

# *Cerveau et apprentissage*

---

Jean-Pierre CHANGEUX

## *I - Introduction*

### *Définitions*

Les mots mémoire et apprentissage sont souvent confondus. Ils sont tous les deux relatifs aux conséquences de l'interaction d'un organisme vivant avec le monde extérieur sur ses conduites ou comportements. L'apprentissage concerne toute modification du comportement ou des activités psychologiques attribuables à l'expérience du sujet tandis que la mémoire est une fonction plus restrictive qui inclut la disponibilité, l'emploi d'un apprentissage. Le mot «mémoire» implique non seulement la propriété de conserver certaines informations dans le cerveau mais également de les reconnaître ou de les restituer. On distingue donc, dans le cas de la mémoire, acquisition, stockage et rappel d'une information. Le processus de mémoire chez l'homme fait intervenir ce qu'il convient d'appeler «la

conscience». Le philosophe américain, William James, définit effectivement la mémoire proprement dite ou «secondaire» comme la «connaissance d'un ancien état psychique réapparaissant dans la conscience après en avoir disparu». Le mot conscience est employé ici dans un sens très général : en quelque sorte la perception de nos propres perceptions. Cette mise en mémoire fait intervenir, comme l'apprentissage, une trace stable et l'essentiel de cet exposé sera consacré à la définition neurale de cette trace. Le stockage d'une trace implique stabilité dans le temps. On distingue donc classiquement deux types de mémoire ou d'apprentissage de stabilités différentes : le court terme, dont les traces durent quelques secondes, et le long terme qui fait intervenir des durées beaucoup plus longues de l'ordre de l'heure, de la journée et même de l'année. La mémoire à court terme chez l'homme a une capacité limitée à  $7 \pm 2$  blocs de mémoire et n'est pas hiérarchisée. Lorsque je raisonne j'utilise ma mémoire à court terme. Par contre, lorsque je fais appel à un souvenir lointain de l'enfance, je fais intervenir ma mémoire à long terme dont la capacité est apparemment sans limite et hiérarchisée. La mémoire à long terme est, elle-même, compartimentée. Les lésions bilatérales de l'hippocampe (qui se trouve dans le lobe temporal du cerveau) interfèrent avec le transfert d'information de la mémoire à court terme à la mémoire à long terme mais préservent la possibilité d'un apprentissage moteur. Enfin, les sujets avec des lésions de la base antérieure du cerveau conservent l'usage des mots avec leur sens mais n'arrivent pas à les situer dans leur contexte temporel. Ces exemples démontrent que le mot «mémoire» recouvre chez l'homme des fonctions cérébrales d'une grande diversité.

### *Niveaux d'organisation*

Le cerveau humain est une structure d'une grande complexité qui peut être subdivisé en plusieurs niveaux d'organisation. Le niveau le plus élémentaire est celui de la cellule nerveuse et de ses connexions synaptiques. Le niveau suivant résulte de l'assemblage de quelques neurones en circuits. Puis ces neurones se regroupent en ensembles plus importants de plusieurs milliers ou dizaine de milliers (voir millions) de cellules nerveuses que l'on peut appeler avec Hebb des assemblées de neurones. La deuxième partie de mon exposé sera consacrée à ces assemblées de neurones qui sont supposées coder les représentations mentales, et, de ce fait, constituent un lien entre ce qu'il est convenu d'appeler le neural et le mental. Au-delà, un nouveau clivage peut être fait. Kant distinguait déjà l'entendement engagé dans la formation des concepts et la raison

qui contribue à organiser les concepts dans le temps. Le neurobiologiste prenant le risque de faire des hypothèses hardies, tentera de trouver une base neurale à ces deux niveaux au sein même du cerveau. Les lésions du lobe préfrontal perturbent le fonctionnement de la raison tout en conservant les fonctions de l'entendement : perception et conceptualisation. Il apparaît donc légitime de supposer que le cortex préfrontal participe aux «architectures» du niveau supérieur de la raison.

### *L'emploi des modèles*

Dans leur approche rationnelle des problèmes posés par le système nerveux central, les neurobiologistes utilisent des modèles. On peut distinguer deux types de modèles : les modèles expérimentaux et les modèles théoriques. Les modèles expérimentaux sont des systèmes simplifiés qui permettent d'avoir accès à une fonction particulière, à la structure qui la détermine sans avoir recours à la totalité du cerveau humain. On pourra, par exemple, essayer de définir un modèle de la raison chez le singe, bien que le singe ait une faculté de raison très inférieure à celle de l'homme. On s'intéressera également aux mécanismes cellulaires et moléculaires de l'apprentissage avec des ganglions nerveux de la limace de mer ou avec la jonction neuromusculaire du rat, bien que ces systèmes paraissent, à première vue, très éloignés de la complexité du cerveau humain et de ses facultés de mémoire. Mais l'emploi de modèles expérimentaux aussi simples trouve sa justification dans la plus grande stabilité évolutive des niveaux les plus bas, moléculaires, cellulaires par rapport aux niveaux les plus élevés de l'organisation du système nerveux.

Les modèles théoriques ont un autre usage. Pour aborder sur le plan expérimental un thème aussi complexe que celui de la mémoire ou de l'apprentissage, il est nécessaire de disposer d'une représentation «théorique» du mécanisme ou du processus que l'on veut étudier, d'un modèle formel et cohérent qui aura comme principale propriété de pouvoir être validé ou invalidé par l'expérience.

### *Le Darwinisme généralisé*

Dernier point d'ordre général, peut être un peu philosophique, mais potentiellement

important sur le plan expérimental : comment concevoir l'effet de l'environnement sur un organisme et plus particulièrement sur le système nerveux ? La thèse que je veux défendre est celle du Darwinisme, non pas dans son application originale à l'Evolution des espèces mais dans ses extensions, d'une part au développement du système nerveux (Darwinisme «neural»), d'autre part à l'organisation temporelle des représentations mentales (Darwinisme «mental»). Dans un cas comme dans l'autre, la sélection opère sans modification du génome. Il y a épigénèse. Ces extensions se justifient, selon moi, pour deux raisons. La première est que le cerveau peut être considéré comme un système qui évolue, mais à l'intérieur de l'organisme. Le cerveau de tout individu se construit de l'oeuf à l'adulte et peut donc faire l'objet d'une sélection par l'activité nerveuse au cours du développement au niveau de la connectivité (Darwinisme neural) puis, et cela est plus spéculatif, au niveau du fonctionnement de la pensée elle-même, de l'enchaînement des objets mentaux pour constituer une «mélodie» ou une proposition logique (Darwinisme mental chez l'adulte).

Le modèle Darwinien se distingue du modèle empiriste suivant lequel l'interaction avec le monde extérieur induit une organisation neurale totalement nouvelle. Pour les Empiristes le cerveau serait, à la naissance, une «tabula rasa» et tout ordre interne résulterait de l'expérience («rien n'est dans l'esprit qui ne fût dans les sens»). Ce modèle s'avère, d'emblée, totalement inexact sur le plan neurologique. Le modèle Darwinien se distingue également du modèle innéiste qui postule, au contraire que la structure interne du cerveau est, à la naissance, riche et innée. Il se situe entre ces deux extrêmes. Il se fonde sur la présence d'un générateur interne de variabilité. Dans le cas de l'Evolution des Espèces (ou de la réponse immunitaire), ce générateur produit des mutations ou des recombinaisons de segments chromosomiques. Dans le cas de l'évolution interne du cerveau, cette variabilité porterait sur la connectivité et sur les états d'activités spontanés du cerveau. Il apparaît donc légitime d'appliquer au système nerveux en développement et au cerveau adulte un modèle très général du Darwinisme.

## *II - L'apprentissage par sélection de synapses dans le système nerveux au cours du développement*

Le cerveau de l'Homme est d'une extrême complexité. Néanmoins, son organisation est, dans ses grandes lignes, soumise au «pouvoir des gènes». J'ai signalé

l'engagement du cortex pré-frontal dans d'éventuelles architectures de la raison chez l'homme. Or, la surface du cortex pré-frontal s'accroît de manière spectaculaire au cours de l'évolution des espèces, du rat, au chien, jusqu'à l'homme, en passant par le chimpanzé. L'unité des traits propres à l'espèce humaine, qui inclut bien entendu ceux de son cerveau, est très largement déterminée génétiquement. On peut considérer que ce déterminisme est une contrainte lourde. Mais on peut également le voir sous un jour positif puisqu'il maintient, en quelque sorte, l'unité de l'homme.

Cette évolution pose, toutefois, un sérieux problème de génétique. La comparaison des chromosomes de l'homme, du chimpanzé, du gorille et de l'orang-outan fait ressortir une remarquable similitude génétique qui tranche avec des différences d'organisation majeure du cerveau et, bien entendu de leurs conduites et comportements. Cela pose un paradoxe que beaucoup de neurobiologistes ont essayé d'analyser. D'abord, le nombre total de gènes de structure présents dans les chromosomes de l'homme est au maximum de l'ordre de 200.000 et vraisemblablement moins élevé. Ce nombre est très faible comparé au nombre de neurones et de connexions synaptiques de son système nerveux central : environ 100 milliards de neurones dans l'ensemble de l'encéphale et environ 10.000 fois plus de synapses. Donc se pose un premier problème de « parcimonie génique ». Le deuxième problème, non moins important, est que du chimpanzé à l'homme, le génome varie peu, alors que l'organisation du cerveau et ses fonctions se complexifient de manière spectaculaire. Il y a « non-linéarité » entre l'évolution du génome et celle du cerveau.

Comment résoudre ce double problème ? Une première réponse est de type innéiste. Au cours des récentes années, des gènes qui interviennent au cours du développement embryonnaire dans la détermination des coordonnées cartésiennes du corps, sa segmentation, et l'identité de chacun de ces segments ont été identifiés, clonés et séquencés par les méthodes de la génétique moléculaire, chez la Drosophile et même chez les vertébrés. L'idée est que la combinaison de ces gènes qui s'expriment précocément contribue au déterminisme de la forme du corps mais aussi, bien entendu, à celle du cerveau. On peut imaginer que si l'activité de l'un de ces gènes se prolonge, la surface du corps soumise à son contrôle augmentera d'autant : l'évolution du chimpanzé à l'homme pourrait avoir porté sur ce type de gènes commandant, par exemple, l'expansion de surface du cortex pré-frontal. Parcimonie génique et non linéarité évolutive peuvent s'expliquer sur la base de l'action de gènes agissant au cours du développement embryonnaire d'une manière séquentielle et combinatoire.

Une seconde réponse au paradoxe de parcimonie génique et de non linéarité évolutive est de nature différente. Si le schéma innéiste était strictement exact, des individus génétiquement identiques devraient posséder des systèmes nerveux également identiques. L'expérience a été faite par les Levinthal chez la puce d'eau ou daphnie et chez un poisson, qui, l'un et l'autre, peuvent se reproduire par parthénogénèse et produisent donc des petits tous génétiquement identiques à la mère. L'analyse quantitative, par microscopie électronique, de la totalité des connexions établies par un même neurone, identifiable d'un vrai jumeau à l'autre, met en évidence une variabilité individuelle significative du nombre de ces connexions. Le pouvoir des gènes laisse place à une «frange» de variabilité. Et l'on peut formuler l'hypothèse que cette variabilité limitée permet l'apprentissage et même en constituer éventuellement l'une des traces.

C'est sur cette idée que se fonde la thèse de la stabilisation sélective des synapses au cours du développement ou Darwinisme neural. L'hypothèse proposée est que seule la mise en place des connexions entre catégories de neurones est soumise à un déterminisme génétique strict. De ce fait, les connexions entre neurones individuels vont être chevauchantes voire redondantes, vont présenter un certain «flou». A ce stade «sensible» d'exubérance connexionnelle, la variabilité interne du système sera maximale. Les variations darwiniennes s'identifieront aux multiples figures connexionnelles qui se formeront dans le réseau nerveux à ce stade. Puis, l'interaction avec le monde extérieur va modeler cette connectivité en stabilisant les combinaisons qui sont en «résonance» avec le monde extérieur et en éliminant les autres. La sélection réduit la variabilité connexionnelle transitoire et accroît l'ordre du système.

Ce modèle théorique, décrit de manière formelle par Philippe Courège, Antoine Danchin et moi même, en 1973, a été mis à l'épreuve de l'expérience d'abord, sur l'exemple très simple de la jonction neuromusculaire. Chez le rat, à la naissance, chaque fibre musculaire reçoit plusieurs terminaisons axonales fonctionnelles, issues de plusieurs neurones distincts, alors que, chez l'adulte, **une seule terminaison motrice persiste par fibre**. On peut mesurer, par des méthodes électrophysiologiques, l'élimination de terminaisons nerveuses fonctionnelles au cours du développement et voir si l'activité du système règle effectivement cette élimination. La réponse est oui, mais dans quel sens ? Réponse la plus courante, qui suit le schéma instructif : «plus j'exerce mon système nerveux, plus je stabilise de synapses».

Et bien non. Des expériences de paralysie musculaire par section de tendon chez le rat nouveau-né ou par injection d'agent curarisant dans l'embryon de poulet, montrent que plus le système est actif, plus l'élimination de synapses va avoir lieu rapidement. «Apprendre c'est éliminer». Le modèle Darwinien se vérifie. Ce qui est vrai pour la jonction neuromusculaire l'est également pour le système nerveux central. Par exemple, les cellules de Purkinje du cervelet sont innervées chez l'adulte par une seule fibre grimpanche. Par contre, chez le nouveau-né, J. Mariani et F. Crépel ont montré que celles-ci en reçoivent environ trois. Deux fibres grimpanches sur trois sont éliminées après la naissance.

Chez l'homme, l'essentiel des synapses se forme dans le cortex après la naissance. Mais si on compte le nombre total de synapses présentes par unité de surface du cortex, on se rend compte qu'avant la puberté une décroissance a lieu. L'idée que d'importants phénomènes régressifs contribuent au modelage du système nerveux et que l'activité intervient dans la stabilisation de la connectivité adulte paraît vraisemblable. Plusieurs groupes ont d'ailleurs adopté ce point de vue, comme Gerald Edelman à l'Université Rockefeller.

Enfin, chez l'homme, l'épigénèse due à l'élimination de synapses peut s'étendre au développement des aires corticales comme celles engagées dans l'apprentissage du langage parlé et même écrit. Les japonais emploient deux systèmes d'écriture : le kanji idéographique et le kana syllabique. Un même individu apprend en général les deux systèmes d'écriture mais des lésions cérébrales discrètes dues à des hémorragies cérébrales ou à des traumatismes permettent, par exemple, de conserver l'usage du kanji et de perdre celui du kana ou l'inverse. L'usage d'un système d'écriture particulier fait appel à une expérience dont la trace est localisée dans une région de l'encéphale distincte de celle utilisée par un autre système d'écriture. L'apprentissage contribue donc au modelage des aires corticales, mais on ne sait pas encore s'il s'effectue, ou non, par sélection de synapses.

### *III - Le darwinisme mental*

Le modèle de la stabilisation sélective des synapses concerne le système nerveux en développement. Peut-on concevoir une application éventuelle du schéma darwinien

aux états mentaux de l'adulte et à leur organisation dans le temps ? Avant d'aborder cette question encore très spéculative, il est souhaitable d'introduire la notion de représentation mentale. Shepard a proposé une expérience très simple qui illustre leur matérialité. On présente à un sujet l'image informatisée d'un assemblage de cubes, puis un second qui dérive du premier par rotation d'un angle qui varie d'une présentation à la suivante. On demande au sujet d'appuyer sur un bouton dès qu'il a identifié la rotation. On constate, dans ces conditions, que plus l'angle de rotation est grand, plus le sujet met de temps pour identifier cette rotation. Il existe une relation linéaire entre l'angle de rotation et le temps de réaction. Cette expérience suggère qu'il existe dans le cerveau, sous une forme ou sous une autre, un objet de référence, une représentation stable à laquelle le sujet compare l'image qu'il perçoit. Cette image possède une matérialité puisqu'il faut du temps pour l'identifier.

Cette matérialité doit, bien entendu, être recherchée au niveau de l'activité des cellules nerveuses qui «codent» pour la représentation du cube. Ces données n'existent pas encore. Les résultats d'une série d'expériences réalisées chez le singe par Georgopoulos montrent, cependant, comment une telle représentation peut se construire au niveau neuronal. On ne demande pas au singe de réagir à la perception d'un objet extérieur, mais de pointer la main dans une direction définie. Lorsque le singe effectue ce geste (pour lequel il reçoit une récompense sous forme de jus de fruit) l'activité des neurones de son cortex moteur est enregistrée, cellule par cellule. L'activité de chaque neurone individuel de la population est représentée par un vecteur dont la longueur est proportionnelle à l'activité moyenne et l'orientation à la direction du bras du singe qui coïncide avec l'activité maximale. Plusieurs centaines de neurones sont enregistrés et, fait remarquable, la somme vectorielle de tous les neurones de la population enregistrée est pratiquement la même que la direction dans laquelle pointe le singe. Il existe un codage neural de la direction de pointage par une population de neurones présente dans le cortex moteur du singe. D'où l'idée que les états d'activité corrélés d'une population de neurones constituent la représentation neurale d'un mouvement. Et cette conclusion doit pouvoir être légitimement étendue au codage neural de la représentation d'un objet, comme dans l'expérience de Shepard.

Troisième point, Descartes, seul dans son cabinet, ne pense qu'à une seule chose, sans recevoir aucune stimulation venant du monde extérieur et conclut, de ce fait, à sa propre existence ou plutôt à celle de son cerveau. Paradoxe pour le psychologue, puisque



le sujet va faire travailler son «esprit», manipuler des «représentations» mentales, les organiser dans le temps, construire des raisonnements sans aucune interaction avec le monde extérieur. Pour le neurobiologiste, le problème se pose en termes différents. Existe-t-il une activité interne du système susceptible de rendre compte de ce «travail mental»? La réponse est oui. Le cerveau de l'homme, comme celui de beaucoup de vertébrés, présente une activité spontanée considérable. Contrairement à une idée reçue, notre système nerveux est en permanence actif. Qu'on dorme, qu'on se promène, qu'on parle, le système nerveux est le siège d'une activité endogène interne très importante. Celle-ci résulte, pour une grande part, de l'activité rythmique d'oscillateurs cellulaires. Quatre catégories de molécules-canaux suffisent pour créer un oscillateur et expliquer la genèse d'une activité spontanée interne. Donc, le fait de penser sans être stimulé par le monde extérieur n'est pas pour le neurobiologiste un paradoxe. Des ensembles définis de neurones doivent pouvoir entrer en activité de manière coordonnée, produire des représentations mentales, extraire des informations de la mémoire à long terme et, éventuellement, s'enchaîner en mélodies ou en propositions logiques.

Est-il possible de construire des modèles théoriques de ces «objets de pensée» qui s'identifient à des états d'activité de population de neurones ? La physique statistique apporte une première solution à ce problème. Les physiciens ont produit des modèles qui rendent compte des propriétés d'ensemble d'atomes ou de molécules pouvant exister sous des états de spin de signe différent. Ces modèles ont été utilisés pour décrire le comportement de population de neurones actifs et, en particulier, leur «assemblage» lors de l'apprentissage. Le psychologue, Donald Hebb, a montré qu'une assemblée stable de neurones peut se former lors de l'interaction avec le monde extérieur si une condition portant sur les efficacités des synapses établies entre neurones se trouve remplie. Cette condition, appelée depuis règle de Hebb, postule que deux neurones en contact «s'associent» entr'eux si leurs décharges coïncident dans le temps. La concomitance d'activité pré- et post-synaptique entraîne le renforcement de la connexion inter-neuronale. La règle permet aux neurones qui sont actifs ensemble, ou qui coopèrent déjà, de mieux coopérer encore. Sur cette base, on peut essayer d'appliquer le modèle Darwinien à la mise en place d'une trace stable de représentation mentale. Au lieu de postuler au départ une variabilité des connexions, comme dans le cas du Darwinisme neural, l'hypothèse est proposée d'une variabilité dans le temps de l'état d'activité des neurones. Les neurones de l'assemblée vont s'allumer, s'éteindre, fluctuer au fil du temps, jusqu'à ce qu'une certaine combinaison d'états actifs ou pré-représentation entre en «résonance» avec un perçoit évoqué par

l'interaction avec le monde extérieur. A ce moment là, cette pré-représentation va être stabilisée. La mise en mémoire peut alors s'effectuer par un changement d'efficacité des connexions mettant en oeuvre la règle de Hebb.

La règle de Hebb n'est pas aussi hypothétique qu'il y paraît, et une implémentation moléculaire plausible de celle-ci a été proposée par Thierry Heidmann et moi-même sur la base de propriétés connues du récepteur de l'acétylcholine. Cette protéine membranaire peut exister sous plusieurs états conformationnels, l'un activable, l'autre désensibilisé et leur interconversion peut se produire en des laps de temps de 100 millisecondes à 5-10 minutes. D'autre part, ce récepteur possède des sites «allostériques» distincts de celui qui reconnaît l'acétylcholine. L'état d'activité d'une synapse particulière va pouvoir régler le rapport entre état activable et état désensibilisé du récepteur d'une autre synapse par l'intermédiaire d'un signal qui va agir sur ces sites allostériques. Des synapses qui fonctionnent en même temps pourront donc régler mutuellement leur efficacité au niveau d'une même molécule de récepteur postsynaptique qui «intègrera» plusieurs signaux d'activité dans le temps et dans l'espace.

La genèse des représentations mentales et leur mise en mémoire, se réalise au niveau qu'il a été convenu d'appeler «entendement». Est-il légitime de généraliser ces réflexions théoriques au niveau de la «raison», à l'enchaînement des représentations mentales ? Pour aborder le dernier point, Stanislas Dehaene, Jean-Pierre Nadal et moi-même, avons adopté un modèle expérimental plus simple que l'opération de raisonner chez l'homme : l'apprentissage du chant chez certains oiseaux étudié par Peter Marler et par Mark Konishi aux Etats-Unis. Le chant du moineau des marais se compose de syllabes organisées en phrases et ces syllabes se composent elles-mêmes de notes. L'apprentissage du chant débute par la mise en mémoire du chant de l'adulte chez l'oisillon. Quelques mois plus tard, le jeune oiseau répète le chant qu'il a entendu. Mais ses premiers essais sont peu fidèles. Il débute par une sorte de babillage assez informe puis celui-ci s'organise en chant plastique. Le chant plastique diffère du chant de l'adulte par le grand nombre de syllabes (13 environ) qu'il contient. Le chant adulte, en effet, n'en présente que trois.

Au fur et à mesure que le moineau des marais apprend à chanter, il élimine

des syllabes. Si on considère que le codage d'une syllabe se compare à celui d'une représentation mentale, il y a organisation d'une mélodie par élimination -sélection Darwinienne- de représentations. Un modèle de réseau de neurones formels permet de «simuler» l'apprentissage d'une mélodie par sélection. Il se fonde sur une organisation des neurones en couches successives et sur la régulation d'efficacités synaptiques par réglage des transitions allostériques d'un récepteur postsynaptique. Ce réseau qui apprend à enchaîner des notes par sélection peut être pris comme un schéma (très primitif et simplifié) de ce qui peut se produire dans notre cerveau lorsque les concepts s'organisent dans le temps en phrase signifiante. Mais on est encore très loin de construire un modèle plausible de ce qui se passe exactement dans notre cerveau à cette occasion.

#### *IV - Conclusions*

En conclusion, j'ai essayé de mettre en relief et d'illustrer deux points :

1) Au cours du développement embryonnaire et post-natal a lieu une épigénèse par sélection de synapses, en particulier, à l'occasion de l'interaction de l'organisme avec le monde extérieur. Cette sélection a lieu au moment de périodes «critiques» où l'exubérance synaptique est maximale. Ces résultats soulignent l'importance cruciale de l'environnement socio-culturel dans l'élaboration de l'organisation cérébrale. Il ne faut pas sous-estimer l'importance de cette «éducation», non seulement pour le développement de nos fonctions psycho-linguistiques, mais bien entendu pour celui de l'organisation des réseaux de neurones qui déterminent ces fonctions. Le cerveau de chaque individu va être imprégné, non seulement par le langage mais par les traditions, les pratiques du milieu culturel dans lequel il aura vécu. On peut presque dire qu'il n'y a pas un libre choix de l'enfant face à cet environnement socio-culturel dans lequel il aura vécu. Il est soumis à une sorte de «totalitarisme» de cet environnement qui lui impose sa langue dite maternelle et tout un arsenal de croyances qui orienteront beaucoup de ses actes ultérieurement dans sa vie. Je crois qu'il faut être très attentif à ce que l'on met dans la tête des enfants. Leurs traces neurales peuvent être d'une stabilité extrême et déterminer de manière cruciale le devenir de l'individu.

2) La faculté d'utiliser des représentations mentales pour les enchaîner en

raisonnement est liée à l'emploi d'un compartiment de mémoire à court terme. L'analyse des modèles physiques de réseaux de neurones a montré que la capacité de mémoire à court terme pouvait être limitée par des paramètres physiques aussi simples que le nombre de connexions ou les règles de variation des efficacités synaptiques. Les limites de cette capacité constituent une contrainte à laquelle nous sommes soumis dans nos conduites, dans nos comportements, et surtout dans nos raisonnements. C'est un des aspects les plus critiques de l'organisation fonctionnelle de notre système nerveux, déjà souligné par Herbert Simon. Un des points les plus faibles de la nature humaine est cette capacité limitée de la mémoire à court terme qui nous impose en permanence des efforts pour raisonner. Et ma dernière phrase sera : faisons plus d'efforts encore pour surmonter cette difficulté

**Jean-Pierre CHANGEUX**  
Professeur au Collège de France  
et à l'Institut Pasteur