

Vers des neurosciences à deux corps : interaction sociale & inscription biologique

Guillaume Dumas

A la croisée des sciences biologique et de l'informatique la métaphore du cerveau-ordinateur qui a prévalu durant plus de quarante ans dans l'essentiel des travaux en neurosciences sur le cerveau a conduit à considérer des individus isolés, sans prise en compte des interactions sociales. Une nouvelle technique de neuro-imagerie, appelée hyperscanning, permet désormais d'enregistrer simultanément le comportement et l'activité cérébrale de plusieurs participants et d'étudier ainsi l'interaction sociale dans un contexte spontané et de réciprocité. L'interaction est alors appréhendée de manière holistique en considérant les deux individus comme un seul système, et le comportement autant que les activités cérébrales. Ces développements méthodologiques et théoriques ont permis de démontrer qu'interagir activement avec les autres est fondamentalement différent d'une perception sociale passive. Ces résultats invitent donc à considérer plus largement la dimension interactionnelle dans les travaux en neurosciences ainsi que la complémentarité entre les contraintes biologiques et la dynamique de nos interactions sociales.

De la cybernétique à l'auto-organisation : quel paradigme pour aborder la complexité de la cognition humaine ?

La cognition humaine est une question complexe, qui a reçu des réponses différentes selon les disciplines et mobilisé des théories parfois contradictoires et souvent parcellaires, à l'image de cette ancienne parabole jaïniste illustrant la réalité relative d'une perception individuelle telle qu'elle peut être décrite dans le système philosophique Anekāntavāda¹ : un éléphant arrive dans un village d'aveugles et ses occupants tentent de deviner ce qu'il est. Des hypothèses bien différentes sont proposées : l'aveugle qui tient le pied pense que c'est un arbre alors que celui qui tient la queue pense que c'est une corde. Nul aveugle ne pourra parvenir à comprendre seul quel

¹ Système philosophique développé avant notre ère, d'origine indienne, qui considère que toute réalité est relative et que les points de vue sont multiples.

est cette chose : seule une mise en commun de leurs différentes expériences permettra de reconnaître l'éléphant.

La cognition humaine est l'éléphant des sciences cognitives et les aveugles sont bien représentés par les différentes disciplines ayant essayé isolément, et en vain, de cerner le fonctionnement de notre psyché : philosophie, psychologie, neurosciences, mais aussi linguistique, informatique, ou encore anthropologie ou théories littéraires.

L'apparition de la cybernétique moderne, au début du XXe siècle, traduisait un désir de fonder un nouveau champ de recherches sur les modes de communication en combinant les savoirs de plusieurs disciplines, tout en accordant une place centrale à la notion de « contrôle ». Il faut attendre les conférences Macy², à New York dans les années 1940 (1942-1953), qui réunissaient mathématiciens, philosophes, anthropologues, psychologues et économistes, pour que les recherches sur la cognition prennent une nouvelle direction au niveau international. Ces conférences et les nombreux débats théoriques sur la nature de l'esprit ont permis un nouvel essor, en résonance avec les développements d'une nouvelle discipline : l'informatique dont les promesses d'applications potentielles ont contribué à l'engouement pour la métaphore du « cerveau ordinateur ».

Pourtant, cette métaphore de l'ordinateur, aussi appelée « computationalisme », n'est pas acceptée par l'ensemble de la communauté scientifique. Au-delà de l'efficacité des algorithmes, les cybernéticiens et leurs successeurs insistent sur l'importance des processus d'auto-organisation dans l'émergence de la cognition. Mais le modèle de l'ordinateur ne prend pas en compte l'ensemble des propriétés du fonctionnement cérébral. En effet, ces propriétés avaient initialement été mises de côté, pour conceptualiser l'ordinateur. Ironiquement, les derniers travaux des pères de l'informatique, Alan Turing et John Von Neumann, soulignent ce problème, en considérant notamment les aspects auto-organisés du fonctionnement cérébral, totalement absents chez l'ordinateur.

Parmi les penseurs de la seconde vague cybernétique, Humberto Maturana et Francisco Varela ont approfondi certains phénomènes (en complémentarité avec les travaux des cognitivistes), en particulier les processus par lesquels le cerveau reconstruit la réalité du monde (e.g., se remémorer la beauté d'une exposition, l'ordre dans lequel on a vu les tableaux, etc.). Ces deux biologistes chiliens abordent ces phénomènes en prenant le parti d'un ancrage biologique fort : avant de considérer plus spécifiquement la cognition, ils tentent, de conceptualiser la vie sous un nouvel angle. Alors que la biologie moléculaire est en plein essor — nous sommes dans les années 1970 — et que la cellule apparaît de plus en plus comme une machine miniature complexe pour

² Conférences organisées à New York de 1942 à 1953 à l'initiative du neurologue Warren McCulloch. Elles tiennent leur nom du soutien financier par la fondation Macy.

les biologistes, les deux neurobiologistes concentrent leurs réflexions sur deux aspects centraux et complémentaires de la vie : l'autonomie et le couplage avec l'environnement.

Maturana et Varela développent ainsi la théorie de l'autopoïèse (« auto » signifiant « soi » et « poïesis » « produire » en grec ; Maturana et Varela, 1994). La cellule est considérée comme l'unité de base du vivant, dans la mesure où les conditions nécessaires à l'établissement d'une structure autonome, et néanmoins en couplage avec l'environnement, sont déjà présentes à ce niveau d'organisation élémentaire. Ce couplage structurel — dit « de premier ordre » - est la combinaison entre un réseau causal clos sur lui-même qui maintient l'auto-organisation ou la reproduction de la cellule.

Ce cadre théorique aide à concevoir comment la stabilisation du couplage structurel avec l'environnement donne les conditions nécessaires à l'établissement d'un couplage entre les cellules elles-mêmes au cours de l'évolution (Figure 1). Cette transition de l'unicellulaire au multicellulaire correspond à l'explosion Cambrienne³ il y a 541 millions d'années. Cet événement marquant de l'histoire de la vie terrestre voit les premiers eucaryotes (i.e., les cellules comprenant un noyau entouré d'une membrane), les protozoaires (« proto » signifiant « premier » et « zôon » étant « animal », en grec) devenir des métazoaires dont les cellules peuvent se spécialiser dans des fonctions différentes au service de l'ensemble de l'organisme. Cette spécialisation permet l'apparition de systèmes biologiques beaucoup plus complexes avec des niveaux d'organisation permettant le développement de processus autres que l'autonomie nutritionnelle. On voit ainsi apparaître le système immunitaire qui assure la défense des organismes contre les maladies, mais surtout le système nerveux qui permet de percevoir l'environnement et de mieux agir sur celui-ci en retour.

Le couplage structurel devient alors « de second ordre » car cette boucle avec l'environnement ne maintient plus seulement une autonomie matérielle mais aussi informationnelle de l'organisme. Varela développera plus tard la théorie de l'énaction⁴ centrée spécifiquement sur ces aspects, avec un focus non plus sur l'évolution/la structure du vivant mais sur la cognition. Comme il avait pu le faire en proposant la théorie de l'autopoïèse, Varela va se distancier de ses contemporains en refusant d'employer la métaphore du cerveau ordinateur et en jouant avec l'idée de l'autonomie et du couplage.

Comme la stabilisation au cours de l'évolution du couplage cellules - environnement donne les conditions nécessaires à l'établissement du couplage entre les cellules elles-mêmes, la stabilisation de l'interaction entre des organismes et leur environnement sur le plan

³ Période de quelques dizaines de millions d'années —aussi appelée « big bang zoologique » — durant laquelle on constate une grande diversification des espèces animales, végétales et bactériennes.

⁴ L'énaction est la manière dont les êtres vivants s'organisent en interaction avec l'environnement.

informationnel a permis à ces organismes d'interagir entre eux (Figure 1). Ce couplage structurel « de troisième ordre » n'est rien d'autre que l'interaction sociale, la précondition d'émergence de la culture. Il est d'ailleurs intéressant de noter la connexion avec le spectacle *Kreature* de Sacha Waltz qui était justement évoqué lors de la session des « Rencontres Recherche et Création » dont ce texte est issu. En effet, l'ouverture du spectacle met en scène des danseurs arborant des costumes éthérés rappelant des membranes cellulaires. Les protagonistes interagissent, fusionnent et se divisent comme dans le chaos primordial. La suite du spectacle décrit l'évolution de ces interactions qui tendent vers des modes d'interaction plus complexes tels que le langage.

Comprendre l'interaction sociale : nouveau défi pour les neurosciences

Aussi paradoxal que cela puisse paraître, les travaux en neurosciences sociales ont longtemps été centrés sur des cerveaux isolés, ce qui a conduit certains chercheurs à utiliser une autre métaphore en considérant l'interaction sociale comme la "matière noire"⁵ des neurosciences sociales (Schilbach et al. 2013). Il faut attendre les années 2000 pour que l'interaction sociale soit prise au sérieux par les neuroscientifiques et que ceux-ci étudient le fonctionnement non plus d'un mais de deux cerveaux en synergie (Hari & Kujala 2009).

Dès lors deux défis méritaient d'être relevés : sur le plan théorique, il fallait inventer des protocoles expérimentaux qui permettent de questionner cette dimension interactionnelle, et sur le plan technique, il fallait construire des outils d'enregistrement de l'activité cérébrale lors d'échanges réciproques et en temps réel. L'étude du cerveau avait jusqu'alors été orientée vers la perception sociale, à partir des recherches centrées sur la perception des stimuli sociaux et ces investigations ne prenaient aucunement en compte la réciprocité et la co-régulation des échanges. Les participants devaient, par exemple, détecter une émotion à partir d'images de visages ou imiter les scènes présentées dans une vidéo. Mais évidemment, comme l'image d'un visage ou une vidéo demeurent insensibles au comportement du spectateur, l'information est en ce cas unidirectionnelle et non pas bidirectionnelle comme dans les interactions sociales.

Comment fermer cette boucle dans laquelle le soi et l'autre s'influencent mutuellement ? Trois grandes approches ont été développées : étudier "*in vivo*" plusieurs humains simultanément, simuler "*in silico*" (i.e. dans un ordinateur) ces interactions avec des modèles mathématiques, et

⁵ Métaphore faisant référence à une substance physique, aussi appelée « matière sombre », qui serait constituée de particules n'ayant jamais été détectées en laboratoire mais qui, pourtant, représenteraient une masse conséquente de l'univers d'après certaines observations astrophysiques.

combiner les deux, l'observation de l'interaction entre des humains et les modèles mathématiques.

Cerveaux sur la même longueur d'onde ou l'exploration de la synchronie

Étudier plusieurs participants humains en interaction avait déjà été réalisé en psychologie, par exemple dans les recherches sur le développement de l'enfant qui ont mis en évidence le rôle fondamental de la co-régulation des échanges entre le bébé et ses parents (Fogel 1993). Toutefois, pour appliquer cette approche aux neurosciences, il fallait la combiner avec des enregistrements de l'activité cérébrale des différents participants en interaction. C'est le but de la méthode appelée "hyperscanning", introduite en 2002 à partir de l'Imagerie par Résonance Magnétique fonctionnelle (IRMf; Montague et al. 2002), puis étendue à l'électroencéphalographie (EEG) en 2006 (Babiloni et al. 2006⁶). Ces premières études démontraient la faisabilité des enregistrements simultanés, et les premiers résultats confirmaient que nos cerveaux tendent à réagir de manière d'autant plus similaire dans des contextes sociaux qu'ils partagent les mêmes informations. Toutefois, ces premiers enregistrements en hyperscanning n'avaient pas pu mettre en évidence le couplage structurel de 3ème ordre, c'est à dire le fait que les cerveaux des participants en interaction se synchronisent, en fonction d'une stimulation commune extérieure (e.g. une musique sur laquelle ils danseraient ou un film qu'ils regarderaient simultanément).

C'est en combinant l'imitation spontanée (une tâche de psychologie du développement où deux personnes s'imitent mutuellement de manière libre) avec des enregistrements EEG en hyperscanning, que nous avons réussi à approcher ce couplage de troisième ordre. Lorsque les participants interagissent spontanément, ils entrent en synchronie interactionnelle, c'est-à-dire que leurs comportements sont co-dépendants dans le temps au point que leurs mouvements commencent et finissent en même temps, même si ces mouvements ne sont pas identiques sur le plan morphologique. En isolant ces moments de synchronie interactionnelle lors d'imitations spontanées de mouvement des mains, nous avons pu démontrer que ceux-ci s'accompagnent de synchronisations des ondes cérébrales entre les cerveaux des participants (Dumas et al 2010; Figure 2).

Outre qu'ils vont dans le sens des expressions "être en phase" ou "être sur la même longueur d'onde", ces résultats ont également montré que notre cerveau réagit à l'interaction sociale en temps réel de manière différente de la perception sociale. Par exemple, les circuits cérébraux de la récompense sont plus activés lors d'une interaction spontanée bidirectionnelle, comme le dialogue, et moins lorsque nous sommes passivement spectateurs d'un monologue. La mise en

⁶ Pour l'anecdote, des expérimentations ont été réalisées dans les années 60 avec l'EEG mais dans le domaine de la parapsychologie

évidence de ces variations, questionne donc la généralisation des résultats antérieurs dans le domaine des neurosciences sociales, basés uniquement sur une approche unidirectionnelle de la perception sociale. Les résultats soulignent également l'importance du contexte et le rôle joué dans l'interaction sociale (e.g. imitateur ou modèle) pour moduler la réponse du cerveau (Nadel & Dumas, 2014). Ces nouvelles approches pourraient avoir des applications sur la manière de concevoir des enseignements plus interactifs et d'aborder les arts vivants.

Jeux sociaux et règles biologiques

L'abeille rêve de la fleur, Et la fleur rêve de l'abeille, Abeille et fleur sont ensembles, telles que si vous enlevez l'une, l'autre disparaît.” ~ Francis Huxley

Ainsi, nous avons vu comment l'approche de la cognition humaine pouvait être renouvelée. En dépassant la métaphore du cerveau ordinateur, la pensée humaine peut être considérée comme une interface entre l'ancrage biologique dans le corps (notamment le cerveau) et les dynamiques sociales (Dumas, 2011). Une double contrainte opère entre ces deux faces : le cerveau social permet l'établissement d'un couplage informationnel avec les autres cerveaux, et les interactions sociales façonnent nos connections cérébrales (Clark et Dumas, 2016). Comme dans le mythe des aveugles et de l'éléphant, il semble donc que les différentes disciplines des sciences de la cognition doivent co-construire du sens au-delà des frontières disciplinaires et de leurs niveaux d'observation (Dumas, Laroche, Lehmann 2014). L'interaction sociale apparaît comme un subtil mélange entre les jeux de nos dynamiques inter-individuelles, et les règles neurobiologiques intra-individuelles.

Références bibliographiques

Maturana, Humberto R., Francisco J. Varela, and François-Charles Jullien. L'arbre de la connaissance. Ed. Addison-Wesley France, 1994

Schilbach, L., Timmermans, B., Reddy, V., Costall, A., Bente, G., Schlicht, T., & Vogeley, K. (2013). Toward a second-person neuroscience 1. Behavioral and brain sciences, 36(4), 393-414.

Hari, R., & Kujala, M. V. (2009). Brain basis of human social interaction: from concepts to brain imaging. Physiological reviews, 89(2), 453-479.

Montague, P. R., Berns, G. S., Cohen, J. D., McClure, S. M., Pagnoni, G., Dhamala, M., ... & Fisher, R. E. (2002). Hyperscanning: simultaneous fMRI during linked social interactions.

Babiloni, F., Cincotti, F., Mattia, D., Mattiocco, M., Fallani, F. D. V., Tocci, A., ... & Astolfi, L. (2006, August). Hypermethods for EEG hyperscanning. In Engineering in Medicine and Biology Society, 2006. EMBS'06. 28th Annual International Conference of the IEEE (pp. 3666-3669). IEEE.

Dumas, G., Nadel, J., Soussignan, R., Martinerie, J., & Garnero, L. (2010). Inter-brain synchronization during social interaction. *PloS one*, 5(8), e12166.

Nadel, J., & Dumas, G. (2014). The interacting body: intra-and interindividual processes during imitation. *J. Cogn. Educ. Psychol*, 13, 163-175.

Dumas, G. (2011). Towards a two-body neuroscience. *Communicative & integrative biology*, 4(3), 349-352.

Clark, I., & Dumas, G. (2016). The regulation of task performance: a trans-disciplinary review. *Frontiers in psychology*, 6, 1862.

Dumas, G., Laroche, J., & Lehmann, A. (2014). Your body, my body, our coupling moves our bodies. *Frontiers in human neuroscience*, 8, 1004.

Figures

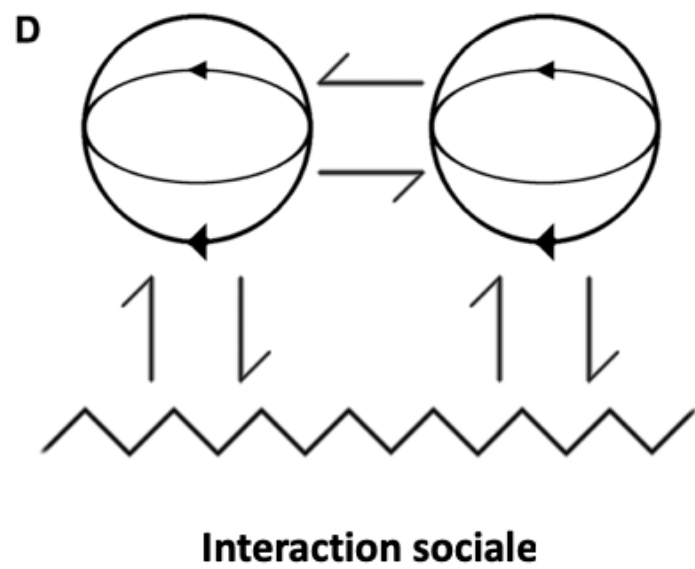
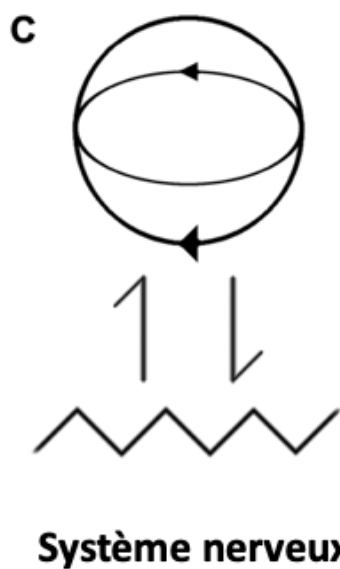
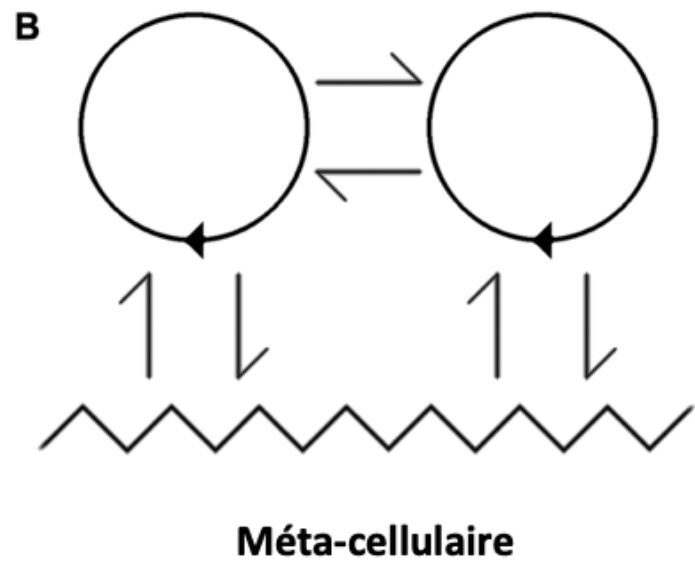
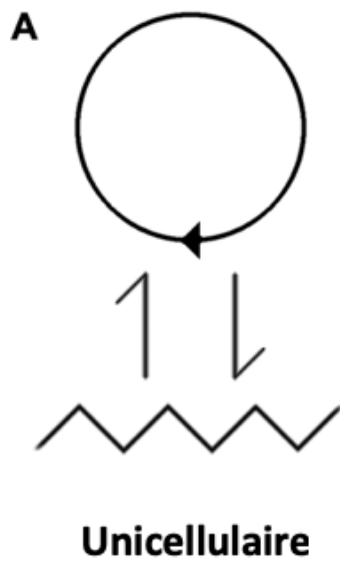


Figure 1 : les différentes échelles de couplages structurels. A) L'unité autopoïétique unicellulaire. B) Organisme méta-cellulaire émergeant d'un couplage structural de second ordre. C) Organisme avec système nerveux : le couplage de second ordre conduit à une boucle interne dans l'organisme qui renforce sa capacité à intégrer son propre état dans ses comportements. D) L'interaction sociale : un couplage structural de troisième ordre.

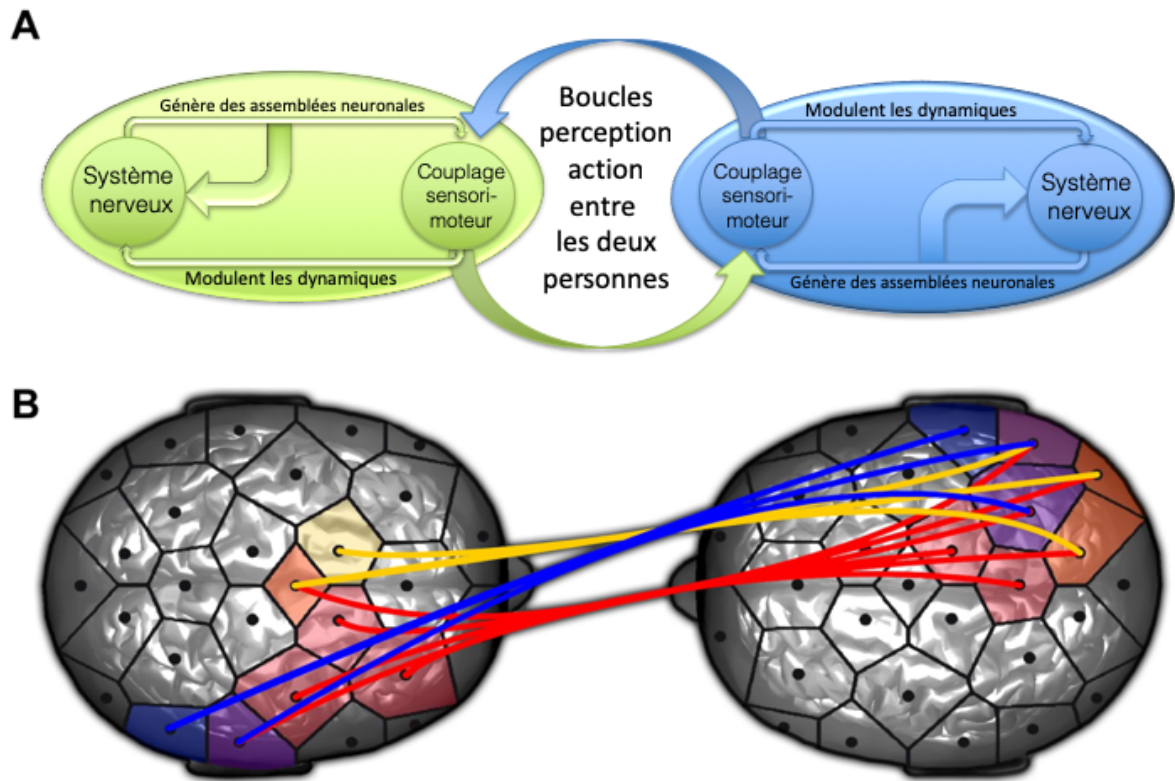


Figure 2 : synchronisations inter-cérébrales. A) Vue schématique de l'interaction sociale dyadique considérée comme un couplage par la perception et l'action entre deux personnes. B) Synchronisation inter-cerveaux dans les bandes de fréquences alpha (bleu), bêta (orange) et gamma (rouge) liées à la synchronisation interactionnelle pendant l'imitation spontanée des mouvements de la main (d'après Dumas 2011)