

ANNUAIRE du **COLLÈGE DE FRANCE** 2019 - 2020

Résumé des cours et travaux

120^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 : langage, cognition

ENSEIGNEMENT

COURS – L'INFLUENCE DU LANGAGE ET DES SYMBOLES
SUR LA PERCEPTION ET LA COGNITION

COLLOQUE – *THE REPRESENTATION OF LANGUAGE IN BRAINS AND MACHINES*

Le cours et le séminaire, tous deux planifiés pour le printemps 2020, n'ont pas pu avoir lieu en raison de l'épidémie de Covid-19. Ils ont été donnés respectivement en septembre et octobre 2020, et les 25 et 26 juin 2021.

COURS À L'EXTÉRIEUR

Une série de trois cours et de trois séminaires correspondants a été donnée à l'université de Buenos Aires (UBA, Argentine) les 19, 20 et 21 novembre 2019, sous le titre « *Advances in understanding the singularity of the human brain* » :

- Cours et séminaire 1 – *How we learn: The 4 pillars of efficient learning* ;
- Cours et séminaire 2 – *Reading acquisition and neuronal recycling* ;
- Cours et séminaire 3 – *From single words to sentences: Syntax in the brain*.

RECHERCHE

L'équipe de recherches sur « les langages du cerveau », financée par l'European Research Council (programme NeuroSyntax) et comprenant notamment Fosca Al Roumi, Yair Lakretz, Samuel Planton et Mathias Sablé-Meyer, a poursuivi ses travaux

aussi bien sur le plan comportemental qu'avec l'IRM fonctionnelle (IRMf) et la magnéto-encéphalographie (MEG). Rappelons que cette recherche teste l'hypothèse que le cerveau humain ne contient pas seulement des circuits dédiés au langage naturel, parlé ou écrit, mais également d'autres circuits qui encodent un langage de la pensée et sont capables de coder, de façon réursive, des régularités mathématiques, musicales, visuelles, etc. Cette faculté de représenter les informations sous forme d'expressions mentales enchâssées serait unique à l'espèce humaine.

Nous avons déjà montré, par les recherches comportementales de Marie Amalric, l'existence d'un langage de la géométrie qui code les régularités récursives des séquences spatiales. En 2019, Liping Wang a utilisé l'IRM fonctionnelle pour recueillir des preuves directes à l'appui du langage de pensée postulé et identifier les circuits neuronaux sous-jacents. Dans l'IRM, nous avons simplement présenté aux participants une séquence spatiale en leur demandant de la suivre du regard. Il est important de noter que même ce comportement élémentaire a été influencé par la complexité prédite par notre langage (*minimal description length* ou MDL), confirmant ainsi la propension humaine à encoder automatiquement les séquences linéaires sous forme de structures arborescentes : plus la MDL était petite, plus le regard des participants anticipait sur les emplacements à venir et s'y posait avant même leur apparition. De plus, la MDL modulait l'activité d'un large ensemble de régions cérébrales occipito-pariétales, préfrontales et caudales. Ainsi, l'activité de ces régions reflétait la structure du langage géométrique postulé. Crucialement, l'IRM a montré que ce langage ne repose pas sur les zones linguistiques classiques du cerveau humain, telles que le gyrus frontal inférieur (aire de Broca) ou le sillon temporal supérieur. Ces zones, identifiées chez chaque individu à l'aide d'un localisateur spécifique, étaient inactives ou même désactivées pendant le traitement du langage géométrique. L'activation induite par les séquences géométriques se rapprochait certes de l'aire de Broca dans la partie dorsale de l'aire de Brodmann bilatérale 44d, mais ce site n'était pas activé par les phrases. Au contraire, les zones actives se chevauchaient de manière significative avec celles du calcul mental et des mathématiques de haut niveau (travaux de Marie Amalric). Ces résultats concordent avec de nombreux travaux antérieurs selon lesquels le langage des mathématiques peut être anatomiquement et fonctionnellement dissocié du langage oral ou écrit communicatif, chez des sujets normaux et chez des patients souffrant de lésions cérébrales : les aphasiques agrammatiques peuvent encore faire de l'algèbre. Nos recherches confirment qu'il faut, pour expliquer la cognition humaine visuo-spatiale, faire appel à un langage – mais que ce langage n'est pas celui des langues naturelles, mais plus proche d'un langage informatique fondé sur des boucles enchâssées.

L'équipe a également continué ses travaux antérieurs sur les bases cérébrales de la lecture, des mathématiques et de l'accès d'une information à la conscience.

– Dans le domaine *mathématique*, Marie Amalric a utilisé l'IRM fonctionnelle pour démontrer qu'un réseau bien distinct de régions cérébrales, notamment le sillon intrapariétal bilatéral et la région temporale inférieure, s'activaient spécifiquement en réponse à des phrases à contenu mathématique. Dror Dotan a développé une méthode de chronométrie mentale fine qui repose sur la mesure des mouvements du doigt au cours d'une décision cognitive, et l'a appliquée à l'analyse de la représentation cérébrale des nombres à plusieurs chiffres.

– Dans le domaine de la *lecture*, en collaboration avec Florence Bouhali et Laurent Cohen, nous avons montré que les circuits de la lecture, dans la voie occipito-temporale ventrale, sont sensibles à l'organisation des lettres en graphèmes

complexes (comme <ch>, <on>, <ou>, <er>, etc.), et que les deux voies de lecture (lexicale et grapho-phonologique) sont déjà partiellement séparables au sein de ces régions visuelles. Ces circuits se retrouvent dans toutes les cultures : Xiaovia Feng a démontré que des régions très similaires sont recrutées lors de la lecture d'une écriture alphabétique comme le français, ou d'une écriture morphosyllabique comme le chinois – et que les anomalies liées à la dyslexie se traduisent également par des anomalies très similaires de l'activité cérébrale.

– Sur le plan de la *conscience*, nous avons publié avec George Mashour et Jean-Pierre Changeux dans *Neuron*, une revue très détaillée des principaux résultats scientifiques pertinents pour le modèle de l'espace de travail neuronal global. En collaboration avec Liping Wang et son équipe, nous avons également montré la pertinence d'une tâche d'écoute de phrases pour identifier, chez les patients souffrants de troubles de la conscience (en état végétatif ou de conscience minimale) de nouvelles signatures électro-encéphalographiques de la conscience.

Président du Conseil scientifique de l'Éducation nationale (CSEN), j'ai également coordonné le lancement de recherches et l'écriture de synthèses de la littérature scientifique utiles aux pratiques enseignantes. Tous les textes sont disponibles gratuitement sur le site du CSEN (<https://www.reseau-canope.fr/conseil-scientifique-de-leducation-nationale.html>). Ils ont été en partie regroupés dans un premier livre intitulé *La Science au service de l'école*, paru en 2019 aux éditions Odile Jacob, et un second livre, intitulé *L'École éclairée par la science*, est paru en 2021.

PUBLICATIONS

AL ROUMI F., DOTAN D., YANG T. et WANG L. et DEHAENE S., « Acquisition and processing of an artificial mini-language combining semantic and syntactic elements », *Cognition*, vol. 185, 2019, p. 49-61, <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2018.11.006>.

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>.

BOUHALI F., BÉZAGU Z., DEHAENE S. et COHEN L., « A mesial-to-lateral dissociation for orthographic processing in the visual cortex », *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 116, n° 43, 2019, p. 21936-21946, <https://doi.org/10.1073/pnas.1904184116>.

CASTALDI E., PIAZZA M., DEHAENE S., VIGNAUD A. et EGER E., « Attentional amplification of neural codes for number independent of other quantities along the dorsal visual stream », *eLife*, vol. 8, 2019, art. e45160, <https://doi.org/10.7554/eLife.45160>.

CHANG C.H.C., DEHAENE S., WU D.H., KUO W.-J. et PALLIER C., « Cortical encoding of linguistic constituent with and without morphosyntactic cues », *Cortex*, vol. 129, 2020, p. 281-295, <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2020.04.024>.

CICCIONE L. et DEHAENE S., « Grouping mechanisms in numerosity perception », *Open Mind*, vol. 4, 2020, p. 102-118, https://doi.org/10.1162/opmi_a_00037.

DEHAENE S. (dir.), *La Science au service de l'école. Premiers travaux du Conseil scientifique de l'éducation nationale*, Paris, Odile Jacob, 2019.

DEHAENE S., *How We Learn: Why Brains Learn Better Than Any Machine... for Now*, New York, Penguin Books, 2020.

- DEMERTZI A., TAGLIAZUCCHI E., DEHAENE S., DECO G., BARTTFELD P., RAIMONDO F., MARTIAL C., FERNÁNDEZ-ESPEJO D., ROHAUT B., VOSS H.U., SCHIFF N.D., OWEN A.M., LAUREYS S., NACCACHE L. et SITT J.D., « 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., DUYSCK 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>.
- DOTAN D. et DEHAENE S., « Parallel and serial processes in number-to-quantity conversion », *Cognition*, vol. 204, 2020, art. 104387, <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2020.104387>.
- DOTAN D., PINHEIRO-CHAGAS P., AL ROUMI F. et DEHAENE S., « Track it to crack it: Dissecting processing stages with finger tracking », *Trends in Cognitive Sciences*, vol. 23, n° 12, 2019, p. 1058-1070, <https://doi.org/10.1016/j.tics.2019.10.002>.
- FENG X., ALTARELLI I., MONZALVO K., DING G., RAMUS F., SHU H., DEHAENE S., MENG X. et DEHAENE-LAMBERTZ G., « A universal reading network and its modulation by writing system and reading ability in French and Chinese children », *ELife*, vol. 9, 2020, art. e54591, <https://doi.org/10.7554/eLife.54591>.
- GUI P., JIANG Y., ZANG D., QI Z., TAN J., TANIGAWA H., JIANG J., WEN Y., XU L., ZHAO J., MAO Y., POO M., DING N., DEHAENE S., WU X. et WANG L., « Assessing the depth of language processing in patients with disorders of consciousness », *Nature Neuroscience*, vol. 23, n° 6, 2020, p. 761770, <https://doi.org/10.1038/s41593-020-0639-1>.
- LAKRETZ Y., DEHAENE S. et KING J.-R., « What limits our capacity to process nested long-range dependencies in sentence comprehension? », *Entropy*, vol. 22, n° 4, 2020, p. 446, <https://doi.org/10.3390/e22040446>.
- 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 J. BURSTEIN, C. DORAN et T. SOLORIO (dir.), *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, <https://doi.org/10.18653/v1/N19-1002>.
- LASNE G., PIAZZA M., DEHAENE S., KLEINSCHMIDT A. et EGER E., « Discriminability of numerosity-evoked fMRI activity patterns in human intra-parietal cortex reflects behavioral numerical acuity », *Cortex*, vol. 114, 2019, p. 90-101, <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2018.03.008>.
- LÓPEZ-BARROSO D., THIEBAUT DE SCHOTTEN M., MORAIS J., KOLINSKY R., BRAGA L.W., GUERREIRO-TAUIL A., DEHAENE S. et COHEN L., « Impact of literacy on the functional connectivity of vision and language related networks », *NeuroImage*, vol. 213, 2020, art. 116722, <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2020.116722>.
- MAHEU M., DEHAENE S. et MEYNIEL F., « Brain signatures of a multiscale process of sequence learning in humans », *ELife*, vol. 8, 2019, art. e41541, <https://doi.org/10.7554/eLife.41541>.
- MALASSIS R., DEHAENE S. et FAGOT J., « Baboons (*Papio papio*) process a context-free but not a context-sensitive grammar », *Scientific Reports*, vol. 10, n° 1, 2020, art. 7381, <https://doi.org/10.1038/s41598-020-64244-5>.
- MASHOUR G.A., ROELFSEMA P., CHANGEUX J.-P. et DEHAENE S., « Conscious processing and the global neuronal workspace hypothesis », *Neuron*, vol. 105, n° 5, 2020, p. 776-798, <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2020.01.026>.
- MICHEL M., BECK D., BLOCK N., BLUMENFELD H., BROWN R., CARMEL D., CARRASCO M., CHIRIMUUTA M., CHUN M., CLEEREMANS A., DEHAENE S., FLEMING S.M., FRITH C., HAGGARD P., HE B.J., HEYES C., GOODALE M.A., IRVINE L., KAWATO M., KENTRIDGE R., KING J.-R., KNIGHT R.T., KOUIDER S., LAMME V., LAMY D., LAU H., LAUREYS S., LEDOUX J.,

LIN Y.-T., LIU K., MACKNIK S.L., MARTINEZ-CONDE S., MASHOUR G.A., MELLONI L., MIRACCHI L., MYLOPOULOS M., NACCACHE L., OWEN A.M., PASSINGHAM R.E., PESSOA L., PETERS M.A.K., RAHNEV D., RO T., ROSENTHAL D., SASAKI Y., SERGENT C., SOLOVEY G., SCHIFF N.D., SETH A., TALLON-BAUDRY C., TAMIETTO M., TONG F., VAN GAAL S., VLASSOVA A., WATANABE T., WEISBERG J., YAN K. et YOSHIDA M., « Opportunities and challenges for a maturing science of consciousness », *Nature Human Behaviour*, vol. 3, n° 2, 2019, p. 104-107, <https://doi.org/10.1038/s41562-019-0531-8>.

MILHAM M., PETKOV C.I., MARGULIES D.S., SCHROEDER C.E., BASSO M.A., BELIN P., FAIR D.A., FOX A., KASTNER S., MARS R.B., MESSINGER A., POIRIER C., VANDUFFEL W., ESSEN D.C.V., ALVAND A., BECKER Y., HAMED S.B., BENN A., BODIN C., BORETIUS S., CAGNA B., COULON O., EL-GOHARY S.H., EVRARD H., FORKEL S.J., FRIEDRICH P., FROUDIST-WALSH S., GARZA-VILLARREAL E.A., GAO Y., GOZZI A., GRIGIS A., HARTIG R., HAYASHI T., HEUER K., HOWELLS H., ARDESCH D.J., JARRAYA B., JARRETT W., JEDEMA H.P., KAGAN I., KELLY C., KENNEDY H., KLINK P.C., KWOK S.C., LEECH R., LIU X., MADAN C., MADUSHANKA W., MAJKA P., MALLON A.-M., MARCHE K., MEGUERDITCHIAN A., MENON R.S., MERCHANT H., MITCHELL A., NENNING K.-H., NIKOLAIDIS A., ORTIZ-RIOS M., PAGANI M., PAREEK V., PRESCOTT M., PROCYK E., RAJIMEHR R., RAUTU I.-S., RAZ A., ROE A.W., ROSSI-POOL R., ROUMAZEILLES L., SAKAI T., SALLET J., GARCÍA-SALDIVAR P., SATO C., SAWIAK S., SCHIFFER M., SCHWIEDRZIK C.M., SEIDLITZ J., SEIN J., SHEN Z., SHMUEL A., SILVA A.C., SIMONE L., SIRMPILATZE N., SLIWA J., SMALLWOOD J., TASSERIE J., SCHOTTEN M.T. de, TORO R., TRAPEAU R., UHRIG L., VEZOLI J., WANG Z., WELLS S., WILLIAMS B., XU T., XU A.G., YACCOUB E., ZHAN M., AI L., AMIEZ C., BALEZEAU F., BAXTER M.G., BLEZER E.L.A., BROCHIER T., CHEN A., CROXSON P.L., DAMATAC C.G., DEHAENE S., EVERLING S., FLEYSHER L., FREIWALD W., GRIFFITHS T.D., GUEDJ C., HADI-BOUZIANE F., HAREL N., HIBA B., JUNG B., KOO B., LALAND K.N., LEOPOLD D.A., LINDENFORS P., MEUNIER M., MOK K., MORRISON J.H., NACEF J., NAGY J., PINSK M., READER S.M., ROELFSEMA P.R., RUDKO D.A., RUSHWORTH M.F.S., RUSS B.E., SCHMID M.C., SULLIVAN E.L., THIELE A., TODOROV O.S., TSAO D., UNGERLEIDER L., WILSON C.R.E., YE F.Q., ZARCO W. et ZHOU Y., « Accelerating the evolution of nonhuman primate neuroimaging », *Neuron*, vol. 105, n° 4, 2020, p. 600-603, <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2019.12.023>.

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>.

PANAGIOTAROPOULOS T.I., WANG L. et DEHAENE S., « Hierarchical architecture of conscious processing and subjective experience », *Cognitive Neuropsychology*, vol. 37, n° 3-4, 2020, p. 180-183, <https://doi.org/10.1080/02643294.2020.1760811>.

PINEL P., FORGEOT D'ARC B., DEHAENE S., BOURGERON T., THIRION B., LE BIHAN D. et POUPON C., « The functional database of the ARCHI project: Potential and perspectives », *NeuroImage*, vol. 197, 2019, p. 527-543, <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2019.04.056>.

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

PINHO A.L., AMADON A., GAUTHIER B., CLAIRIS N., KNOPS A., GENON S., DOHMATOB E., TORRE J.J., GINISTY C., BECUWE-DESMIDT S., ROGER S., LECOMTE Y., BERLAND V., LAURIER L., JOLY-TESTAULT V., MÉDIOUNI-CLOAREC G., DOUBLÉ C., MARTINS B., SALMON E., PIAZZA M., MELCHER D., PESSIGLIONE M., VAN WASSENHOVE V., EGER E., VAROQUAUX G., DEHAENE S., HERTZ-PANNIER L. et THIRION B., « Individual Brain Charting dataset extension, second release of high-resolution fMRI data for cognitive mapping », *Scientific Data*, vol. 7, n° 1, 2020, p. 353, <https://doi.org/10.1038/s41597-020-00670-4>.

RAJALINGHAM R., KAR K., SANGHAVI S., DEHAENE S. et DiCARLO J.J., « The inferior temporal cortex is a potential cortical precursor of orthographic processing in untrained monkeys », *Nature Communications*, vol. 11, n° 1, 2020, art. 3886, <https://doi.org/10.1038/s41467-020-17714-3>.

STRAUSS M. et DEHAENE S., « Detection of arithmetic violations during sleep », *Sleep*, vol. 42, n° 3, 2019, art. zsy232, <https://doi.org/10.1093/sleep/zsy232>.

STRAUSS M., RAIMONDO F., SITT J., NACCACHE L. et DEHAENE S., « De l'éveil au sommeil : quand perdons-nous connaissance ? », *Médecine du Sommeil*, vol. 16, n° 1, 2019, p. 24, <https://doi.org/10.1016/j.msom.2019.01.227>.

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>.

TRÜBUTSCHEK D., MARTI S., UEBERSCHÄR H. et DEHAENE S., « Probing the limits of activity-silent non-conscious working memory », *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 116, n° 28, 2019, p. 14358-14367, <https://doi.org/10.1073/pnas.1820730116>.

WANG L., AMALRIC M., FANG W., JIANG X., PALLIER C., FIGUEIRA S., SIGMAN M. et DEHAENE S., « Representation of spatial sequences using nested rules in human prefrontal cortex », *NeuroImage*, vol. 186, 2019, p. 245-255, <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2018.10.061>.

POTIER WATKINS C., CAPORAL J., MERVILLE C., KOUIDER S. et DEHAENE S., « Accelerating reading acquisition and boosting comprehension with a cognitive science-based tablet training », *Journal of Computers in Education*, vol. 7, n° 2, 2020, p. 183-212, <https://doi.org/10.1007/s40692-019-00152-6>.

WATKINS C.P., DEHAENE O. et DEHAENE S., « Automatic construction of a phonics curriculum for reading education using the transformer neural network », in S. ISOTANI *et al.* (dir.), *International Conference on Artificial Intelligence in Education*, vol. 2 : *20th International Conference, AIED 2019 (Chicago, June 25-29, 2019): proceedings*, Cham, Springer, coll. « Lecture Notes in Computer Science », vol. 11626, 2019, p. 226-231, https://doi.org/10.1007/978-3-030-23207-8_42.

WOOLNOUGH O., DONOS C., ROLLO P.S., FORSETH K.J., LAKRETZ Y., CRONE N.E., FISCHER-BAUM S., DEHAENE S. et TANDON N., « Spatiotemporal dynamics of orthographic and lexical processing in the ventral visual pathway », *Nature Human Behaviour*, vol. 5, n° 3, 2020, p. 389-398, <https://doi.org/10.1038/s41562-020-00982-w>.