

BULLETIN N° 87
ACADÉMIE EUROPÉENNE INTERDISCIPLINAIRE
DES SCIENCES



Séance du Mardi 7 Septembre 2004

Conférence de notre collègue
ALAIN CARDON

Professeur d'Informatique, Université du Havre
LIP6 Université Paris VI,

«Poser le problème de la conscience ».

Prochaine séance : le Mardi 12 Octobre 2004 :

ASSEMBLEE GENERALE

A l'issue de l'Assemblée Générale,
Une discussion sera ouverte sur les thèmes
de la conférence du 7 Septembre

ACADEMIE EUROPEENNE INTERDISCIPLINAIRE DES SCIENCES
MAISON DES SCIENCES DE L'HOMME

SECRETARE GENERAL : Pr. EMMANUEL NUNEZ.
 TRESORIER GENERAL : BRUNO BLONDEL.
 CONSEILERS SCIENTIFIQUES :
 SCIENCES DE LA MATIERE : Pr. GILLES COHEN-TANNOUJJI.
 SCIENCES DE LA VIE ET BIOTECHNOLOGIES : Pr. FRANCOIS BEGON
 PRESIDENT DE LA SECTION DE NICE : Doyen RENE DARS.

PRESIDENT FONDATEUR
 DOCTEUR LUCIEN LEVY (†)
 SECRETARE GENERAL D'HONNEUR
 PROFESSEUR P. LIACOPOULOS
 TRESORIER GENERAL D'HONNEUR
 PROFESSEUR H. NARGEOLET

Juin 2004

N° 87

TABLE DES MATIERES

- P. 5. Compte-rendu de la séance du 7 Septembre 2004.
- P. 7 . Compte Rendu de la séance du 15 Juillet 2004 de Nice-Côte d'Azur
- P. 9. Ordre du jour de l'Assemblée Générale. Pouvoirs.
- P. 11. Documents

Notre collègue Alain CARDON nous a transmis la présentation de sa conférence. du 7 Septembre. Nous la donnons ci-après sous la forme de ses transparents qui sont très lisibles. Nous donnons également le texte de la conférence du Pr. Wolf Singer prononcée lors du congrès « Biologie et Conscience ».

Date de la prochaine séance :

le Mardi 12 Octobrebre 2004 à **18 h.**, salle 215, M.S.H.

ASSEMBLEE GENERALE

Discussion sur la conférence d'Alain CARDON

« Poser le problème de la conscience artificielle »

ACADEMIE EUROPEENNE INTERDISCIPLINAIRE DES SCIENCES
Maison des Sciences de l'Homme, Paris.

Séance du
Mardi 7 Septembre 2004

Maison des Sciences de l'Homme, salle 215, à 18 h.

La séance est ouverte à 18 heures, en présence d'un nombre très restreint de participants. Le décalage exceptionnel au 1^{er} Mardi en est en partie responsable.

G. Belaubre présente les excuses de Françoise Dutheil, de François Bégon et de Bruno Blondel.

Il remercie Michel Gondran et Irène Herpe-Litwin pour leur appui dans la préparation du bulletin de Juin.

Congrès « Fractales en progrès ».

En l'absence de François Bégon, qui s'est excusé, G. Belaubre fait part de l'avancement du projet. Notre collègue Jacques Elkeslassy, Président de l'Agence Régimédia, vient de constituer une équipe solide pour assurer la réussite du congrès. Une réunion s'est tenue le 7 Septembre, à laquelle participaient Gilbert Belaubre et Michel Gondran, ainsi que François Bégon par liaison téléphonique. Notre collègue François Bégon a obtenu un appui financier du Crédit Agricole. Nous allons contacter directement, au travers de leur association, les professeurs de classes préparatoires. Nous aurons donc des informations claires pour la réunion d'Octobre.

Assemblée Générale.

L'assemblée générale ordinaire annuelle se tiendra le 12 Octobre prochain. L'ordre du jour est donné dans la fiche ci-jointe, qui comporte également un bulletin de « pouvoir ». Nous rappelons que seuls les membres de l'Académie à jour avec le trésor pourront participer au vote. Les membres de l'Académie qui désireraient postuler à une fonction du bureau sont priés de se faire connaître auprès :

du Secrétaire Général: Emmanuel NUNEZ
La Chaumière, 1, rue de l'Echiquier,
78760 CHENNEVIERES
ou du Président : Gilbert BELAUBRE,
42, rue Marcadet,
75018 PARIS.

Des additifs à l'ordre du jour pourront être traités pourvu que la demande en soit faite au Secrétaire Général au plus tard 48 heures avant l'assemblée, c'est à dire le 10 Octobre prochain.

Communication du Pr. Alain Cardon.

La parole est alors donnée au Pr. Alain CARDON pour sa conférence « **Poser le Problème de la Conscience** »

Alain Cardon est Professeur à l'Université du Havre et Directeur du laboratoire d'Informatique de cette Université. C'est un spécialiste d'Informatique et d'Intelligence Artificielle. Ses deux derniers ouvrages qui sont consacrés à la conscience artificielle devraient devenir des classiques : « *Conscience Artificielle et Systèmes adaptatifs* » Eyrolles 2000 et « *Modéliser et Concevoir une Machine Pensante* » Vuibert 2004.

Les transparents de l'exposé très riche et profond d'Alain CARDON sont donnés ci-après. Après avoir rappelé les objectifs qu'il s'était fixés, Alain CARDON nous présente l'architecture de son modèle de conscience artificielle. Une première réalisation informatique a été effectuée avec un thésard au Japon. Il regrette cependant que son projet n'ait pas reçu plus d'encouragements de la communauté française.

L'exposé d'Alain CARDON a donné lieu à des échanges auxquels G. Belaubre, Michel Gondran, Gérard Lévy ont participé.

Septembre 2004.

Numéro préparé et composé par Michel Gondran , Irène Herpe-Litwin et Gilbert Belaubre.

*Académie Européenne Interdisciplinaire des Sciences
Nice-Côte d'Azur*

Le savoir est le seul bien qui s'accroisse à le partager. Comprendre est bien sans limite qui apporte une joie parfaite. *Baruch SPINOZA (1632-1677)*

*Compte-rendu de la séance du 15 juillet 2004
(73^{ème} séance)*

Présents :

Sonia Chakhoff, Pierre Coulet, Patrice Crossa-Raynaud, Guy Darcourt, René Dars, Jean-Pierre Delmont, Emile Girard, Jean-Paul Goux, Jean Jaubert, Jean-François Mattéi.

Excusés :

Jean Aubouin, Alain Bernard, René Blanchet, Thierry Gontier, Daniel Nahon, Maurice Papo, Alexandre Sosno, Jacques Wolgensinger.

1- **Approbation du compte-rendu de la 72^{ème} séance.**

Le compte-rendu est approuvé à l'unanimité des présents.

2- **Actes des colloques précédents.**

- Les actes du colloque « Science et Jeunesse » sont chez l'imprimeur.
- Les actes du colloque « La Science en mouvement » sont en préparation finale

3- Maison de la Science.

La préparation des statuts de la Maison de la Science a occupé la plus grande partie de notre séance. Ils seront déposés dans les jours à venir.

Le président René Dars a obtenu l'accord de Monsieur le Préfet de Nice, de Monsieur le Recteur et de Monsieur le Président de l'Université de Nice.

4- Distinctions.

- a) Notre confrère René Blanchet vient de s'être vu décerner le Grand Prix Léon Lutaud de l'Académie des Sciences pour l'ensemble de ses travaux en géologie. Toutes nos félicitations.
- b) Notre confrère Jean-François Mattéi recevra, à Nice, la médaille de Chevalier de la Légion d'Honneur. La date et l'heure de cette cérémonie à laquelle tous les membres de l'AEIS sont invités, seront précisées ultérieurement.

Prochaine réunion

le jeudi 16 septembre 2004 à 17 heures
au siège
Palais Marie-Christine

20, rue de France
06000 NICE

**ACADEMIE EUROPEENNE INTERDISCIPLINAIRE
DES SCIENCES**

MAISON DES SCIENCES DE L'HOMME

ASSEMBLEE GENERALE 2004

Convocation.

L'assemblée générale ordinaire de l'Académie Européenne
Interdisciplinaire des Sciences se tiendra le

Mardi 12 Octobre 2004

à 18 heures,

Salle 215 de la

Maison des Sciences de l'Homme,

54 Bd Raspail, Paris 6^{ème}

Vous êtes cordialement prié d'y prendre part .

L'ordre du jour de l'assemblée générale est le suivant :

Rapport moral.

Rapport financier ; rapport des contrôleurs,

Votes sur les rapports.

Elections aux postes du Bureau.

Questions soumises à l'Assemblée Générale.

Les courriers relatifs à cette Assemblée, en particulier les
demandes d'inscriptions de questions dans l'ordre du jour, sont à adresser au
Secrétaire Général Pr. Emmanuel Nunez.

La Chaumière, 1, rue de l'Echiquier,
78760 CHENNEVIERES.

En cas d'empêchement, nous vous prions de remettre le pouvoir
ci-dessous à un membre de l'Académie, à votre choix.

POUVOIR

Je soussigné(e)

membre de l'A.E.I.S. ,donne pouvoir à

.....

.....

pour me représenter à l'assemblée générale de l'Académie, le 12
Octobre 2004.

(lieu et date).....

Bon pour pouvoir.

(signature)

Documents

P. 13 - Nous donnons copie des transparents de la conférence de notre collègue le Pr. Alain Cardon :

« Poser le problème de la conscience artificielle».

P.33 - Nous complétons les transparents précédents par un extrait de son ouvrage « Modéliser et concevoir une machine pensante » Vuibert 2004

P.37 – Nous donnons le texte de la conférence du Pr.Wolf Singer prononcée lors du congrès « Biologie et Conscience » et traduit par notre collègue Irène Herpe-Litwin

Extrait de « Modéliser et concevoir une machine pensante » d'Alain Cardon, p.314-319.

Voir et percevoir : un exemple

Donnons un exemple montrant ce qu'est l'état de perception consciente de la machine pensante. La machine est par exemple postée devant un arbre. Elle a de nombreux capteurs visuels, c'est-à-dire des caméras et micro-caméras lui permettant de saisir des zones de l'environnement. La vision du réel ne se fait évidemment pas du tout à partir d'une image globale composée de pixels et qui serait ensuite traitée par des algorithmes compliqués. Elle se fait par la vision simultanée de zones recouvrant tout l'espace visuel, zones d'abord globales (près, loin, clair, foncé...), qui sont connectées topologiquement et auxquelles correspondront des activations d'agents aspectuels spécifiques. Cela correspond si l'on veut à une vision floue du paysage permettant de se représenter ses grands caractères. Puis certaines de ces zones, selon l'attention qui opère, seront découpées en parties (haut, bas, gauche, teinte oblique ou verticale, forme géométrique typique...) et constitueront un raffinement des zones précédentes. La vision est précisée, par parties et de façons concurrentes. La précision des zones se fait en parallèle, constituant un approfondissement global de la scène. Et ainsi de suite, des parties, des motifs, des états (déplacements,; ordre...) sont exhibés. De cette façon, se constitue une hiérarchie de parties, chaque partie de l'espace qui est exhibée étant représentée par des agents aspectuels de type et de localité, qui se coordonnent entre eux. La représentation de l'espace est donc un ensemble de hiérarchies de formes, de tons, de relations topologiques et de caractères que réifient un ensemble organisé d'agents aspectuels. La finesse et la précision de la scène exhibée dépendent de la qualité de cette organisation d'agents, essentiellement, c'est-à-dire du nombre des agents, de la structure qu'ils forment et de la vitesse de constitution de cette structure.

Chaque caméra qui scrute une partie de l'espace est commandée par un mécanisme qui permet de régler la profondeur de champ. Les caméras sont aussi commandées directionnellement et peuvent être orientées par des moteurs indépendants. La machine a des capteurs permettant d'apprécier les mouvements des moteurs directionnels des caméras. Tout mouvement est apprécié par une action contre une réaction, par le fait qu'une rotation d'une caméra nécessite un effort et une dépense d'énergie. La simulation de l'effort musculaire des organismes vivants est représentée par la tension à exercer sur un ressort de rappel ou sur un ensemble de ressorts. Ce cas est absolument général: le mouvement des roues est un effort sur le frottement, tout mouvement de la tête de la machine pensante est un effort contre la gravité et l'inertie...

Pour faire action de l'un quelconque de ses composants, la machine pensante doit produire des efforts mesurables par des capteurs spécifiques.

Toute variation de la mesure d'un capteur est appréciée par une entité logicielle simple appelée élément d'interface. Tous les éléments d'interface sont groupés pour déclencher l'action d'agents d'interface qui apprécient les efforts et les entrées d'informations nouvelles. Toute prise d'information est un acte double: prendre l'information et apprécier l'effort pour prendre cette information.

Il y a toujours des cartes émotionnelles en activité. Traitons le cas des cartes émotionnelles relatives à la vision. À chaque caméra est associée une carte émotionnelle. Les éléments d'interface prennent les images et procèdent à un traitement minimal. L'image est analysée comme suit :

- complexe ou simple, c'est-à-dire avec une décomposition simple ou compliquée en éléments de

base,

- avec un élément géométrique typique dans l'image ou non,
- avec une couleur dominante ou plusieurs,
- avec une orientation ou non...

Cette analyse automatique est réalisée par chaque élément d'interface. Les résultats sont appréhendés par les agents des cartes connectées à ces éléments. Les agents procèdent à des traitements cognitifs et numériques :

- comparaison des informations avec des connaissances de référence (extraction et comparaison de formes par rapport à des gabarits),
- fusion de données de plusieurs éléments d'interface (construction de formes par assemblages),
 - comparaison avec l'état courant des agents actifs (évaluation de la transformation opérée),
 - prise en compte des efforts déployés par les composants de la machine pour obtenir ces résultats...

Ces analyses conduisent à activer certains agents aspectuels plutôt que d'autres. Il est bien évident que ce seront les agents relatifs à ce qui est de couleur verte, de forme complexe, qui a une position verticale, qui a un volume, qui masque le fond et est de taille plutôt grande... qui seront activés à partir des images prises par les caméras. L'ensemble des agents aspectuels activés détermine :

- des éléments particuliers de l'image,
- une cohérence des parties (ou non) conduisant à la constitution de quelque chose.

Pour valider leurs caractères, certains agents aspectuels vont commander à des agents d'interface d'effectuer des mouvements de caméras ou d'objectifs des caméras, mouvements conduisant simultanément à des mesures d'efforts. La carte générale d'activité de l'organisme apprécie les efforts dirigés vers l'action de certains organes.

Simultanément, les éléments morphologiques apprécient :

- le travail des groupes d'agents aspectuels opérant pour détacher des détails des informations, pour constituer une forme visuelle typique par composition de traits caractéristiques,
- le travail des agents mesurant les efforts des mécanismes extracteurs des informations,
- le travail d'organisation des agents aspectuels, les groupes qui se renforcent, s'opposent, s'ignorent, s'absorbent...

Les agents de morphologie accélèrent et contraignent les activités organisationnelles des éléments aspectuels, les conduisant à exprimer ce qui est selon eux le plus évident à exprimer. La prise en compte de la combinaison de ces deux types d'agents, aspectuels et de morphologie, fournit :

- ce dont il est question, de quoi on traite par des calculs multiples faits par les agents aspectuels et à quel coût en dépense d'énergie,
- comment on organise les calculs et quelle est la forme de l'organisation aspectuelle.

Ce qui est actif dans le système est donc :

- relatif aux caractères locaux d'une forme physique
- relatif à la synthèse de ces caractères pour produire l'activation d'un groupe d'agents aspectuels typique de l'activation exprimant « des caractères généraux de la forme typique extraite »,
 - relatif au correspondant dans les ensembles morphologiques de la reconnaissance de cette forme physique opérée par les analyses aspectuelles, ainsi que le coût pour réaliser cette reconnaissance.

Il n'est pas fait référence au mot arbre dans ces activations, il n'y a aucun caractère manipulé à propos de sa connaissance comme étant un végétal particulier connu. On peut donc dire que les cartes émotionnelles spécifiques de la reconnaissance des images, couplées avec celles mesurant les efforts effectués pour y parvenir (efforts physiques et organisationnels) ont opéré. D'autres cartes appréciant cette situation de perception, c'est-à-dire l'apparence générale de l'environnement (le paysage où se situe la machine pensante), l'état physique des appareils et composants de la machine pensante,

l'état des dépenses et transferts d'énergie, la quiétude de la situation (la régularité des flux d'énergie et d'information entre cartes), la clarté ou l'ambiguïté de ce qui est vu (la reconnaissance immédiate ou la non reconnaissance et la qualité de cet acte de reconnaissance). Beaucoup de ces appréciations sont décrites par l'état d'ensembles morphologiques. Et ces cartes vont faire s'activer des agents aspectuels qui vont exprimer des émotions plus fondamentales : quiétude, appréhension, malaise, interrogation, crainte...

Ces cartes, si elles sont bien activées, vont altérer le fonctionnement des cartes liées à la vision, en faisant se modifier les actions aspectuelles de commande des mécanismes de prise d'informations et de réalisation d'efforts. La représentation d'une émotion de déplaisir se traduirait par une forte activité de certaines cartes, l'inhibition de certaines autres réalisant des fonctions usuelles, un état des flux informationnels très déséquilibré, en fait une tension de plus en plus forte, mesurée par les éléments de synchronisation et se traduisant par l'activation des capteurs internes de mesure des activités organisationnelles, une tension ne trouvant pas de résolution immédiate. La vision serait alors altérée.

Le système générateur d'émotions appréciera, par ses agents actifs et par la récession forcée des autres, ce qu'il voit, comment il le voit et dans quel contexte émotionnel.

Et il ne s'agit, dans toute cette description, que de la prise instantanée d'informations relative aux capacités visuelles, constituant un état émotionnel qualifié d'instantané, selon la durée des mesures et des calculs, bien sûr.

Mais, simultanément, le système générateur de pensées est actif. Des structures de signification relatives à l'analyse sémantique des images visuelles opèrent. Elles opèrent sur les éléments d'analyse et les morphologies des cartes émotionnelles liées à la vision. Elles tentent de désigner :

- l'objet manipulé,
- de rappeler ses caractères,
- de rappeler des situations importantes semblables à ce cas de perception (des souvenirs en quelque sorte),
- de désigner les sensations à la suite de l'état des cartes émotionnelles.

Il s'agit bien de l'action spécifique des structures de signification. Pour ces reconnaissances, les ensembles morphologiques feront accélérer les activités groupales à partir de motifs préexistants et les éléments de synchronisation feront se co-activer les structures les plus actives.

C'est dans la relation étroite, réglée par les éléments de synchronisation, que les structures de signification opèrent. Des agents aspectuels relatifs à la connaissance de ce qui est observé vont être activés. On a donc, simultanément :

- des cartes émotionnelles qui exhibent quelque chose de vu,
- des cartes émotionnelles qui apprécient l'effort et la situation de cette vision,
- des structures de signification qui désignent, qualifient ce qui est regardé,
- des structures de signification qui qualifient les émotions de cette observation.

Et toutes ces cartes et structures se synchronisent, opèrent ensemble, en coactivation avec les capteurs et effecteurs de l'organisme. Un état particulier émerge : la scène signifiante. Cet état entraîne des mémorisations dans les éléments de mémoire, il accède à la qualité d'état significatif. Quel est alors l'état courant de l'organisme :

- ses caméras sont orientées sur une forme particulière,
- le corps de la machine pensante relâche un instant ses efforts,
- les cartes émotionnelles apprécient les détails de cette observation et conduisent les effecteurs à se stabiliser un instant,
- les structures de signification qualifient l'objet repéré ainsi que la situation de repérage.

Mais l'ensemble d'anticipation était toujours actif. Ses agents les plus actifs permettaient cette situation, autorisaient les cartes émotionnelles relatives à la vision à opérer une prise de forme avec reconnaissance (à occuper les ressources des processeurs). L'ensemble d'anticipation demandait aux systèmes générateurs d'opérer une prise d'information avec traitement de connaissances conjoint. Ce qui a été fait et se fait.

Et ce mécanisme mettant en liaison toutes les parties de l'organisme est son état de pensée explicite, au moment où il atteint cet état cohérent de ses activités : le système voit et éprouve la vision d'un arbre.

Mais c'est déjà terminé, car les états de certains agents aspectuels et de morphologie ont changé, d'autres activations se font et le système exprime une scène latente et se dirige vers une autre scène signifiante. L'ensemble d'anticipation, lisant les morphologies de ses structures de signification, se réorganise et dégage, à partir de la scène signifiante, la nouvelle visée qui en déterminera la suite.

Il a fallu toute cette activité pour générer une idée simple : la vision ressentie d'un arbre.

Mais quand même, une idée artificielle perçue, perçue par l'organisme car correspondant à des états d'activités distingués de certains de ses éléments, un état mesuré par tous ses capteurs actifs internes et externes contrôlant certains de ses effecteurs, un état qui s'ancre dans la mémoire à court terme, et un état qui provoque l'émergence motivée de son successeur, de la pensée suivante.

Le mécanisme émotionnel nécessaire à la prise de conscience de la pensée

Il s'agit dans ce paragraphe de définir comment des organisations matérielles très complexes sont amenées à produire des pensées. Il s'agira, ici, de déterminer comment des structures computationnelles qui s'activent et se réorganisent sont aussi des expressions de pensées. Il s'agit donc de la clé du problème que cet ouvrage traite.

Il reste donc un point à traiter concernant l'usage systématique du système générateur d'émotions et de pensées. Nous avons posé que la perception par l'organisme même de ses pensées générées revenait à éprouver de manière sensible les caractères très particuliers de l'état de la scène signifiante, en la comprenant. Pour se savoir pensant, pour qu'un organisme possédant les capacités de sensation et d'action d'un corps qui manipule d'une certaine façon un système très complexe soit amené à penser, il faut qu'il éprouve cet état strictement interne qui est celui du système générateur de pensées lors de l'expression de la scène signifiante. Qu'est-ce que cette sensation qui fait faire sens sur les choses du monde, qui est la pensée dont il aurait conscience, qui est la clé existentielle de la machine pensante, et qui va permettre à une grappe de processeurs fortement connectés à un robot très mécanique doté de multiples capteurs, d'être un organisme pensant en le sachant ?

Imaginons la machine pensante :

- un corps muni de nombreux organes compliqués aux multiples possibilités d'action, avec de multiples capteurs, internes et externes
- des unités de traitements proches de ces capteurs : les éléments d'interface
- deux systèmes de générations, ceux d'émotions et de pensées
- de très nombreux processeurs sur lesquels, continuellement, des processus s'exécutent et communiquent
- un considérable ensemble de processus qui représentent les agents aspectuels en action, en action de calcul, de communication, de mutation, de commande des éléments d'interface
- et puis, pour les activations des processus représentant les agents aspectuels, dans chaque carte ou chaque structure de signification, l'activation conjointe, coordonnée, la co-activation des ensembles morphologiques.

Une coordination temporelle à grande échelle de l'activité corticale comme préalable à l'expérience consciente

Wolf SINGER

Institut Max Planck pour la recherche sur le Cerveau. Francfort sur le Main

Résumé

Nous faisons l'hypothèse que la conscience phénoménale, la faculté pour quelqu'un d'être conscient de ses sensations et de ses sentiments dérive de la faculté de représentation des cerveaux évolués de leurs propres processus cognitifs en répétant et en réappliquant sur eux-mêmes les opérations corticales qui engendrent des représentations du monde extérieur. C'est pourquoi la recherche du substrat neuronal de la conscience conduit à la recherche du code neuronal utilisé par les cerveaux pour représenter leur environnement. Nous avançons en outre l'hypothèse selon laquelle le cerveau des mammifères utilise deux stratégies complémentaires de représentation. La première consiste à générer des neurones répondant sélectivement à des constellations particulières de traits particuliers et elle est basée sur une recombinaison sélective des entrées en architectures structurées hiérarchiquement en boucles en aval (circuits en feed-forward). L'autre stratégie repose sur l'association dynamique de grandes quantités de neurones répartis en groupes cellulaires cohérents représentant dans leur ensemble un contenu cognitif. Nous présentons ici les arguments et les données expérimentales en faveur de la notion selon laquelle les méta-représentations qui contribuent à la conscience sont établies conformément à la seconde stratégie. Nous privilégions l'hypothèse selon laquelle de telles représentations distributives s'auto-organisent grâce à une synchronisation transitoire des décharges des neurones participants et nous présentons les arguments en faveur d'une similitude des conditions préalables pour que se produisent ces phénomènes de synchronisation d'une part, et pour qu'il y ait conscience d'autre part.

Le terme de conscience comporte un grand nombre de connotations différentes allant de la conscience de ses perceptions et de ses sensations à la conscience de soi, perception de soi-même en tant qu'agent doté d'intentionnalité et de libre arbitre. Ici, sera défendue la position selon laquelle ces diverses manifestations de la conscience devraient pouvoir être traitées dans le cadre de systèmes de description neurobiologiques s'il est possible de réduire le problème à la question de savoir comment les cerveaux perçoivent et représentent les contenus perceptifs. Si quelqu'un est conscient, il l'est toujours de quelque chose. Les contenus respectifs de l'expérience consciente peuvent être des objets perceptifs appartenant au monde extérieur ou des états de son propre organisme, dans lequel une information sur la situation est fournie au cerveau par des sens extéro et entéroceptifs. Cependant, les contenus de la conscience peuvent aussi n'être que des processus démarrant dans le cerveau lui-même, en l'absence de tout stimulus externe. Ainsi l'expérience consciente semble impliquer un processus cognitif qui contrôle les schémas d'activation neuronale, que ceux-ci résultent d'une entrée sensorielle ou soient générés par voie interne. Ceci suggère deux conclusions :

- 1) puisque des signaux sensoriels peuvent facilement influencer des réponses motrices sans être consciemment perçus, les opérations cognitives conduisant à une expérience consciente doivent être de rang plus élevé que les processus sensori-moteurs.
- 2) du fait qu'ils peuvent tout à la fois subir un processus conscient et alors co-exister en étant reliés, les processus sensoriels primaires et les états internes générés doivent avoir le même format.

En d'autres termes, les schémas d'activation neuronale représentant les contenus de l'expérience consciente doivent posséder certains éléments caractéristiques en commun, qu'ils soient consécutifs à des entrées sensorielles ou qu'ils résultent d'une activité auto-générée. Ces éléments caractéristiques devraient être

identifiables par l'analyse des différences entre les schémas d'activité spatio-temporels associés aux processus respectivement conscients ou inconscients.

Deux possibilités non exclusives peuvent être envisagées. Des processus conscients et inconscients peuvent impliquer le même substrat anatomique tout en différant vis à vis de certains paramètres d'état tels que la cohérence temporelle ou la synchronie, sinon ils dépendraient de structures différentes, le processus conscient exigeant l'implication de traitements de niveau supérieur capables de contrôler à la fois les résultats des processus sensoriels primaires et les résultats de calculs uniquement basés sur l'information stockée dans le système. Les substrats les plus probables pour de tels processus cognitifs sont les aires corticales qui se sont ajoutées au cours de l'évolution et qui traitent les résultats de processus de niveau inférieur de la même manière que les aires en amont traitent les entrées en provenance de la périphérie sensorielle. Une partie de la fonction de conscience de l'œil interne pourrait ainsi prendre forme grâce à des fonctions corticales auto-similaires itératives. Cette interprétation est compatible avec les arguments neuro-anatomiques selon lesquels les aires corticales, d'apparition phylogénétique plus récente, sont plus éloignées de l'entrée sensorielle de départ, et communiquent principalement les unes avec les autres et avec les aires de niveau inférieur (Krubitzer, 1998). Ce scénario est également compatible avec l'apparition graduelle de la capacité de traitement conscient, elle-même corrélée avec l'expansion graduelle du cortex cérébral au cours de l'évolution et avec la maturation progressive des aires corticales au cours de l'ontogénèse. Les changements évolutifs du cerveau des mammifères consistent essentiellement dans l'apposition de nouvelles aires corticales et les études comparatives de comportement suggèrent que cet accroissement de la corticalisation va de pair avec la capacité croissante de représentation et de combinaison de l'information au niveau conscient. Pendant le développement ontogénétique la différenciation croissante du processus conscient, depuis un état d'éveil aux sensations rudimentaire jusqu'à la conscience de soi totalement exprimée chez l'animal adulte va de pair avec la maturation graduelle des aires corticales plus récentes d'un point de vue phylogénétique.

Plusieurs arguments font apparaître comme vraisemblable le fait que les opérations de calcul réalisées par les modules corticaux obéissent toujours aux mêmes principes de base quel que soit le type d'entrée traitée. Ces arguments découlent de la mise en évidence du fait que la structure en microcircuits des différentes aires corticales est d'une similitude frappante et que, par exemple, le cortex auditif, s'il est alimenté par des entrées visuelles, développe des fonctionnalités très proches de celles du cortex visuel. Ainsi, on peut supposer que les aires corticales, plus récentes d'un point de vue phylogénétique, qui reçoivent principalement leurs entrées en provenance des aires phylogénétiquement plus anciennes, traitent ces entrées exactement de la même manière que ces dernières traitent celles qui leur sont fournies par les organes sensoriels. S'il en est ainsi, la capacité des cerveaux d'être au fait de leurs propres opérations et états, devrait être attribuée à une répétition des mêmes opérations cognitives que celles qui contribuent au traitement sensoriel primaire. L'obstacle explicatif à franchir dans l'étude des corrélats neuronaux de la conscience pourrait alors se réduire à la question de fond : comment le cortex cérébral traite-t-il les signaux et génère-t-il des représentations ? Si on peut répondre à cette question en ce qui concerne les fonctions sensorielles primaires, les stratégies ainsi découvertes pourront être généralisées à la formation de méta-représentations, représentations globales et cohérentes que l'on pense être à la base de l'expérience consciente.

Deux stratégies de représentation

Considérons comme valide l'argument selon lequel les fonctions internes de monitoring qui conduisent à la conscience reposent sur les mêmes opérations cognitives que les processus sensoriels qui traitent des signaux acheminés par les organes sensoriels. Dans ces conditions, la recherche du substrat neuronal de la conscience phénoménale est convergente avec la recherche concernant la nature des codes neuronaux utilisés par le cortex cérébral pour représenter et stocker les objets perçus. C'est pourquoi, dans les paragraphes suivants, je vais exposer les hypothèses sur la nature putative des représentations neuronales.

L'hypothèse proposée ici consiste à affirmer que les cerveaux évolués ont recours à deux stratégies complémentaires pour représenter des contenus. La première stratégie reposerait sur la connexion de neurones individuels à des constellations particulières d'activité d'entrée. Au travers de leurs réponses sélectives, ces neurones établissent des représentations explicites de constellations particulières de traits distinctifs. On prétend communément que la spécificité de ces neurones est induite par la convergence sélective des connexions

d'entrée vers des architectures organisées hiérarchiquement en boucle aval (circuit en feed-forward) . Certes, cette stratégie de représentation permet un traitement rapide et elle convient idéalement à la représentation de combinaisons récurrentes stéréotypées de traits caractéristiques. Mais elle est coûteuse en terme du nombre de neurones requis et elle ne convient pas pour gérer la diversité virtuellement infinie de constellations de traits caractéristiques rencontrée dans les objets du monde réel. La seconde stratégie, selon moi, consiste en l'association temporaire de grands nombres de neurones vastement distribués en des groupes fonctionnellement cohérents. Ces derniers, dans leur globalité, représentent un contenu particulier tandis que chacun des neurones en participation est connecté à l'un des traits caractéristiques élémentaires des objets composites perçus. Cette stratégie de représentation est plus économique en terme du nombre de neurones parce qu'un neurone particulier , peut, à différents moments, participer à différents groupements de même qu'un trait particulier peut appartenir à de nombreux objets perceptifs différents. Qui plus est, cette stratégie de représentation est plus souple. Elle permet un turnover rapide de la représentation de constellations jamais expérimentées jusque là parce qu'il n'y a virtuellement aucune limite à l'association dynamique de neurones en constellations en perpétuel changement. Ainsi, pour la représentation de contenus hautement complexes subissant des changements incessants, cette seconde stratégie de codage distribué apparaît comme plus appropriée que la première.

Les méta-représentations postulées comme substrat à l'expérience consciente doivent s'adapter à des contenus qui sont particulièrement imprédictibles et riches en terme de complexité combinatoire. Pour contribuer à l'unité de la conscience, les résultats de calcul d'un grand nombre de sous-systèmes doivent être agrégés dans des constellations qui évoluent sans cesse, et ceci avec la même fréquence de changement que les contenus de la conscience. Il semble alors que la seconde stratégie de représentation qui est basée sur la formation de groupes dynamiques convienne mieux pour la production des méta-représentations qui contribuent à la conscience. En faveur de cette vision viennent des considérations sur la dépendance de la situation et le caractère non localisé, à savoir la nature distributive des mécanismes qui contribuent à l'expérience consciente. Si l'expérience consciente repose sur la capacité de liaison dynamique des résultats des calculs des sous-systèmes en une méta-représentation unitaire , les conditions préalables à la formation de représentations devraient être les mêmes que celles nécessaires à l'apparition de la conscience. Les codes neuronaux qui sont facilement observables dans l'anesthésie profonde ou durant le sommeil à onde lente , où lors d'un défaut d'attention, ne devraient pas être acceptés comme corrélatifs de l'état de veille ou de conscience. Comme les propriétés de réponse des neurones individuels tendent seulement à différer légèrement entre les cerveaux éveillés et anesthésiés, du moins à des niveaux bas de traitement, il est improbable que les représentations explicites encodées par ces neurones soient le substrat de méta-représentations qui contribuent à la conscience. Par contre, l'organisation d'une distribution des codes semble nécessiter des mécanismes de coordination qui n'entrent en jeu que lorsque le cerveau est en état d'éveil et d'attention. Comme il en sera discuté plus bas, la liaison dynamique entre les réponses neuronales réparties sous forme de représentations cohérentes, pourrait requérir une synchronisation temporelle très précise des réponses neuronales sur de grandes distances. Une telle synchronisation est favorisée par les mêmes états cérébraux (éveil et attention) également requis pour l'expérience consciente.

De même, si les méta-représentations postulées comme substrat de l'expérience consciente sont basées sur des codes distribués à distance plutôt que sur des réponses de groupes locaux de neurones alors la conscience devrait assez bien résister à des lésions locales. Alors que les lésions dans des sous-systèmes sont supposées entraver l'expérience consciente des contenus procurée par le sous-système correspondant , la conscience en elle-même ne devrait pas être mise en danger . Elle ne devrait faire défaut que si des lésions interféraient avec les mécanismes de coordination qui permettent la mise en place de groupes de neurones globalement cohérents. Cette prédiction est assez largement en accord avec les conséquences connues de lésions corticales circonscrites. Elles éliminent de l'expérience consciente les contenus spécifiques traités par les aires lésées mais il n'existe aucun site distinct du néo-cortex dont la destruction puisse conduire à une perte de conscience. C'est seulement lors de lésions affectant la coordination globale des fonctions corticales que la conscience est supprimée. Ces considérations suggèrent que les contenus de l'expérience consciente sont représentés par des codes distribués . C'est pourquoi, les paragraphes suivants vont se focaliser sur la mise en évidence de telles stratégies de codage .

Le signe distinctif des codes distribués

Dans le codage distribué une importante contrainte doit être respectée. Il faut un mécanisme qui permette l'association dynamique des neurones sélectionnés en des groupements distincts et fonctionnellement

cohérents et des réponses groupées selon des marques distinctives de façon à assurer leur traitement conjoint. De nombreuses études théoriques ont posé la question de savoir comment des groupements peuvent s'auto-organiser grâce à des interactions coopératives entre neurones distribués mais interconnectés (Braitenberg, 1978 ; Edelman, 1987 ; Palm, 1990). Ici on cherchera plus précisément à savoir comment des réponses de cellules qui ont été assemblées en un groupe neuronal peuvent subir un marquage, comme rapporté ci-dessus. Un tel marquage revient à affirmer que les réponses sont bien traitées ensemble et que ceci est réalisé au mieux en augmentant en concomitance leur mise en relief. En principe, il y a trois possibilités :

- 1) des réponses non groupées peuvent être inhibées
- 2) l'amplitude des réponses sélectionnées peut être augmentée
- 3) les cellules sélectionnées peuvent être aptes à émettre des décharges synchronisées avec précision.

Chacun des trois mécanismes augmente l'impact relatif des réponses groupées. Les deux premières stratégies, qui reposent sur la modulation des fréquences des décharges ont été étudiées avec soin et semblent communes à tous les types de processus . Cependant, elles comportent certains désavantages lorsqu'elles sont utilisées pour le marquage des groupes parce qu'elles peuvent introduire certaines ambiguïtés (von der Malsburg, 1985) et réduire ainsi la vitesse de traitement (Singer et al., 1997). Des ambiguïtés pourraient se produire parce que les fréquences de décharge des cellules ont une vaste amplitude de variation en tant que fonction de l'appariement entre le stimulus et les propriétés du champ de réception ; ces modulations ne pourraient donc être distinguées de celles signalant la similitude des réponses. La vitesse de traitement serait réduite parce que les groupes neuronaux codés selon la fréquence de décharge ne peuvent être identifiés qu'après qu'un nombre suffisant de pics de potentiel aient été intégrés pour distinguer les fréquences lentes et rapides. C'est pourquoi ces groupes doivent être maintenus un certain temps pour pouvoir être distingués, ce qui réduit substantiellement la vitesse à laquelle les différents assemblages peuvent se succéder les uns aux autres.

L'ensemble des deux obstacles, l'ambiguïté et la lenteur de traitement peuvent être surmontés si la sélection et le marquage des réponses sont réalisés au moyen d'une synchronisation des décharges individuelles (Von der Malsburg 1985 ; Gray et al., 1989 ; Singer and Gray 1995). L'expression de corrélations par synchronisation résout les ambiguïtés résultant de fluctuations de fréquence dépendant du stimulus parce que la synchronisation peut être modulée indépendamment des fréquences. La synchronisation accélère également la vitesse à laquelle les différents groupes neuronaux peuvent se succéder les uns aux autres parce que l'événement sélectionné est le pic de potentiel individuel ou une brève explosion de potentiels de pointe ; leur mise en relief n'est accrue justement que pour ces décharges qui sont rigoureusement synchronisées. La vitesse à laquelle les différents groupes neuronaux peuvent se succéder sans être confondus n'est alors limitée que par la durée de l'intervalle pendant lequel les potentiels synaptiques s'additionnent effectivement .

Mise en évidence expérimentale de la formation de groupes neuronaux synchrones

A la suite de la découverte d'une synchronisation des réponses liées aux stimuli au sein des neurones du cortex visuel du chat (Gray et Singer, 1987 ; 1989), de nombreuses expériences ont été réalisées pour chercher une corrélation entre l'apparition d'une synchronisation des réponses et les processus cognitifs . Une des prédictions à tester était le fait que la probabilité de synchronisation devrait refléter certains des critères de Gestalt selon lesquels le système visuel regroupe des traits analogues au cours de la segmentation de la scène. Parmi les critères de regroupement examinés à ce jour, figurent la continuité, la proximité, la similarité, la colinéarité dans le domaine de l'orientation, et une communauté de sort dans le domaine moteur. Jusqu'ici , les résultats de ces recherches sont compatibles avec l'hypothèse selon laquelle la probabilité de synchronisation des réponses reflète les critères de Gestalt appliqués au groupage neuronal basé sur la perception. On a trouvé une synchronisation des réponses propres à un stimulus au sein et au travers de différentes aires y compris entre les hémisphères. Chose très importante, aucun de ces phénomènes de synchronisation n'était détectable en corrélant des réponses aux mêmes stimuli enregistrées successivement. Ceci indique que la synchronisation n'était pas due à un blocage des stimuli mais à une coordination dynamique interne du rythme des pics de potentiel. La cohérence temporelle observée entre les réponses était bien supérieure à celle attendue d'une simple variation de fréquence en relation avec la succession des événements.

Des études impliquant des lésions (Engel et al. 1991b ; Nowak et al., 1995) et des manipulations relatives au développement (Löwel et Singer, 1992 ; König et al., 1993) montrent que les interactions responsables de ces phénomènes de synchronisation dynamique sont produites jusqu'à un degré important par des connexions

cortico-corticales. Les critères de groupages perceptuels devraient alors se refléter dans l'architecture de ces connexions et ce postulat concorde avec la mise en évidence de connexions cortico-corticales reliant préférentiellement des neurones présentant des analogies fonctionnelles.

Synchronisation de la réponse - états comportementaux

Cette synchronie d'une précision rigoureuse, générée par voie interne, est considérablement plus marquée dans le cerveau en état de veille que dans le cerveau anesthésié. D'un intérêt tout particulier est le contexte de cette découverte selon laquelle la synchronisation de réponse est spécialement prononcée lorsque l'EEG global se désynchronise et lorsque les sujets sont attentifs. La stimulation de la formation réticulaire mésoencéphalique chez des animaux anesthésiés conduit à une désynchronisation transitoire de l'EEG, qui ressemble à la transition entre le sommeil à ondes lentes vers le sommeil comportant des mouvements oculaires rapides. Munk et al.,(1996) et Herculano-Houzel et al. (1999) ont montré qu'une synchronisation spécifique à un stimulus est drastiquement facilitée lors d'un état de désynchronisation de l'EEG que lors d'un état de synchronisation de ce dernier.

Un indice direct favorable à une facilitation de la synchronisation liée à l'attention a été obtenu chez des chats entraînés à produire une réponse motrice déclenchée visuellement (Roelfsema et al., 1997). Des enregistrements réalisés dans aires visuelles, associatives, somatosensorielles et motrices ont révélé que les aires corticales impliquées dans l'exécution de la tâche synchronisaient leur activité, le plus souvent avec un déphasage nul, dès que les animaux se préparaient à la tâche et concentraient leur attention sur le stimulus pertinent. Immédiatement après l'apparition du stimulus visuel, la synchronisation s'est étendue aux aires enregistrées, et ces schémas d'activation coordonnés ont été maintenus jusqu'à l'accomplissement de la tâche. Cependant, dès que la récompense était disponible et que les animaux se lançaient dans un processus de consommation, la cohérence de ces schémas s'effondrait, donnant lieu à une activité oscillatoire de basse fréquence qui ne présentait aucune relation de phase détectable. Cette correspondance étroite entre l'exécution d'une performance visuélo-motrice exigeant de l'attention et l'apparition d'une synchronie à déphasage nul suggère une coordination temporelle à grande échelle de l'activité corticale. Tout se passe comme si les mécanismes de l'attention imposaient une modulation cohérente subliminaire aux neurones situés dans les aires corticales qui doivent participer à l'exécution de la tâche anticipée ; ce faisant ils permettraient une synchronisation rapide des réponses sélectionnées. Selon ce scénario, les mécanismes de l'attention induiraient ce qu'on pourrait nommer un état d'attente dans les aires corticales respectives en leur imposant un schéma d'activation dynamique lié à la tâche. Une fois disponible l'entrée produite par le stimulus, cette activité schématisée agirait comme un filtre dynamique entraînant une synchronisation rapide des réponses sélectionnées. Elle accomplirait ainsi le groupement et la liaisons nécessaire des réponses en assurant en plus une transmission rapide de l'activité synchronisée.

La perception consciente

On a trouvé une corrélation intime entre la synchronisation de réponse et la perception consciente et une dissociation remarquable entre les réponses des neurones individuels et la perception lors des expérimentations sur la rivalité binoculaire. Lorsqu'on présente aux deux yeux des schémas qui ne peuvent être fusionnés en une seule perception cohérente, les deux schémas sont perçus en alternance plutôt qu'en superposition de leurs composants. Ceci implique qu'il existe un mécanisme central de contrôle d'entrée qui sélectionne en alternance les signaux provenant de chacun des deux yeux en vue d'un traitement ultérieur. La rivalité binoculaire est ainsi un paradigme convenable pour rechercher les corrélats neuronaux de la perception consciente.

Les réponses multi-unitaires et celles des champs de potentiel ont été enregistrées avec des électrodes implantées de manière espacée dans le temps dans jusqu'à 30 sites du cortex visuel du chat tandis que les animaux étaient exposés à des conditions de stimulation en rivalité binoculaire. Du fait que l'animal réalise des mouvements de suivi de l'œil uniquement pour le schéma réellement perçu, les schémas qui se déplacent en direction opposée ont été présentés en dissociation optique en vue de déterminer à partir des mouvements de suivi quels étaient les signaux réellement perçus par l'animal. Le résultat de cette expérimentation a été surprenant puisque pour finir la fréquence de décharge des neurones dans le cortex visuel primaire n'a pas réussi à refléter la suppression des signaux non sélectionnés. Une corrélation hautement significative existait

cependant entre les changements dans l'intensité de la réponse et l'issue de la rivalité binoculaire. Les cellules fournissant des réponses de l'œil vainqueur dans la compétition binoculaire, tout en étant perçues consciemment, augmentaient la synchronicité de leurs réponses à l'introduction du stimulus de rivalité tandis que c'était l'inverse pour les cellules pilotées par l'œil censuré. Ainsi dans ce cas particulier de compétition, la sélection des réponses pour les traitements ultérieurs semble avoir été accomplie par une augmentation de la mise en relief des réponses en les synchronisant plutôt qu'en augmentant leur fréquence de décharge. De même, la censure n'est pas accomplie par l'inhibition des réponses mais par leur désynchronisation.

Ainsi, au moins dans les aires visuelles primaires, existe-t-il une dissociation remarquable entre la perception et la fréquence de décharge des neurones individuels. Les cellules dont les réponses ne sont pas perçues et qui sont exclues du contrôle comportemental répondent aussi vigoureusement que les cellules dont les réponses sont perçues et participent au comportement. Un autre résultat remarquable de l'étude de la rivalité binoculaire réside dans le fait que les réponses qui remportent la compétition augmentent leur synchronicité en présence du stimulus de rivalité binoculaire. Ceci suggère l'action d'un mécanisme qui augmente la mise en relief des réponses sélectionnées en augmentant leur synchronicité pour les protéger contre l'interférence causée par le stimulus créé par l'œil rival.

Pour conclure, l'évaluation des schémas de corrélation générés intérieurement permet d'extraire de l'information sur les configurations du stimulus et sur les états comportementaux et de perception, ce qui ne pourrait être obtenu en analysant les réponses neuronales individuelles de manière séquentielle. La variable pertinente contenant cette information additionnelle est la synchronisation assez rigoureuse d'une fraction des décharges constituant les réponses respectives. Les données indiquent en outre que les réponses possédant des périodes d'enregistrement de synchronisation ont une plus grande probabilité d'être traitées plus avant et éventuellement d'être perçues consciemment.

Le caractère général de la synchronisation neuronale

Les études des modalités sensorielles autres que visuelles et celles du système moteur montrent que le caractère synchrone et l'activité oscillatoire sont des phénomènes très généraux dans le système nerveux. La synchronisation intervient dans une gamme variée de bandes de fréquence et on l'a trouvée dans toutes les modalités sensorielles. La synchronisation dans la zone des hautes fréquences (oscillations bêta et gamma) a été observée dans le système olfactif, le cortex auditif, le système somatosensoriel, le cortex préfrontal, le cortex moteur et l'hippocampe (Singer, 2004).

La synchronisation semble également jouer un rôle dans la liaison entre les groupes corticaux et les structures cibles sous-corticales tel le colliculus supérieur. Cette possibilité est suggérée par l'existence de parentés temporelles précises entre les décharges des neurones des aires du cortex visuel et le colliculus supérieur (Brecht et al., 1998). Dans ces expériences, on a pu montrer que les interactions corticotectales sont fortement dépendantes de la cohérence temporelle de l'activité corticale. Si les neurones corticaux s'engagent dans une activité oscillatoire soit avec des partenaires situés au sein de la même aire corticale soit avec des cellules d'autres zones corticales, leurs impacts sur les cellules tectales sont augmentés indiquant que les cellules tectales sont mobilisées plus efficacement par l'activité corticale synchrone qu'asynchrone. Cette découverte est cohérente avec l'idée selon laquelle l'organisation temporelle des schémas d'activité joue un rôle important dans la définition de ce que produit le cortex.

En outre, il existe des indices qui suggèrent que des phénomènes comparables de synchronisation sont retrouvés dans un grand nombre de systèmes fonctionnels différents. Ainsi, il semble justifié de généraliser les résultats obtenus sur le cortex visuel et de suggérer que la coordination temporelle des décharges peut être généralement pertinente pour décrire le traitement de l'information neurale. Fait important, il existe maintenant un faisceau abondant d'arguments convergeant vers l'existence d'une synchronisation précise telle que celle qui est associée aux oscillations dans les bandes bêta et gamma dans le cerveau humain. Les études des EEG et MEG ont fourni des preuves que ces oscillations de hautes fréquences sont liées aux fonctions cognitives telles que la reconnaissance de forme, la recherche visuelle, la concentration, la mémoire à long terme et à court terme et la perception consciente (voir Tallon-Baudry et Bertrand, 1999 ; Varela et al., 1999 a,b ; Tononi et al., 1998).

Conclusion

L'hypothèse proposée est basée sur les suppositions suivantes :

- 1) La conscience phénoménale résulte de la formation de méta-représentations.
- 2) Celles-ci sont réalisées par l'addition d'aires d'ordre supérieur qui procèdent au même traitement des sorties issues des aires inférieures que celles-ci de leurs propres entrées.
- 3) Pour rendre compte de la flexibilité combinatoire nécessaire, ces méta-représentations sont probablement constituées des réponses de groupes de neurones distribués, liés dynamiquement plutôt que des réponses de cellules individuelles spécialisées.
- 4) La sélection et le mécanisme de liaison des neurones en groupes et d'étiquetage de leurs réponses comme liées provient de la synchronisation transitoire des décharges avec une précision de l'ordre de la milliseconde.
- 5) La formation de groupes cellulaires synchronisés, associés dynamiquement, nécessite des états cérébraux activés caractérisés par des EEG « désynchronisés » ; elle est facilitée par les mécanismes attentionnels.

Les données exposées ci-dessus sont favorables à ces hypothèses et elles définissent les conditions qui doivent être remplies pour permettre une expérience consciente.

Evidemment, pour qu'un contenu soit perçu consciemment il est nécessaire que les neurones codant ce contenu soient actifs. Cependant en mesurant les réponses de neurones individuels, il est impossible de décider si l'enregistrement d'une réponse est une condition simplement nécessaire ou s'il s'agit d'une condition suffisante pour qu'il y ait expérience consciente. Si les neurones d'une chaîne particulière de transmission cessent de répondre, le contenu acheminé par ce groupe de neurones ne peut être perçu. De ce fait, les corrélations entre conscience perceptive et réponses cellulaires montrent seulement que les décharges des cellules à une étape particulière du processus, sont nécessaires pour qu'un contenu particulier atteigne le niveau de conscience. Afin de déterminer si des conditions nécessaires supplémentaires doivent être remplies, telle que par exemple, l'assemblage de ces réponses en groupes neuronaux largement distribués, il faut déterminer les variables qui permettent d'évaluer les niveaux de regroupement au-delà des simples unités. Ceci ne peut être réalisé qu'au moyen de techniques d'enregistrement qui révèlent le profil d'activation spatio-temporel d'un grand nombre de neurones. Dans ce contexte il convient de noter que les méthodes telles que les enregistrements d'EEG et MEG. Celles-ci déterminent les profils globaux d'activation d'un grand nombre de neurones et n'enregistrent que l'activité qui est suffisamment synchrone pour s'additionner en un signal mesurable et se différencier au mieux entre des états cérébraux propices ou non à l'état de conscience. Ceci est en faveur de l'hypothèse selon laquelle la genèse des méta-représentations qui contribuent à l'expérience consciente nécessite une coordination temporelle de l'activité qui va bien au-delà du niveau de la décharge d'une seule cellule. La conscience ne se manifeste que pendant des états cérébraux caractérisés par des EEG « désynchronisés ». Ces états, en retour, favorisent l'apparition d'oscillations de haute fréquence et la synchronisation à distance des réponses neuronales avec une précision de l'ordre de la milliseconde. Il ne semble pas déraisonnable, de ce fait, de persister dans l'hypothèse suivante : Les méta-représentations nécessaires à la manifestation de la conscience consistent en de vastes groupes de neurones distribués de manière diffuse dont le signe caractéristique de liaison est la synchronicité des décharges générées intérieurement.

Références citées

Livres

- Braitenberg, V. (1978) Cell assemblies in the cerebral cortex. In *Architectonics of the Cerebral Cortex. Lecture Notes in Biomathematics 21, Theoretical Approaches in Complex Systems* (eds. Heim, R. and Palm, G.) pp. 171-188. Springer-Verlag.
- Edelman, G.M. (1987) *Neural Darwinism: The Theory of Neuronal Group Selection*. New York: Basic Books.
- Engel, A.K., Fries, P., König, P., Brecht, M. and Singer W. (1999a) Temporal binding, binocular rivalry, and consciousness. *Consciousness Cognition* 8, 128-151.
- Hebb, D. O. (1949) *The Organization of Behavior*. New York: John Wiley & Sons
- Krubitzer, L. (1998) Constructing the neocortex: influence on the pattern of organization in mammals. In *Brain and Mind: Evolutionary Perspectives* (eds. Gazzaniga, M.S. and Altman, J.S.) pp. 19-34. HFSP, Strasbourg.
- Singer, W. (2004) Synchrony, oscillations, and relational codes. Chalupa, L. M. and Werner, J. S. *The Visual Neurosciences*. Cambridge, Massachusetts: The MIT Press, A Bradford Book, pp. 1665-1681.

Articles publiés dans des revues

- Brecht, M., W. Singer and A.K. Engel. (1998) Correlation analysis of corticotectal interactions in the cat visual system. *J. Neurophysiol.*, 79, 2394-2407.
- Engel, A.K., König, P., Kreiter, A.K. and Singer, W. (1991b) Interhemispheric synchronization of oscillatory neuronal responses in cat visual cortex. *Science* 252, 1177-1179.
- Gray, C.M. and Singer, W. (1987) Stimulus-specific neuronal oscillations in the cat visual cortex: a cortical functional unit. *Soc. Neurosci. Abstr.* 13, 1449.
- Gray, C.M. and Singer, W. (1989) Stimulus-specific neuronal oscillations in orientation columns of cat visual cortex. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 86, 1698-1702.
- Herculano-Houzel, S., Munk, M. H. J., Neuenschwander, S. and Singer, W. (1999) Precisely synchronized oscillatory firing patterns require electroencephalographic activation. *J. Neurosci.* 19(10), 3992-4010.
- König, P., Engel, A.K., Löwel, S. and Singer, W. (1993) Squint affects synchronization of oscillatory responses in cat visual cortex. *Eur. J. Neurosci.* 5, 501-508.
- Löwel, S. and Singer, W. (1992) Selection of intrinsic horizontal connections in the visual cortex by correlated neuronal activity. *Science* 255, 209-212.
- Munk, M.H.J., Roelfsema, P.R., König, P., Engel, A.K. and Singer, W. (1996) Role of reticular activation in the modulation of intracortical synchronization. *Science* 272, 271-274.
- Palm, G. (1990) Cell assemblies as a guideline for brain research. *Concepts Neurosci.* 1, 133-147.
- Roelfsema, P.R., Engel, A.K., König, P., and Singer, W. (1997) Visuomotor integration is associated with zero time-lag synchronization among cortical areas. *Nature* 385, 157-161.
- Singer, W. (1995) Development and plasticity of cortical processing architectures. *Science* 270, 758-764.
- Singer, W., Engel, A.K., Kreiter, A.K., Munk, M.H.J., Neuenschwander, S. and Roelfsema, P.R. (1997) Neuronal assemblies: necessity, signature and detectability. *Trends Cog. Sci.* 1(7), 252-261.
- Singer, W. and Gray, C.M. (1995) Visual feature integration and the temporal correlation hypothesis. *Annu. Rev. Neurosci.* 18, 555-586.
- Tallon-Baudry, C. and Bertrand, O. (1999) Oscillatory gamma activity in humans and its role in object representation. *Trends Cogn. Sci.* 3(4), 151-162.
- Tononi, G., Srinivasan, R., Russell, D.P. and Edelman, G.M. (1998) Investigating neural correlates of conscious perception by frequency-tagged neuromagnetic responses. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 95, 3198-3203.
- Varela, F., Lachaux, J.-P., Rodriguez, E. and Martinerie, J. (2001) The brainweb: phase synchronization and large-scale integration. *Nat. Rev. Neurosci.* 2, 229-239.
- Von der Malsburg, C. (1985) Nervous structures with dynamical links. *Ber. Bunsenges. Phys. Chem.* 89, 703-710.

