

PSYCHOLOGIE COGNITIVE EXPÉRIMENTALE

Stanislas DEHAENE

Membre de l'Institut (Académie des sciences),
professeur au Collège de France

Mots-clés : langage, mathématiques, conscience

Les cours et séminaires sont disponibles en audio et en vidéo sur le site internet du Collège de France (<http://www.college-de-france.fr/site/stanislas-dehaene/course-2015-2016.htm> et <http://www.college-de-france.fr/site/stanislas-dehaene/seminar-2015-2016.htm>).

ENSEIGNEMENT

COURS – REPRÉSENTATION CÉRÉBRALE DES STRUCTURES LINGUISTIQUES

S'il existe des systèmes rudimentaires de communication chez les autres animaux, l'utilisation de structures syntaxiques semble bien être l'apanage de l'espèce humaine. Seul *Homo sapiens* parvient à exprimer ses pensées avec précision par le biais de phrases d'une longueur et d'une complexité arbitraires. Le cerveau humain doit donc posséder des architectures neuronales spécifiques qui permettent de représenter les structures de toutes les langues humaines.

L'objectif du cours de 2015-2016 était de passer en revue les connaissances actuelles sur les structures linguistiques et leur mise en relation avec l'architecture du cerveau telle qu'on peut l'étudier par les méthodes de la neuropsychologie ou de l'imagerie cérébrale. Nous nous sommes particulièrement intéressés au domaine de la syntaxe, qui présente la particularité de s'appuyer sur des structures enchâssées sous formes d'arbres hiérarchiques (syntagmes). La formation des syntagmes par le biais d'une opération de fusion (*merge*) et leur déplacement dans la structure hiérarchique par le biais d'une opération de mouvement syntaxique (*move*) sont des propriétés probablement universelles des langues humaines dont nous nous sommes attachés à décomposer les mécanismes cérébraux.

Le cours s'est appuyé sur une série de publications et d'ouvrages de référence, dont les principaux sont :

- Baker M. (2001), *The Atoms of Language*, New York, Basic Books.
- Chomsky N. (1956), « Three models for the description of language », *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 2, n° 3, p. 113-124.
- Dehaene S., Meyniel F., Wacongne C., Wang L. et Pallier C. (2015), « The neural representation of sequences: From transition probabilities to algebraic patterns and linguistic trees », *Neuron*, vol. 88 n° 1, p. 2-19.
- Fitch W.T. (2014), « Toward a computational framework for cognitive biology: unifying approaches from cognitive neuroscience and comparative cognition », *Physics of Life Reviews*, vol. 11, n° 3, p. 329-364.
- Fromkins V., Rodman R. et Hyams N. (2010), *An Introduction to Language*, 9^e édition, Boston (Mass.), Wadsworth Cengage Learning.
- Haegeman L. (2005), *Thinking Syntactically: A Guide to Argumentation and Analysis*, New York, Wiley.
- Hale J. (2015), *Automaton Theories of Human Sentence Comprehension*, Stanford (Californie), Center for the Study of Language and Information.
- Kemmerer D. (2014), *Cognitive Neuroscience of Language*, New York, Psychology Press.
- Lenneberg E. (1967), *Biological Foundations of Language*, New York, Wiley.
- Marcus G.F. (2001), *The Algebraic Mind. Integrating Connectionism & Cognitive Science*, Cambridge (Mass.), MIT Press.
- Moro A. (2008/2015), *The Boundaries of Babel* (2^e édition), Cambridge (Mass.), MIT Press.
- Pinker S. (1995), *The Language Instinct*, Londres, Penguin.
- Sportiche D., Koopman H. et Stabler E. (2013), *An Introduction to Syntactic Analysis and Theory*, Hoboken, Wiley-Blackwell.

Introduction aux structures combinatoires du langage

Karl Lashley avait, dès 1951, souligné que la production et la compréhension des séquences de mots obéissent à une combinatoire complexe et exigent un format de représentation spécifique. Dans un article publié en 2015 dans la revue *Neuron* et intitulé « The neural representation of sequences : From transition probabilities to algebraic patterns and linguistic trees », mes collègues et moi avons passé en revue l'ensemble des mécanismes de représentation cérébrale des séquences temporelles. De nombreuses espèces animales peuvent représenter les probabilités et les délais de transition d'un item à l'autre ; les grouper en blocs (*chunks*) ; représenter leur structure ordinale (1^{er}, 2^e, 3^e) et même repérer des schémas algébriques (AAB). Cependant, aucun de ces mécanismes ne suffit à rendre compte de l'organisation des structures syntaxiques. Celles-ci forment des structures arborescentes enchâssées les unes dans les autres, que l'on appelle des syntagmes (appelées *phrases* en anglais), qui obéissent à des règles récursives bien spécifiques.

Les arguments en faveur de l'existence de ces structures ne manquent pas. Citons d'abord les nombreux cas attestés d'ambiguïté syntaxique, dans lesquels la même séquence de mots peut être représentée par deux enchâssements distincts (par exemple « [black taxi] driver » et « black [taxi driver] ». Même un mot isolé peut être ambigu (par exemple « unlockable » = [un-lock]able, which can be unlocked, ou un[lock-able], which cannot be locked). Ces exemples montrent que le cerveau humain ne s'arrête pas à la séquence superficielle de syllabes ou de mots, mais les recode en utilisant une hiérarchie d'arborescences enchâssées. Un deuxième argument provient de l'observation des ellipses ou des substitutions. Un syntagme se reconnaît au fait

qu'il peut être supprimé ou remplacé par un mot plus court et, dans certaines phrases, on reconnaît les structures enchâssées au fait que chacune d'elles peut être abrégée (par exemple « *he [drove [to [this [big house]]]]* » = « *he drove to this one* », « *he drove to it* », « *he drove there* », « *he did* »). Un troisième argument provient du mouvement syntaxique : les syntagmes peuvent être déplacés hors de leur position d'origine, par exemple lors de la formation de questions, de phrases clivées, etc., mais toujours en respectant l'enchaînement des groupes de mots de la phrase. Enfin, les dépendances à longue distance, qui régissent par exemple l'accord du sujet avec le verbe ou le liage d'un pronom avec un nom, ne peuvent pas être correctement décrites au niveau de la structure séquentielle de la phrase, mais seulement en considérant l'enchaînement de ses syntagmes. Dans « Les voitures qui doublent ce camion roulent trop vite », le verbe s'accorde au pluriel, comme l'exige le sujet « les voitures », sans que l'agrammaticalité de la séquence « ce camion roulent » ne soit même détectée.

L'idée qu'une « structure profonde » arborescente sous-tend la linéarité apparente des phrases possède des racines anciennes. René Descartes observe déjà que seuls les humains savent « user de paroles ou d'autres signes en les composant » (*Discours de la méthode*, 1637). Arnault et Lancelot, dans la *Grammaire de Port-Royal* (1660), soulignent que le langage fait appel à plusieurs niveaux, tous combinatoires : sons et lettres, mais aussi mots, phrases, et discours. Pour Wilhelm von Humboldt (1767-1835), le langage fait « un usage infini de moyens finis ». Ferdinand de Saussure (1857-1913) fait de la linéarité du langage son second principe (« Le signifiant, étant de nature auditive, se déroule dans le temps seul »), mais il souligne immédiatement qu'en dépit de cette linéarité, les mots forment des syntagmes enchâssés à plusieurs niveaux :

La notion de syntagme s'applique non seulement aux mots, mais aux groupes de mots, aux unités complexes de toute dimension et de toute espèce (mots composés, dérivés, membres de phrase, phrases entières).

Enfin Lucien Tesnière (1893-1954) introduit une représentation explicite de la phrase sous forme d'arbre hiérarchique.

Ces idées sont reprises et étendues par Noam Chomsky, pour qui la propriété essentielle de la faculté de langage est l'« infinité discrète » (*discrete infinity*) – la capacité, propre à l'espèce humaine, de former des représentations symboliques en les enchâssant de façon récursive pour composer des objets de pensée de complexité arbitraire :

Le langage est, par essence, un système à la fois digital et infini. À ma connaissance, aucun autre système biologique ne possède de telles propriétés (Chomsky, 1991).

La linguistique formelle n'a pas cessé d'évoluer depuis les années 1950, au rythme des avancées majeures dans la sophistication des observations en linguistique comparée, et l'on peut distinguer au moins trois générations de théories chomskyennes :

(1) la grammaire transformationnelle, dotée de règles de réécriture : dès 1956, Chomsky introduit la théorie des langages formels et démontre la nécessité d'une représentation enchâssée : la structure linéaire ou associative postulée par Skinner ne suffit pas ;

(2) la théorie des principes et des paramètres (1981) : face à la multiplication de règles *ad hoc* propres à chaque langue, Chomsky, avec Luigi Rizzi, tente d'identifier des *principes universels*, communs à toutes les langues du monde, et des *variations paramétriques* minimales qui les distinguent ;

(3) le programme minimaliste (1993) : Chomsky postule que tous les syntagmes sont issus de l'application répétée et récursive d'une seule opération, *merge* (fusion) qui, à partir de deux éléments quelconques, produit une paire étiquetée mais non-ordonnée.

Les neurosciences doivent-elles prendre au sérieux les postulats de la linguistique ? Il me semble que oui, non seulement à cause de la rigueur des raisonnements sur lesquels elle s'appuie, mais aussi pour une raison historique : dans de nombreux domaines des sciences cognitives, ce sont toujours les sciences du comportement qui, les premières, dégagent les principes théoriques fondamentaux, bien avant que les neurosciences n'en dissèquent les mécanismes. J'ai présenté dans le cours l'exemple de la théorie phonologique, développée initialement par Roman Jakobson, Nikolai Trubetzkoy et l'École de Prague. Les nombreux postulats de cette théorie, et notamment l'existence de traits phonologiques (*features*) discrets, orthogonaux, et dont la combinatoire engendre l'ensemble des phonèmes des langues humaines, sont aujourd'hui en partie validés par de remarquables enregistrements intracrâniens réalisés par Eddie Chang et ses collègues. Il nous faut donc, de la même manière, nous pencher sur les mécanismes cérébraux des opérations syntaxiques. L'existence d'une représentation arborescente et enchâssée des phrases peut-elle être confirmée au niveau cérébral ? Quelles sont les aires cérébrales impliquées ? Comment cette représentation est-elle codée au niveau neuronal ? Comment est-elle calculée en temps réel lors de l'écoute d'une phrase ?

La découverte d'une spécialisation cérébrale pour les opérations linguistiques

Historiquement, c'est la neuropsychologie, c'est-à-dire l'étude des conséquences des lésions cérébrales, qui a permis les premières avancées dans la compréhension des mécanismes cérébraux des opérations linguistiques. Les premières observations conduisent rapidement à une dissociation entre l'aphasie de Broca avec agrammatisme, dans laquelle on note un déficit massif de l'articulation et de l'organisation syntaxique de la phrase, et l'aphasie de Wernicke, dans laquelle ces fonctions peuvent être largement préservées. Dès les premières études de Paul Broca, la troisième circonvolution frontale inférieure de l'hémisphère gauche (« aire de Broca ») apparaît essentielle pour la production du langage articulé. Cependant, l'idée ancienne selon laquelle cette région n'intervient que dans la production du langage est aujourd'hui invalidée : les patients avec une aphasie de Broca éprouvent également des difficultés considérables à comprendre l'organisation des phrases qu'ils entendent, même dans des tâches qui n'exigent aucune production de parole. La compréhension et la manipulation des phrases sémantiquement réversibles, du type « le chat que le chien mord est noir », dans lesquelles seule la syntaxe permet de savoir qui fait quoi à qui, leur posent de grandes difficultés. Caramazza et Zurif (1976) concluent que « chez les aphasiques "de Broca", le déficit affecte un mécanisme général de traitement du langage, impliqué dans la syntaxe aussi bien en compréhension qu'en production ».

Le rôle crucial de la région frontale inférieure gauche, mais aussi des régions supérieures du lobe temporal gauche, est rapidement confirmé, d'abord par la stimulation corticale directe, pratiquée au cours d'une intervention chirurgicale, puis par les premières études d'imagerie cérébrale en caméra à positons. L'IRM fonctionnelle contemporaine permet aujourd'hui d'identifier ces réseaux du langage en quelques minutes, par exemple en contrastant l'écoute d'une langue connue et

celle d'une langue inconnue, ou en examinant quelles aires cérébrales se synchronisent, dans les cerveaux de deux personnes qui écoutent le même texte. Au sein de ce vaste ensemble de régions, la complexité syntaxique des phrases module spécifiquement l'activité de la région frontale inférieure gauche (l'aire de Broca) et d'une région postérieure du sillon temporal supérieur gauche. Ces deux régions apparaissent systématiquement activées dès qu'une personne doit manipuler mentalement des arbres syntaxiques de complexité variable.

L'instinct du langage ? Précocité et automaticité des opérations linguistiques

Les circuits cérébraux impliqués dans le traitement syntaxique forment-ils un « module » au sens de Fodor (1983) ? Ils vérifient indubitablement plusieurs critères de modularité. Non seulement leur architecture neurale est fixe et reproductible d'un individu à l'autre ; mais leur développement est rapide et propre à l'espèce humaine. Des recherches récentes suggèrent que l'on peut, à la suite de Steven Pinker, parler d'un « instinct du langage » ou, avec Chomsky, d'un *language acquisition device* qui permet au très jeune enfant de faire sienne n'importe quelle langue du monde.

Dès la naissance, en effet, les bébés préfèrent écouter leur langue maternelle plutôt qu'une langue étrangère. À deux mois, l'imagerie cérébrale montre que l'écoute de la langue maternelle active déjà un réseau spécifique de l'hémisphère gauche, proche de celui de l'adulte. La phonologie de la langue maternelle se stabilise aux alentours de six mois pour les voyelles et de douze mois pour les consonnes. Dès six mois, les enfants comprennent des mots très fréquents (biberon, pied, manger, etc.). Vers la fin de la première année de vie, les enfants commencent à repérer et à utiliser les mots grammaticaux. Ils les repèrent sur la base de leur fréquence élevée, de leur longueur et de leur présence aux frontières prosodiques. Les enfants de 11 mois distinguent déjà les déterminants (le, la, des...) et les pronoms (il, elle, ma, sa...) les plus fréquents, et ils les utilisent pour repérer les noms et les verbes et pour les segmenter. Chez le bébé, la compréhension précède de beaucoup la production du langage. Cependant, dès 20 mois, lorsque l'enfant produit ses premiers syntagmes de deux ou trois mots, il en respecte la grammaire. Il est remarquable, par exemple, que l'enfant place la négation à bon escient, c'est-à-dire avant un verbe à la forme infinitive (« pas manger »), mais après un verbe conjugué (« mange pas »). La grammaire de l'enfant n'est pas identique à celle de l'adulte, mais le linguiste Luigi Rizzi fait l'hypothèse que les productions des enfants correspondent à une version tronquée des mêmes structures arborescentes.

Les toutes premières années de la vie constituent une période critique pour l'acquisition de la syntaxe de la langue maternelle. Dans une étude remarquable, Naama Friedmann montre que des enfants carencés en thiamine (vitamine B1) pendant quelques semaines au cours de la première année de vie souffrent, des années plus tard, de déficits majeurs de compréhension et de production des structures qui impliquent un mouvement syntaxique. Ces résultats, qui soutiennent l'existence d'une période critique, sont convergents avec d'autres études menées chez les enfants « sauvages » ou maltraités, ainsi que chez les enfants sourds appareillés : seuls les enfants implantés avant l'âge d'un an présentent des performances linguistiques normales.

L'imagerie cérébrale à l'âge adulte confirme également la spécialisation d'une partie de la région de Broca pour l'acquisition du langage. Si l'on enseigne à des

adultes de nouvelles règles linguistiques, dont certaines seulement respectent la structure arborescente commune à toutes les langues humaines, seul l'apprentissage de ces dernières s'accompagne d'un accroissement progressif de l'activité de l'aire de Broca. Les travaux les plus récents du laboratoire montrent que l'acquisition de règles numériques ou mathématiques, y compris chez les mathématiciens professionnels, ne fait pas appel aux réseaux cérébraux du langage. Il existe ainsi une double dissociation entre le traitement du langage naturel et celui du langage mathématique.

Enfin, plusieurs expériences montrent que le traitement de la syntaxe des phrases peut s'effectuer en l'absence de conscience. Le réseau des aires du langage présente donc des propriétés d'encapsulation, d'automatisation, de spécialisation fonctionnelle et d'acquisition rapide qui en font un bon exemple de modularité selon la définition qu'en donne Fodor (1983).

Décomposition anatomique et fonctionnelle des aires du langage

Quelle est l'organisation anatomique et fonctionnelle des aires cérébrales impliquées dans la représentation des structures linguistiques ? Les aires cérébrales activées au cours du traitement des phrases sont aujourd'hui connues dans leurs grandes lignes : il s'agit de la circonvolution frontale inférieure gauche et d'un chapelet de régions situées dans la profondeur du sillon temporal supérieur. Une activation est également observée dans d'autres régions dorsales (cortex prémoteur), mésales (précuneus), et sous-corticales (putamen gauche). Ces régions sont coactivées et leur activité est fortement intercorrélée au cours du traitement des phrases. Les régions temporales et frontale inférieure sont interconnectées anatomiquement par le faisceau arqué (particulièrement développé et asymétrique chez l'homme par rapport à d'autres espèces de primates), le faisceau unciné et la capsule extrême.

Diverses expériences ont tenté de préciser si un sous-ensemble de ce réseau s'intéresse particulièrement aux structures syntaxiques arborescentes. Leurs résultats pointent vers la partie postérieure du sillon temporal supérieur (pSTS) et la partie triangulaire du gyrus frontal inférieur (IFGtri). L'ambiguïté syntaxique, par exemple, accroît spécifiquement l'activité de ces régions. Il en va de même lorsque la tâche impose une manipulation des arbres syntaxiques pour déterminer qui fait quoi à qui (par exemple : « le camion qui double la voiture est rouge » → qu'est-ce qui est rouge ?).

Le modèle « Memory, Unification, Control » proposé par Peter Hagoort postule que les aires du langage abritent au moins trois circuits parallèles correspondant aux trois principaux niveaux de représentation combinatoire du langage : phonologie, syntaxe et sémantique. Dans chacun de ces circuits, des secteurs distincts de la région frontale inférieure gauche interviendraient pour *unifier* les objets codés par les aires temporales et pariétales postérieures sous forme d'arbres cohérents.

Plus récemment, des micro-territoires corticaux ont été identifiés pour le codage des rôles thématiques de la phrase. Lors de la lecture d'une phrase active ou passive comme « the grandfather kicked the baby », l'agent, le verbe et le patient seraient codés dans des micro-secteurs distincts du cortex temporal, en sorte que l'IRM fonctionnelle permette de les décoder et d'identifier, à partir de leur configuration d'activité, qui est l'auteur de l'action et à qui elle a été faite. Reste à comprendre

comment plusieurs syntagmes peuvent être enchâssés, par exemple en présence d'une proposition relative.

Représentation cérébrale des syntagmes

Afin d'identifier les aires cérébrales impliquées dans la formation des syntagmes, avec Christophe Pallier, nous avons étudié comment l'activité cérébrale varie avec la complexité des structures syntaxiques. Nous avons créé un jeu de stimuli dont le nombre de mots est fixe, mais dont la taille des syntagmes varie. En mesurant l'activité cérébrale en IRM fonctionnelle alors que les participants lisaient ces séries de mots, nous avons identifié un réseau cérébral dont l'activité croît avec la taille des syntagmes. Ce réseau comprend quatre régions situées le long du sillon temporal supérieur gauche, deux régions dans le gyrus frontal inférieur gauche (aire de Broca) ainsi que le putamen gauche. Une fraction de ce réseau continue de s'activer lorsque les mots à contenu sont remplacés par des pseudo-mots équivalents, formant une version expérimentale du célèbre poème *Jabberwocky* de Lewis Carroll. Il s'agit, à nouveau, des aires pSTS et IFGtri, ce qui suggère que ces aires implémentent un calcul syntaxique qui continue de fonctionner même en l'absence d'informations lexico-sémantiques.

Ces résultats ont été répliqués et étendus dans de nombreuses expériences récentes, en langage oral ou écrit, et même en langue des signes. Ils conduisent à distinguer deux réseaux impliqués dans la combinatoire des mots du langage. Les combinaisons syntaxiques de deux mots (par exemple un pronom et un verbe conjugué, « *he plays* ») suffisent à activer le noyau de régions syntaxiques (pSTS + IFGtri). Les combinaisons sémantiques, du type adjectif + nom (« *red boat* ») ou nom + nom (« *plaid jacket* »), activent plutôt le pôle temporal ou le gyrus angulaire.

Dynamique de la formation des syntagmes

Le profil d'activation de ces régions en IRM fonctionnelle fournit plusieurs indices importants sur la nature du code neural des phrases. L'activation varie de façon logarithmique avec la taille des syntagmes, aussi bien dans son intensité que dans sa phase. On observe également, à mesure que croît la complexité des syntagmes, un délai croissant de l'activation cérébrale, notamment dans la région frontale inférieure gauche. Ce résultat suggère que le réseau d'aires cérébrales effectue des calculs pendant une durée croissante et qui s'étend probablement après la fin de la présentation de la phrase. Cette organisation systématique des délais d'activation est déjà présente chez le bébé de quelques mois. Elle suggère qu'une succession hiérarchique d'aires cérébrales, avec des constantes d'intégration de plus en plus lentes, intègre en cascade les signaux linguistiques issus de l'aire auditive primaire. Différentes régions semblent être « accordées » à des structures linguistiques de plus en plus grandes. L'accès au sens des phrases et des textes se produit au plus haut niveau de cette hiérarchie, dans les régions frontales latérales et pariétales inférieures bilatérales ainsi que dans le précuneus.

Pour préciser la vitesse de traitement des phrases, nous avons étudié en IRM fonctionnelle l'activité cérébrale évoquée par l'écoute ou la lecture de phrases présentées à un rythme accéléré. Les résultats suggèrent que seules les aires les plus périphériques de ce réseau peuvent accélérer leur traitement. Au contraire, les aires impliquées dans le traitement des syntagmes semblent former un goulot

d'étranglement dont la lenteur expliquerait la perte soudaine d'intelligibilité des phrases au-delà d'un seuil de l'ordre de 100 millisecondes par mot.

La magnéto-encéphalographie permet de suivre l'évolution de l'activité cérébrale au fil de chacun des mots d'une phrase. On observe une augmentation progressive de la puissance dans les fréquences thêta (4-7 Hz) et bêta (13-18 Hz). Ces phénomènes, encore mal compris, suggèrent que le cerveau pourrait utiliser des boucles opérant dans ces bandes de fréquences pour accumuler les informations sur les mots. Par ailleurs, Ding et ses collaborateurs ont observé que la structure en syntagmes se reflète directement dans le domaine spectral : lorsqu'un sujet écoute une phrase formée de deux syntagmes de deux mots (par exemple [*the sky*] [*is blue*]), le spectre de puissance des signaux magnéto-encéphalographiques montre des pics à la moitié et au quart de la fréquence de présentation des mots individuels, qui reflètent respectivement les syntagmes de deux et de quatre mots. À l'avenir, cette technique spectrale pourrait jouer un rôle essentiel dans l'identification des syntagmes et de leurs bases cérébrales.

Réalité neurophysiologique du concept de mouvement syntaxique

Outre le concept de syntagme, pratiquement toutes les théories syntaxiques postulent l'existence de transformations syntaxiques qui permettent de déplacer un syntagme loin de sa position initiale. Ainsi, dans la phrase « voici le facteur que le chien a mordu », l'objet « le facteur » s'est déplacé hors de sa position initiale, l'objet du verbe mordre. Les linguistes supposent que le syntagme déplacé laisse, à son point de départ, une sorte de pointeur (*trace* ou *gap*).

La technique d'amorçage intermodal a été utilisée par David Swinney pour démontrer la réalité psychologique du concept de trace. Pendant l'écoute d'une phrase parlée, au moment de la trace (ici, après « mordu »), on observe un amorçage d'un mot présenté visuellement et relié à l'antécédent de la trace (dans notre exemple, le mot « facteur » amorcerait un mot comme « courrier »). Il y aurait donc une réactivation interne de l'antécédent, causée par la trace.

Les linguistes distinguent différents types de mouvement syntaxique, tels que le mouvement « que » (*wh-movement*) pour la formation des questions, des relatives, ou la topicalisation ; le mouvement verbal (*verb-to-C*) ; et le mouvement argumental (*A-movement*) utilisé dans les verbes inaccusatifs. Les études de Naama Friedmann sur l'acquisition de ces structures chez l'enfant et sur les erreurs de patients agrammatiques confirment que ces différents mouvements font appel à des niveaux hiérarchiques distincts de l'arbre syntaxique. La neuro-imagerie confirme que le mouvement syntaxique fait, une fois de plus, appel au « noyau syntaxique » que forment les régions pSTS et IFGtri.

En conclusion, ce circuit pSTS-IFGtri semble jouer un rôle essentiel dans la représentation cérébrale des arbres syntaxiques. En effet, il s'active à chaque fois que le cerveau humain représente ou manipule un arbre linguistique, en proportion du nombre d'enchâssements (opération *merge*) et de la présence de mouvements syntaxiques (opération *move*). Son activité reflète également la présence d'ambiguïtés syntaxiques et la nécessité d'explorer l'arbre syntaxique. Il intervient à chaque fois qu'un bébé, un enfant ou un adulte apprend une langue naturelle, y compris la langue des signes. Enfin, sa lésion entraîne un agrammatisme qui se traduit par l'incapacité de produire ou de comprendre des structures syntaxiques complexes.

SÉMINAIRE – COGNITION ANIMALE

En complément du cours, le séminaire a porté sur les avancées récentes dans le domaine de la cognition animale. Sept conférenciers invités ont exposé leurs travaux. Tous utilisent une approche d'éthologie expérimentale, qui consiste à évaluer les capacités cognitives des animaux en les plaçant dans des situations expérimentales contrôlées (en liberté ou en laboratoire). L'examen de leur comportement permet de mettre en évidence des opérations mentales d'une complexité souvent insoupçonnée. Le débat a naturellement porté sur l'existence d'une limite nette avec les capacités cognitives humaines, notamment dans le domaine de la communication et de la syntaxe.

- 5 janvier 2016 : Irene Pepperberg (Harvard) : « Cognitive and communicative abilities of Grey Parrots » ;
- 12 janvier : Martin Giurfa (CNRS - université de Toulouse) : « La cognition dans un mini cerveau : ce que nous apprend le cerveau d'une abeille » ;
- 19 janvier : Tecumseh Fitch (université de Vienne) : « Towards a computational framework for comparative studies of sequence and syntax » ;
- 26 janvier : Joël Fagot (CNRS et université d'Aix-en-Provence) : « Les mécanismes de l'analogie chez le babouin » ;
- 2 février : Klaus Zuberbühler (université de St Andrews) : « Communication and elementary syntax in non-human primates » ;
- 9 février : Josep Call (université de St Andrews) : « When math trumps logic: an ape perspective » ;
- 16 février : Matthew Rushworth (université d'Oxford) : « Brain mechanisms of social cognition in human and non-human primates ».

COURS À L'EXTÉRIEUR (UNIVERSITÉ DE HONG KONG) – LA REPRÉSENTATION CÉRÉBRALE DU LANGAGE

Un séjour d'une semaine à l'université de Hong Kong (HKU) a été l'occasion de partager les travaux récents du laboratoire, d'une part sur la singularité du cerveau humain dans le domaine de la représentation du langage parlé, et d'autre part des transformations qu'induit l'apprentissage de la lecture sur ces réseaux cérébraux. Deux cours ont été donnés.

Elementary mechanisms of sequence and syntax in human and non-human primates

How do human representational capacities differ from those of other species? Language, music and mathematics are prime examples of domains that seem uniquely developed in humans. Hauser, Chomsky and Fitch hypothesized that they reflect a human-specific ability to represent recursive or nested structures. In this lecture, I will present recent fMRI data from my laboratory exploring the issue of human uniqueness for language and mathematics. In the first part, I will present human fMRI data suggesting that linguistic and mathematical structures involve parallel circuits passing through distinct sectors of inferior frontal cortex. In the second part, I will describe our efforts to reduce the complexity of these tasks by studying the encoding of abstract auditory patterns in human adults, infants, and macaque monkeys. fMRI studies in monkeys and humans suggest that both species possess dissociable dorsal and ventral circuitry for number and sequence patterns,

but that only humans assemble both sources of information into a single integrative representation in bilateral inferior frontal gyrus.

The multiple effects of literacy on the brain

The acquisition of literacy transforms the human brain. By reviewing studies of illiterate subjects, we propose specific hypotheses concerning the core brain systems whose previous function is partially reoriented or “recycled” when learning to read. Literacy acquisition improves early visual processing and reorganizes the ventral occipito-temporal pathway: a left region increases its response to written characters, while responses to faces shift towards the right hemisphere. Literacy also modifies phonological coding and strengthens the functional and anatomic link between phonemic and graphemic representations. Literacy acquisition therefore provides a remarkable example of how the brain reorganizes to accommodate a novel cultural skill.

RECHERCHE

Mon équipe de recherche analyse la singularité du cerveau humain, c’est-à-dire les mécanismes cérébraux des activités cognitives qui sont particulièrement développées dans l’espèce humaine, telles que le traitement du langage parlé ou écrit, les mathématiques, la manipulation consciente des informations.

TRAITEMENT DU LANGAGE PARLÉ ET ÉCRIT

Depuis plusieurs années, nous menons des expérimentations sur l’organisation des aires du langage chez le volontaire sain, grâce à l’IRM fonctionnelle. Plus récemment, nous avons lancé une vaste expérimentation visant à obtenir des signaux intracrâniens de très haute résolution spatiale et temporelle dans les aires du langage. Nous avons monté un réseau international de centres spécialisés dans l’enregistrement SEEG ou ECOG chez les patients épileptiques (Salpêtrière, Boston, Stanford). Ces centres nous ont envoyé des enregistrements effectués pendant que les patients lisaient des phrases en français ou en anglais, dont la complexité syntaxique était contrôlée par un logiciel spécifique. Ces observations ont révélé que la structure syntagmatique des phrases se reflète dans le spectre de puissance des signaux issus des aires temporelles supérieures et frontale inférieure gauche (activité dans la bande gamma). À chaque mot supplémentaire, l’activité augmente, mais elle diminue ensuite soudainement dès que les mots peuvent être intégrés en un syntagme nominal ou verbal. Ce résultat novateur confirme que ces régions font appel à une représentation sous forme de syntagmes enchâssés, comme le suggéraient de nombreux débats en linguistique formelle.

Les travaux du laboratoire sur la lecture des mots et des phrases se poursuivent également, avec notamment un grand travail en cours de finalisation sur l’évolution longitudinale des réponses cérébrales chez l’enfant qui apprend à lire (collaboration avec G. Dehaene-Lambertz), et d’autres travaux sur l’organisation des activations chez les illettrés, ou sur l’interaction entre l’apprentissage de la lecture et celui de la musique (collaboration avec L. Cohen). Un logiciel d’aide à l’apprentissage de la lecture, ELAN, a été développé et commence à être mis à l’épreuve dans les classes (travaux de Cassandra Potier-Watkins).

MÉCANISMES CÉRÉBRAUX DES OPÉRATIONS MATHÉMATIQUES

Dans le cadre de la thèse de Marie Amalric, nous avons étudié, pour la première fois, les aires cérébrales impliquées dans la réflexion mathématique de haut niveau. Notre but était de répondre à la question classique de l'implication du langage dans le raisonnement mathématique. Nous avons scanné en IRM fonctionnelle quinze mathématiciens professionnels alors qu'on leur demandait de réfléchir à des affirmations mathématiques et non mathématiques de haut niveau. Lorsque la réflexion portait sur des objets mathématiques, un réseau dorsal pariétal et frontal était activé, réseau qui ne présentait aucun recouvrement avec les aires du langage. À l'inverse, lorsqu'on demandait de réfléchir à un problème d'histoire ou de géographie, le réseau qui s'activait était complètement différent des régions mathématiques et impliquait certaines aires du langage. Ces résultats, publiés sous forme d'un article inaugural dans la revue de l'Académie des sciences américaine, concordent avec d'autres observations, par exemple le fait que certains patients aphasiques puissent encore faire du calcul et de l'algèbre.

Le réseau d'aires cérébrales mis à jour dans cette étude n'est pas seulement impliqué dans les mathématiques de très haut niveau, mais également dans le traitement du nombre et du calcul mental. Nous avons d'ailleurs pu observer qu'il s'activait également en réponse à la simple vue de nombres ou de formules mathématiques, et que ces activations étaient amplifiées chez les mathématiciens professionnels par rapport à un groupe contrôle de chercheurs de même niveau universitaire, mais sans formation scientifique. Ces résultats confortent le modèle du *recyclage neuronal*, selon lequel l'apprentissage d'activités culturelles nécessite la réorientation de réseaux corticaux universels, anciens dans l'évolution, et impliqués dans une fonction proche (ici, le sens du nombre).

Ces travaux se poursuivent dans plusieurs directions : réplication et extension de ces résultats, notamment chez trois mathématiciens aveugles (thèse de Marie Amalric) ; examen de la dynamique de ces réseaux lors de calculs élémentaires, à l'aide de signaux de magnéto-encéphalographie et d'enregistrements intracrâniens (thèse de Pedro Pinheiro-Chagas) ; analyse comportementale de la représentation des nombres à plusieurs chiffres (thèse de Dror Dotan) ; et modélisation mathématique des réseaux de neurones impliqués dans le sens du nombre chez l'enfant et l'animal (travaux de Thomas Hannagan).

MÉCANISMES DE L'ACCÈS À LA CONSCIENCE

Le laboratoire travaille toujours sur les mécanismes cérébraux qui permettent de prendre conscience d'une information élémentaire, telle qu'une image, un mot ou un chiffre. La magnéto-encéphalographie a permis de mesurer, très précisément, les étapes de traitement non-conscient et le moment de l'accès à la conscience. Les théories de l'accès à la conscience ont été remises en question et précisées par les recherches de Jean-Rémi King sur une forme de « mémoire de travail non-consciente ». Ce travail se poursuit avec la thèse de Darinka Trübutschek. Les travaux de Sébastien Marti, quant à eux, ont mis en évidence un délai massif de l'accès à la conscience lorsqu'une personne tente d'effectuer deux tâches simultanément. Enfin, l'organisation de l'activité cérébrale pendant le sommeil,

ainsi que chez les patients en coma ou en état végétatif, continue de nous aider à préciser la nature des signatures neuronales de la conscience – sujet de mon livre récent *Le Code de la conscience* (Odile Jacob, 2014).

PUBLICATIONS

- AMALRIC M. et DEHAENE S., « Origins of the brain networks for advanced mathematics in expert mathematicians », *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 113, n° 18, 2016, p. 4909-4917, DOI : 10.1073/pnas.1603205113.
- CHANG C.H.C., PALLIER C., WU D.H., NAKAMURA K., JOBERT A., KUO W.-J. et DEHAENE S., « Adaptation of the human visual system to the statistics of letters and line configurations », *NeuroImage*, vol. 120, 2015, p. 428-440, DOI : 10.1016/j.neuroimage.2015.07.028.
- CHARLES L., GAILLARD R., AMADO I., KREBS M.-O., BENDJEMAA N. et DEHAENE S., « Conscious and unconscious performance monitoring: Evidence from patients with schizophrenia », *NeuroImage*, vol. 144, 2017, p. 153-163, DOI : 10.1016/j.neuroimage.2016.09.056.
- COHEN L., DEHAENE S., MCCORMICK S., DURANT S. et ZANKER J.M., « Brain mechanisms of recovery from pure alexia: A single case study with multiple longitudinal scans », *Neuropsychologia*, vol. 91, 2016, p. 36-49, DOI : 10.1016/j.neuropsychologia.2016.07.009.
- DEHAENE S., DUDAI Y. et KONEN C., « Cognitive architectures », *Neuron*, vol. 88, n° 1, 2015, p. 1, DOI : 10.1016/j.neuron.2015.09.046.
- DEHAENE S., MEYNIEL F., WACONGNE C., WANG L. et PALLIER C., « The neural representation of sequences: From transition probabilities to algebraic patterns and linguistic trees », *Neuron*, vol. 88, n° 1, 2015, p. 2-19, DOI : 10.1016/j.neuron.2015.09.019.
- DOTAN D. et DEHAENE S., « On the origins of logarithmic number-to-position mapping. », *Psychological Review*, vol. 123, n° 6, 2016, p. 637-666, DOI : 10.1037/rev0000038.
- GOMEZ A., PIAZZA M., JOBERT A., DEHAENE-LAMBERTZ G., DEHAENE S. et HURON C., « Mathematical difficulties in developmental coordination disorder: Symbolic and nonsymbolic number processing », *Research in Developmental Disabilities*, vol. 43-44, 2015, p. 167-178, DOI : 10.1016/j.ridd.2015.06.011.
- HANNAGAN T., AMEDI A., COHEN L., DEHAENE-LAMBERTZ G. et DEHAENE S., « Origins of the specialization for letters and numbers in ventral occipitotemporal cortex », *Trends in Cognitive Sciences*, vol. 19, n° 7, 2015, p. 374-382, DOI : 10.1016/j.tics.2015.05.006.
- HUNG Y.-H., PALLIER C., DEHAENE S., LIN Y.-C., CHANG A., TZENG O.J.-L. et WU D.H., « Neural correlates of merging number words », *NeuroImage*, vol. 122, 2015, p. 33-43, DOI : 10.1016/j.neuroimage.2015.07.045.
- KING J.-R., PESCELELLI N. et DEHAENE S., « Brain mechanisms underlying the brief maintenance of seen and unseen sensory information », *Neuron*, vol. 92, n° 5, 2016, p. 1122-1134, DOI : 10.1016/j.neuron.2016.10.051.
- MARTI S., KING J.-R. et DEHAENE S., « Time-resolved decoding of two processing chains during dual-task interference », *Neuron*, vol. 88, n° 6, 2015, p. 1297-1307, DOI : 10.1016/j.neuron.2015.10.040.
- MONGELLI V., DEHAENE S., VINCKIER F., PERETZ I., BARTOLOMEO P. et COHEN L., « Music and words in the visual cortex: The impact of musical expertise », *Cortex*, vol. 86, 2017, p. 260-274, DOI : 10.1016/j.cortex.2016.05.016.
- MOUTARD C., DEHAENE S. et MALACH R., « Spontaneous fluctuations and non-linear ignitions: Two dynamic faces of cortical recurrent loops », *Neuron*, vol. 88, n° 1, 2015, p. 194-206, DOI : 10.1016/j.neuron.2015.09.018.

NACCACHE L., KING J.-R., SITT J., ENGEMANN D., EL KAROUI I., ROHAUT B., FAUGERAS F., CHENNU S., STRAUSS M., BEKINSCHTEIN T. et DEHAENE S., « Neural detection of complex sound sequences or of statistical regularities in the absence of consciousness? », *Brain*, vol. 138, n° 12, 2015, e395-e395, DOI : 10.1093/brain/awv190.

NACCACHE L., SITT J., KING J.-R., ROHAUT B., FAUGERAS F., CHENNU S., STRAUSS M., VALENTE M., ENGEMANN D., RAIMONDO F., DEMERTZI A., BEKINSCHTEIN T. et DEHAENE S., « Reply: Replicability and impact of statistics in the detection of neural responses of consciousness », *Brain*, vol. 139, n° 6, 2016, e31-e31, DOI : 10.1093/brain/aww060.

SUN Z.Y., PINEL P., RIVIÈRE D., MORENO A., DEHAENE S. et MANGIN J.-F., « Linking morphological and functional variability in hand movement and silent reading », *Brain Structure and Function*, vol. 221, n° 7, 2016, p. 3361-3371, DOI : 10.1007/s00429-015-1106-8.

UHRIG L., JANSSEN D., DEHAENE S. et JARRAYA B., « Cerebral responses to local and global auditory novelty under general anesthesia », *NeuroImage*, vol. 141, 2016, p. 326-340, DOI : 10.1016/j.neuroimage.2016.08.004.

WANG L., UHRIG L., JARRAYA B. et DEHAENE S., « Representation of numerical and sequential patterns in macaque and human brains », *Current Biology*, vol. 25, n° 15, 2015, p. 1966-1974, DOI : 10.1016/j.cub.2015.06.035.

