

ANNUAIRE du **COLLÈGE DE FRANCE** 2018 - 2019

Résumé des cours et travaux

119^e
année



COLLÈGE
DE FRANCE
—1530—

PSYCHOLOGIE COGNITIVE EXPÉRIMENTALE

Stanislas DEHAENE

Membre de l'Institut (Académie des sciences)

Mots-clés : cerveau, comportement, imagerie cérébrale

La série de cours « Progrès récents en imagerie cérébrale et décodage des représentations mentales » est disponible en audio et vidéo sur le site internet du Collège de France (<https://www.college-de-france.fr/site/stanislas-dehaene/course-2018-2019.htm>), ainsi que la série de séminaires « Développement du cerveau et émergence des fonctions cognitives » (<https://www.college-de-france.fr/site/stanislas-dehaene/seminar-2018-2019.htm>) et la série de quatre conférences de Xia-Jing Wang, professeur invité : « Computational neuroscience of elemental cognition » (<https://www.college-de-france.fr/site/stanislas-dehaene/guestlecturer-2018-2019.htm>).

ENSEIGNEMENT

COURS – PROGRÈS RÉCENTS EN IMAGERIE CÉRÉBRALE ET DÉCODAGE DES REPRÉSENTATIONS MENTALES

L'imagerie cérébrale est devenue un ingrédient indispensable de la psychologie expérimentale. Jusque dans les années 1970 ou 1980, il était de bon ton de défendre une thèse fonctionnaliste selon laquelle la psychologie et la neurobiologie seraient des disciplines autonomes, qui occupent des compartiments étanches. « La nature physique [du cerveau] n'impose aucune contrainte aux formes de la pensée », affirmait Philip Johnson-Laird dans *Mental models* en 1983. Aujourd'hui, cette idée est abandonnée, tant abondent les exemples de contraintes mutuelles et de fructueux dialogues interdisciplinaires. Dans une direction, la psychologie est souvent la première à étudier et à théoriser une fonction cognitive : en témoigne l'exemple de la

théorie de la prise de décision par accumulation d'évidence, développée en psychologie dès les années 1960 avant d'être confirmée et étendue, trente ans plus tard, au niveau neurophysiologique. Dans l'autre sens, la découverte des mécanismes cérébraux, neuronaux, voire moléculaires qui sous-tendent une fonction cognitive conduit souvent à mieux les maîtriser : par exemple, la théorie de l'apprentissage, qui a débuté avec les études comportementales d'Ebbinghaus, Pavlov, Hull ou Rescorla, a fait des progrès considérables avec l'avènement de modèles neuronaux d'abord spéculatifs (Hebb), puis de plus en plus fondés sur l'expérimentation et la modélisation en neurosciences (Kandel).

Dans l'étude des fonctions cognitives, l'imagerie cérébrale joue un rôle essentiel, car elle seule permet d'accéder, de façon non invasive, à l'organisation anatomique et fonctionnelle des circuits du cerveau humain. Les méthodes d'imagerie ont considérablement progressé depuis leur émergence il y a une quarantaine d'années. L'objectif du cours 2018-2019 était de faire le point sur ces progrès à la fois techniques et méthodologiques, de mieux comprendre dans quelle mesure ces méthodes parviennent à clarifier la nature des représentations mentales chez l'homme, et d'en discerner les limites.

Cours 1 – Méthodes d'imagerie cérébrale : l'état de l'art

Dans le premier cours, nous avons passé en revue les différentes méthodes d'imagerie cérébrales et leurs différences. L'IRM fonctionnelle (IRMf), aujourd'hui la plus répandue, consiste à mesurer les petites variations d'oxygénation cérébrale qui, grâce à un mécanisme de couplage neurovasculaire, reflètent l'activité des circuits neuronaux. L'IRMf présente de nombreux avantages : mesures rapides et répétées, au niveau du cerveau tout entier, sans nécessiter d'injection. Même si la mesure est indirecte, elle reflète les décharges neuronales assez fidèlement et avec une grande linéarité (sauf dans certains cas pathologiques). Cependant, la résolution spatiale reste modeste (de l'ordre du millimètre ou un peu moins) et ne permet que de visualiser la moyenne de populations de l'ordre de plusieurs dizaines de milliers de neurones. La résolution spatiale est également réduite, même si des techniques d'analyse permettent de détecter des variations de l'ordre de 100-200 millisecondes dans le début et la durée de l'activation.

L'IRM ne cesse de progresser, notamment avec l'utilisation d'antennes parallèles à 32 ou 64 canaux, de séquences multibandes, de transmission également parallèle et de techniques d'échantillonnage partiel. L'augmentation du champ magnétique permet d'améliorer le rapport signal à bruit, qui varie de façon non linéaire. On est passé de machines à 1,5 Tesla dans les années 1990 à des IRM à 3 T, puis 7 T, 9,4 T, et enfin, à NeuroSpin, à un prototype unique d'aimant de 90 cm de diamètre à 11,72 T, dont la montée en champ a été réalisée en juillet 2019. Ces améliorations ne concernent pas seulement l'IRM fonctionnelle, mais également l'analyse de l'anatomie du cerveau, à l'échelle mésoscopique (~ 1 millimètre) et microscopique (quelques microns). Grâce à différentes variantes de l'IRM de diffusion, il devient par exemple possible d'évaluer le diamètre moyen des axones, la taille moyenne des cellules et même leur forme, sans toutefois les voir individuellement.

Complémentaires de l'IRM, l'électro- et la magnéto-encéphalographie (EEG et MEG) mesurent directement les potentiels électriques et les minuscules champs magnétiques engendrés par les courants qui circulent entre les dendrites et le corps cellulaire des neurones. C'est pourquoi ces méthodes possèdent une excellente

résolution temporelle (en dessous de la milliseconde) et fréquentielle (entre 0,01 et 1 000 Hz ou plus). Leur excellente sensibilité, couplée à l'utilisation d'algorithmes de décodage multivarié, permet de décoder et de reconstituer la séquence d'activité cérébrale associée à une tâche cognitive. Leur inconvénient est de ne pas permettre de localiser précisément l'origine des signaux. Là encore, des avancées méthodologiques sont en cours, notamment dans l'EEG de très haute résolution et dans l'émergence d'une nouvelle génération de capteurs MEG fondés sur le pompage optique et ne nécessitant plus de refroidissement à l'hélium liquide.

Le cours s'est conclu par un rapide tour d'horizon des méthodes électrophysiologiques et d'imagerie optique (2 et 3 photons) qui sont en train de révolutionner les études du cerveau animal. Ces techniques, miniaturisées, permettent d'enregistrer des milliers de neurones simultanément, voire *tous* les neurones d'un animal comme la larve de poisson-zèbre, avec un suivi chronique, jour après jour, des mêmes neurones. Le code neural, fondé sur l'activité collective de grandes populations de neurones, commence à devenir accessible et l'on peut, par exemple, décoder précisément où se trouve un animal, ou quelle décision il prend, sur la base de l'état d'activité des neurones de l'hippocampe ou du cortex préfrontal.

Cours 2 – Comment relier l'activité cérébrale et les représentations mentales ?

Visualiser l'activité du cerveau ne suffit pas à comprendre comment cette activité encode des représentations mentales, ni comment celles-ci se transforment en pensées ou en comportements. Les neurosciences cognitives sont à la recherche de lois de passage du niveau neurophysiologique au niveau psychologique – de l'activité cérébrale à l'état mental. Dans le second cours, nous avons examiné les stratégies qui permettent de discerner, dans le foisonnement d'activité cérébrale qui survient à chaque instant, les états neuronaux qui codent pour des états mentaux.

La méthode de soustraction consiste à contraster l'activité cérébrale évoquée par deux conditions expérimentales minimalement différentes (par exemple nommer un chiffre, *versus* le soustraire de 10 ; ou bien nommer un chiffre *versus* nommer une lettre). Elle permet d'identifier quel est le circuit cérébral impliqué dans une étape précise d'une tâche cognitive, mais elle souffre d'un problème d'inférence inverse : si chaque opération cognitive active un circuit souvent répliquable, l'observation qu'un circuit donné est actif ne permet pas de savoir quelle est la fonction ou le code cognitif déployé.

L'analyse multivariée (MVPA, *multivariate pattern analysis*) permet d'avancer d'un cran : elle dissèque les codes neuronaux à l'intérieur d'une région donnée. On examine dans quelle mesure deux conditions expérimentales conduisent à des cartes d'activation qui se ressemblent, et on en déduit dans quelle mesure ces deux conditions expérimentales font appel à des représentations similaires. Au laboratoire, par exemple, nous avons utilisé cette méthode pour montrer que le mathématicien, qui réfléchit à des objets mathématiques très abstraits, continue d'utiliser des circuits cérébraux activés chez chacun d'entre nous lors d'opérations arithmétiques élémentaires ($2 + 3$) ou même la simple vision d'un nombre. Ainsi, les mathématiques de haut niveau « recyclent » des circuits de l'arithmétique élémentaire. De même, chez l'enfant en cours d'acquisition de la lecture, l'analyse multivariée permet de montrer que certains secteurs du cortex visuel se spécialisent partiellement pour la reconnaissance des mots écrits, tout en conservant leur sélectivité antérieure pour la reconnaissance des objets.

Cours 3 – Vers une cartographie de plus en plus fine des représentations mentales

L'analyse de la similarité des représentations (RSA = *representational similarity analysis*) est une autre méthode d'analyse multivariée qui permet des inférences sophistiquées sur le codage cérébral des informations cognitives. Elle repose sur le concept d'isomorphisme de second ordre, dû au psychologue californien Roger Shepard.

L'argument de Shepard repose en premier lieu sur la réfutation d'une idée courante mais fautive, selon laquelle il existerait une correspondance directe entre les objets du monde extérieur et leur représentation interne dans le cerveau (un isomorphisme de premier ordre). On pense parfois naïvement que, lorsqu'une personne imagine un carré vert, il doit y avoir dans son cerveau une « image » de ce carré. Mais ce type de raisonnement conduit rapidement à des absurdités : qui reconnaît l'image de ce carré dans le cerveau (régression à l'infini) ? Comment est codée la couleur verte – par des neurones verts ? Comment sont codés des concepts abstraits tels que le nombre ou la liberté ?

Au lieu d'un isomorphisme de premier ordre, Shepard affirme que l'on doit rechercher un isomorphisme *de second ordre*, c'est-à-dire une correspondance entre les *relations* entre les objets du monde extérieur, et les *relations* entre leurs représentations internes. L'idée est que, si la représentation interne d'un rectangle n'est en rien l'image d'un rectangle, cette représentation doit ressembler plus à celle d'un carré qu'à celle, disons, d'un chou-fleur. Ainsi, il faut mesurer la similarité subjective entre les représentations mentales et la comparer à la similarité des représentations cérébrales. Dans chaque région du cerveau, l'analyse consiste à (1) extraire les configurations d'activité pour chaque *stimulus* ; (2) évaluer leur dissimilarité, par exemple $1-r$ où r est le coefficient de corrélation ; (3) comparer cette matrice empirique avec une ou plusieurs matrices prédites par différents modèles, ou par la similarité subjective mesurée sur le plan comportemental. On peut aussi faire l'étude directe de cette matrice, par exemple par *multi-dimensional scaling*, une méthode de visualisation des matrices de similarité inventée par Roger Shepard.

Selon Nicolas Kriegeskorte, l'analyse de la similarité des représentations a vocation à devenir une méthode unificatrice pour les neurosciences. En effet, elle seule permet de comparer des mesures extrêmement différentes : IRM fonctionnelle du cerveau humain ou animal ; enregistrements neuronaux ou neurophysiologiques ; comportement ; rapports subjectifs ; prédictions issues de modèles théoriques ou de simulations ; etc.

Dans le cours, nous avons examiné quatre exemples d'application de la méthode :

1) l'« hyper-alignement » de plusieurs cerveaux humains, qui consiste à aligner, non seulement les surfaces corticales, mais les hyper-espaces engendrés par les variations d'activité à travers tous les voxels d'une région d'intérêt ;

2) la comparaison entre les représentations neuronales chez l'homme et chez le singe, dans le cortex temporal inférieur ;

3) la comparaison des métriques issues des représentations cérébrales et du comportement ;

4) l'analyse de la représentation cérébrale d'une fonction cognitive de haut niveau : la représentation invariante du nombre dans les régions occipito-pariétales (travaux d'Elisa Castaldi et Evelyn Eger avec l'aimant 7 Tesla de NeuroSpin).

Cours 4 – Identification de codes neuronaux et comparaison avec les réseaux de neurones profonds

Dans le quatrième cours, nous avons continué notre progression à travers les différentes méthodes d'IRM qui permettent d'affiner l'identification des codes neuronaux. Parmi celles-ci, la méthode d'amorçage ou d'adaptation présente un avantage clé : elle est la seule qui permette de mesurer les codes neuronaux à l'intérieur d'un voxel, en s'affranchissant de la médiocre résolution spatiale de l'IRM. L'idée est de s'appuyer sur le phénomène d'adaptation à la répétition : dans de nombreuses régions du cortex, sinon toutes, la répétition d'un même *stimulus* conduit à une réduction de l'activité neuronale, donc du signal d'IRM. Dans un dessin expérimental croisé, on va donc comparer l'activation évoquée par des paires de *stimuli* s_1 et s_2 , soit répétés (s_1 suivi de s_1 , et $s_2 + s_2$), soit non répétés ($s_1 + s_2$ et $s_2 + s_1$). L'effet est subtil : en moyenne, les *stimuli* sont identiques, seule change leur relation (mais le sujet n'a pas besoin d'être conscient de la relation entre les *stimuli*, ni même de la présence du *stimulus* d'adaptation). Si la région cérébrale différencie les deux *stimuli*, elle doit montrer une réduction de l'activité à la répétition.

La méthode d'amorçage permet des inférences sophistiquées sur les codes neuronaux. Ainsi, elle nous a permis de démontrer que le cortex pariétal humain code les noms de nombres et les chiffres arabes (« trois » et « 3 ») comme la même quantité, et ce de façon automatique et inconsciente. L'adaptation permet également de tracer des courbes d'accord (*tuning curves*) que l'on peut comparer à celles obtenues par la neurophysiologie chez l'animal.

L'IRM fonctionnelle pourrait-elle permettre de voir *directement* le code neuronal associé à une région du cortex ? Oui, si celui-ci repose sur des colonnes corticales suffisamment grandes pour être visualisées par l'IRM à haut champ. Ainsi, à 4 ou 7 Tesla, dans le cortex visuel de quelques sujets soigneusement sélectionnés, les colonnes de dominance oculaire ou de sélectivité à l'orientation ont pu être observées en IRM fonctionnelle, avec des voxels de l'ordre de 500 microns de côté. La modélisation mathématique permet de quantifier la taille des champs récepteurs en fonction de l'excentricité, et d'évaluer ainsi le facteur de magnification en chaque point du cortex et de la hiérarchie des aires visuelles. Des travaux similaires ont conduit à identifier des cartes corticales « numérotopiques » codant pour le nombre d'objets, et de commencer à modéliser les réponses visuelles du cortex temporal inférieur, en les comparant à celles de réseaux de neurones à convolution. Dans les aires auditives, de même, l'analyse des champs récepteurs et des réponses à des *stimuli* complexes (musique, langage) est en cours.

La dimension verticale du cortex n'est pas oubliée. En effet, le cortex humain est organisé en couches de neurones bien distinctes sur le plan cytoarchitectonique mais dont la fonction reste méconnue. Le cadre théorique du « codage prédictif » postule que les couches moyennes (couche IV) reçoivent les signaux sensoriels ascendants (*bottom-up*), tandis que les couches superficielles reçoivent des prédictions descendantes (*top-down*) en provenance d'autres régions du cortex. Les équipes de Lars Mückli et de Peter Kok, avec Floris de Lange, ont réussi le tour de force de séparer les réponses de ces trois niveaux de profondeur du cortex visuel humain. Leurs mesures démontrent effectivement que, lors de tâches d'imagerie mentale ou d'exposition à des illusions visuelles classiques, les couches profondes et superficielles montrent des réponses de plus haut niveau que les couches moyennes, ce qui correspondrait à des effets cognitifs descendants.

Cette capacité, encore balbutiante, d'utiliser l'IRM à très haut champ pour visualiser l'activité des différentes couches du cortex humain, ouvre de nombreuses perspectives. Non seulement elle permet de séparer les signaux ascendants et descendants et d'évaluer la théorie du codage prédictif, mais elle devrait également permettre d'analyser le rôle des signaux descendants dans la mémoire de travail, l'imagerie mentale, l'attention sélective, le changement de tâche, l'intégration multisensorielle, et même la prise de conscience et les hallucinations (par exemple chez les patients avec schizophrénie).

Cours 5 – Décodage du déroulement temporel des opérations mentales

Dans le cinquième cours, nous avons examiné la question classique de la décomposition temporelle, et non plus spatiale, de l'activité cérébrale.

Chaque opération cognitive, même très simple comme la lecture d'une lettre, mobilise toute une série d'étapes de traitement de l'information. Pour les analyser, la chronométrie mentale, avec Franciscus Donders, Saul Sternberg ou Michael Posner, a développé toute une panoplie de méthodes comportementales de décomposition du temps de réponse (insertion pure ; méthode des facteurs additifs ; plans factoriels, etc.). Cependant, ces méthodes demeurent indirectes et ne séparent pas directement les différentes étapes d'exécution d'un processus cognitif.

Dans le cours, nous avons vu comment l'EEG et la MEG peuvent être exploitées, en combinaison avec un dessin expérimental factoriel, afin de décomposer une séquence d'activité cérébrale en étapes. Le décodage multivarié des signaux EEG et MEG fournit quantité d'informations sur le déroulement temporel des représentations mentales. En entraînant un décodeur à identifier à quel moment les signaux cérébraux contiennent une information significative sur telle ou telle variable cognitive, puis en examinant si ce même décodeur peut généraliser à un autre point dans le temps, ou à une autre condition expérimentale, on peut déterminer le cheminement de l'information dans le cerveau humain. La matrice de généralisation à travers le temps (*generalization across time* ou GAT) donne des informations détaillées sur la durée de chaque étape, sa stabilité dans le temps, sa récurrence à des moments différents, éventuellement avec un délai ou une durée différente.

L'utilisation des méthodes de décodage multivarié est aujourd'hui très répandue. En effet, l'imagerie cérébrale engendre un très grand nombre de mesures par unité de temps, et seule l'assistance d'un outil automatisé de recherche des signaux faibles permet d'y détecter des effets significatifs. Nous avons examiné de nombreux exemples, et notamment la capacité de détecter, par EEG, des marqueurs de la conscience qui puissent être exploités en clinique chez les patients en état végétatif apparent. Un autre exemple est le décodage des opérations arithmétiques : lorsqu'une personne vérifie une opération comme $2 + 5 = 8$ (vrai ou faux), les signaux MEG permettent de décoder pratiquement chaque étape de traitement : perception de chaque chiffre ou opérateur, durée de l'opération, perception et comparaison avec le résultat proposé... Pour des raisons inconnues, seul le résultat interne (ici, 7) n'a pas pu être décodé – il semble que certains codes corticaux nous échappent encore, peut-être parce qu'ils font appel à des représentations neuronales d'un type différent.

Cours 6 – L'imagerie cérébrale permet-elle de décoder les pensées ?

Dans le dernier cours, nous avons examiné jusqu'à quel point les techniques de décodage multivarié, appliquées aux signaux d'IRM ou de MEG, permettent de décoder le contenu conscient des sujets scannés, (« la pensée »). Comme je l'ai souligné dans *Le Code de la conscience* (Odile Jacob, 2014), de nombreux paradigmes permettent aujourd'hui de contraster le traitement conscient ou non conscient d'une information visuelle ou auditive. Le cours a passé en revue toute une série de résultats récents qui convergent pour suggérer que l'accès d'une information à la conscience correspond, au niveau cérébral, à un embrasement tardif (~300 ms après la présentation du *stimulus*), au cours duquel le cerveau stabilise un code neural « métastable » (durable à l'échelle de quelques centaines de millisecondes).

Des recherches récentes indiquent cependant que ce contraste n'est pas aussi tranché qu'on le pensait. D'une part, les travaux récemment menés au laboratoire par Jean-Rémi King montrent que l'activité cérébrale évoquée par un *stimulus* non conscient peut demeurer détectable pendant plusieurs secondes. D'autre part, après l'accès à la conscience, l'activité cérébrale évoquée par un *stimulus* conscient n'a pas nécessairement besoin de rester active et stable tout au long d'un délai – il existe une forme de mémoire de travail silencieuse (*activity-silent working memory*) qui permet l'encodage des représentations sous une forme « dormante » (probablement codée par des changements rapides d'efficacité synaptique) et qui peut, à tout moment, être récupérée en mémoire active et consciente.

Plusieurs exemples spectaculaires de décodage cérébral ont été évoqués dans le cours. Avec la MEG, Sébastien Marti est ainsi parvenu à décoder chacune des images visuelles successives qui étaient présentées au sujet à un rythme de 9 images par seconde – et de déterminer celle que le sujet choisissait de garder en mémoire. En IRM fonctionnelle, le décodage des cartes visuelles rétinotopiques permet même de transformer l'activité cérébrale en une image de ce qu'a vu le sujet – y compris le contenu de son rêve, s'il s'est endormi dans l'IRM ! Ces techniques de reconstruction nécessitent toutefois d'acquérir un grand nombre de données lourdes et spécifiques au cerveau d'une personne donnée. Le risque est donc faible qu'elles envahissent notre vie privée – mais elles seront certainement très utiles pour les patients tétraplégiques ou *locked-in* qui commencent à retrouver, grâce au décodage de leurs intentions, une forme d'autonomie et de communication avec le monde extérieur.

SÉMINAIRE – DÉVELOPPEMENT DU CERVEAU ET ÉMERGENCE DES FONCTIONS COGNITIVES (*BRAIN DEVELOPMENT AND EMERGENCE OF COGNITIVE FUNCTIONS*)

En 2018-2019, nous avons reçu six invités spécialistes du développement cérébral et de l'évaluation des capacités cognitives des très jeunes enfants. Les bébés présentent, en effet, des compétences insoupçonnées que l'on peut mettre en évidence par des méthodes comportementales ou d'imagerie. Nous nous sommes particulièrement focalisés sur les capacités cognitives de haut niveau : apprentissage du langage, capacités de déduction logique, et représentation des pensées d'autrui.

- Steve Piantadosi : « The hypothesis of a language of thought in infancy » (7 janvier 2019) ;
- Sandy Waxman : « The acquisition of lexical concepts in infancy » (14 janvier 2019) ;

- Jessica Dubois : « L'organisation anatomique précoce du cerveau du nourrisson » 21 janvier 2019) ;
- Agnès Kovacs : « The early emergence of theory of mind in human infants » (28 janvier 2019) ;
- Luca Bonatti : « Logic and reasoning in infants » (4 février 2019) ;
- Noah Goodman : « How language structures thought » (11 février 2019).

COURS À L'EXTÉRIEUR – IMAGERIE CÉRÉBRALE DES FONCTIONS COGNITIVES : LANGAGE, CONSCIENCE

Deux cours ont été donnés au Mexique, au Colegio Nacional et à l'UNAM :

- « Reading in the brain: How literacy changes us » (15 novembre 2018) ;
- « What is consciousness? Electrophysiological signatures of consciousness in humans and monkeys » (16 novembre 2018).

RECHERCHE

La poursuite du projet « NeuroSyntax » financé par l'European Research Council (ERC) nous a conduits à étudier l'apprentissage de séquences qui variaient en complexité, afin de déterminer la limite entre les compétences des primates non humains et celles de l'espèce humaine, notamment dans le domaine du langage et des mathématiques. La thèse de Maxime Maheu a été consacrée au plus bas niveau : l'apprentissage de séquences fondées sur les probabilités de transitions entre items successifs (séquences markoviennes). Un modèle d'observateur optimal (bayésien) pour l'apprentissage de séquences a été ajusté aux données issues d'une expérience de MEG, ce qui a permis de montrer que différentes étapes de traitement cérébral obéissent à des règles d'apprentissage bien distinctes. Au niveau des séquences syntaxiquement plus complexes, avec des dépendances à longue distance caractéristiques des langues humaines, Yair Lakretz a finement disséqué la manière dont un réseau de neurones artificiels apprend l'accord en nombre du sujet et du verbe. Il a montré l'existence d'un mécanisme très spécifique : un tout petit nombre de neurones maintient en mémoire active le nombre (singulier ou pluriel) du sujet de la phrase, jusqu'à ce que le verbe correspondant soit identifié. Le modèle fait des prédictions comportementales et neurophysiologiques qui sont en train d'être testées sur le plan empirique, notamment par le biais de collaborations avec différents centres de neurochirurgie capables d'enregistrer des neurones uniques chez l'homme (Florian Mormann à Bonn, Itzhak Fried à UCLA et Tel Aviv).

En ce qui concerne l'analyse des mécanismes cérébraux de la conscience, de nombreux progrès ont été accomplis. La thèse de Lucie Berkovitch a montré qu'une information syntaxique minimale (la catégorie grammaticale d'un mot, son genre et son nombre) pouvait être extraite inconsciemment et utilisée pour prédire le mot suivant. La thèse de Darinka Trübutschek, quant à elle, a porté sur la démonstration expérimentale, en comportement et en MEG, d'une mémoire de travail silencieuse et non consciente (voir le cours n° 6). Enfin, les travaux de Lynn Uhrig, Bechir Jarraya et Jacobo Sitt ont appliqué ces connaissances à la détection de « signatures de la conscience » soit au cours de l'anesthésie, soit chez les patients en état végétatif ou avec d'autres troubles de la conscience.

Président du Conseil scientifique de l'Éducation nationale (CSEN), j'ai également organisé l'écriture de nombreuses synthèses de littérature scientifique utiles aux pratiques enseignantes. Le programme « EvalAide » a consisté, avec la Direction de l'évaluation, de la prospective et de la performance de l'Éducation nationale (DEPP), à créer de nouvelles évaluations nationales pour tous les élèves en début de CP, milieu de CP et début de CE1, afin d'identifier très rapidement les besoins des élèves et d'y répondre par une intervention pédagogique adaptée. Ces travaux, dont tous les textes sont disponibles gratuitement sur le site du CSEN (<https://www.reseau-canope.fr/conseil-scientifique-de-leducation-nationale.html>), ont également été regroupés dans un petit livre intitulé *La Science au service de l'école* (Odile Jacob, 2019).

PUBLICATIONS

2019

AMALRIC M. et DEHAENE S., « A distinct cortical network for mathematical knowledge in the human brain », *NeuroImage*, vol. 189, 2019, p. 19-31, <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2019.01.001>.

BERKOVITCH L. et DEHAENE S., « Subliminal syntactic priming », *Cognitive Psychology*, vol. 109, 2019, p. 26-46, <https://doi.org/10.1016/j.cogpsych.2018.12.001>.

DEMERTZI A., TAGLIAZUCCHI E., DEHAENE S., DECO G., BARTTFELD P., RAIMONDO F., MARTIAL C., FERNÁNDEZ-ESPEJO D., ROHAUT B., VOSS H.U. *et al.*, « Human consciousness is supported by dynamic complex patterns of brain signal coordination ». *Science Advances*, vol. 5, n° 2, 2019, art. eaat7603, <https://doi.org/10.1126/sciadv.aat7603>.

DILLON M.R., DUYCK M., DEHAENE S., AMALRIC M., et IZARD V., « Geometric categories in cognition », *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, vol. 45, n° 9, 2019, p. 1236-1247, <https://doi.org/10.1037/xhp0000663>.

LAKRETZ Y., KRUSZEWSKI G., DESBORDES T., HUPKES D., DEHAENE S. et BARONI M., « The emergence of number and syntax units in LSTM language models », in : *Proceedings of the 2019 Conference of the North American Chapter of the Association for Computational Linguistics: Human Language Technologies*, vol. 1, Minneapolis, Association for Computational Linguistics, 2019, p. 11-20, <http://dx.doi.org/10.18653/v1/N19-1002> [arXiv : 1903.07435v2].

LASNE G., PIAZZA M., DEHAENE S., KLEINSCHMIDT A. et EGER E., « Discriminability of numerosity-evoked fMRI activity patterns in human intra-parietal cortex reflects behavioural numerical acuity », *Cortex*, vol. 114, 2019, p. 90-101 ; version numérique : 2018, 198002, <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2018.03.008>. MAHEU M., DEHAENE S. et MEYNIEL F., « Brain signatures of a multiscale process of sequence learning in humans », *Elife*, 2019, art. 8:e41541, <https://doi.org/10.7554/eLife.41541.001>.

MOULTON E., BOUHALI F., MONZALVO K., POUPON C., ZHANG H., DEHAENE S., DEHAENE-LAMBERTZ G. et DUBOIS J., « Connectivity between the visual word form area and the parietal lobe improves after the first year of reading instruction: A longitudinal MRI study in children », *Brain Structure and Function*, vol. 224, n° 4, 2019, p. 1519-1536, <https://doi.org/10.1007/s00429-019-01855-3>.

PINHEIRO-CHAGAS P., PIAZZA M. et DEHAENE S., « Decoding the processing stages of mental arithmetic with magnetoencephalography », *Cortex*, vol. 114, 2019, p. 124-139 ; version numérique : 2018, <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2018.07.018>.

TRÜBUTSCHEK D., MARTI S. et DEHAENE S., « Temporal-order information can be maintained in non-conscious working memory », *Scientific Reports*, vol. 9, n° 1, 2019, art. 6484, <https://doi.org/10.1038/s41598-019-42942-z>.

2018

CASTALDI E., MIRASSOU A., DEHAENE S., PIAZZA M. et EGER E., « Asymmetrical interference between number and item size perception provides evidence for a domain specific impairment in dyscalculia », *PLOS one*, vol. 13, n° 12, 2018, art. e0209256, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0209256>.

CHAO Z.C., TAKAURA K., WANG L., FUJII N. et DEHAENE S., « Large-scale cortical networks for hierarchical prediction and prediction error in the primate brain », *Neuron*, vol. 100, n° 5, 2018, p. 1252-1266, art. e3, <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2018.10.004>.

KOLINSKY R., MORAIS J., COHEN L. et DEHAENE S., « Les bases neurales de l'apprentissage de la lecture », *Langue française*, vol. 199, n° 3, 2018, p. 17-33, <https://doi.org/10.3917/lf.199.0017>.

PINHEIRO-CHAGAS P., DAITCH A., PARVIZI J. et DEHAENE S., « Brain mechanisms of arithmetic: A crucial role for ventral temporal cortex », *Journal of Cognitive Neuroscience*, vol. 30, n° 12, 2018, p. 1757-1772, https://doi.org/10.1162/jocn_a_01319.

SALVADOR A., BERKOVITCH L., VINCKIER F., COHEN L., NACCACHE L., DEHAENE S. et GAILLARD R., « Unconscious memory suppression », *Cognition*, vol. 180, 2018, p. 191-199, <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2018.06.023>.

UHRIG L., SITT J.D., JACOB A., TASSERIE J., BARTTFELD P., DUPONT M., DEHAENE S. et JARRAYA B., « Resting-state dynamics as a cortical signature of anesthesia in monkeys », *Anesthesiology. The Journal of the American Society of Anesthesiologists*, vol. 129, n° 5, 2018, p. 942-958, <https://doi.org/10.1097/aln.0000000000002336>.