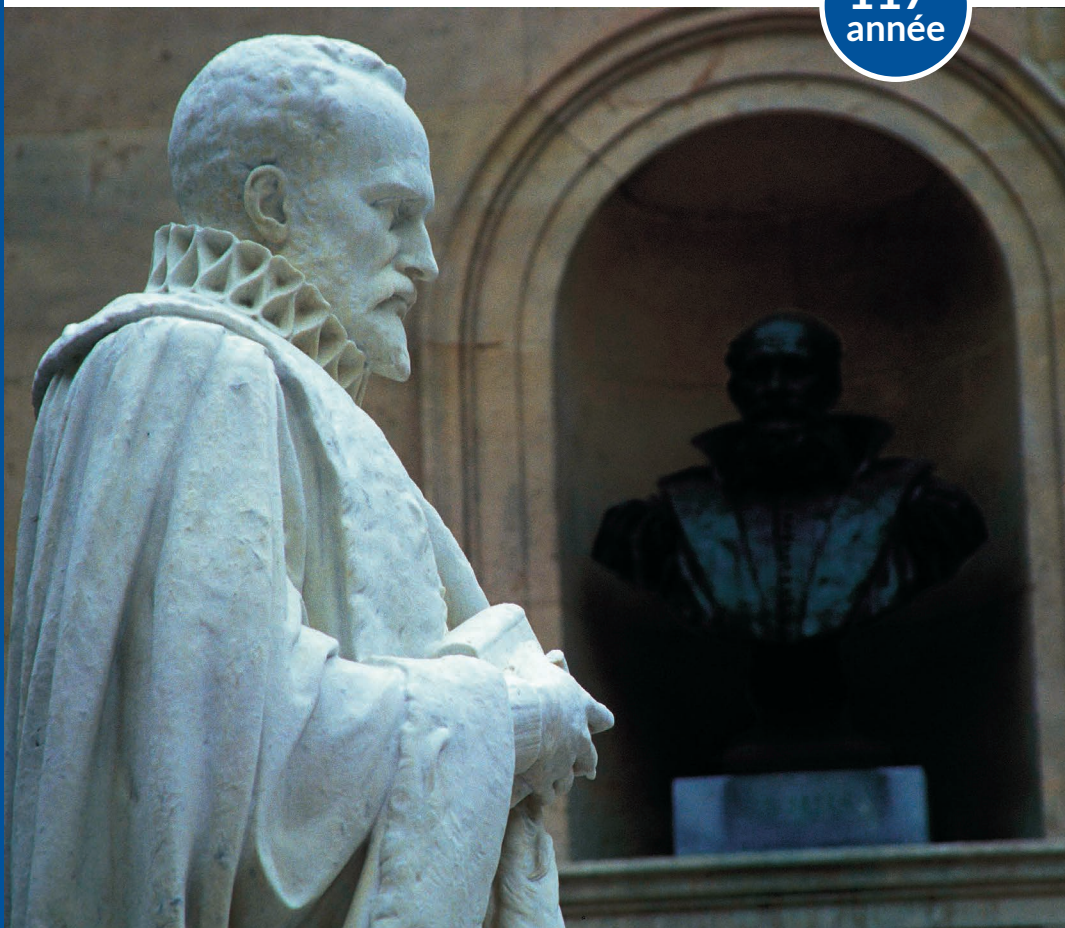


ANNUAIRE du **COLLÈGE DE FRANCE** 2016 - 2017

Résumé des cours et travaux

117^e
année



COLLÈGE
DE FRANCE
— 1530 —

PSYCHOLOGIE COGNITIVE EXPÉRIMENTALE

Stanislas DEHAENE

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

Mots-clés : récursion, langage, évolution, mathématiques, musique, conscience

La série de cours « Parole, musique, mathématiques : les langages du cerveau » et de séminaires « Grammaire naturelle et grammaire artificielle » est disponible en audio et/ou en vidéo, sur le site internet du Collège de France (https://www.college-de-france.fr/site/stanislas-dehaene/p1319400748114720_content.htm et <https://www.college-de-france.fr/site/stanislas-dehaene/seminar-2016-2017.htm>).

ENSEIGNEMENT

COURS – PAROLE, MUSIQUE, MATHÉMATIQUES : LES LANGAGES DU CERVEAU

Dans la suite logique du cours 2015-2016 consacré à la représentation cérébrale des structures linguistiques, le cours 2016-2017 s'est intéressé aux autres facultés cognitives apparentées et qui semblent caractéristiques de l'espèce humaine. Notre espèce est la seule non seulement à s'exprimer sous forme de mots mais également à créer de vastes systèmes mathématiques, informatiques, ou musicaux. Dans tous ces domaines, l'espèce humaine présente une capacité singulière de créer et de manipuler des structures symboliques enchâssées : ce sont des « langages » dans l'acception la plus large de ce mot. On peut, dès lors, s'interroger : un mécanisme cérébral unique sous-tend-il ces différents langages ? Ou bien, l'évolution a-t-elle doté le cerveau humain de mécanismes distincts de représentation des structures symboliques, propres à chaque domaine ?

La question des « langages du cerveau » joue un rôle central dans la réflexion contemporaine sur les origines de la singularité de notre espèce. Marc Hauser, avec Tecumseh Fitch et Noam Chomsky, postule que l'apparition de la faculté humaine de langage trouve son origine dans l'émergence d'une opération unique : la récursion, c'est-à-dire la faculté de produire des représentations complexes en les enchâssant les unes dans les autres, à l'infini. Cependant, la récursion est-elle une adaptation à

la communication, restreinte au langage naturel ? Ou bien s'applique-t-elle à de nombreux domaines ? En 2016, Marc Hauser et Jeffrey Watumull ont fait l'hypothèse que l'espèce humaine se caractérise par une « faculté générative universelle » (*universal grammar faculty*) :

[cette faculté] et ses interfaces vers les différents domaines de connaissance permettent d'engendrer des structures hiérarchiques (en réalité fractales), *ad infinitum*, lesquelles représentations sont ensuite « exaptées » pour le langage, les mathématiques, la musique, et le sens moral. Ces différents domaines ne diffèrent que dans les valeurs (mots, nombres, notes, événements) qui se substituent aux variables dans les procédures génératives.

Ces mêmes auteurs soulignent que, dans l'état actuel des connaissances :

[...] dans la plupart du monde animal, même lorsqu'il existe quelques preuves de l'existence de procédures génératives du niveau des langages réguliers (le plus bas niveau de la hiérarchie de Chomsky), rien ne prouve que ces procédures sous-tendent à la fois la reconnaissance et la production [de séquences] dans plusieurs domaines.

Ainsi, le cerveau humain pourrait bien être le seul à posséder des modèles génératifs récurrents communs à plusieurs domaines de connaissances (idée également développée par Josh Tenenbaum et détaillée dans un cours précédent sur le « cerveau bayésien »).

L'objectif du cours 2016-2017 était d'évaluer cette hypothèse en passant en revue les données disponibles concernant l'organisation des représentations mentales dans trois domaines : langage naturel, musique et mathématiques. En dépit d'évidentes différences de surface, nous avons essayé d'identifier des parallèles entre ces trois domaines : peut-on, sans tomber dans une métaphore inappropriée, parler de langue mathématique ou de langue musicale ?

Cours 1 – La représentation des arbres syntaxiques, singularité de l'espèce humaine ?

Après avoir rappelé les enjeux théoriques de l'étude de la singularité humaine, le premier cours s'est intéressé aux réseaux cérébraux du langage. Ces réseaux sont-ils réellement spécifiques à l'espèce humaine ? Une brève revue de l'anatomie fonctionnelle comparée (qui sera développée dans le cours 2017-2018 intitulé « Origines du langage et singularité de l'espèce humaine ») suggère que la région frontale inférieure, ainsi que ses connexions avec les aires temporales et pariétales inférieures par le biais du faisceau arqué, ont subi une expansion particulière dans l'espèce humaine. L'IRM fonctionnelle suggère que l'aire de Broca pourrait avoir une fonction particulière chez le primate humain, celle de rassembler les informations sous forme de représentations arborescentes ou enchâssées.

Le cours s'est particulièrement focalisé sur les données récentes du laboratoire qui indiquent comment ces aires du langage codent pour la structure des phrases. Cette recherche, réalisée par Matt Nelson, Imen El Karoui et plusieurs autres membres du laboratoire, fruit de plus de cinq ans de travail, a consisté à analyser les enregistrements intracrâniens de douze patients épileptiques alors qu'ils lisaient des phrases en anglais ou en français. Les réponses neurophysiologiques ont validé une hypothèse-clé des théories linguistiques contemporaines : l'existence d'une représentation des phrases sous forme de syntagmes enchâssés. Les signaux dans la bande de fréquence gamma augmentent au fil des mots successifs, mais décroissent soudainement à la frontière

d'un syntagme. L'analyse a permis de montrer, dans la plupart des aires du langage de l'hémisphère gauche, la supériorité du modèle syntagmatique par rapport à d'autres modèles fondés uniquement sur l'apprentissage statistique des probabilités de transition entre les mots ou entre les catégories de mots. De plus, nous avons montré qu'il était possible de déterminer, parmi plusieurs analyseurs syntaxiques (*parsers*) proposés par les linguistes, ceux qui correspondent le mieux aux réponses du cerveau humain. Les résultats renforcent l'hypothèse de Hauser, Chomsky et Fitch selon laquelle le cœur de la faculté de langage consiste en une capacité de représentation des séquences de mots sous forme d'arbres syntaxiques enchâssés de façon récursive.

Cours 2 – Modularité et traitement non-conscient des structures linguistiques

Le traitement du langage est-il organisé de façon modulaire ? Comme nous l'avons déjà discuté dans le cours 2015-2016, le noyau des aires du langage vérifie plusieurs critères de modularité (Fodor, 1983) :

- 1) son architecture neurale est fixe et reproductible d'un individu à l'autre, il possède des connexions anatomiques spécifiques et même un profil distinct de densité des récepteurs de neurotransmetteurs ;
- 2) il présente un développement rapide, instinctif, et propre à l'espèce humaine (propriétés du *language acquisition device* postulé par Chomsky) ;
- 3) il semble largement spécialisé pour le langage, par opposition à d'autres systèmes cérébraux organisés de façon plus « horizontale » ou « isotrope », qui interviennent dans de multiples tâches cognitives ;
- 4) les informations linguistiques semblent encapsulées : le cœur du réseau des aires du langage ne traite qu'une fraction de l'information disponible, et répond par exemple de façon identique à des phrases normales et en « Jabberwocky » (dont on a supprimé les informations sémantiques) ;
- 5) il traite les informations de façon automatique et inaccessible à la conscience.

Le cours a développé ce dernier point en passant en revue l'ensemble des données disponibles sur le traitement inconscient du langage. Des données récentes, obtenues dans le cadre de la thèse de Lucie Berkovitch, suggèrent que l'accès à un lexique syntaxique (qui détermine la catégorie des mots, par exemple nom ou verbe) se produit même lorsque le mot est rendu invisible par masquage. Ainsi, les étapes les plus précoces et les plus simples du traitement syntaxique peuvent s'exécuter non consciemment, qu'il s'agisse de la catégorisation grammaticale ou de l'identification des traits syntaxiques (par exemple singulier ou pluriel). De plus, le cerveau répond de façon non consciente à des violations syntaxiques (onde ELAN) ou sémantiques (onde N400), quoique peut-être seulement si les mots sont suffisamment proches dans le temps (il existerait ainsi une dépendance entre mémoire de travail et prise de conscience). L'imagerie cérébrale montre que le cortex temporal continue de répondre aux phrases inconscientes, y compris pendant la sédation, tandis que la région de Broca semble cesser de répondre.

Nous avons également réexaminé la question de l'encapsulation du traitement du langage : les aires du langage sont-elles entièrement spécialisées pour le traitement des phrases ? La réponse semble positive. Des données neuropsychologiques et d'imagerie cérébrale indiquent que la syntaxe des scripts d'actions ne fait pas appel aux mêmes régions. L'imagerie cérébrale individuelle réalisée par Ev Fedorenko montre que, au sein des aires du langage, chaque sujet possède des secteurs qui

s'activent uniquement en réponse à la complexité des phrases, mais pas à d'autres tâches telles que le Stroop ou l'arithmétique. Seule la perception de la musique semble présenter un (faible) recouvrement avec les aires du langage. Le réseau linguistique est donc très largement modulaire.

Cours 3 – L'organisation des structures musicales

Est-il approprié de parler de « langage musical » ? En 1973, dans une série de conférences à Harvard, le compositeur Leonard Bernstein appelle les chercheurs à proposer une grammaire musicale comparable à la « grammaire générative » de Noam Chomsky. En réponse, le compositeur musicologue Fred Lerdahl s'associe au linguiste Ray Jackendoff pour proposer *Une théorie générative de la musique tonale* (1983). La théorie postule l'existence de quatre structures, toutes hiérarchiques :

- 1) le groupement : motifs, phrases musicales, etc. ;
- 2) la structure métrique : la pulsation et ses multiples ;
- 3) la réduction de l'empan temporel (*time-span reduction* [TSR]), qui s'appuie sur les deux niveaux précédents pour former un arbre temporel avec plusieurs niveaux d'enchâssements ;
- 4) la réduction prolongative (*prolongational reduction* [PR]) fondée sur l'augmentation ou la réduction de la tension tonale.

Ces deux dernières structures sont supposées être organisées suivant des arbres binaires et, en ce sens, elles ressemblent fortement aux structures postulées par les linguistes. Katz et Pesetsky vont jusqu'à proposer une vision extrême : les lexiques des structures musicales et linguistiques diffèrent, mais les structures syntaxiques sont les mêmes. Selon eux,

toutes les différences entre langage et musique sont la conséquence de différences entre leurs éléments constitutifs fondamentaux : des appariements arbitraires de sons et de sens dans le cas du langage ; des notes et des combinaisons de notes dans le cas de la musique. À tous les autres égards, le langage et la musique sont identiques.

Le cours a passé en revue les données comportementales qui mettent à l'épreuve ces idées. Nous avons d'abord rappelé la terminologie de ce domaine, et notamment les termes de fréquence, hauteur tonale, note, et gamme. Le psychologue Roger Shepard montre que les similarités psychologiques entre ces objets musicaux obéissent à des règles fondamentales, que l'on peut représenter sous forme de spirale ou de tore, et qui gouvernent la succession et l'enchâssement des tonalités et des accords au sein d'une mélodie. La structure métrique, étudiée par son élève Carol Krumhansl, obéit également à des lois fondées sur un enchâssement de puissances de deux. Les données montrent que les sujets, même non musiciens, sont sensibles à ces structures et en détectent les violations. Le postulat d'une « syntaxe musicale » n'est donc pas inapproprié.

Cours 4 – Les réseaux cérébraux de la syntaxe musicale

La représentation des règles musicales fait-elle appel aux mêmes aires cérébrales que celle des règles linguistiques ? Ani Patel, suivi en cela par Katz et Pesetsky, propose deux hypothèses très simples. D'une part, les éléments de base et les règles d'organisation propres à la musique et au langage sont distincts. On s'attend donc à observer l'activation de régions auditives spécialisées pour l'une et pour l'autre,

ainsi que des dissociations entre langage et musique en neuropsychologie. D'autre part, l'exécution de ces règles syntaxiques fait appel à des ressources partagées. Cette seconde hypothèse prédit que l'activation cérébrale devrait se recouvrir partiellement, tout particulièrement lors de comparaisons qui isolent le niveau syntaxique du traitement musical ou linguistique. Elle suggère également qu'il devrait exister des interférences entre langage et musique lorsque la tâche exige qu'un sujet traite la syntaxe des deux domaines en même temps.

Dans le cours, nous avons vu que ces prédictions sont assez bien vérifiées. Des expériences très récentes, menées à l'échelle individuelle, montrent effectivement qu'au sein des aires auditives, des secteurs distincts s'intéressent à la musique et à la parole. Les cas d'aphasie sans amusie, tel celui du compositeur moscovite Vissarion Shebalin, confirment que les circuits sont en partie séparables. Cependant, lorsqu'on se penche sur le niveau syntaxique, la ressemblance entre musique et langage s'accroît. En particulier, l'introduction d'une note ou d'un accord inapproprié, qui viole la syntaxe musicale, engendre des réponses cérébrales très semblables à celles évoquées par une violation syntaxique au sein d'une phrase écrite ou parlée (onde ELAN, activation frontale inférieure en IRM fonctionnelle). Il existe donc un début de preuve de l'existence de structures syntaxiques en musique, avec des parallèles plus au moins convaincants à deux niveaux : la structure rythmique de la musique correspondrait à la prosodie du langage, tandis que sa structure harmonique correspondrait à la syntaxe. Notons toutefois qu'à plus haute résolution spatiale, les travaux d'IRM fonctionnelle d'Ev Fedorenko mettent en doute qu'il s'agisse exactement des mêmes régions.

Sur le plan du comportement, il existe effectivement des interférences entre ces deux sortes de violations, qui sont compatibles avec l'hypothèse d'une ressource partagée proposée par Patel : une augmentation locale de la complexité syntaxique d'une phrase empêche les sujets de percevoir convenablement une violation simultanée de la syntaxe d'une mélodie. La modulation de profondeur des structures musicales module également l'activité cérébrale, en partie dans le gyrus frontal inférieur, mais surtout dans l'hémisphère droit, et pas nécessairement dans les mêmes régions que celles activées par le langage. Le plus probable est donc qu'il existe des circuits dissociables, mais qui se recouvrent partiellement.

Cours 5 – Langage et mathématiques : des réseaux dissociables

S'il ne fait aucun doute que les mathématiques sont organisées comme un langage, avec leur lexique et leurs règles propres, la nature de cette « langue mathématique » et de ses liens avec la langue naturelle fait question. Pour Noam Chomsky, « les capacités mathématiques trouvent leur origine dans une abstraction à partir des opérations linguistiques ». De nombreux physiciens et mathématiciens, cependant, estiment, avec Albert Einstein, que :

[...] les mots et le langage, écrits ou parlés, ne semblent pas jouer le moindre rôle dans le mécanisme de ma pensée. Les entités psychiques qui servent d'élément à la pensée sont certains signes ou des images plus ou moins claires, qui peuvent à volonté être reproduits ou combinés.

Pour déterminer quelles aires cérébrales sont impliquées dans la réflexion mathématique de haut niveau, Marie Amalric, dans le cadre de sa thèse au laboratoire, a scanné en IRM fonctionnelle une quinzaine de mathématiciens

professionnels alors qu'on leur demandait de réfléchir pendant quatre secondes à des affirmations mathématiques et non mathématiques de haut niveau, afin de les juger vraies, fausses ou absurdes. Lorsque leur 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 leur 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. Il existe ainsi un réseau mathématique dans le cerveau, qui n'est pas celui du langage. Ce résultat concorde avec de nombreuses autres observations, par exemple : l'activation de ce réseau au cours de l'écoute d'histoires qui parlent de nombres, de quantités ou de mesures (travaux de Jack Gallant) ; les enregistrements intracrâniens au cours du traitement des nombres et du calcul mental (travaux de Josef Parvizi) ; ou encore le fait que certains patients aphasiques demeurent compétents en calcul et même en algèbre (travaux de Rosemary Varley).

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 des nombres 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 chez les mathématiciens professionnels comme chez les non-mathématiciens (des chercheurs de même niveau universitaire, mais sans formation scientifique). Cependant, l'activation des régions de ce réseau était amplifiée chez les mathématiciens par rapport aux non-mathématiciens. Cette observation coïncide avec la théorie du recyclage neuronal, qui stipule que les activités culturelles de haut niveau, telles que les mathématiques, recyclent des fondations cérébrales très anciennes dans l'évolution, telles que le sens du nombre, de l'espace ou du temps. Les mathématiques s'appuient donc sur un langage, mais celui-ci ne fait pas appel aux aires cérébrales du langage naturel.

Cours 6 – Un langage mathématique sans mots pour le dire

Des études récentes suggèrent que le réseau cérébral associé aux opérations mathématiques est déjà impliqué dans le sens du nombre chez les jeunes enfants non encore scolarisés. Il est très ancien dans l'évolution car il est présent lorsque des singes macaques reconnaissent un certain nombre d'objets concrets. Se pourrait-il que l'émergence d'un langage mathématique, au cours de l'évolution de l'espèce humaine, ait précédé celle du langage parlé ? Cela n'est pas impossible lorsque l'on constate que l'humanité a conçu des objets et des outils dotés de symétries complexes depuis environ deux millions d'années (comptage : au moins 40 000 ans, symboles géométriques : 70 000 à 100 000 ans ; zigzags : 540 000 ans ; bifaces au double plan de symétrie : jusqu'à 1,8 million d'années ; sphéroïdes : environ 2 millions d'années).

Dans ce dernier cours, nous avons rassemblé les données qui suggèrent que le cerveau humain parvient à manipuler et combiner des concepts mathématiques, même lorsqu'il ne possède pas de mots pour les exprimer. Les études des indiens Mundurucu d'Amazonie, réalisées en collaboration avec Véronique Izard, Pierre Pica, et Elizabeth Spelke, jouent ici un rôle essentiel. Elles montrent qu'en l'absence d'éducation et de vocabulaire mathématiques, des enfants et des adultes disposent d'intuitions arithmétiques et géométriques complexes : concept de nombre, de correspondance entre une carte bidimensionnelle et la réalité tridimensionnelle, d'angle, de parallélisme, de courbure, etc.

Le cours s'est terminé par l'évocation de données très récentes sur le « langage de la géométrie ». Nous avons montré que, même lorsqu'il s'agit de retenir une séquence de positions dans l'espace, adultes et enfants, quel que soit leur niveau d'éducation, représentent cette séquence spatiale en faisant appel à un mini-langage composé de primitives simples (successeur, répétition, symétrie) enchâssées de façon récursive. La mémoire spatiale est normalement limitée à environ quatre positions, mais nos expériences montrent qu'il est facile de retenir des séquences de huit positions lorsqu'elles sont « compressibles », c'est-à-dire suffisamment régulières pour être codées en mémoire à l'aide de ce langage interne (qui permet d'exprimer, par exemple, que les positions forment « deux carrés enchâssés »). La capacité de mémoire est prédite par la complexité de cette représentation comprimée, mesurée par la longueur de la description minimale, (également connue sous le nom de complexité de Kolmogorov). L'imagerie cérébrale montre que cette compression en mémoire se produit dans certaines aires préfrontales et pariétales dorsales, un réseau qui coïncide en partie avec le réseau cérébral des mathématiques, mais ne présente pas de recouvrement avec les aires du langage.

En conclusion, il semble que nous parvenions à calculer et à faire de la géométrie parce que nous héritons, de l'évolution des primates, des représentations de l'espace et des nombres qui nous confèrent des intuitions proto-mathématiques. Nous partageons ces primitives avec de nombreuses espèces animales, mais seule notre espèce parvient à les intégrer dans de vastes systèmes de symboles, pour former des langages formels précis et cohérents. La capacité symbolique nous permet d'étendre notre répertoire initial de concepts mathématiques. Ce langage des mathématiques, que nous commençons à explorer, ne s'identifie pas au langage naturel, mais fait appel à des régions distinctes du cerveau. Cependant, le rôle du langage dans la transmission des concepts mathématiques, particulièrement au cours du développement précoce de l'enfant, reste à préciser et n'est certainement pas à négliger.

SÉMINAIRE – GRAMMAIRES NATURELLES ET ARTIFICIELLES

En complément du cours, le séminaire a porté sur les recherches récentes qui utilisent des « grammaires artificielles », c'est-à-dire des séquences de stimuli visuels ou auditifs organisées suivant des régularités qui s'approchent de celles utilisées dans le langage naturel. Les grammaires artificielles permettent d'étudier, en laboratoire, l'acquisition rapide de règles simples, et d'en analyser les mécanismes sous-jacents, afin de les comparer au traitement des grammaires du langage naturel. Six intervenants ont exposé leurs travaux sur ces questions :

- Séminaire 1 – La perception statistique de séquences aléatoires, Florent Meyniel (NeuroSpin, CEA), 20 février 2017
- Séminaire 2 – How the brain discovers patterns in sound sequences, Maria Chait (University College London), 27 février 2017
- Séminaire 3 – Evidence for modularity in developmental language impairments, Naama Friedmann (Tel-Aviv University), 6 mars 2017
- Séminaire 4 – The representation of syntax and syntactic categories in the brain, Alfonso Caramazza (Harvard University), 13 mars 2017
- Séminaire 5 – Electrophysiological signatures of sequential and syntactic coding, David Poeppel (Max-Planck-Institute and New York University), 20 mars 2017

- Séminaire 6 – Tree-based learning and « learning to learn », Botvinick (Google DeepMind, London), 27 mars 2017

COURS À L'EXTÉRIEUR – SYNTAX AND THE BRAIN

Une série de trois cours a été donnée à l'Institut d'études avancées de l'université de Tel-Aviv, sur invitation du professeur Naama Friedmann, avec le soutien de la Fondation Nirit et Michael Shaoul, sous le titre « Syntax and the brain » :

- 1) Brain mechanisms of language syntax
- 2) Brain mechanisms of mathematical syntax
- 3) Why human syntax may be special

L'objectif était de faire le point sur les recherches récentes du laboratoire concernant les capacités syntaxiques du cerveau humain.

Le premier cours a rappelé l'existence d'un réseau d'aires cérébrales systématiquement activé lors du traitement des phrases, qu'elles soient écrites ou parlées. Au sein de ces régions situées dans l'hémisphère gauche, qui s'étendent tout au long du sillon temporal supérieur ainsi que dans la région de Broca, un sous-ensemble restreint semble s'intéresser spécifiquement à l'organisation syntaxique des phrases. Son activité varie en fonction de paramètres syntaxiques tels que la présence de syntagmes enchâssés ou de mouvement syntaxique (*wh-movement*), et sa lésion entraîne un agrammatisme. Le cours s'est ensuite focalisé sur les données récemment publiées par Matt Nelson lors de son post-doctorat au laboratoire, et qui ont révélé un marqueur neurophysiologique de la structure syntagmatique des phrases.

Le deuxième cours s'est interrogé sur la syntaxe des mathématiques. S'il ne fait aucun doute que les mathématiques sont organisées comme un langage, celui-ci fait-il appel aux mêmes aires cérébrales que le langage naturel, parlé ou écrit ? Le cours a montré que ce n'était pas le cas, en s'appuyant notamment sur les données récentes obtenues par Marie Amalric au laboratoire.

Enfin, le dernier cours a été consacré à la singularité de l'espèce humaine. Pourquoi sommes-nous la seule espèce à développer des langages, que ce soit pour la communication, en mathématiques ou en musique ? Le cours a rappelé les données d'IRM fonctionnelle obtenues au laboratoire par Liping Wang et Bechir Jarraya. Lorsqu'un singe macaque écoute une séquence auditive, même très simple, son cerveau met en œuvre des mécanismes sophistiqués de représentation du nombre d'items, de leur probabilité de transition, et de leur organisation globale (par exemple « le dernier item est différent des précédents »). Cependant, l'IRM comparée des primates humain et non-humain montre qu'il existe une activation cérébrale unique à l'espèce humaine, dans la région frontale inférieure et le sillon temporal postérieur des deux hémisphères. Nous postulons que ces régions abritent une représentation spécifique des séquences temporelles sous forme d'un arbre enchâssé, et que celle-ci explique l'organisation complexe et récursive caractéristique des langues humaines.

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, ou encore la manipulation consciente des informations.

MÉCANISMES DU LANGAGE

L'année académique 2016-2017 a vu le lancement du projet de recherches « NeuroSyntax » financé par l'European Research Council (ERC) et visant à analyser les mécanismes cérébraux de la compétence de l'espèce humaine pour la syntaxe dans tous les domaines : langue naturelle, mais aussi mathématiques et musique.

Cette année a également vu la publication du travail réalisé par Matt Nelson, Imen El Karoui et plusieurs autres membres du laboratoire sur les mécanismes neurophysiologiques de la représentation des phrases. Cette recherche, fruit de plus de cinq ans de travail, a consisté à colliger et analyser les enregistrements intracrâniens de douze patients épileptiques alors qu'ils lisaient des phrases en anglais ou en français. Les réponses neurophysiologiques ont validé une hypothèse clé des théories linguistiques contemporaines : l'existence d'une représentation des phrases sous forme de syntagmes enchâssées. Les signaux dans la bande de fréquence gamma croissent au fil des mots successifs, mais décroissent soudainement à la frontière d'un syntagme. L'analyse a permis de montrer, dans la plupart des aires du langage de l'hémisphère gauche, la supériorité du modèle syntagmatique par rapport à d'autres modèles fondés uniquement sur l'apprentissage statistique des probabilités de transition entre les mots ou entre les catégories de mots. De plus, il devient possible de sélectionner, parmi plusieurs analyseurs syntaxiques (*parsers*) proposés par les linguistes, lesquels correspondent le mieux aux réponses du cerveau humain. Ces travaux vont se continuer dans le cadre du projet ERC ainsi que d'un financement conjoint avec le professeur Nitin Tandon (hôpitaux de Houston, Texas) dans le cadre de la *Brain Initiative* lancée par le président Obama.

Nous avons également progressé dans la compréhension de la plasticité du cerveau humain pour l'acquisition de la lecture. Une recherche menée en collaboration avec Laurent Cohen a ainsi démontré que la lecture musicale, chez des musiciens professionnels, fait appel à une région spécifique du cortex occipito-temporal ventral, différente de l'aire de la forme visuelle des mots écrits (*visual word form area*, VWFA). L'acquisition de la musique conduit à un déplacement de la VWFA chez les musiciens par rapport aux non-musiciens.

Nous avons également analysé, chez plusieurs cas uniques, les mécanismes de l'apprentissage de la lecture à l'âge adulte. Nos études montrent qu'un adulte illettré apprend difficilement à mettre en place le circuit cérébral de la lecture, tandis qu'un patient cérébro-lésé atteint d'alexie pure ne récupère pas d'activation dans la VWFA, même deux ans après la lésion. Ces travaux sont prolongés par un travail en cours, en collaboration avec Ghislaine Dehaene-Lambertz, sur le suivi longitudinal en IRM fonctionnelle d'enfants pendant l'année d'apprentissage de la lecture (CP).

MÉCANISMES DES MATHÉMATIQUES

Dans le domaine des mathématiques, au cours de la thèse de Marie Amalric, nous avons publié un travail montrant que, même lorsqu'ils stockent en mémoire une séquence spatiale très simple, les humains la représentent en faisant appel à un « langage de la géométrie » composé de primitives simples (successeur, répétition, symétrie) enchâssées de façon récursive. La complexité de cette représentation (mesurée par la longueur de la description minimale, également connue sous le nom de complexité de Kolmogorov) prédit les erreurs des adultes éduqués ou non, et même d'enfants d'âge préscolaire. La description de ce « langage de l'esprit »

représente un pas important dans la modélisation des facultés mathématiques élémentaires de l'espèce humaine. Nous poursuivons actuellement ce travail par une expérience d'IRM fonctionnelle, dont les premiers résultats suggèrent que des régions pariétales et préfrontales dorsales, distinctes des aires du langage naturel, sous-tendent cette représentation mentale de la géométrie.

Nous avons également progressé dans la compréhension des mécanismes de l'arithmétique en publiant, dans le cadre de la thèse de Pedro Pinheiro-Chagas, une analyse détaillée des étapes de manipulation mentale qui permettent d'additionner ou de soustraire deux nombres. Cette publication fait appel à la méthode de suivi en temps réel de la trajectoire du doigt, développée par Dror Dotan au cours de sa thèse. Nous préparons une publication qui rend public le code informatique qui sous-tend cette méthode et qui en explique le potentiel et les limites.

MÉCANISMES DE LA CONSCIENCE

Nous continuons également d'analyser les signatures de la conscience, c'est-à-dire les marqueurs physiologiques d'un traitement conscient dans le cerveau. Cette année a vu la publication de deux articles importants de Jean-Rémi King et de Darinka Trübütschek, tous deux portant sur la possibilité de décoder les signaux magnéto-encéphalographiques au cours d'une période de mémoire de travail. Les résultats montrent, de façon très surprenante, qu'une information non consciente peut rester disponible pendant une période de plusieurs secondes. Cependant, il semble qu'après quelques secondes, cette représentation ne repose plus sur la décharge active de populations de neurones, mais reste « dormante », peut-être fondée sur des modifications rapides de l'efficacité synaptique. Nous avons collaboré avec le théoricien israélien Misha Tsodyks pour proposer un modèle et des simulations précises de cette mémoire dormante.

PUBLICATIONS

AMALRIC M., WANG L., PICA P., FIGUEIRA S., SIGMAN M. et DEHAENE S., « The language of geometry: Fast comprehension of geometrical primitives and rules in human adults and preschoolers », *PLOS Computational Biology*, vol. 13, n° 1, 2017, e1005273, DOI : 10.1371/journal.pcbi.1005273.

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. 260274, DOI : 10.1016/j.cortex.2016.05.016.

NELSON M.J., KAROU I.E., GIBER K., YANG X., COHEN L., KOOPMAN H., CASH S.S., NACCACHE L., HALE J.T., PALLIER C. et DEHAENE S., « Neurophysiological dynamics of phrase-structure building during sentence processing », *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 114, n° 18, 2017, E3669E3678, DOI : 10.1073/pnas.1701590114.

PINHEIRO-CHAGAS P., DOTAN D., PIAZZA M. et DEHAENE S., « Finger tracking reveals the covert stages of mental arithmetic », *Open Mind*, vol. 1, n° 1, 2017, p. 3041, DOI : 10.1162/OPMI_a_00003.

TRÜBÜTSCHKE D., MARTI S., OJEDA A., KING J.-R., MI Y., TSODYKS M. et DEHAENE S., « A theory of working memory without consciousness or sustained activity », *eLife*, vol. 6, 2017, e23871, DOI : 10.7554/eLife.23871.

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. 49094917, DOI : 10.1073/pnas.1603205113.

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*, 2017, vol. 144, p. 153163, 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. 3649, DOI : 10.1016/j.neuropsychologia.2016.07.009.

DEHAENE S. et DEHAENE-LAMBERTZ G., « Is the brain prewired for letters? », *Nature Neuroscience*, vol. 19, n° 9, 2016, p. 11921193, DOI : 10.1038/nn.4369.

DOTAN D. et DEHAENE S., « On the origins of logarithmic number-to-position mapping », *Psychological Review*, vol. 123, n° 6, 2016, p. 637666, DOI : 10.1037/rev0000038.

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. 11221134, DOI : 10.1016/j.neuron.2016.10.051.

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, e31e31, DOI : 10.1093/brain/aww060.

PATTAMADILOK C., DEHAENE S. et PALLIER C., « A role for left inferior frontal and posterior superior temporal cortex in extracting a syntactic tree from a sentence », *Cortex*, vol. 75, 2016, p. 4455, DOI : 10.1016/j.cortex.2015.11.012.

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. 33613371, 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. 326340, DOI : 10.1016/j.neuroimage.2016.08.004.

ZIMMERMAN F., SHALOM D., GONZALEZ P.A., GARRIDO J.M., HEDUAN F.A., DEHAENE S., SIGMAN M. et RIEZNIK A., « Arithmetic on your phone: A large scale investigation of simple additions and multiplications », *PLoS One*, vol. 11, n° 12, 2016, e0168431, DOI : 10.1371/journal.pone.0168431.

BERKOVITCH L., DEHAENE S. et GAILLARD R., « Disruption of conscious access in schizophrenia », *Trends in Cognitive Sciences*, vol. 21, n° 11, 2017, p. 878892, DOI : 10.1016/j.tics.2017.08.006.

BRAGA L.W., AMEMIYA E., TAUIL A., SUGUIEDA D., LACERDA C., KLEIN E., DEHAENE-LAMBERTZ G. et DEHAENE S., « Tracking adult literacy acquisition with functional MRI: a single-case study. », *Mind, Brain, and Education*, vol. 11, n° 3, 2017, p. 121132, DOI : 10.1111/mbe.12143.

DEHAENE S., LAU H. et KOUIDER S., « What is consciousness, and could machines have it? », *Science*, vol. 358, n° 6362, 2017, p. 486492, DOI : 10.1126/science.aan8871.

MARTI S. et DEHAENE S., « Discrete and continuous mechanisms of temporal selection in rapid visual streams », *Nature Communications*, vol. 8, n° 1, 2017, p. 1955, DOI : 10.1038/s41467-017-02079-x.

MEYNIEL F. et DEHAENE S., « Brain networks for confidence weighting and hierarchical inference during probabilistic learning », *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 114, n° 19, 2017, E3859E3868, DOI : 10.1073/pnas.1615773114.

MEYNIEL F., MAHEU M. et DEHAENE S., « Human inferences about sequences: A minimal transition probability model », *Plos Computational Biology*, vol. 12, n° 12, 2016, e1005260, DOI : 10.1371/journal.pcbi.1005260.

MEYNIEL F., MAHEU M. et DEHAENE S., « Computational fingerprints of probabilistic inference in MEG signals », *International Journal of Psychophysiology*, vol. 108, n° 54, 2016, DOI : 10.1016/j.ijpsycho.2016.07.181.

PICA P., IZARD V., DEHAENE S., SPELKE E., ROORYCK J. et JAIRO S., « Mundurucu terms with arithmetical, geometrical and spatial content », 2017, <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01498325>.