire en Sardaigne, au milieu des vignes. Très tôt, la fillette studieuse sait qu'elle sera médecin. Après des études de médecine et de psychologie à Rome, elle s'oriente vers la neuropsychologie et les neurosciences cognitives avec un post-doctorat à Marseille, puis un second au NIH aux Etats-Unis. De retour en France, le Pr Marc JEANNEROD, fondateur de l'Institut des sciences cognitives de Lyon, la recrute.* »

Cette biographie doit être complétée. A votre retour des Etats-Unis, vous avez rejoint le CNRS à l'université Pierre et Marie CURIE où vous avez obtenu l'habilitation à diriger des recherches en travaillant au laboratoire de médecine expérimentale de la Salpêtrière avant de rejoindre le professeur JEANNEROD.

Vous êtes auteure de nombreux articles publiés dans des revues internationales prestigieuses.

A l'origine de la découverte du rôle de l'ocytocine sur l'expression des compétences sociales latentes des autistes d'Asperger, vous êtes particulièrement bien placée pour nous parler des bases cérébrales de la sociabilité.

Dr Angela SIRIGU



Tout d'abord, je voudrais remercier M. DECOR de m'avoir invitée.

Comme cela vous a été indiqué, je vais vous parler des bases cérébrales de la sociabilité.

On pense toujours qu'être sociable est un phénomène extérieur à notre cerveau. Les faits que je vais vous présenter vont vous convaincre du contraire. C'est grâce à notre cerveau qu'on est sociable.

Après les deux premiers exposés, le rôle principal du cerveau dans notre organisme a été bien établi. C'est la partie de notre corps qui nous fait réagir, anticiper les événements extérieurs, mais aussi rêver, imaginer, penser avec tous les biais que cela comporte pour activer le cerveau.

Cela a été très bien dit par Pierre-Marie LLEDO.

Faire de la recherche sur le cerveau est un enjeu pour notre société.

Pendant plusieurs décennies, en neuroscience, on pensait que notre cerveau et

Les bases cérébrales de la sociabilité

Comprendre le fonctionnement du cerveau pour mieux soigner



les neurones n'évoluaient pas une fois atteint l'âge adulte. On sait maintenant que cette idée est complètement fautive. Au contraire, le cerveau évolue en continu. L'activité cérébrale change en fonction des événements externes, mais aussi en fonction de l'activité endogène.

Les circuits cérébraux sont extrêmement complexes. Pour les neuroscientifiques, c'est un véritable challenge de les étudier, mais c'est aussi une tâche passionnante.

Un enfant très petit sait attraper un objet. Quand il voit un objet et qu'il cherche à l'attraper, le circuit du cortex visuel se met en activité. En fait on ne voit qu'une partie du système.

Il est extrêmement complexe et notre défi est de le comprendre.



- Compétences sociales

Lorsqu'il s'agit des compétences sociales, la complexité est encore plus grande.

Comprendre le comportement social est un énorme défi pour les scientifiques.

Les compétences sociales apparaissent très tôt. Déjà, les bébés sont capables de reconnaître les mouvements faits par les adultes. Dans une étude réalisée en 1997 par MELTZOFF un adulte fait plusieurs gestes face à un bébé, comme liron la langue ou ouvrir la bouche. Le bébé, déjà à cet âge, est capable d'imiter les comportements qu'ils voient. Pour cela, le cerveau du bébé doit transformer une information visuelle en mouvement coordonné.



Cela signifie que des systèmes sont pré-câblés à la naissance et qu'ils sont prêts à s'exprimer suivant l'environnement.

Il s'agit ici de mouvements, mais, en même temps, cela introduit une autre dimension : notre cerveau est capable d'imiter quelqu'un d'autre. On peut considérer que cette imitation est une première forme de contact social, certes très primitif, mais cela reste quand même une première forme d'interaction entre un adulte et un enfant.

- L'autisme

Malheureusement, quelques enfants ne sont pas capables d'exprimer ce contact social. Ils

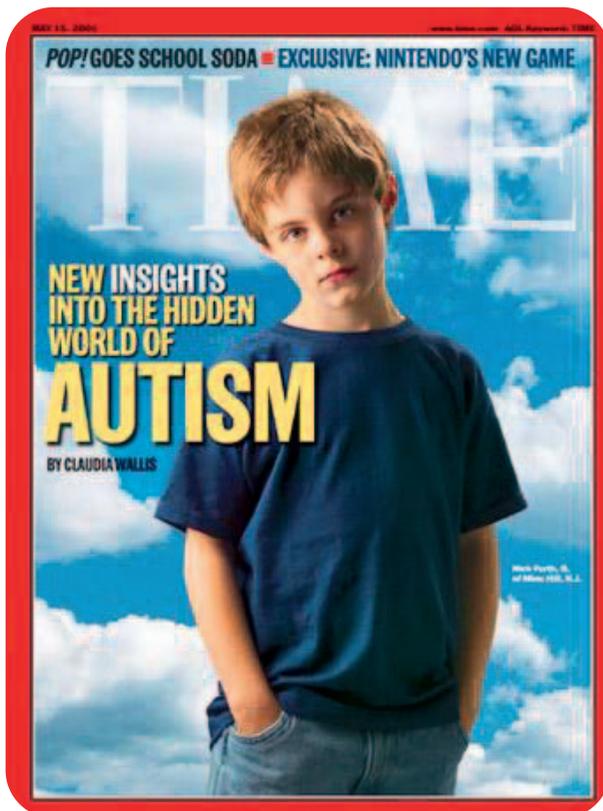
Les bases cérébrales de la sociabilité

ne sont pas capables d'interagir avec d'autres personnes. Il s'agit des autistes.

C'est un problème de développement du cerveau. A l'âge adulte, ces patients sont encore autistes car on n'est pas capable de les guérir.

Notre défi actuel est de comprendre les bases cérébrales de notre capacité à socialiser pour savoir comment le cerveau va les mettre en acte mais aussi pour soigner ce type de maladie qui devient un phénomène croissant dans notre société.

C'est un problème de développement qui couvre un large spectre et implique plusieurs déficits.



L'autisme peut désormais être détecté dès six mois. Les adultes qui souffrent d'autisme ont surtout des capacités cognitives très réduites. Les autistes très sévères ont des déficits à

interagir, à communiquer avec les autres et ont même des comportements moteurs très stéréotypés.

C'est la définition large de l'autisme.

Il existe une autre catégorie d'autisme que l'on appelle syndrome d'Asperger, du nom du médecin qui a découvert cette forme particulière. La particularité des patients souffrant du syndrome d'Asperger est d'avoir un niveau intellectuel très élevé. Ils sont capables de parler normalement. Ils ont même des capacités cognitives qui vont au-delà de la norme, par exemple des capacités de dessiner ou de calculer très impressionnantes. À côté de cela, ils échouent dans l'interaction sociale, dans les choses que nous faisons de façon automatique et qui nous apparaissent banales.

Temple Grandin, une autiste de niveau Asperger, a écrit beaucoup sur la relation qu'elle entretient avec les enfants. C'est une autiste avec de grandes capacités intellectuelles. Elle le reconnaît elle-même et milite pour la reconnaissance de ce syndrome.

Temple Grandin a parfaitement décrit les difficultés que ces patients ont quand ils interagissent avec les autres personnes. Elle écrit : *"Lorsque je rencontre une situation sociale nouvelle, je dois rechercher dans ma mémoire une expérience similaire que je peux utiliser comme modèle pour mon action."* En l'occurrence, nous ne sommes pas dans un mode automatique, mais dans un mode tout à fait réfléchi. Dans les situations sociales, il faut souvent se mettre dans un mode automatique.

"J'ai des difficultés lorsque je suis confrontée à des situations sociales"

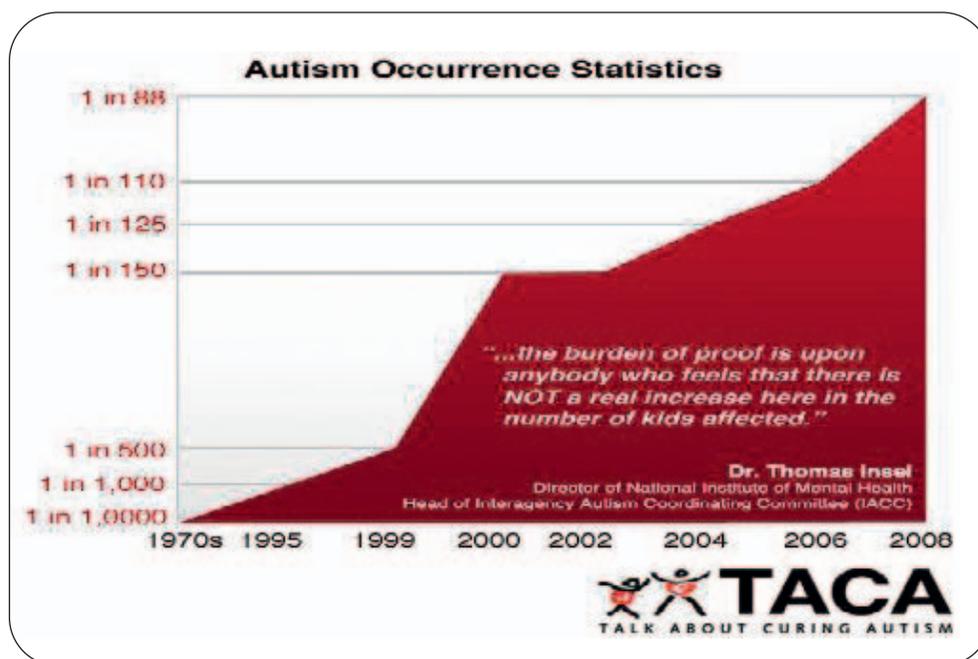
Les bases cérébrales de la sociabilité

inattendues, des surprises sociales." Cette définition est importante. En général on aime les surprises sociales. Quand on rencontre quelqu'un que l'on n'a pas vu depuis longtemps, on a plaisir à le revoir. Pour les autistes, au contraire, c'est un problème.

Lorsqu'elle interagit avec les personnes avec qui elle travaille, Temple Grandin écrit : *"j'utilise des réponses préprogrammées que j'ai déjà stockées dans ma mémoire."* En fait tout est fait avec logique et rien n'est fait spontanément.

Les patients autistes n'ont pas de problème à faire des calculs, à raisonner, ils raisonnent mieux que le commun des mortels. En revanche, ils sont incapables de socialiser, d'interagir dans les situations sociales courantes.

L'autisme ne fait qu'augmenter. Il devient un problème sociétal très important. Les gouvernements ont décrété 2013 comme l'année de l'autisme.



Le déficit majeur particulier que l'on peut immédiatement détecter chez ces patients est l'incapacité à regarder dans les yeux. Lorsqu'on parle avec quelqu'un, on le regarde très souvent dans les yeux.

Regarder les autres dans les yeux est une forme primaire de contact social, c'est une manière de dire à l'autre : *"Je t'aime bien, je vais interagir avec toi, avoir un comportement amical avec toi."*

Ces patients ont beaucoup de difficultés avec cette forme élémentaire de comportement social.

Le premier déficit est le regard.

Nous avons beaucoup étudié les autistes en laboratoire et nous avons enregistré les mouvements de leurs yeux lorsqu'ils regardent l'image d'un visage.

Les bases cérébrales de la sociabilité

Un sujet sain se concentre sur la région des yeux car c'est la partie la plus saillante du visage humain. Les singes font exactement la même chose.

Les patients autistes, eux, ont des difficultés à regarder dans cette région et se concentrent sur la région de la bouche. Même lorsqu'ils croisent le milieu du visage, les autistes évitent de façon très importante de regarder la région des yeux. Ils ont un comportement actif pour éviter cette région car nous pensons que pour ces patients regarder dans les yeux est une source d'angoisse.

Peut-on trouver un fondement neurobiologique à ce comportement ? La réponse est oui. J'ai étudié les effets des lésions cérébrales dans la région du cortex préfrontal chez des patients après un infarctus par exemple. Nous avons parlé précédemment de l'importance de cette région du raisonnement. Le cortex préfrontal contient une sous-région appelée le cortex orbito-frontal. Cette partie est très importante pour la socialisation. Les patients qui ont des lésions dans cette région changent de personnalité. Ils deviennent très agressifs, asociaux. La plupart du temps, ceux qui ont eu un infarctus dans cette région finissent en hôpital psychiatrique. Il se produit un changement complet de leur personnalité. Beaucoup de cas ont été décrits dans la littérature : c'est un patient qui perd son travail, qui divorce, sa vie devient un vrai désastre. Il perd tous ses amis, etc.

Cette région est appelée le cerveau social. Ces neurones sont importants pour avoir un comportement adapté dans l'environnement avec les autres.

La région de l'amygdale est également importante. Elle se situe dans la profondeur de notre cerveau et c'est une région, comme le montrent de nombreuses études, qui s'active lorsqu'on a peur.

Une lésion dans cette région supprime toute réaction à la peur dans des situations sociales.

Ces deux régions semblent donc clés pour une adaptation sociale optimale.

- Les neuromédiateurs

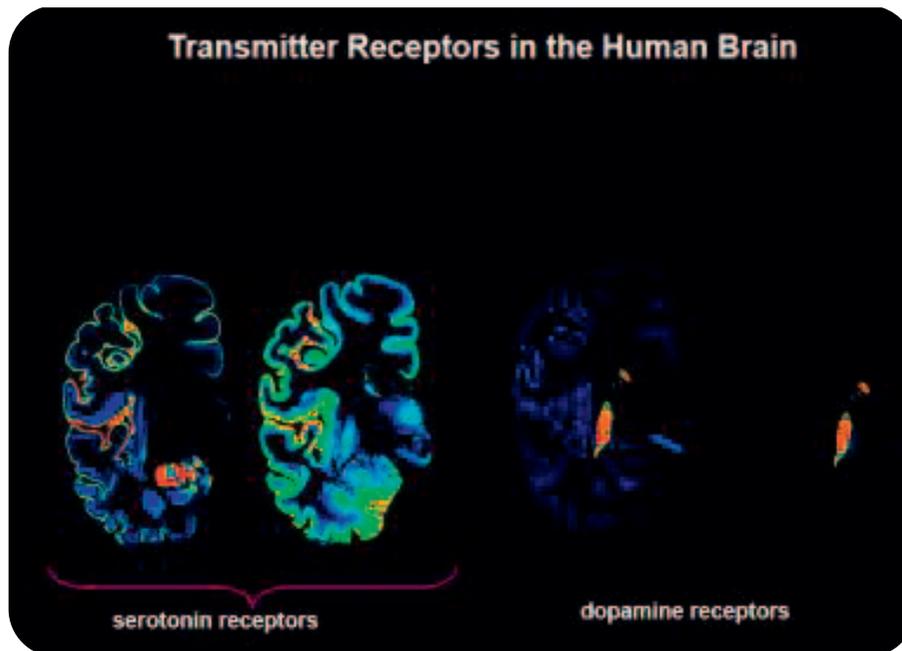
Il est bien connu que l'activité cérébrale est modulée par plusieurs substances chimiques. Nous nous limiterons à examiner les trois qui régulent les comportements sociaux.

- **1** - La première est la sérotonine. Le récepteur de cette substance est une espèce de petite boîte en dehors des neurones qui capte tout ce qui est extracellulaire.

La sérotonine régule notre comportement social. Un taux très élevé de sérotonine conduit à l'agressivité. Par exemple les déprimés ont un taux de sérotonine trop bas que l'on fait élever.

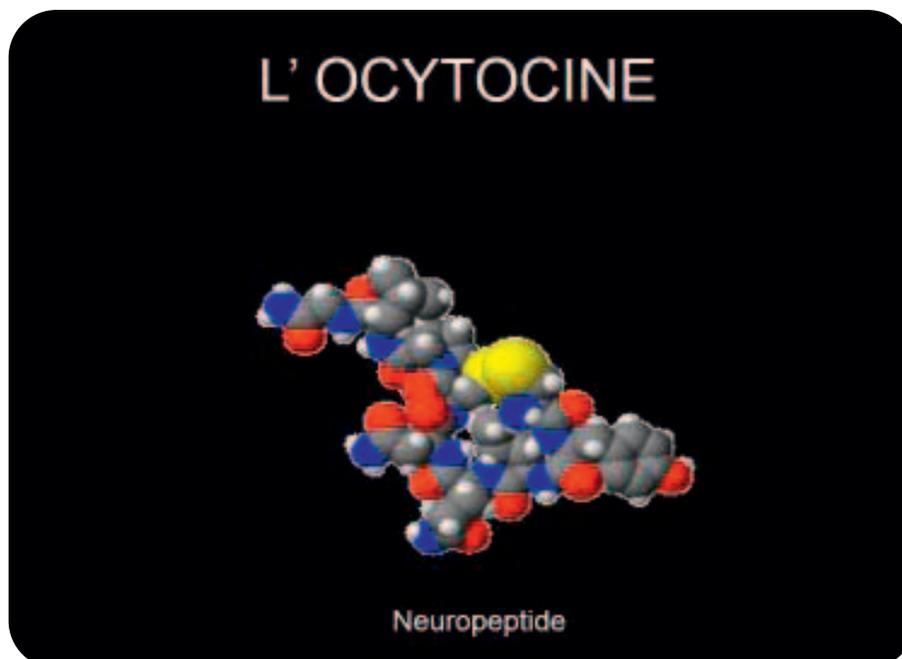
- **2** - La deuxième est la dopamine. Dans le cas de la maladie de Parkinson, il y a une dépression de la dopamine. Les régions riches en dopamine sont le noyau accumbens et l'aire tegmentale ventrale. Toutes ces régions sont importantes pour éprouver du plaisir. C'est en particulier la motivation pour l'argent, mais aussi apprécier les choses qui font plaisir, que l'on désire, c'est la motivation sociale d'être avec les autres qui est une forme de récompense.

Les bases cérébrales de la sociabilité



- 3 - Une troisième substance est l'ocytocine. C'est un petit peptide formé de neuf acides aminés, sa particularité est d'être à l'origine de

la vie et de notre capacité à être sociable. Je vais vous expliquer pourquoi.



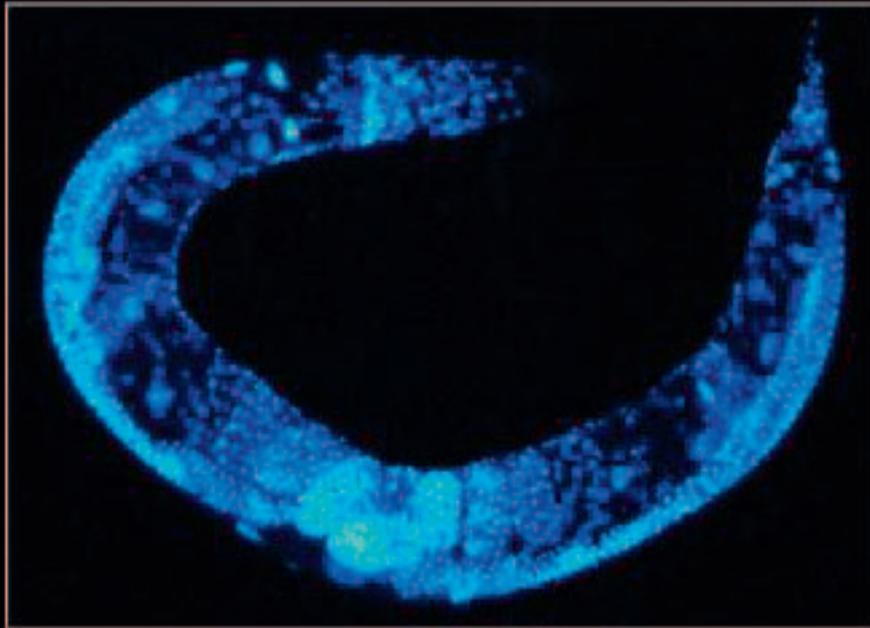
L'ocytocine est produite dans l'hypothalamus, région située dans les profondeurs de notre cerveau. C'est la région qui régule également la faim, la soif, le système digestif. L'ocytocine a une action périphérique. Elle est importante pendant l'accouchement. Lors de

l'accouchement, des taux d'ocytocine massifs sont relâchés comme pendant l'allaitement. Cette molécule est à la base de notre comportement social comme nous allons le voir par la suite.

Les bases cérébrales de la sociabilité

Est-ce spécifique à l'homme ? Non, il existe un phénomène ocytocinergique chez le ver *C. elegans*. Ce ver qui possède très peu de

neurones est très étudié en neuroscience. Campbell a eu le prix Nobel suite à ses travaux sur *C. elegans*.



C. elegans
(*Caenorhabditis elegans*)

Ver transparent d'environ un millimètre de longueur

WormBook

Ce phénomène existe chez différentes espèces. L'ocytocine est impliquée dans l'accouchement, mais aussi dans les phases successives après la naissance, dans la relation mère-enfant. Nous pensons qu'elle est à la base de l'attachement maternel.



Les bases cérébrales de la sociabilité

- Que savons-nous de l'ocytocine ?

De nombreuses recherches ont porté sur l'animal, en particulier sur les rats et les campagnols. Lorsqu'on administre de l'ocytocine chez des rats vierges, on induit un comportement maternel que l'on peut ainsi programmer.

A l'inverse si on administre un antagoniste de l'ocytocine on inhibe le comportement maternel chez la rate qui vient de mettre bas.

Une autre propriété de l'ocytocine est de faciliter la mémoire sociale. Ce n'est pas toute la mémoire, mais une forme particulière, celle d'avoir rencontré quelqu'un. Lorsque le rat rencontre un congénère qu'il n'a jamais vu, il se familiarise avec lui d'autant plus facilement qu'on lui a injecté de l'ocytocine. Si l'expression du gène correspondant à l'ocytocine est réprimée, le rat ne reconnaît même plus les membres de son propre groupe.

Lorsqu'on injecte de l'ocytocine chez les rats qui ont ce gène réprimé, on peut rétablir le comportement social. Pour cela, l'ocytocine doit être injectée dans une région spécifique, l'amygdale.

Une autre qualité de l'ocytocine serait son importance pour le maintien de la stabilité du couple et pour l'existence de relations durables. Ceci a été vérifié sur les rats.

Le directeur du NIMH aux États-Unis, Thomas Insel, a démontré, à travers de nombreuses études, qu'il existait deux types de campagnols : des campagnols monogames et des campagnols polygames. Il a mis en évidence que les campagnols monogames ont un taux d'ocytocine beaucoup plus élevé que les campagnols polygames.



Les campagnols très sociables sont monogames. Le campagnol solitaire est polygame. Déjà chez cette espèce, des comportements différents se profilent lorsqu'ils interagissent entre eux. Les campagnols ayant beaucoup d'ocytocine commencent à jouer. Le campagnol polygame qui n'a pas beaucoup d'ocytocine ne montre pas d'affection.

Pour vérifier cela sur les Humains, il faudrait mener une étude comparative des taux d'ocytocine entre les divorcés et ceux qui ne le sont pas. Je n'ai aucune intention de le faire, mais cela pourrait être intéressant...

Chez les espèces plus hautes dans la hiérarchie, comme les macaques, on a retrouvé une différence de taux d'ocytocine entre les macaques solitaires, et ceux qui passent beaucoup de temps en groupe. Les macaques en groupe ont un taux d'ocytocine plus élevé.

La différence de comportement social des campagnols se reflète également dans la distribution des récepteurs de l'ocytocine dans le cerveau. Les récepteurs chez les campagnols sociables se trouvent dans des régions importantes pour le plaisir (noyau *accumbens*). Les campagnols solitaires ont, quant à eux, beaucoup de récepteurs dans l'amygdale, région qui code plutôt les aspects aversifs.

Les bases cérébrales de la sociabilité



- Que se passe-t-il chez l'homme ?

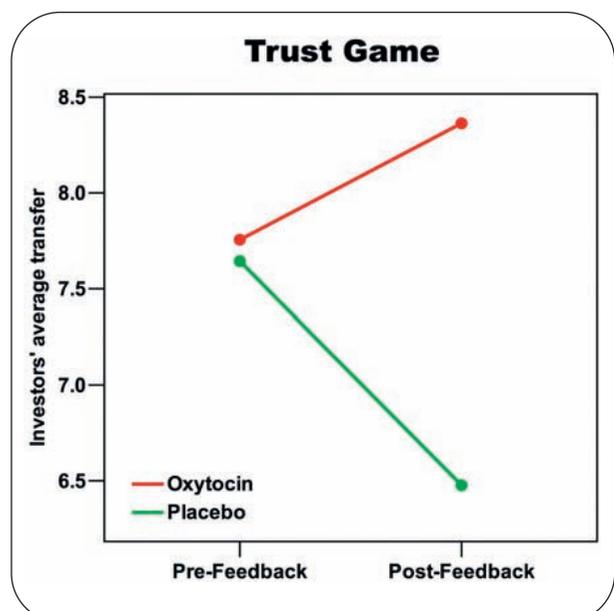
Depuis sept ans, des études chez l'homme montrent des effets de l'ocytocine très similaires à ceux observés chez les campagnols. Nous savons que l'ocytocine chez l'homme est impliquée dans la confiance, la filiation, la coopération, l'identité au groupe et l'agressivité envers les individus extérieurs au groupe. Cela peut avoir des implications sociales. Lorsqu'on prend de l'ocytocine, on peut mieux comprendre l'émotion que les autres ressentent. On a montré que l'ocytocine est impliquée dans les échanges économiques. Des économistes se sont associés à des neuroscientifiques pour étudier ces types de comportements d'échanges économiques et les effets de l'ocytocine sur ce type de comportement.

Le jeu de confiance est très connu en neuroscience. On donne de l'argent à un sujet et on lui dit : *"Vous avez en face de vous une autre personne avec qui vous devez échanger votre argent. Vous pouvez lui donner un certain montant d'argent, c'est le jeu."* Le sujet qui investit sur l'autre s'attend à ce que son partenaire, en retour, lui rende en partie ce qu'il lui a donné. Ce jeu a pour but de voir comment s'expriment des comportements de réciprocité.*



Ces deux points en pré-feedback se réfèrent à l'investissement du sujet avant qu'il sache si l'autre sujet va lui renvoyer l'argent.

Au départ, les deux sujets, l'un sous placebo, l'autre sous ocytocine, envoient une certaine somme d'argent, sans savoir ce que l'autre va faire. Mais celui sous effet placebo, lorsqu'il réalise sait que l'autre ne lui renvoie pas d'argent comme lui l'a fait, il n'envoie plus rien au deuxième essai. En revanche, celui, sous l'effet de l'ocytocine, continue à envoyer de l'argent. C'est comme si la confiance était multipliée en dépit de l'évidence que l'autre n'établit pas une réciprocité.



On a aussi montré dans mon laboratoire que lorsqu'on mesure le niveau d'ocytocine chez les sujets sains d'un groupe de 50 volontaires,

Les bases cérébrales de la sociabilité

plus l'ocytocine est élevé dans le sang, plus s'exprime un comportement social d'affiliation. On est plus extraverti. Il y a une corrélation entre les niveaux d'extraversion et les niveaux d'ocytocine chez l'homme.

En particulier, lorsqu'on a beaucoup d'ocytocine, on recherche des sensations et on est plutôt grégaire ; on s'amuse en groupe avec les autres.

On a observé que cette capacité d'extraversion est corrélée avec le volume de l'amygdale. Plus elle est petite et plus le comportement est extraverti, au contraire, plus l'amygdale est grande, moins on est extraverti et moins on a d'ocytocine. Je vais vous expliquer pourquoi.

L'amygdale réagit lorsqu'on est en situation de stress. Des recherches ont montré que lorsqu'on regarde des visages ou des scènes qui nous font peur, l'ocytocine diminue l'activité de l'amygdale. L'interaction sociale peut être une situation de stress et en diminuant le stress, l'ocytocine diminue l'activité dans l'amygdale.

Dans une interaction sociale très répétée, l'ocytocine a une implication sur la manière dont le volume de l'amygdale va s'exprimer.

Vu ces effets évidents de l'ocytocine sur le comportement social, on s'est demandé pourquoi ne pas essayer l'ocytocine sur les enfants et les adultes autistes. Ainsi, nous avons mené une étude dans mon laboratoire. Elle a été rendue possible grâce à la Fondation de France, la Fondation FondaMental et avec la collaboration de différentes personnes.

Dans cette étude, nous avons administré de l'ocytocine à des sujets qui souffraient

d'autisme. Nous avons ensuite pris un certain nombre de mesures relatives à leur comportement.

Nous avons, dans un premier temps, mesuré le niveau d'ocytocine chez ces patients autistes. Leur niveau était très bas. Après l'administration d'un spray, ce niveau a augmenté, mais sans jamais rejoindre le niveau des sujets sains. Ces patients présentent donc un déficit très important de l'ocytocine endogène, c'est-à-dire de la capacité à la produire.

Nous avons observé que cette administration avait un effet sur le comportement social et en particulier améliorer la capacité d'exploration des visages.

Ces patients sont-ils capables de passer plus de temps à regarder dans les yeux des autres ?

La réponse est oui !

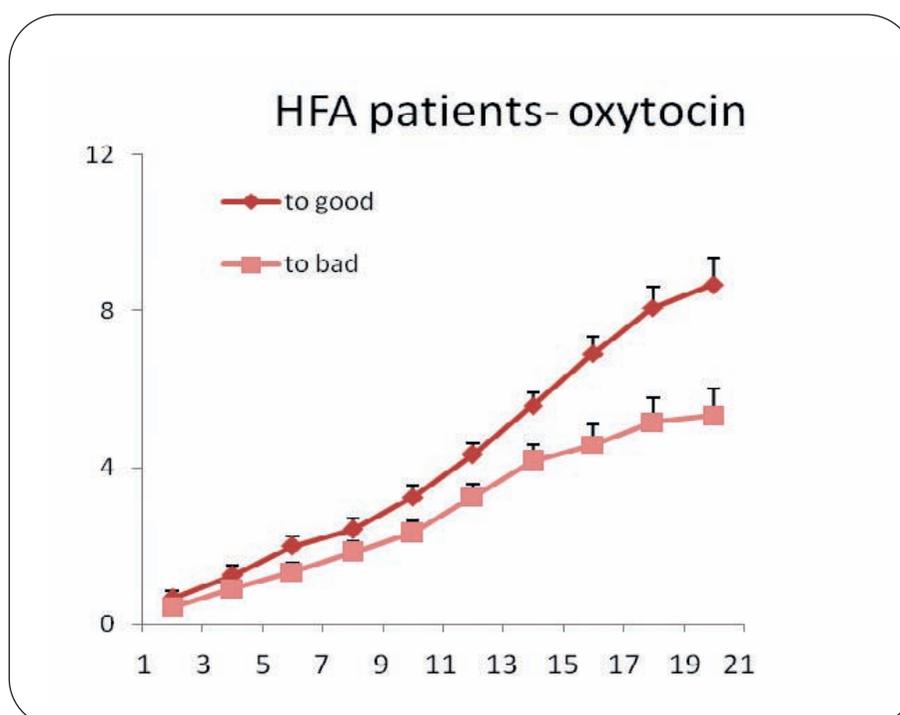
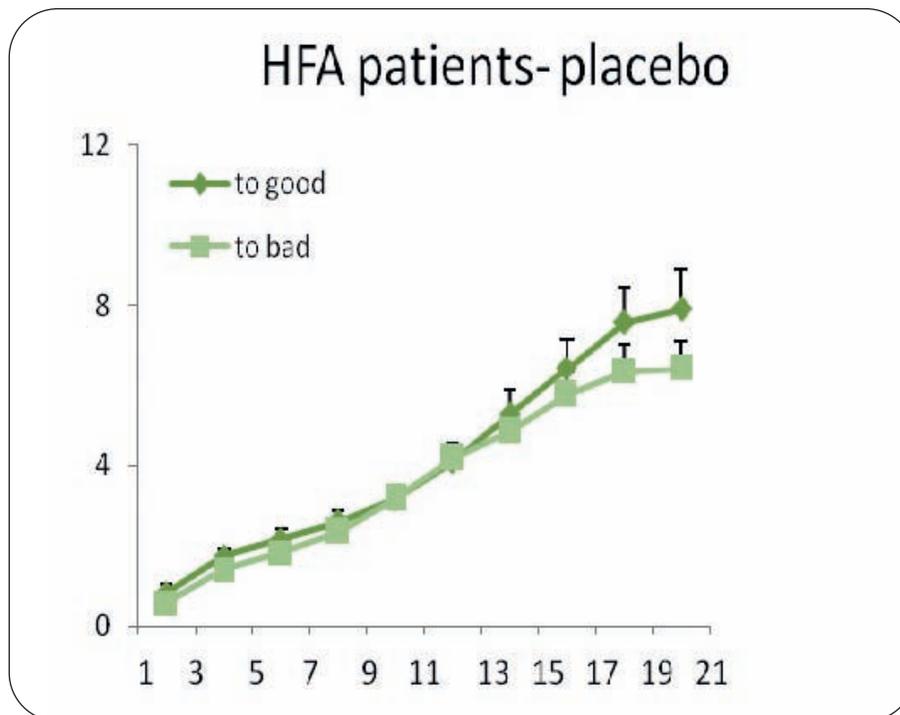
Une vidéo a été réalisée. On peut comparer le temps que le patient passe sur la région des yeux quand il est sous l'effet de l'ocytocine et lorsqu'il est en situation de placebo. Sous l'effet de l'ocytocine ce temps est beaucoup plus long. Il est à remarquer que l'ocytocine n'affecte pas le temps de fixation des autres parties du visage. Elle a donc une action spécifique sur les yeux.

Montrer que ces patients sont capables de regarder dans les yeux n'est pas une preuve. Bien entendu, les yeux étaient une première forme de contact social mais on ne peut pas dire que dans la vie de tous les jours, ils seront capables, avec l'ocytocine, d'apprendre à interagir avec les autres, de comprendre les intentions des autres. En effet, un des problèmes des autistes est de comprendre les intentions des autres.

Les bases cérébrales de la sociabilité

Pour apprécier si l'ocytocine avait un effet sur l'apprentissage, en particulier social, nous avons inventé le jeu de balle à l'ordinateur que l'on appelle le « cyberball ». Il se déroule de la façon suivante : le patient passe, avant d'entrer dans la salle de jeu, dans une autre salle où trois personnes étaient assises devant un

ordinateur et nous lui indiquons qu'il va jouer avec ces trois personnes dans une pièce à côté. Vous aurez compris que ces partenaires étaient complètement fictifs, le but étant de faire croire au patient qu'il allait effectivement jouer avec ces personnes.



Les bases cérébrales de la sociabilité

Le jeu consiste à gagner de l'argent chaque fois que patient reçoit la balle. L'argent sert pour apporter une motivation autre que sociale.

Sont ici représentées les différentes formes d'opérations que le sujet avait avec les trois partenaires.

Dans les dix premiers essais, tout le monde envoyait la balle au patient. Après le dixième essai, chaque partenaire commençait à changer de comportement : le « bon » partenaire envoyait presque tout le temps la balle au sujet. Le partenaire « neutre » envoyait la balle de façon égale à tout le monde et le « méchant » partenaire envoyait la balle très peu de fois au patient.

Ce jeu a pour but de reproduire une situation sociale de la vie de tous les jours, dans un contexte de laboratoire où nous pouvons contrôler plusieurs variables. La variable était de comprendre si le patient autiste, sous l'effet de l'ocytocine, pouvaient apprendre que ces trois partenaires avaient des profils sociaux complètement différents, parce qu'ils interagissaient avec lui de façon différente. C'est trivial pour chacun d'entre nous, mais très difficile pour les patients autistes.

Sous l'effet du placebo, sur la vidéo on constate que le patient donne indifféremment la balle au bon partenaire et au méchant sans aucune distinction entre les deux.

Sous l'effet de l'ocytocine, le patient, à l'égal d'un sujet sain, commence à comprendre qu'il y a un changement de comportement et sa préférence va aussi changer.

Ces résultats montrent que l'ocytocine peut améliorer les capacités sociales des patients autistes et démontre son potentiel thérapeutique.

Nous avons reproduit en laboratoire une situation de la vie réelle et nous montrons qu'en administrant l'ocytocine, on peut changer la capacité des patients autistes à comprendre les comportements des autres.

Après la publication de cette étude, de nombreuses familles nous ont contacté. Beaucoup de questions se posent et la première est de savoir si la prise à long terme d'ocytocine est sans danger pour la santé.

Je vous ai présenté les résultats chez les campagnols. Nous avons quelques données chez les primates, mais il reste beaucoup de travail sur les mécanismes fondamentaux de l'ocytocine. Nous ne connaissons donc pas les effets de l'ocytocine à long terme. Mais d'après Géraldine Dawson, la présidente de l'association Autism Speaks, l'absence d'alternative est une motivation supplémentaire pour l'ocytocine.

Les autistes sont actuellement sous antipsychotiques qui servent à réduire leur agressivité, en particulier l'auto agressivité. Ces médicaments n'ont aucun effet sur les troubles sociaux des patients. On donne donc actuellement des médicaments qui ont un effet sur une sphère de la pathologie de l'autisme mais n'améliorent pas la communication sociale de ces patients. L'ocytocine peut le faire.

Des études ont été menées chez les rats sur les effets à long terme de l'ocytocine, de la naissance à l'âge adulte ont donné des résultats contrastés. L'une montre à l'âge adulte, un déficit de l'attachement maternel vers les rats qui leur sont familiers. Ces rats sont plus attachés aux étrangers qu'aux rats qui leur sont familiers.

Les bases cérébrales de la sociabilité

Une autre étude donne des résultats exactement opposés...

Ce qui est important ce sont les études chez l'homme. Depuis que nous avons publié notre article, des études ont été menées sur l'Homme. L'une, montre que la prise d'ocytocine améliore la communication sociale des patients autistes lorsqu'ils sont sous traitement d'ocytocine pendant six mois et il n'y a aucun effet délétère associé à la prise de cette substance.

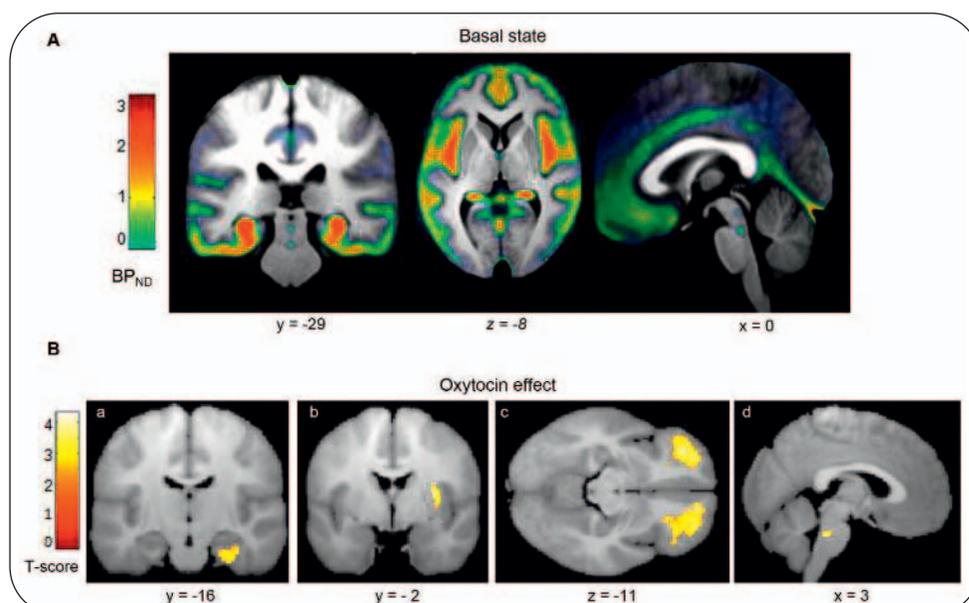
Une étude à long terme sur des populations plus larges est nécessaire. J'avais l'intention de la faire. Entre temps, le NIH a versé 12,6 millions de dollars à sept psychiatres de l'Université de Caroline du Nord pour mener une étude de cinq ans sur des enfants et adolescents âgés de 3 à 17 ans. Nous ne pouvons pas faire d'étude de ce type faute de financement.

En revanche, nous ne perdons pas l'espoir, Avec peu d'argent disponible nous poursuivons nos recherches. La Région Rhône-Alpes et le CNRS m'ont permis d'ouvrir un centre de recherche pour l'autisme. Mon intention est de comprendre les mécanismes de l'ocytocine, en particulier son interaction

avec les autres neurotransmetteurs. Le défi des prochaines années sera de savoir si tous ces neurotransmetteurs interagissent entre eux. Il n'y a aucune recherche sur ce thème, entre l'ocytocine et la sérotonine, mais aussi entre la sérotonine et la dopamine. Nous savons qu'il y a différents récepteurs dans le cerveau. Nous administrons des médicaments qui sont par exemple sérotoninergique, mais on ne sait pas ce que l'ocytocine peut faire sur un médicament sérotoninergique.

Dans les prochaines années, il faut comprendre comment toutes ces substances chimiques modulent notre activité cérébrale et comment elles vont interagir entre elles.

Nous avons récemment mené une étude dans laquelle nous avons observé les effets de l'ocytocine sur le système 5-HT 1A qui est responsable de l'anxiété et la timidité sociale, ainsi que de l'agressivité. Le système 5-HT 1A module le niveau de l'ocytocine. Il est inhibiteur et on montre dans cette étude menée sur 20 sujets sains que lorsqu'on donne de l'ocytocine, on modifie l'action de la sérotonine. Elle interagit dans différentes régions : l'amygdale, l'insula et le cortex orbitofrontal, régions cibles du système ocytocinergique.



Les bases cérébrales de la sociabilité

Une autre manière est d'étudier les mécanismes ocytocinergiques chez les primates. Actuellement, on mesure les niveaux d'ocytocine dans le sang, mais est-il un marqueur pour ce qui se passe dans le cerveau ? Nous ne le savons pas.

Ce sont ces études que nous menons dans mon laboratoire avec les docteurs Michel DESMURET, Nathalie RICHARD, Elissar ANDARI, Raphaëlle MOTTOLESE, Lucia CARRIERO, et Nadia MERHOUN.

La mémoire cérébrale sous l'éclairage de la théorie de l'information

Pr Claude BERROU

Professeur à Télécom-Bretagne
Membre de l'Académie des Sciences

Dr Jean-Pierre DECOR.- Nous avons démarré ce colloque il y a sept millions d'années avec Toumaï. Nous venons de prendre connaissance des possibilités actuelles de notre cerveau et de tout le travail qu'il reste à faire pour mieux le comprendre.

Avec Claude BERROU, nous allons faire un saut dans le futur.

Son objectif est de réaliser des machines pensantes capable d'intelligence artificielle et de supplanter le cerveau humain !

Claude BERROU vous êtes ingénieur de l'Institut national polytechnique de Grenoble. Votre première mission a été la création de la nouvelle Ecole Nationale Supérieure des Télécoms, l'ENST, de Bretagne, grande école sous tutelle du ministère de l'Industrie.

Après plusieurs années passées à l'organisation de l'ensemble des cours de physique et d'électronique, vous avez créé un laboratoire de conception de circuits intégrés avec, comme axe de travail, l'interaction logarithme/silicium.

Au début des années 90, vous avez inventé et mis au point, avec le concours d'Alain Glavieux, les codes correcteurs d'erreurs quasi optimaux, les fameux " turbocodes" aujourd'hui massivement utilisés dans la téléphonie mobile 3G et 4G.

Ces travaux vous ont valu une notoriété considérable avec, entre autres, le Grand prix de l'Académie des Sciences dont vous êtes

maintenant membre, la Médaille Hamming et le prestigieux Prix Marconi, succédant ainsi au fondateur de Google.

Aujourd'hui, après ces découvertes, vos activités de recherche sont presque entièrement consacrées aux neurosciences.

En 2011, le Conseil européen de la recherche vous a accordé un budget pour travailler pendant cinq ans sur les liens entre théorie de l'information, codage distribué et cognition mentale. Vous avez écrit un livre avec Vincent Gripon « *Petite mathématique du cerveau, une théorie de l'information mentale.* »

Des turbocodes au néocortex, voilà un bel exemple de mobilité thématique !

Réaliser une machine d'intelligence supérieure à celle de l'Homme, loin d'être une utopie, est votre programme de recherche.

Je vous cède la parole pour nous présenter la mémoire cérébrale sous l'éclairage de la théorie de l'information.

Pr. Claude BERROU



Je vous remercie de m'avoir invité à cette journée consacrée au cerveau, passionnante jusqu'à présent. Etant le dernier orateur, le réservoir des ondes gamma doit être presque épuisé !

La mémoire cérébrale sous l'éclairage de la théorie de l'information

Mon exposé a pour ambition de vous convaincre que les sciences de l'information en général et la théorie de l'information en particulier, cette toute jeune science née il y a 60 ans avec les travaux pionniers de l'Américain Claude Shannon, peuvent fortement contribuer aux neurosciences et à l'explication de ce **Pr Claude BERROU** que je nomme l'information mentale.

Comme M. DECOR vient de le dire, j'appartiens à l'Institut Télécom sous la supervision du ministère de l'Industrie et mes travaux sont financés par le Conseil Européen de la Recherche.

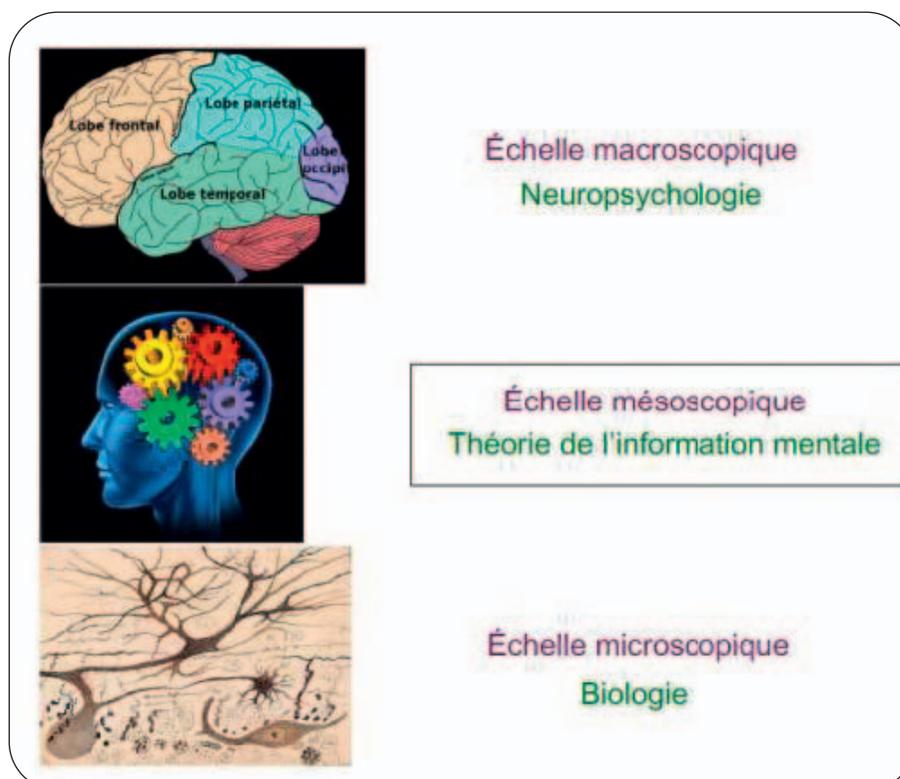
Sans entrer dans les détails, on peut considérer trois angles d'attaque pour essayer de comprendre le cerveau.

Au niveau le plus élémentaire, celui du composant ; il y a le neurone. Il en a été très peu

question lors des exposés précédents, alors qu'il est l'élément essentiel du système nerveux.

On peut en effet considérer que l'on sait à peu près tout aujourd'hui de sa chimie, sa physico-chimie, et des différents canaux qui permettent aux neurotransmetteurs de produire leurs effets. On connaît les neurones depuis 130 ans, grâce aux travaux pionniers de Ramon y Cajal à la fin du XIXe siècle, prix Nobel de médecine en 1906. Le composant fondamental du cerveau est aussi bien connu qu'un transistor dans un circuit intégré.

À l'extrême opposé, il y a le cerveau dans son ensemble, considéré comme une boîte noire. Ce n'est pas tout à fait exact à cause des moyens très sophistiqués d'imagerie utilisés par les neuropsychologues et les spécialistes du comportement.



La mémoire cérébrale sous l'éclairage de la théorie de l'information

Énormément de monde aujourd'hui dans la communauté scientifique travaille dans ce domaine. On peut les compter par centaines de milliers !

Au niveau biologique, il s'agit surtout de comprendre les effets de telle molécule, d'hormone, de neurotransmetteur dans le fonctionnement partiel ou global de cette superbe machine. Il est surtout question de santé publique, tout comme la neuropsychologie d'ailleurs.

Il y a un niveau intermédiaire que nous sommes peu à occuper, probablement quelques centaines, peut-être quelques milliers à travers différents pays. C'est le niveau de l'information et des circuits.

Comment le cerveau s'organise-t-il pour réagir à une information qu'il juge pertinente ? Comment fait-il pour la mémoriser, pour la remémorer,

l'exploiter, la croiser avec d'autres informations ?

Quels sont les principes ? On connaît très bien les principes du CD-Rom, DVD ou du disque dur de l'ordinateur. Pourquoi ne serait-il pas possible de faire ce même travail pour le cerveau ?

C'est à ce niveau que se situent mes recherches. Je ne suis ni biologiste ni psychologue. Je suis un théoricien de l'information. Il y a environ 7/8 ans, j'ai commandé une trentaine de livres sur le cerveau, avec l'envie d'aller voir plus loin que le monde des télécommunications. J'ai beaucoup lu, appris à élaguer et à abstraire car, comme on l'a dit précédemment, il n'y a pas dans l'univers, de "machine" plus complexe que le cerveau.

- L'information mentale

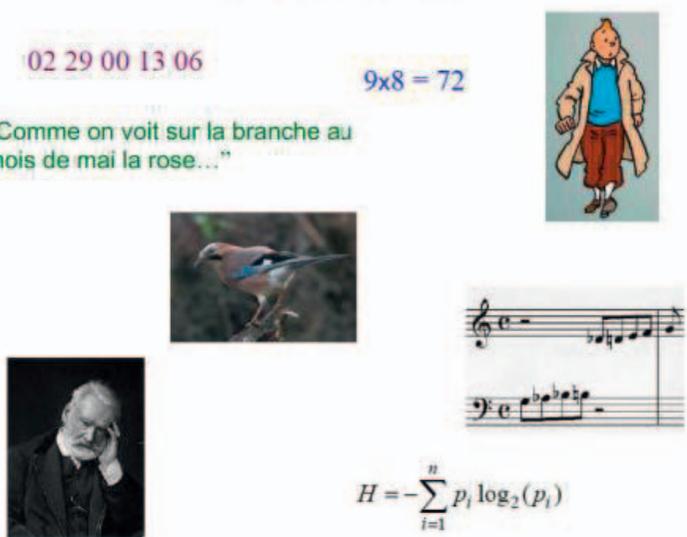
Je m'intéresse donc à la pure information mentale.

L'information mentale

02 29 00 13 06

9x8 = 72

"Comme on voit sur la branche au
nois de mai la rose..."



$$H = -\sum_{i=1}^n p_i \log_2(p_i)$$

La mémoire cérébrale sous l'éclairage de la théorie de l'information

Si je dis 9×8 , immédiatement votre cerveau réagit et il n'y a pas d'affect ni d'émotion. L'ocytocine n'est pas concernée par ce travail, la réponse, immédiate, est 72. C'est mécanique. C'est automatique.

Si je vous demande le début d'un poème de Ronsard, si vous le connaissez, vous allez le réciter, peut-être qu'une émotion à un moment donné surviendra, mais la mémoire aura déjà fait son travail et sorti les premiers mots du poème.

De la même façon pour reconnaître le personnage de Tintin. Cela vous a peut-être rappelé des souvenirs, mais après coup. Le nom Tintin vous est venu à l'esprit par un effet de remémoration et selon des principes que personne aujourd'hui ne connaît.

Pourtant, lorsqu'on traite d'une machine cognitive, sachant que la matière première de cette machine est l'information, il faudrait peut-être essayer de commencer par traiter le problème de l'information.

Cela dit, j'ai énormément apprécié les trois précédents exposés, car le cerveau, en termes de santé publique, est aussi une affaire considérable aujourd'hui.

En revanche Je ne parlerai pas des séquences, M. DECOR m'ayant accordé peu de temps. Je me limiterai à l'information mentale intemporelle, aux messages figés qui reviennent en un temps extrêmement court.

Vous avez également reconnu immédiatement Victor HUGO sans ressentir la moindre émotion. Quels sont les circuits de cette mémoire cérébrale ?

- La mémoire héréditaire, intergénérationnelle, est numérique

La mémoire intergénérationnelle, c'est notre patrimoine génétique. Vous savez tous que cette mémoire est numérique. Notre ADN utilise un alphabet à quatre caractères A T G C. La vie a fait le choix de l'exprimer par un alphabet discret, à savoir numérique. Il n'est pas binaire, mais quaternaire.

Si la vie a fait ce choix sur le très long terme, de génération en génération, pour passer d'*Homo erectus* à sapiens en passant par *habilis*, sur le court terme, je pense que le temps d'une vie, pour le cerveau, le numérique pourrait être la bonne réponse.

Je vais essayer de vous en convaincre maintenant.

- Neurosciences computationnelles

Vous savez encore que $9 \times 8 = 72$. Vous l'avez appris vers l'âge de 8 ans.

A l'instant où je vous parle, vous perdez un neurone par seconde et plus de connexions encore et pourtant $9 \times 8 = 72$ vous vous en souviendrez encore très longtemps.

Le cerveau subit à tout moment des agressions de toutes sortes, chimiques, radiatives, ainsi que le vieillissement naturel et cependant $9 \times 8 = 72$ reste indéfectiblement en mémoire.

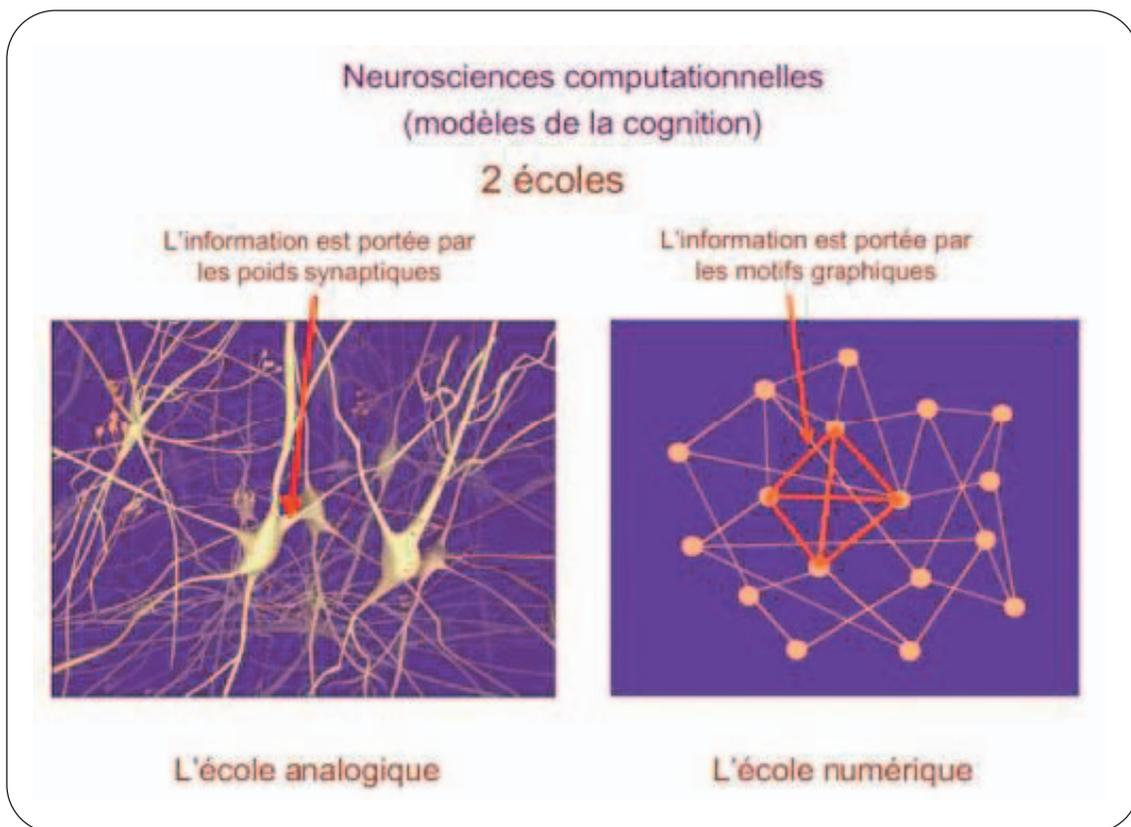
Il y a deux écoles en matière de neurosciences computationnelles. C'est un terme barbare qu'on peut considérer comme étant synonyme de science des modèles de la cognition.

La mémoire cérébrale sous l'éclairage de la théorie de l'information

Si l'on considère un neurone, il a un corps et des entrées multiples (10 000 possibles) appelées synapses vues de l'extérieur ou dendrites vues de l'intérieur. Il n'a qu'une seule sortie, appelée axone. La combinatoire en termes mathématiques peut exploser.

Quand le neurone envoie ses potentiels d'action, on ne sait pas où cela va arriver. C'est un réseau de noeuds qui peuvent s'exprimer mais ces noeuds ne savent pas où les messages vont arriver.

Si l'on compare à un réseau de communication, c'est assez sidérant. Imaginez un monde internet où vous envoyez des signaux et où vous ne savez pas trop à qui cela va arriver, imaginez le bazar que cela va mettre dans la communication. C'est le cas du cerveau. Le neurone ne sait pas où le signal qu'il émet va parvenir.



La mémoire cérébrale sous l'éclairage de la théorie de l'information

La première école, majoritaire, est l'école analogique. Elle dit que l'information mentale ($9 \times 8 = 72$) est portée par les poids synaptiques. Un poids synaptique est la force du contact d'une des entrées du neurone. Cette entrée va recevoir et transmettre, sous forme électrique, le potentiel d'action. Ces potentiels d'action vont être modifiés en neurotransmetteurs. Des ions vont pouvoir s'ajouter. La loi de Kirchhoff en électronique nous dit que c'est très facile de sommer des courants, au contraire des potentiels.

La façon dont le signal électrique se transforme en signal chimique s'exprime par le poids synaptique. Ce poids synaptique va porter l'information. Cela fait 40 ans que des personnes travaillent sur cette approche.

La deuxième école à laquelle j'appartiens, minoritaire, est l'école numérique. Elle considère qu'on ne peut pas faire porter une information aussi précise dans un monde aussi agressif par des valeurs qui peuvent changer tout le temps et même assez intensément.

Cette école numérique pense que l'information mentale est portée par des motifs graphiques, à savoir par des populations de neurones qui s'activent ensemble. C'est la position de Jean-Pierre CHANGEUX ; il l'a écrit, il y a 30 ans, dans son livre « *l'homme neuronal* ». Cependant, cela n'avait jamais été formalisé ni quantifié.

Le travail de mon équipe, est de quantifier, formaliser cette vision pour arriver à dégager des principes informationnels qui puissent être reproduits dans une machine. Ce serait une machine de raison pure qui ne ressentirait aucune émotion, qui ne connaîtrait pas de dysfonctionnement, qui serait un ordinateur

connexionniste, s'appuyant sur des propriétés de communication par des liaisons de noeud à noeud et non pas par des programmes tels que vous les connaissez dans vos PC.

Dans votre PC : les circuits électroniques sont alimentés par des programmes qui exécutent les uns après les autres des instructions.

Pour le cerveau, le principe est complètement différent : la machine, ce sont des noeuds avec des arêtes, à savoir des connexions possibles entre ces noeuds.

- Le binaire n'interdit pas les émotions !

J'ai dit que notre future machine ne ressentira pas d'émotion, mais le cerveau en ressent. Le cerveau nous fait vivre des journées parfois passionnantes, parfois éprouvantes. Si l'information mentale est numérique et même binaire, cela n'interdit pas les émotions.

Par exemple, ce soir, vous rentrez chez vous, vous avez envie de voir un bon film, vous avez l'équipement qu'il faut, un home cinéma. Vous introduisez votre DVD préféré qui ne porte que des informations binaires. Un DVD porte des 0 et des 1 plus un code correcteur d'erreurs qui permet de corriger la lecture en présence de poussières.

Ces 0 et 1 à travers les différents transducteurs (écran, haut-parleur) vont vous faire ressentir des émotions. Bien que binaire au départ, cette information n'interdit pas les émotions.

Je rejoins ce que disait M. DECOR en début d'après-midi sur le fossé qui se creuse aujourd'hui entre une certaine partie de la population et toute cette nouvelle technologie qui arrive de plus en plus sous forme

La mémoire cérébrale sous l'éclairage de la théorie de l'information

numérique. La vie elle-même s'appuie sur des principes numériques. Il ne faut pas en avoir peur.

- Formidable avantage du binaire : la robustesse

Pourquoi le numérique est-il si intéressant?

J'ai ici deux situations. Dans les deux cas, je veux effectuer la même tâche : transmettre dans un canal de transmission quatre valeurs : 5, 12, 3, 7.

Ce canal peut être affecté d'un coefficient de transmission aléatoire, qui peut amplifier le signal ou l'atténuer dans une certaine limite.

Dans un canal analogique affecté de ce défaut de coefficient de transmission un peu aléatoire, ce qui est reçu peut être faux, par exemple : 7, 10, 5, 6.

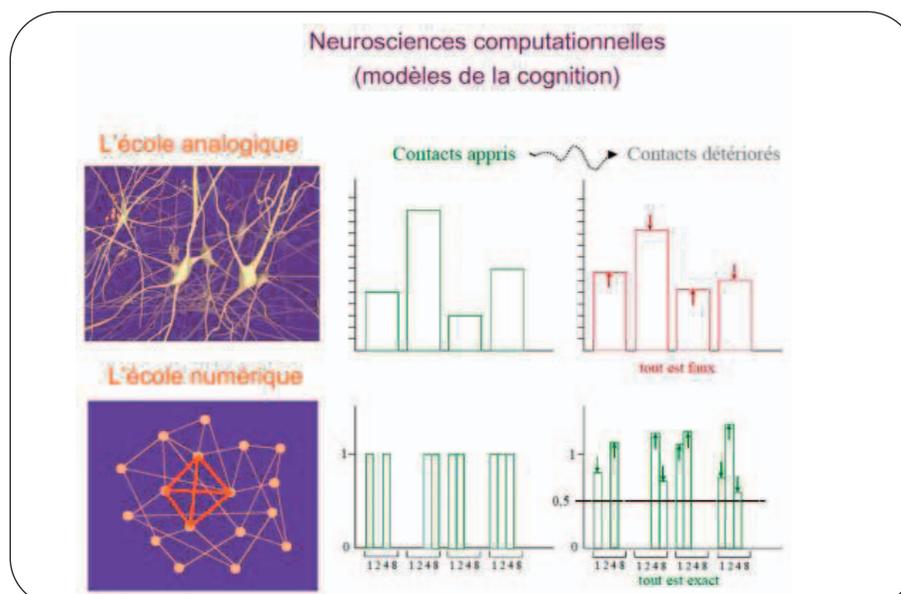
Vous pouvez faire des analogies avec la vie courante. Tout à l'heure, lors du cocktail, dans un espace un peu bruyant, vous dites un mot et vous contrôlez assez mal la puissance

sonore de l'émission. En face, l'auditeur essaie de comprendre ce que vous dites dans cet environnement bruyant. C'est le coefficient de transmission un peu aléatoire.

Maintenant, vous allez utiliser la numération binaire. Cela consiste à transformer un nombre quelconque en une série de nombres en base 2. La numération binaire s'appuie sur une base qui est : 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64... Vous pouvez écrire tous les nombres sous la forme d'une somme de certaines de ces bases.

Ainsi 5 est $4+1$; 12 $4+8$; 3 $1+2$ et 7 est $1+2+4$.

Vous envoyez toutes ces valeurs vers un destinataire. Le canal est toujours affecté d'un coefficient non maîtrisé. A condition que l'atténuation ne soit pas trop forte, tout ce qui arrive est exact. Dès lors que les valeurs reçues sont supérieures à la moyenne qui sépare 0 et 1 ; la moyenne étant donc 0,5, tous les signaux vont être reconnus comme des 1. Les valeurs exactes (5, 12, 3, 7) vont pouvoir être parfaitement récupérées.



La mémoire cérébrale sous l'éclairage de la théorie de l'information

Je pense qu'il en est de même pour l'information mentale.

Si vous considérez un modèle analogique, tout peut être faux, car vous êtes fatigué, vous avez passé une mauvaise nuit. Certains neurotransmetteurs ne font plus leur travail, telle hormone est manquante, vous êtes passé près d'une antenne émettant de très forts rayons électriques ou électromagnétiques. Imaginez-vous vous réveiller un matin où tout serait faux !

Avec le modèle numérique, aucun souci, vos poids synaptiques ont pu être modifiés de la même façon mais vous allez pouvoir tout récupérer sans effort.

Pour aller plus loin dans la modélisation numérique de l'information mentale, il nous faut faire trois hypothèses.

- Première hypothèse : l'information mentale est redondante

Dans une approche complètement originale dans le monde des neurosciences computationnelles, j'assimile le cerveau à une machine de Shannon.

Claude SHANNON est le père de la science « théorie de l'information ». Il a posé les grands principes de la communication numérique. Il est

décédé en 2001 après une très longue période d'Alzheimer. Je n'ai jamais eu la chance de le rencontrer.

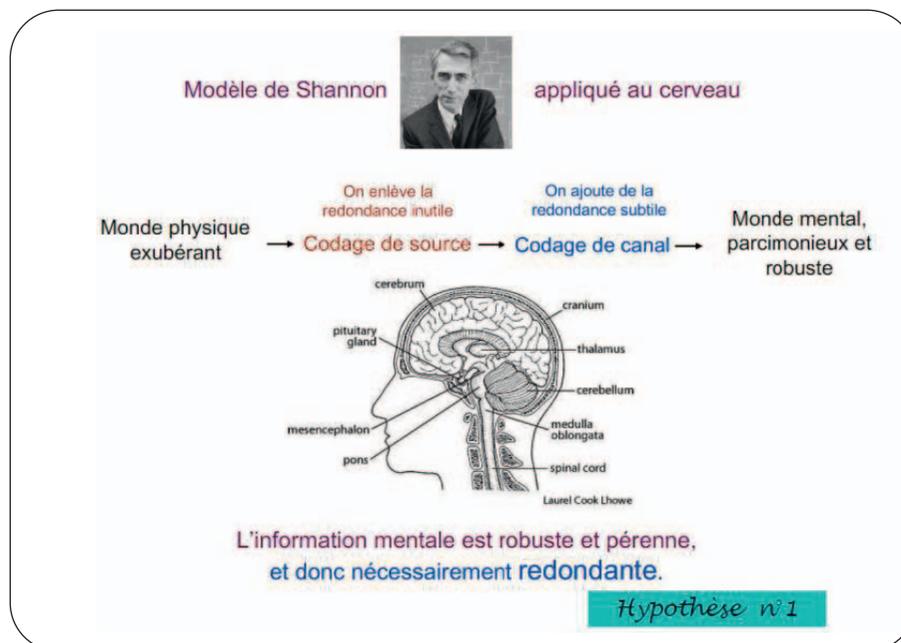
Je ne vais pas entrer dans les détails techniques. Il y a deux étapes fondamentales : quand on veut transmettre ou mémoriser de l'information, il faut commencer par enlever tout ce qui est inutile.

Vous avez tous entendu parler de normes JPEG, MP3, MPEG ou ZIP. Tous ces procédés sont des algorithmes de compression numérique. Cette compression numérique est appelée : codage de source. Cela consiste à enlever tout ce qui est inutile. Cela peut être subjectif. Cela peut dépendre du destinataire ou de la fonction à assurer.

Par exemple, la compression numérique en termes d'images fixes (JPEG) n'est pas tout à fait pareille à la compression de l'image animée (MPEG). Ce ne sont pas les mêmes algorithmes. Les effets en réception sont différents. Regarder une image fixe n'est pas pareil que de regarder une vidéo. Quand vous regardez une vidéo à 25 images par seconde, une image peut sauter, ce n'est pas très grave. En revanche, si une image fixe n'est plus là ...!

On travaille actuellement pour comprendre les mécanismes de ces compressions numériques effectuées par le cerveau.

La mémoire cérébrale sous l'éclairage de la théorie de l'information



Par exemple, juste pour le système visuel : vous êtes en train de me regarder. Cela représente probablement plusieurs millions de bits que vous avez sous les yeux entre moi et l'écran. On peut y ajouter l'ambiance, la température.

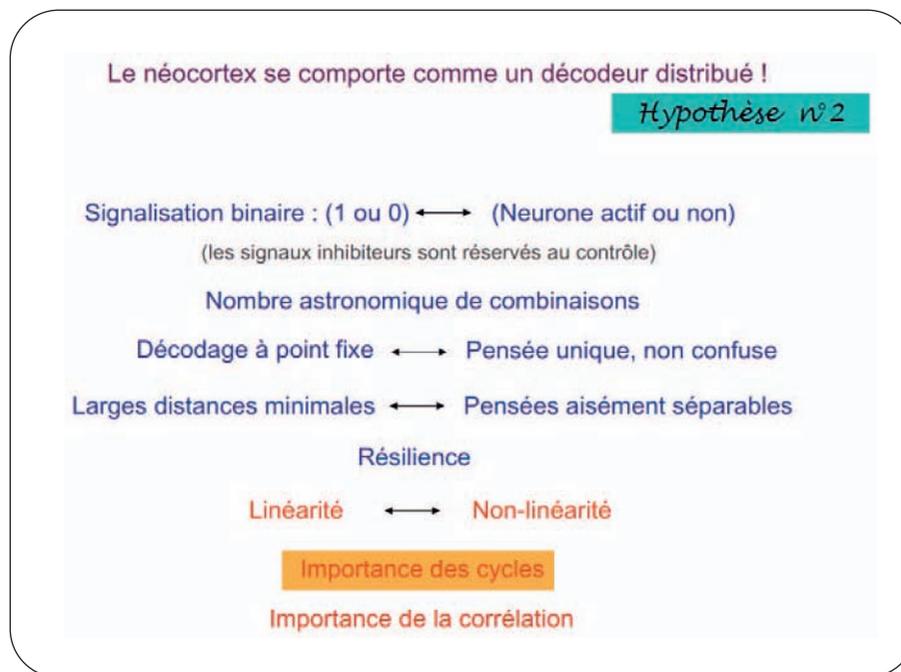
Si, demain, je vous demande, de décrire ces 3 secondes, combien de lignes écririez-vous ? A peine une page. Vous ne pourrez pas retrouver plus d'informations qu'une page de quelques milliers de bits.

Ainsi, les taux de compression numérique du cerveau sont considérables. Ils se comptent en millions. C'est vrai pour l'image fixe, animée, le son, le toucher. Il y a une forte analogie avec cette étape de compression numérique ou de codage de source formalisée par SHANNON.

Pour le cerveau, ce travail de nettoyage est évidemment une opération obligatoire. Les ressources ne sont pas infinies, le flux sanguin n'est pas illimité dans le cerveau et celui-ci ne dispose que d'une vingtaine de watts pour faire son travail à un instant donné. Les ressources en matériel énergétique n'y sont pas extensibles. Il est nécessaire pour lui de réduire au maximum ce qu'il doit engranger s'il a décidé de l'engranger.

Mais ce qu'il veut emmagasiner, il doit le protéger au maximum. Je reviens à mon $9 \times 8 = 72$. Si le cerveau a décidé de mémoriser quelque chose, c'est qu'il l'a jugé important et il doit pouvoir le trouver sans faillir, à tout moment.

La mémoire cérébrale sous l'éclairage de la théorie de l'information



- Deuxième hypothèse : Le néocortex est un décodeur distribué

En télécommunications, on appelle cela le codage correcteur d'erreurs ou plus savamment le codage de canal. Nous avons beaucoup travaillé ces dernières années sur cette deuxième étape, vue du côté du cerveau. Nous avons obtenu des résultats qui ont convaincu l'Europe de nous aider et d'autres aussi.

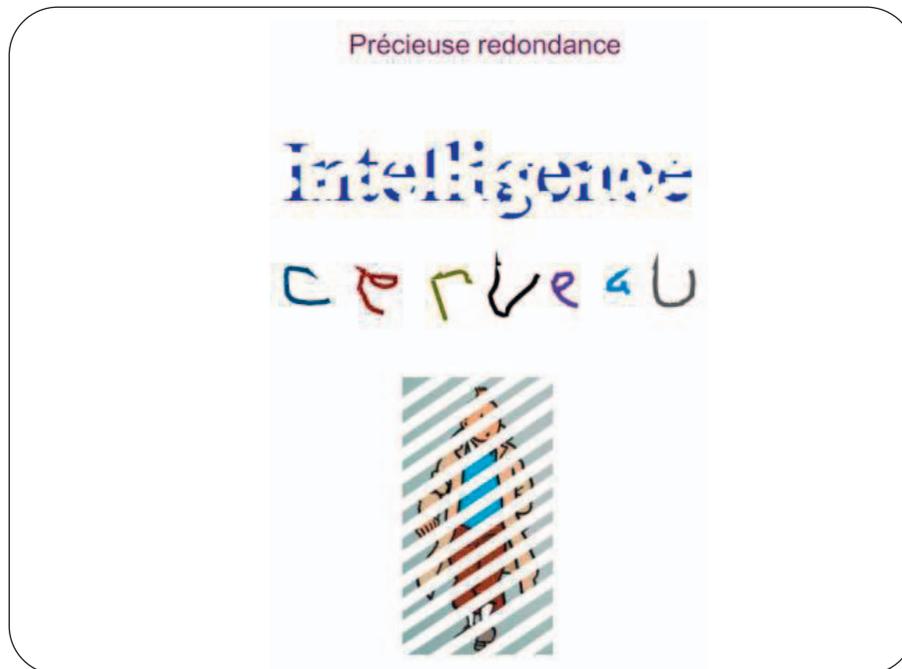
Je considère cette deuxième étape bouclée. Dans les années à venir, il faut vraiment investir sur la compression numérique, à savoir le travail que fait le cerveau pour passer du monde exubérant et flottant vers l'information qu'il juge nécessaire de conserver.

On ne va pas partir de zéro. En sciences de l'information, cela s'appelle *machine learning*, ou l'apprentissage en bon français.

Ce codage correcteur d'erreurs mis en oeuvre dans les télécommunications s'appuie sur la notion de redondance. Sans redondance, toute information peut être perdue. Si je vous lance une lettre de l'alphabet dans une ambiance bruyante, si elle n'est accompagnée d'aucune autre information qui vient la confirmer, le contenu pourra être perdu.

Il faut accompagner le message d'origine d'un message complémentaire. Sans redondance, vous n'auriez certainement pas pu décrypter le premier mot à moitié effacé. Des travaux récents montrent qu'on peut effacer 97 % d'un mot et pourtant le reconnaître.

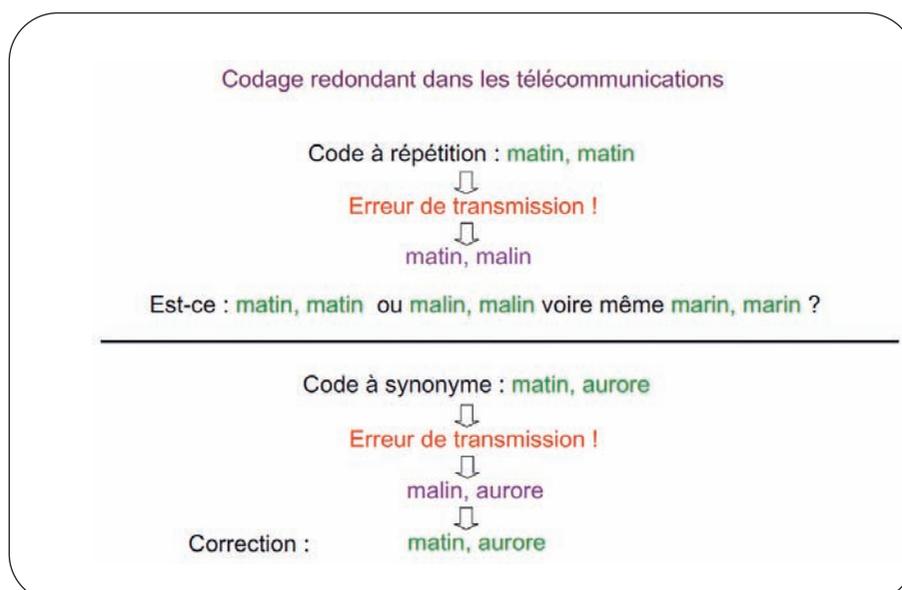
La mémoire cérébrale sous l'éclairage de la théorie de l'information



Vous n'auriez pas pu, sans redondance, décrypter le mot « cerveau » écrit à la façon d'un enfant de 5 ans. C'est ici une correction d'approximation. Vous n'auriez pas pu non plus reconnaître Tintin à moitié effacé. C'est bien parce qu'on a de la redondance qu'on peut retrouver l'information initiale en en supprimant une partie. On reçoit quelque chose, c'est à moitié effacé ou déformé, pourtant on retrouve l'information.

En utilisant le principe des mots croisés, c'est encore mieux !

J'ai été le premier avec mon collègue, Alain GLAVIEUX à Brest, à proposer les turbocodes qui sont capables d'atteindre la limite théorique calculée par Claude SHANNON en 1948. Ce sont aujourd'hui les codes correcteurs d'erreurs de la 3G et de la 4G.



La mémoire cérébrale sous l'éclairage de la théorie de l'information

Vous connaissez le Sudoku. Que faites-vous quand vous complétez une grille de Sudoku ? Vous faites du décodage correcteur d'erreurs ou plus précisément du décodage correcteur d'effacement. Nous avons ici affaire à de la redondance implicite.

Vous avez une grille à retrouver et vous n'en avez que quelques éléments. Quel travail allez-vous faire ? Vous allez décoder des lois locales. Au total, il y en a 27.

Un autre exemple de code distribué (redondance implicite) :

le sudoku

	3			1		7	
6			8				2
		1		4		5	
	7			2		4	
2				9			6
	4		3				1
		5		3		4	
1				6			5
	2		1				3

27 lois de codage local

Environ 10^{22} combinaisons possibles

Concept de **mémoire associative**

Pourquoi 27 ? Une première loi locale dit que tous les chiffres de 1 à 9 doivent apparaître sur la ligne en haut, une fois et une seule. La deuxième loi indique qu'il en est de même sur la deuxième ligne. De même, sur la première colonne, tous les chiffres de 1 à 9 doivent apparaître une fois et une seule. Cela en fait déjà 18. Puis, vous devez satisfaire neuf autres lois correspondant à 9 carrés de la grille. Dans chacun de ces carrés de 3 X 3, la même règle doit être appliquée. Il y en a donc 27.

Pourtant, vous allez retrouver cette grille même si vous n'avez que des informations partielles. La grille est donc redondante. On a enlevé de l'information et pourtant, vous pourrez la restituer complètement. Vous vous appuyez sur du codage correcteur d'erreur ou plutôt

d'effacement pour le cas présent.

Nous pourrions aussi faire des sudokus avec des informations initiales erronées. Vous avez quelques chiffres et l'on vous dit que parmi ces chiffres, trois sont faux. C'est possible pour certains sudokus.

Mais là, vous vous appuyez sur du codage distribué. Ce n'est pas une loi de codage unique qui s'applique à la grille, c'est 27.

La puissance de ce procédé n'est pas qu'il y ait 27 petites lois locales, mais qu'il y ait 27 petites lois locales liées entre elles. Le 3 en haut à gauche doit satisfaire trois relations de codage, trois contraintes : sur la ligne, sur la colonne et dans le carré. Les 27 décodeurs

La mémoire cérébrale sous l'éclairage de la théorie de l'information

locaux qui ont traité les 27 contraintes locales vont devoir communiquer.

Tout cela commence à faire penser au cortex humain. En termes d'information mentale, il fait un travail de mémoire associative. Une mémoire associative est une mémoire qui permet de retrouver tout un contenu à partir d'une information partielle. C'est bien le problème du sudoku. Quand vous jouez au sudoku, vous faites un travail qui n'est pas très éloigné de celui du cortex humain, toujours en termes d'information.

La mémoire associative est à opposer à la mémoire indexée qui est la mémoire active de nos ordinateurs : vous donnez une adresse à un facteur et celui-ci va délivrer l'enveloppe là où il faut. C'est ce que l'on appelle une mémoire indexée.

La mémoire associative ne fonctionne pas du tout de la même manière et c'est d'ailleurs la mémoire cérébrale, corticale qui sera capable, avec un petit morceau d'information, de compléter par des lois de codage qu'il nous faut trouver et comprendre.

La deuxième hypothèse est que le cortex semble fonctionner comme un décodeur. Lorsque vous envoyez via votre téléphone un SMS de 30 caractères, les possibilités de SMS que vous pouvez envoyer sont énormes. Si vous avez droit à 64 caractères, c'est 64 à la puissance 30. C'est plus grand que le nombre d'atomes dans l'univers visible.

Pourtant, votre décodeur va devoir restituer le message que vous avez envoyé, même s'il y a eu des erreurs, même si des 0 se sont transformés en 1, des 1 en 0, un seul message possible parmi 6430, une seule solution parmi

un nombre astronomique.

Notre cerveau fait bien ce travail aussi : parmi des dizaines de milliards, une seule pensée à un instant donné, de façon unique et non superposable. Si je vous demande de chanter la Marseillaise, vous saurez le faire. Si je vous demande de chanter God save the Queen, vous sauriez probablement le faire aussi. Mais si je vous demande de chanter la Marseillaise et *God save the Queen* en même temps, en superposant les deux hymnes, vous n'y arriverez jamais. Le code mental est unique et non superposable.

C'est exactement la façon dont le décodeur fonctionne.

- Troisième hypothèse : le néocortex est un graphe récurrent

Ma troisième hypothèse rejoint certains éléments des exposés précédents. Il faut faire appel à la théorie de l'évolution. La vie est apparue sur Terre il y a trois milliards d'années. À un certain moment, il y a un milliard d'années, une cellule très particulière est arrivée dans les organismes, une cellule qui avait des entrées et une sortie. Elle a constitué un tournant essentiel dans l'évolution de la vie car ces cellules ont été capables de répercuter d'une cellule sensorielle vers une cellule motrice un danger ou une action à entreprendre. Les neurones ont été capables dans des circuits unidirectionnels de transmettre des informations du monde extérieur vers les organes moteurs. Cela a donné lieu au cerveau reptilien (fonctions basiques du corps), puis au cerveau limbique (les émotions et certaines fonctions de physiologie essentielles).

La mémoire cérébrale sous l'éclairage de la théorie de l'information

Puis, le néocortex, cette dernière couche dans l'évolution du système nerveux, est apparu d'une façon complètement inattendue. Les dinosaures avaient déjà un cortex, en remontant à plusieurs centaines de millions d'années. C'est probablement du côté du milliard d'années que l'on trouvera l'apparition de cette troisième couche dans le cerveau des animaux : reptilien, limbique, puis des neurones en très grand nombre et de manière désordonnée sont apparus à la surface de l'encéphale. C'est notre cortex ou le cortex de certains animaux car tous les animaux n'en ont pas.

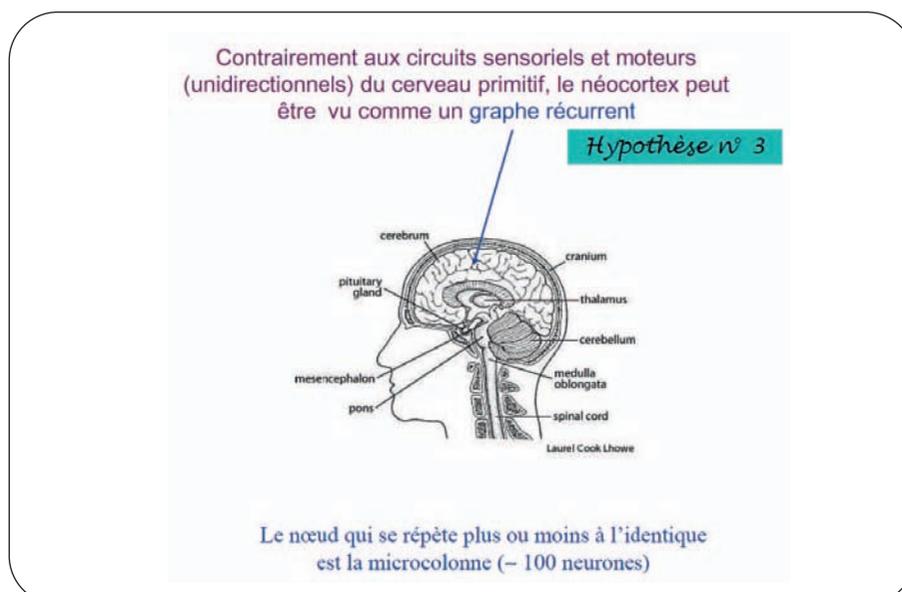
A la naissance, le cortex de l'être humain n'est pas figé, mais à peu près tout le matériel est en place. Les neurones sont là. Ceux nécessaires au développement de l'intelligence sont en place à 80, 90 %. Mais il manque la communication entre ces neurones. Et quand on naît, c'est le vrai bazar, c'est l'anarchie complète dans la communication.

C'est une preuve assez évidente que le cortex est apparu dans l'évolution d'une manière assez aléatoire. La vie n'en avait pas vraiment

besoin, le reptilien et le limbique nous permettaient de survivre. Mais ces neurones n'étaient pas non plus létaux et la vie en a merveilleusement profité pour y inscrire ces informations pertinentes et développer des fonctions de cognition supérieure. C'est ce qui a fait toute la différence dans l'évolution. Ce cortex qui n'était pas nécessaire est devenu la clé de notre humanité.

Vous me direz que c'est un joli discours, que je ne suis pas capable de le prouver. En tout cas, cela me donne la possibilité d'assimiler le cortex à un graphe, et particulièrement le cortex humain. En mathématiques, il y a une sous-discipline appelée la théorie des graphes qui a produit énormément de résultats. Si j'assimile le cortex humain à un graphe récurrent qui comprend beaucoup de cycles, où l'on peut aller d'un point A à un point B en passant par de nombreux chemins et réciproquement, cela va me permettre d'utiliser les outils de la théorie des graphes.

Telles sont les trois hypothèses que nous utilisons en permanence dans notre laboratoire.



La mémoire cérébrale sous l'éclairage de la théorie de l'information

Avec le modèle de graphe que je vais considérer pour développer les circuits de la mémoire cérébrale et pour les implémenter sur des machines informatiques et électroniques dans trois ans, la première machine ne sera pas très intelligente, mais fonctionnera à la manière du cortex, au moins pour ce qui concerne l'information. Il faudra probablement cinq à six ans pour maîtriser la propagation de l'activité dans le réseau.

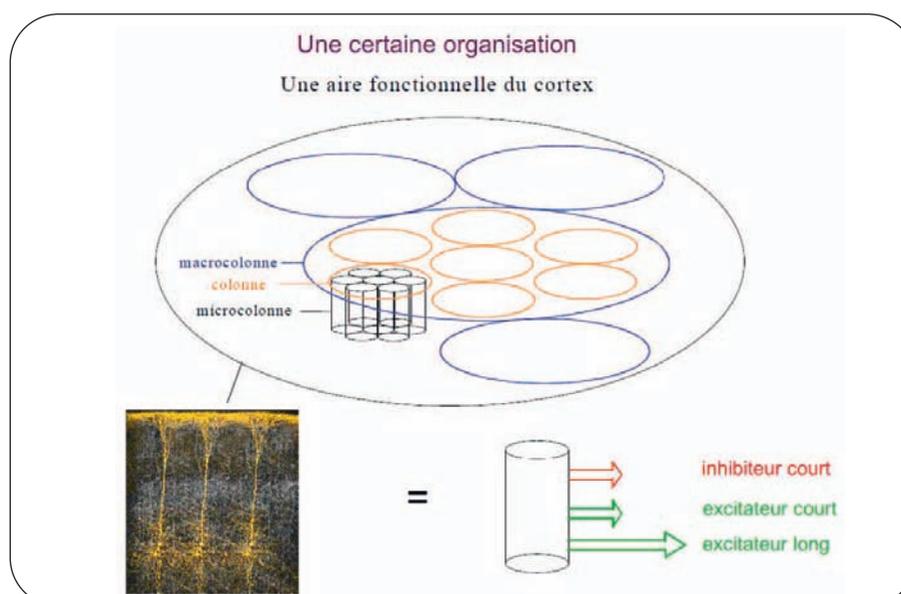
Le noeud dans le graphe n'est pas le neurone. Il y a trop de types de neurones dans le cerveau pour en faire un élément reproductible. Si l'on veut considérer la notion de graphe (de réseau), il faut trouver un noeud qui se répète à l'identique. Autrement ce n'est plus un graphe homogène, ce n'est plus un réseau. Or, il existe plusieurs dizaines, voire plusieurs centaines de types de neurones dans le cerveau.

En revanche, on peut considérer comme noeud reproductible dans le graphe cortical ce que les neuroanatomistes appellent la micro colonne.

Qu'est-ce qu'une micro colonne dans le cerveau ? C'est une centaine de neurones très hétérogènes. Sur 6 mm d'épaisseur de la matière grise, on retrouve des motifs à peu près reproductibles. Ce n'est pas tout à fait exact car cela change d'une région à l'autre du cortex. Mais on peut considérer que le noeud est cette micro colonne capable d'envoyer des signaux excitateurs, qui déclenchent l'activité d'autres neurones à courte distance et à longue distance et également capables d'inhiber, de faire taire des neurones concurrents à courte distance.

C'est le modèle informationnel qui nous permet de progresser.

Avec toutes les hypothèses que je viens d'énoncer, quel est le code mental ? Que trouve-t-on dans le cortex ? Des neurones et bien sûr des cellules gliales qui exécutent le travail d'intendance. Mais ce qui supporte l'information mentale et son exploitation, c'est bien le neurone. Il y a des connexions entre ces neurones. Je les ai regroupées par micro colonne, par groupes homogènes et c'est tout.



La mémoire cérébrale sous l'éclairage de la théorie de l'information

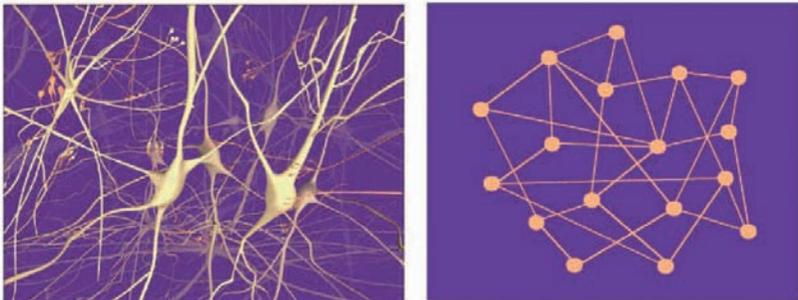
Comment un tel matériel peut-il raisonner ? Quelle est l'information que ce matériel exploite pour élaborer, imaginer, écrire un article, faire une présentation ? Il faut trouver le code et il doit satisfaire ces propriétés, il doit être redondant.

$9 \times x = 72$. x est 8. Vous avez utilisé la propriété redondante de votre code mental.

Il doit être robuste, il doit être distribué, propriété physique première du cortex. Le traitement se fait sur toute la surface du cortex à tout instant. Le nombre de neurones qui s'activent à un instant donné est entre 1 et 10 %.

Il doit être graphique (pas d'autres matériels que ces neurones) et aussi économe, parcimonieux, 20 watts au maximum au plus gros de la tâche.

Quel est le code mental ?



- Un code
- redondant (robuste)
- distribué (par construction)
- graphique (pas d'autre *matériel* que les neurones)
- économe (20 watts pour tout le cerveau)

Le problème est donc un graphe avec 1 milliard de micro colonnes ; ce qui correspond à 100 milliards de neurones. Ces micro colonnes sont connectées à 100 000 autres en moyenne, sachant qu'il y a 100 neurones par micro colonne.

La réponse a déjà été donnée par plusieurs personnes et en particulier par un Français, Jean-Pierre Changeux, qui explique dans son livre *L'homme neuronal* de 1983 que l'information est peut-être portée par l'activité

concomitante d'une population limitée de neurones. On ne sait pas encore combien. Pour nous, c'est quelques centaines à quelques milliers de micro colonnes.

Nous développons une théorie mathématique autour de ce concept. Nous sommes en train de préparer les circuits et les programmes qui vont l'accompagner, et transcrire tout cela en dynamique : une population de neurones est figée. Mais de population à population, on peut envisager

La mémoire cérébrale sous l'éclairage de la théorie de l'information

une propagation d'activité pour matérialiser des séquences : quelques numéros de téléphone ou autre chose, nous l'avons pratiquement terminé.

Si vous voulez en savoir plus, je vous suggère de lire ce livre *Petite mathématique du cerveau* coécrit avec Vincent Gripon, paru aux éditions Odile Jacob.

Il ne faut pas en avoir peur, mais j'espère que vous avez compris ce discours. Nous essayons de le prouver, pas simplement par des simulations informatiques, mais aussi par des collaborations avec des chercheurs de l'INSERM qui essaient de mettre en évidence ces populations de noeuds dans le graphe. Il est probable que notre information mentale soit numérique. Ce qui simplifie considérablement le problème. Du côté du numérique, on a déjà fait énormément de travail. Vous n'imaginez pas tout le travail qui a dû être mené pour arriver à un smartphone. Il contient pratiquement toute l'intelligence des sciences de l'information.

Tout ce qui a été fait pour les télécommunications pourra maintenant être appliqué au cerveau, en supposant toujours bien sûr que le modèle soit numérique.

Je vous remercie.



Dr Jean Pierre DECOR

Avant d'aborder la discussion je tiens à remercier, au nom de vous tous, nos quatre conférenciers pour leurs brillants exposés. Quel chemin parcouru depuis l'émergence de la pensée conceptuelle jusqu'au projet de mise en oeuvre d'une pensée extérieure au cerveau !

Cher Claude BERROU, au cours d'une discussion précédente, vous m'avez indiqué qu'en 2040, nous serons capables de créer une machine, qui à partir de l'ensemble des informations disponibles, sera capable de proposer des solutions innovantes. C'est la définition même de l'intelligence : résoudre un problème dont la solution n'était pas connue auparavant.

Sur un ordinateur, à partir de mots-clés vous obtenez des informations mais pas de résolution de problème.

Cette machine aura toute la connaissance encyclopédique que nous ne pouvons pas avoir dans notre tête. Elle proposera des

solutions supérieures et elle pourra, par exemple, avoir un impact sur la gouvernance car elle apportera peut-être des solutions à la crise des *subprimes* auxquelles nos plus grands économistes n'auront pas pensé.

Pr Claude BERROU.- Cette machine électronique fonctionnera à une vitesse au moins un million de fois supérieure à celle de notre cerveau dont la fréquence de travail est de 100 hertz. Là, on pourra aller jusqu'à 100 mégahertz.

Par ailleurs, le circuit n'est pas limité à quelques décimètres cubes, il pourra être grand comme une salle.

Imaginez une machine connexionniste s'appuyant sur des principes de traitement de l'information similaires à ceux du cerveau, qui soit 100 fois plus vaste, capable de stocker. J'ai oublié de le dire, le modèle numérique arrive à une loi quadratique de mémorisation.

Avec une capacité de stockage 10 000 fois supérieure, travaillant un million de fois plus vite, capable de se connecter à Internet, à toutes les bases de données, à tous les

dictionnaires, imaginez la puissance de traitement de l'information mentale que cela offrira.

Quand le verrons-nous ? Nous avons déjà atteint le million de fois plus vite. Nous atteindrons le 10 000 fois plus vite dans cinq ans. Reste à valider nos modèles.

M. Claude DELCAYRE.- Je suis directeur de recherche au CNRS dans une unité de l'INSERM qui s'intéresse à la puissance cardiaque. Nous utilisons des animaux pour tenter de décrypter les mécanismes. Nous connaissons les fonctions basiques de la cellule.

Pour passer à l'étape supérieure, vous proposez un modèle. J'en suis ravi. J'avais lu le livre de Jean-Pierre Changeux et j'avais été très déçu parce que je n'avais pas trouvé l'information.

Comment allez-vous tester votre modèle ? Quand on soumet un papier en proposant des explications, on se fait parfois rejeter parce que c'est descriptif mais non mécanistique.

Comment pourrez-vous tester le modèle que vous proposez sur des modèles humains ou animaux supérieurs ?

Deuxièmement, comment allez-vous pouvoir introduire la notion de correction d'erreurs ? Notre cerveau permet de corriger ses erreurs et de s'auto-réparer.

Pr Claude BERROU.- Lorsqu'un journaliste me pose la question "*Quand considérerez-vous que votre machine est un succès ?*", je lui réponds : "*Lorsqu'on lui demandera d'apprendre quelque chose et qu'elle répondra que cela ne l'intéresse pas,*

lorsqu'elle sera capable d'un jugement par rapport à l'information."

M. Claude DELCAYRE.- Quand sera-t-elle capable de créer un *hub* ?

Pr Claude BERROU.- Vous avez bien compris que notre travail est purement informationnel. Nous évacuons toute liaison pour le moment avec la chimie et la physiologie, les fonctions vitales et l'amygdale. Cette machine ne restera qu'une machine électronique conçue d'une manière complètement différente.

Je ne pense pas qu'elle pourra aider pour le cœur, peut-être, en revanche, pour des dysfonctionnements psychiatriques. Cela ne sera pas notre travail, je suis plutôt concerné par l'intelligence artificielle et la perspective d'auxiliaires intellectuels. Je cherche à proposer et à concevoir des auxiliaires intellectuels.

Par exemple, la schizophrénie est principalement une affaire d'information mentale et de contrôle sur cette information. C'est essentiellement cortical. On peut aussi considérer des défauts durs comme Alzheimer avec des pannes de circuit. Dans ces domaines, nous pourrions aider. Nous sommes vraiment au niveau de l'information, donc du cortex. Le système nerveux n'est pas que cela.

Pour toutes les fonctions vitales, cœur, ventilation, etc..., je ne m'engage pas.

Dr Jean-Pierre DECOR.- J'ai tenu à vous présenter cet aspect de la recherche sur le cerveau. Il est très différent du projet *Human Brain Project* qui consiste à accumuler les connaissances et à s'aider d'ordinateurs avec des puissances de calcul extraordinaires pour mimer le cerveau dans tous ses aspects.

Dans le projet de l'équipe de Claude BERROU, il s'agit d'intelligence artificielle. En la matière, il me semble que nous sommes plus près d'avoir un résultat qu'au niveau du *Human Brain Project*. Le fonctionnement d'une micro colonne fait appel à des consommations énergétiques qui n'ont rien à voir avec un ordinateur mimant un cerveau, il faudra des capacités énergétiques énormes.

Pr Claude BERROU.- Il y a trois ans, ce n'était pas le HBP, mais le Blue Brain et ils étaient capables de simuler 1 000 micro colonnes avec le plus gros ordinateur qu'IBM possédait, c'est-à-dire un millionième de la ressource corticale. C'était il y a trois ans.

Je partage l'avis de M. DECOR, je ne vois pas comment on peut arriver à modéliser le cerveau au niveau de la molécule en moins d'un siècle.

M. Claude DELCAYRE.- Je me suis mal fait comprendre. Je suis tout à fait convaincu par un nouveau paradigme.

J'ai regardé le projet *Brain*. Le projet Physiome était du même style. La modélisation est une chose, mais ce n'est pas en accumulant le nombre de connexions que l'on va y arriver, au contraire. L'intelligence artificielle demande de passer à un niveau différent, supérieur.

Je suis donc ravi que vous fassiez vos propositions. Mais je me demandais comment vous pourriez les relier au fonctionnement d'un cerveau normal.

Dr Angela SIRIGU.- Je suis d'accord avec Monsieur DELCAYRE, à un moment, du modèle computationnel on sera confronté à la faisabilité biologique. C'est important, beaucoup de gens qui font de la science computationnelle vont créer le modèle

neuronal plausible qui sera la plupart du temps confronté à ce qui se passe dans l'activité neuronale présente chez le singe. Si l'on veut faire le saut entre la machine et l'homme, il faut bien que le modèle soit plausible.

Vous avez énoncé le concept de redondance de manière compréhensible, mais vous avez fait croire que dans le cerveau, il y avait de la redondance inutile, je ne suis pas d'accord sur ce point. Vous avez expliqué que l'on pouvait effacer beaucoup d'informations dans un stimulus et que l'on continuait à reconnaître l'information. C'est vrai, car le cerveau complète tout le temps même lorsque l'information manque. Mais certaines informations sont cruciales et si on les enlève, on ne reconnaît plus rien.

Par exemple, les muscles sont représentés dans différentes parties de notre cerveau. Quand vous faites un mouvement, plusieurs régions du cerveau s'activent. Ce mouvement est codé par plusieurs étages : vous avez le cortex pariétal, le cervelet, le cortex moteur, le cortex pré-moteur.

Plusieurs régions codent les mouvements. C'est une redondance, mais toutes ces régions font des choses différentes.

Pr Claude BERROU.- Vous allez dans mon sens. J'associe la redondance dont vous parlez à ce que SHANNON présentait comme le codage correcteur d'erreurs. C'est bien cette redondance qui va permettre au cerveau de se sortir de situations épouvantables.

M. Bernard BODO.- Monsieur de LUMLEY nous a expliqué la saga d'un primate très particulier que nous connaissons bien. Existe-t-il actuellement des espèces qui seraient susceptibles d'avoir une évolution similaire à

celle de notre espèce ? Je pense en particulier aux poulpes ou peut-être à d'autres animaux. Pourrait-il y avoir d'autres espèces qui suivraient la même évolution ?

Pr Henry de LUMLEY.- Pour l'instant, on ne connaît pas d'espèces qui ont un cerveau aussi puissant, avec autant de neurones que celui de l'Homme. L'évolution du cerveau humain a été quand même quelque chose d'un peu exceptionnel avec une évolution très rapide.

Le poulpe ou les autres invertébrés ont été stables pendant des centaines de millions d'années alors que le cerveau humain a évolué quand même rapidement. Cette évolution a été assez proportionnelle au temps, mais, avec l'évolution culturelle, elle est allée en s'accéléralant.

Il est intéressant de constater que *Toumai* qui marche debout a le même cerveau que les Chimpanzés 350 cm³. Les premiers primates bipèdes atteignent 450 cm³. Quand ils sont à 550 cm³, cela doit correspondre à une augmentation du nombre de neurones. On ne peut pas le savoir, mais on peut le déduire.

Ils inventent l'outil. Quand ils sont à 800 cm³, ils acquièrent la notion d'esthétique, de symétrie. Quand ils ont 1 100 cm³, ils domestiquent le feu. Quand ils ont 1 400 cm³, mais avec des lobes frontaux peu développés, c'est la naissance de la métaphysique. Avec 1 400 cm³ et des lobes frontaux plus développés, c'est l'invention de la musique, de l'art, ensuite il n'y a pas de changement avec le premier peuple agriculteur et pasteur.

On a actuellement beaucoup de moulages endocrâniens de cerveaux humains. On a trouvé beaucoup de crânes, mais il y en a

seulement 150 pour les hommes antérieurs à l'homme moderne.

Il serait intéressant d'étudier la relation entre la surface développée du cerveau. Malheureusement on ne peut pas aller plus loin, pour faire ce type de parallélisme, nous n'avons accès qu'à une vision atténuée de la surface du cortex cérébral. Il est certain que le cerveau de l'Homme est la machine la plus complexe.

Jérôme GERVAIS.- L'intelligence est-elle proportionnelle au volume du cerveau ? Des espèces ont peut-être des cerveaux plus importants que les nôtres.

Par les biotechnologies, peut-on développer des cerveaux plus complexes, plus performants de façon à améliorer l'Homme ?

Pr Henry de LUMLEY.- Sur la première question, on peut dire que, chez les hominidés, plus le cerveau a été volumineux, en volume et en organisation, plus la cognition a été développée.

Pr Pierre-Marie LLEDO.- Pour compléter la réponse à la première partie de la question, de tout temps, même aujourd'hui, on essaie aussi d'établir cette relation structure/fonction et d'essayer de comprendre pourquoi certains humains auraient un QI supérieur à 130 et d'autres inférieurs à 130 en ayant cherché le substrat anatomique.

Je fais référence aux travaux qui sont, tous les six mois, publiés sur le cerveau d'EINSTEIN. On a l'impression de trouver la clé. En plus, le problème est une relation de causalité. Avait-il la bosse des maths et c'est ce qui lui a donné ce potentiel plus qu'à d'autres d'élaborer des théories ou l'inverse ? Est-ce que c'est parce

qu'il avait une grande activité mentale qu'il a créé sa bosse des maths ? C'est le gros problème d'établir des relations de causalité en biologie.

Pour les acquis nouveaux dans les fonctions cognitives, les lobes frontaux sont extrêmement importants. On se rend compte aussi que, par le corps calleux, cette espèce d'autoroute qui met les deux hémisphères au travail ensemble, on a aussi la clé d'une évolution et certainement de l'évolution à venir.

Quand je vous ai parlé de plasticité cérébrale, on s'est focalisé sur les neurones. Il ne faut pas oublier cette gaine qui va entourer les fibres et qui va permettre une meilleure conduction de l'influx nerveux, peut-être éviter les phénomènes de redondance, en tout cas augmenter leur robustesse et d'autres phénomènes. On a un point sur lequel l'évolution va pouvoir travailler. C'est indéniable. Cela a été négligé pendant des années dans les travaux de recherche. C'est un point d'entrée très important sur l'évolution.

Maintenant, le futur de l'humanité, par rapport à la biotechnologie, il y a des champs importants comme celui de transformer la pensée en action. On connaît la pierre de Rosette. On peut maintenant avec des traitements mathématiques avoir cette vision numérique pour décrypter l'information électrique et pouvoir la transformer en une commande motrice. Est-ce que c'est le destin de l'humanité ?

Il y a plein d'autres points sur lesquels on peut travailler, notamment ce potentiel qu'on a tous de produire de la plasticité. On voit arriver des médicaments qui sont aujourd'hui déroutés de leur cible. Ce sont les fameux « *smart drugs* », les médicaments qui rendent intelligent. Des

médicaments font que votre performance mnésique peut être déçue.

Cependant, on oublie la question : qu'est-ce que l'humanité ? On a parlé de machine, de cerveau. EPICURE disait : « *la psyché, c'est le cri du corps* ». Le cerveau n'est pas juste un organe qui flotte. Il est aussi à l'interface avec un corps.

Quand on parle d'émotion, les marqueurs somatiques s'expriment tout le long du corps. Ce n'est pas que dans le cerveau. A la limite, c'est parce que je pleure que je suis triste et non pas l'inverse.

L'interface cerveau/corps est intéressante. S'il y a un point d'entrée pour le futur de l'humanité, c'est de travailler sur cette interface. C'est notre boulet français, l'influence de DESCARTES qui séparait le corps et l'esprit, mais il est temps de rejoindre un peu les deux dimensions. Je suis sûr qu'Angela SIRIGU ne me contredira pas avec les travaux qu'elle a fait sur cette dimension.

Il y a certainement tout un travail à faire dans ce domaine : mettre le cerveau à l'interface avec le corps, voire ensuite avec les machines où l'on voit le cerveau capable de s'approprier des organes qui peuvent être extracorporels. On voit cette puissance qu'est le cerveau d'accepter ces tâches nouvelles pour lui à condition qu'il soit baigné par l'alchimie du bien-être.

Dr Angela SIRIGU.- Il m'a semblé comprendre que vous vouliez savoir s'il y a des méthodes pour augmenter la performance.

Des articles ont été publiés récemment sur l'utilisation de la stimulation magnétique transcrânienne. On stimule avec une bobine

qu'on met sous le scalpe. On envoie un champ magnétique qui émet un courant électrique, ce qui peut exciter ou inhiber les neurones suivant la fréquence de stimulation.

Des recherches montrent qu'on peut inhiber certaines fonctions. On peut exciter encore plus le système moteur, l'activité musculaire. Avec cette méthode, on peut aussi augmenter la mémoire.

Dans le cas de la schizophrénie, cette méthode a été utilisée pour inhiber le cortex temporal qui est très activé lorsque les personnes ont des hallucinations. Lorsqu'on utilise cette méthode à des basses fréquences, on inhibe cette partie du cerveau et on élimine les hallucinations auditives.

Dr. Pierre-Marie LLEDO.- Il faut garder à l'esprit, quand je posais la question "*qu'est-ce que l'humanité*", que l'oubli est aussi un facteur de survie. Si notre mémoire était si bonne et vivace par rapport à la douleur, les femmes n'auraient qu'un enfant et pas deux et nous n'irions tous qu'une fois chez le dentiste sans aucune envie d'y retourner ! L'amnésie à la douleur est un facteur de survie et d'adaptation.

Cela interroge sur qu'est-ce que l'humanité, qu'est-ce que l'humain et que veut-on faire de l'humain ? Les transhumanistes nous disent qu'il y a le point de singularité, que c'est par là qu'il faut aller et d'autres humanistes que nous représentons plus ou moins autour de cette table disent qu'il y a des seuils, des valeurs qu'il faut respecter. En tout cas, cela pose des questions éthiques.

M. NAHON.- Une remarque et une boutade.

La remarque, suite au propos d'Henry de LUMLEY, concerne la rapidité d'évolution du

cerveau, 400 000 générations, soit rien du tout dans l'évolution darwinienne.

Cela veut dire que quand on invente le feu, le simple fait de manger en convivialité doit considérablement développer l'intelligence. Le schéma d'Escher que vous avez repris est très symbolique en cela, il y a des feedbacks constants entre ce que le cerveau invente et l'invention vers le cerveau. On ne sait pas dans deux, trois siècles, ou un millier d'années quelle sera l'intelligence de l'homme. C'est la raison pour laquelle il nous semble très important, pour nous scientifiques, de développer aussi l'éthique de responsabilité pour les chercheurs.

Enfin, la boutade : si vous avez trouvé des médicaments qui rendent intelligent, j'entrevois là une industrie florissante. Il serait bon de le faire savoir et de commencer à en distribuer largement à ceux qui nous gouvernent !

(Rires dans la salle)

Pr Françoise FORETTE.- Monsieur LLEDO, vous nous avez bien montré que la neurogénèse se construit et continue tout au long de la vie.

Mais que faites-vous du vieillissement des fonctions cognitives ? Si l'on vous croit, toutes stimulations qui représentent la vie devraient augmenter cette neurogénèse jusqu'au bout.

Pour vous, est-ce simplement la pathologie qui peut survenir et qui malheureusement survient souvent qui fait que l'on n'a pas toujours cette progression jusqu'au bout de la vie ? Même chez le sujet normal, on voit les temps de réaction diminuer, les réponses aux stimuli multiples diminuer, alors que les capacités de réflexion augmentent. On voit quand même des différences.

Comment les interprétez-vous à la lumière de cette neurogénèse qui continue ?

Dr Pierre-Marie LLEDO.- La neurogénèse qui continue est restreinte dans des territoires, elle ne se voit pas partout.

Mais par rapport à votre question du vieillissement, l'idée que l'on a pour l'hippocampe est qu'il existe un équilibre. C'est un système en équilibre instable. On a l'impression de très haut que le système est figé et quand on « zoome », l'on constate qu'il y a autant de constructions que de déconstructions.

La vieillesse avec déclin des capacités cognitives est une rupture de cet équilibre pseudo-dynamique. L'idée que nous avons développée au laboratoire est que les pathologies neurodégénératives sont une rupture de cette neurogénèse. Je ne reste pas que dans la sphère de la neurologie, mais je vais aussi dans la sphère de la psychiatrie, les désordres de santé mentale, l'anxiété et la dépression, comme étant aussi des troubles de la mal adaptation, l'individu ayant perdu ses capacités à s'adapter.

Par exemple parce qu'il n'y a plus assez d'arrivées de nouveaux neurones : une porte claque et vous vous souvenez de l'incident que vous avez vécu il y a 10 ans.

La rupture de cet équilibre dynamique fait que chacun peut avoir son point de rupture et que le déclin va se déclarer quand il y a cette rupture.

Certaines structures du cerveau échappent à la flèche du temps. Vous avez l'âge en fonction de ce que vous faites, de l'état mental dans lequel vous êtes, de ces cinq facteurs que j'ai

probablement balayés trop rapidement.

C'est un point important car c'est un enjeu sociétal énorme. M. DECOR a commencé par dire que les maladies neurodégénératives étaient aussi le résultat du vieillissement de la population. Peut-être, mais pas que cela. D'autres facteurs d'ordre sociétal font que les gens s'ennuient plus souvent, sont moins dans le désir, plutôt dans la satisfaction de ce désir. L'impact sociétal a une incidence et ce n'est pas pour rien que l'on voit ce décollage dans les années 50, 60 de l'incidence des maladies neurodégénératives avec le changement radical de la société. Les petites épiceries disparaissent au profit des supermarchés, la publicité, toutes ces choses font que l'on incite notre cerveau à marcher davantage en mode automatique.

Rappelez-vous Patrick Le Lay sur TF1 qui disait en 2004 : *"Mon boulot, c'est de vendre du cerveau disponible."* Il a déclenché la polémique, mais c'était rationnel, il préparait les gens à se mettre en cerveau automatique, prêts à absorber toute l'information. Cette "infobésité" est extrêmement délétère car nous marchons la plupart du temps en cerveau automatique.

Pr Françoise FORETTE.- L'observation de cerveaux avec des lésions de la maladie d'Alzheimer absolument massives et pourtant avec un fonctionnement tout à fait normal va en votre faveur. Nous l'observons de plus en plus grâce à des moyens qui le permettent et *post mortem*. Les facultés d'adaptation du cerveau humain sont absolument fabuleuses, mêmes en cas de lésions.

Madame SIRIGU, vous parliez d'une augmentation impressionnante de la prévalence de l'autisme. Est-ce dû au fait qu'il

est beaucoup mieux diagnostiqué ? Cela est vrai pour la maladie d'Alzheimer ? Il n'y a pas d'augmentation de la prévalence de la maladie d'Alzheimer, on la diagnostique beaucoup mieux et plus précocement. En est-il de même pour l'autisme ou y a-t-il un facteur qui conduit cette maladie à se développer beaucoup plus ?

Dr Angela SIRIGU.-

Je vais vous répondre par une anecdote.

Quand je suis arrivée à Paris, j'avais tenu une conférence dans les laboratoires d'Yves Agid et j'avais présenté le cas d'une patiente qui était classifiée comme Alzheimer, mais qui n'en avait pas tous les symptômes. Elle avait ce que l'on appelle aujourd'hui la dégénérescence corticobasale.

À cette époque, elle aurait pu être ajoutée à la population d'Alzheimer. Aujourd'hui, elle est ajoutée à la population de dégénérescence corticobasale. Nous avons une autre classification.

Nous savons que l'autisme touche surtout les hommes. Je pense que nous avons de meilleures étiquettes verbales pour définir l'autisme et nous le connaissons mieux. Les déficits sont mieux décrits et distingués. Je fais la distinction entre un syndrome d'Asperger et un syndrome autistique. Peut-être il y a cinq ans, les Asperger n'étaient-ils pas classés à part du syndrome autistique. Il y a un problème de terminologie.

Aujourd'hui même, il y a encore beaucoup de problèmes à diagnostiquer l'autisme. Il y a quelques semaines, est arrivé dans mon bureau un garçon de 16 ans. Sa mère voulait qu'il rentre dans le protocole sous l'ocytocine et

quand je l'ai vu arriver dans mon bureau, je me suis dit qu'il n'était pas autiste. Ce garçon avait une anoxie au niveau des régions préfrontales. Mais il est arrivé chez moi après avoir été vu par différents psychiatres qui avaient fait un diagnostic d'autisme.

Vous voyez la difficulté à définir tout type de pathologies et encore plus la maladie psychiatrique.

Pr Françoise FORETTE.- Il n'y a donc pas d'épidémie d'autisme.

Dr Angela SIRIGU.- L'autisme est seulement plus prononcé dans les sociétés occidentales. Mais on peut le comprendre avec notre style de vie très individualiste. On peut penser que dans les autres sociétés, le patient est bien intégré dans son groupe, dans sa famille. C'est un autre facteur qui peut l'expliquer.

Dr Roland MOREAU.- Mme SIRIGU nous a exposé les bases cérébrales de la sociabilité.

Existe-t-il aussi des travaux qui ont établi les bases cérébrales de l'angoisse métaphysique dont a parlé le professeur DE LUMLEY, ou de la pensée symbolique ou des bases de la religion ou de la pensée magique ?

Dr Angela SIRIGU.- Oui. Je commence par la religion. On peut trouver le centre de Dieu dans le cerveau. Il se trouve dans la région pariétale, région qui s'active lorsque des religieux placés dans une machine IRM pensent à Dieu et entrent en méditation.

La région pariétale est-elle vraiment la région de Dieu ? Je ne le crois pas. C'est une région qui code notre corps, la perception que nous en avons et effectivement, lorsqu'on médite, on se concentre plus sur son corps par rapport à

d'autres situations où l'on est plus en train de coder l'information qui vient de l'extérieur. Je ne crois pas que le cortex pariétal soit le centre de la croyance en Dieu, mais plutôt une région qui nous permet de faire un certain travail d'introspection sur notre corps.

Beaucoup de recherches montrent que plusieurs régions entrent en jeu dans la pensée symbolique :

- les régions temporales qui sont importantes pour le codage sémantique, la signification des mots, la reconnaissance des objets ;
- les régions préfrontales.

La pensée symbolique peut être codée à différents niveaux dans le cerveau. Plusieurs régions sont importantes pour cela et le cortex préfrontal est crucial pour développer une pensée symbolique.

Pr Henry de LUMLEY.- Si l'on regarde les moulages endocrâniens d'hommes fossiles, on constate que l'invention de la parure, de l'art pariétal, de l'art mobilier, de la musique apparaît quand les lobes frontaux sont développés. Quand ils sont réduits, fuyants, il n'y a ni musique ni art mobilier. On ne connaît pas l'intérieur du cerveau, on n'en connaît que la surface, mais le développement des lobes frontaux du cerveau est lié à l'apparition de l'art pariétal, de l'art mobilier, de la parure et de la musique.

Pr Françoise FORETTE.- Pourquoi se développe-t-il ?

Pr Henry de LUMLEY.- Un paléontologue ne répond pas au pourquoi, il observe et reconstitue l'enchaînement des événements qui se sont succédés. Nous sommes les

cinéastes du passé !

Dr Angela SIRIGU.- Le cortex préfrontal et le cortex pariétal chez l'homme par rapport au singe présentent plus de circonvolutions. Le singe possède des cortex préfrontal et pariétal, mais le cortex préfrontal est beaucoup moins développé vers l'avant que chez l'homme.

Pr Henry de LUMLEY.- Même chez les hommes, il est différent entre les *homo erectus* et les hommes moderne. Chez l'homme de Néandertal, il y a une différence très importante dans le développement de lobes frontaux du cerveau selon ses différents stades d'évolution.

C'est pourquoi il faudrait un travail très poussé entre les comparaisons de tous les cerveaux d'hommes fossiles, voir ce qui apparaît à certains moments en fonction de l'évolution du cerveau. A partir de moulages de cerveaux, on pourrait presque fonder cette étude sur le plan statistique.

Pr Pierre-Marie LLEDO.- Pour apporter un éclairage par rapport aux lobes frontaux, on sait que l'une des forces dans l'évolution a été l'encéphalisation. Le passage des invertébrés aux vertébrés n'est pas l'acquisition d'une vertèbre. C'est surtout le développement vers l'avant avec beaucoup d'incidences sur le fait qu'on se développe vers l'avant : les mâchoires, on crée les prédateurs.

Dans l'exposé, on a senti le passage d'herbivores aux carnivores. C'est extrêmement important le régime alimentaire. Dans l'encéphalisation, les mêmes gènes qui poussent le cerveau à se développer vers l'avant sont les mêmes qui vont permettre l'apparition de la mâchoire.

On ne dira pas pourquoi, car c'est la question pour Dieu, mais on peut expliquer le comment. Le comment cette partie antérieure du cerveau se développe, c'était déjà dans le passage invertébré/vertébré.

Après on peut merveilleusement faire un peu de métaphysique. Quand je parle de prospective du cerveau qui se projette vers l'avant dans le temps, alors que, pour les invertébrés, ce sont des cerveaux répartis comme des échelles. On a tout mis en avant. On a pris tous ces barreaux. On les a mis en avant et on en a fait un centre qui permet de centraliser toutes les décisions. Il est en avant,

car il va être près de tous les sens et aussi tourné vers le futur.

Dr Jean-Pierre DECOR.- Vous voyez quel chemin a été parcouru par le cerveau humain. Le comprendre va constituer un bond dans l'histoire. Cela va améliorer le bien-être de millions de personnes. Cela va faire progresser la médecine thérapeutique. Je pense à la machine. Elle va peut-être nous permettre une nouvelle gouvernance mondiale beaucoup plus intelligente que celle qu'on a aujourd'hui. Le XXI^{ème} siècle en science sera incontestablement celui du cerveau.



Ce colloque se termine. Il me reste à remercier chaleureusement les intervenants, les participants, le collège des Bernardins et toutes les assistantes qui ont bien travaillé.



17, rue Bourgelat
69002 Lyon - France