

# AFSCET

## Res-Systemica

Revue Française de Systémique  
Fondée par Evelyne Andreewsky

Volume 25, Rochebrune 2022

Systèmes complexes ; théorie et pratiques

Res-Systemica, volume 25, article 09

Le cerveau, un système complexe

Salma Mesmoudi

15 pages



Creative Commons

# LE CERVEAU, UN SYSTÈME COMPLEXE

Salma Mesmoudi

Université Paris1 Sorbonne-Panthéon

MATRICE

CESSP-UMR 8209

## **Résumé :**

Le cerveau est un système complexe à plusieurs échelles d'espace et de temps peut être décomposé en sous-composants qui interagissent entre eux. Il est important de noter que les propriétés graphiques des réseaux du cerveau humain ont été directement liées au fonctionnement du système par des corrélations avec des variables comportementales et cognitives, notamment la fluidité verbale, le QI et la précision de la mémoire de travail. Cependant, certaines études ont mis en évidence correspondance des propriétés métaboliques du cerveau avec l'organisation du réseau, ce qui suggère des contraintes énergétiques sur l'architecture sous-jacente du connectome. Ces résultats sont cohérents avec nos travaux caractérisant l'intégration topographique de l'organisation du réseau cérébral dans l'espace et dans le temps.

**Mots clés :** cerveau, complexité, topographie, intégration

## **Abstract :**

The brain is a complex system at multiple scales of space and time that can be broken down into subcomponents that interact with each other.

Importantly, the graphical properties of human brain networks have been directly linked to system functioning through correlations with behavioral and cognitive variables, including verbal fluency, IQ, and working memory accuracy. However, some studies have shown correspondence of metabolic properties of the brain with the organization of the network, suggesting energetic constraints on the underlying architecture of the connectome. These results are consistent with our work characterizing the topographic integration of brain network organization in space and time.

Key words : brain, complexity, topography, integration

## **I. Introduction**

Le cerveau est un organe complexe que les chercheurs en neurosciences et d'autres disciplines continuent d'examiner en détail. Cette complexité se traduit par la multiplicité des échelles (l'échelle spatiale et temporelle), son irréductibilité, ainsi que l'émergence qui pourrait être un cadre pour la relation esprit-cerveau (Bassett & Gazzaniga, 2011).

L'organisation anatomique et fonctionnelle du cerveau des mammifères englobe de multiples sous-réseaux, dotés de connexions intrinsèques denses et regroupés sur différents sites anatomiques. Ces réseaux sont relativement spécialisés dans le traitement et le routage de différents flux d'informations liés à l'intégration sensorimotrice et cognitive, par exemple le système visuel, avec ses régions sensorielles précoces et ses multiples flux (ventraux et dorsaux). Ils sont reliés les uns aux autres de manière

partiellement hiérarchique (Eckert et al., 2008). Les systèmes modaux, par exemple les systèmes visuels, auditifs, somatosensoriels, y compris les régions primaires et secondaires, sont intégrés au niveau des régions bimodales ou multimodales, pour le transfert d'informations inter-modales, elles-mêmes intégrées au niveau des régions d'association d'ordre supérieur, qui sont souvent en position de hubs par rapport à ces autres systèmes cérébraux (van den Heuvel & Sporns, 2011). Pour que l'organisation de ces réseaux soit efficace, il est important qu'ils « se plient » à certaines contraintes. Ces contraintes impliquent que : 1) les régions du cerveau sont énergiquement actives de façon différentielle et évolutive, soutenant des quantités variables de développement et de développement des synapses ou de plasticité. 2) Sur le plan anatomique, ce principe organisationnel de modularité hiérarchique est potentiellement compatible avec une pression évolutive pour la réduction de la taille des synapses et de la plasticité de manière générale. 3) Les régions proches les unes des autres dans l'espace physique interagissent fortement alors que les connexions anatomiques ou les interactions fonctionnelles à longue portée relient les régions entre elles avec les modules disparates. 4) Le pliage du feuillet cortical ainsi que son positionnement à l'extérieur du cerveau permet au schéma du réseau complexe du cerveau de contenir des connexions à courte portée énergiquement efficaces.

Parmi les solutions architecturales documentées dans la littérature, l'architecture en anneau semble optimale (Mesmoudi et al., 2013) pour mettre en œuvre un réseau résilient en temps réel de l'accès aux informations. Ce type d'architecture présente un coût d'énergie inférieur à celui des réseaux entièrement connectés, tout en préservant un niveau élevé de résilience. Les architectures en anneau sont très évolutives et offrent une résilience grâce à la redondance. Pour que cette architecture réponde aux contraintes cités plus haut, il est impératif que :

- 1) les régions cérébrales sensorimotrices d'ordre supérieur qui intègrent les informations sensorimotrices en cours devraient être connectées deux par deux en une chaîne fermée ;
- 2) des ondes progressives mesurables de signaux électriques devraient circuler le long de cet anneau anatomique, reflétant l'acheminement de la récupération des informations dans le magasin distribué ;
- 3) le système global devrait être résistant aux petites lésions mais très sensible aux lésions plus importantes ;
- 4) l'anneau et le système global de traitement en temps réel devraient contenir des connexions fortes et à courte portée ;
- 5) néanmoins, la dépense énergétique devrait être relativement faible dans ce système.

Dans le reste de l'article nous développerons la capacité de cette architecture en double anneaux à répondre aux spécificités et aux contraintes.

## **II. Intégration en temps réel dans l'anneau VSA et intégration multi-temporelles dans l'anneau PTF**

L'architecture en double anneaux entrelacée semble également souligner un double processus d'intégration : l'anneau VSA effectue une intégration multimodale rapide en temps réel des informations sensorimotrices, pour contrôler les interactions avec l'environnement, tandis que l'anneau PTF effectue des intégrations multi-temporelle (c'est-à-dire mettre en relation les représentations passées, présentes et futures à différentes échelles temporelles), comme décrit ci-dessous.

Le traitement sensorimoteur dans l'anneau VSA implique de fortes contraintes "temps réel", conçues pour relier ensemble diverses sources d'informations auditives, visuelles et somatomotrices et pour contrôler le comportement réel. Ces interactions en temps réel sont importantes, non seulement au sein de chaque modalité comme sensorielle ou motrice, mais aussi pour toutes leurs interactions bimodales : entre visuel et moteur (par exemple, saisir, atteindre, imiter) ; entre information auditive et somatomotrice (par exemple, reconnaître et produire des phonèmes) ; et entre information auditive et visuelle (importante

pour la communication). Nos résultats montrent que l'anneau PTF met en œuvre au moins quatre groupes principaux de fonctions : (1) régulation biologique, olfaction, goût et émotion, (2) mémoire de travail et attention, (3) fonctions cognitives supérieures et cognition sociale et (4) langage. Les processus neuronaux communs qui soutiennent ces fonctions (par opposition aux processus sensorimoteurs en temps réel) intègrent différentes sources d'information de manière "multi-temporelle", à différentes échelles de temps, y compris le rappel du passé et les projections dans le futur.

Les régulations et les rythmes biologiques (dans la partie médiane et antérieure de l'anneau PTF (Laird et al., 2011), fonctionnent à différentes échelles de temps et sont fortement influencés par (1) l'hypothalamus et les régulations hormonales allant de quelques minutes à quelques jours et mois et par (2) le système dopaminergique impliqué dans la conduite, la récompense et le renforcement, allant de quelques minutes à quelques heures. De même, les émotions sont des réactions prolongées, qui durent beaucoup plus longtemps que les stimuli sensoriels émotionnels induits : l'olfaction et le goût produisent des effets neuronaux qui durent beaucoup plus longtemps que ceux produits par la vision, l'audition ou le toucher en temps réel.

La planification et la mémoire de travail (dans le réseau frontal latéral de l'anneau PTF) sont basées sur l'intégration de l'information à travers le temps par des activations neuronales

soutenues et sont capables d'intégrer dans une même séquence, plusieurs événements sensoriels et moteurs séparés par des délais longs et variables (Kovach et al., 2012; Mesulam et al., 2002; Milner et al., 1985; Northoff & Bermpohl, 2004; Vogeley & Fink, 2003). Les fonctions cognitives supérieures (dans la partie fronto-pariétale médiane de l'anneau PTF) nécessitent l'intégration d'informations à différentes échelles temporelle du passé (mémoire), du présent et du futur (Andrews-Hanna et al., 2010; Buckner et al., 2009; Decety & Sommerville, 2003; Gallagher & Frith, 2003; Gusnard et al., 2001; Kiviniemi et al., 2011; Schacter et al., 2007; Yan et al., 2009). Ces régions sont actives à la fois lorsque les sujets considèrent leur état mental actuel et lorsqu'ils font des déductions sur l'état mental des autres (théorie de l'esprit et de la cognition sociale) (Buckner & Carroll, 2007; Fuster, 2006; Ochsner et al., 2004; Saxe & Kanwisher, 2003). Ces processus peuvent durer de quelques minutes à quelques heures.

Le traitement du langage (partie temporo-pariéto-frontale gauche de l'anneau PTF) nécessite la formation de représentations conceptuelles significatives intégrant les événements et leurs conséquences sur de longues lignes de temps. Il est frappant de constater que les régions de l'anneau PTF correspondent à des régions qui sont plus fortement activées pour les mots ayant un sens que pour les pseudo-mots, qui, en revanche, ne sont traités que dans l'anneau VSA [11]. L'anneau PTF a une topographie assez similaire aux activations cérébrales liées au traitement



sémantique (Binder et al., 2009; Buckner et al., 2008; Fuster & Bressler, 2012). En revanche, le traitement de la parole nécessite un traitement en temps réel de la perception de la forme visuelle, de l'articulation motrice et de la perception auditive et, par conséquent, les TBN correspondants se trouvent dans l'anneau VSA. Les processus doubles que nous postulons à travers les deux anneaux (c'est-à-dire l'intégration en temps réel et multi-temporelle), sont proches du processus double proposé par Fuster (Fuster, 2006; Kravitz et al., 2011) avec à la fois des cycles perception-action et des processus de mémoire de travail (WM pour working memory). Un cycle de perception-action nécessite une contiguïté temporelle entre les différents signaux. En revanche, la mémoire de travail basée sur une activation neuronale soutenue est essentielle à l'intégration des informations dans le temps pour le comportement, le raisonnement et le langage, qui font le pont entre le temps et le cycle de perception/action. La WM a une fonction rétrospective de rétention et une fonction prospective d'anticipation et de préparation des actions à venir. Elle permet de stocker en mémoire les structures temporelles des stratégies, des mélodies, des phrases, des scripts, etc. De plus, les processus de la WM dépendent des interactions entre les réseaux à grande échelle du cortex cérébral, impliquant la co-activation de plusieurs zones corticales non contiguës (par exemple, une région préfrontale latérale et, une région du cortex postérieur).

EEG : Les réponses sélectives aux objets sont apparues dans les régions pariétales, frontales et temporales liées à l'utilisation d'outils et à la reconnaissance d'objets (Vlcek et al., 2020).

### **III Avantages topologiques de l'entrelacement**

L'architecture en deux anneaux entrelacés constitue un avantage topologique important, car elle crée de multiples interfaces entre les deux anneaux dans chaque hémisphère pour une grande variété de fonctions cognitives et sensorimotrices. Tout d'abord, l'architecture entrelacée forme trois grandes interfaces entre les deux anneaux, qui correspondent à trois grands sillons : le sillon pré-central, le sillon STS et le sillon intrapariétal. Le sillon pré-central forme une interface VSA-PTF pour les tâches associant des objectifs multi-temporelle et des sous-objectifs (zones frontales) avec une commande en temps réel de chaque action (zones somatomotrices). Le sillon STS forme une deuxième interface VSA-PTF pour les tâches associant la parole en temps réel (les aires temporales supérieures) à la signification multi-temporelle des mots (les aires temporales inférieures). Le sillon intrapariétal forme une troisième interface VSA-PTF pour les tâches impliquant le traitement visuo-motrice en temps réel de scènes et d'événements et le traitement multi-temporelle de ces scènes en termes d'interactions sociales.

Deuxièmement, l'architecture entrelacée place les zones pariétales associatives BA#39 et 40 (qui font partie de l'anneau PTF) dans le trou central de l'anneau VSA à la confluence des flux de traitement visuel, spatial, somatosensoriel et auditif (voir (Golland et al., 2007)). Cette même région BA#39 est également liée à la partie médiane de l'anneau PTF qui est impliquée dans les représentations des intentions et des interactions sociales. La BA#39 peut donc transformer l'observation en temps réel des actions, des scènes et des événements traités dans l'anneau VSA en prédictions et interprétations à plus long terme liées aux intentions et aux interactions sociales traitées dans l'anneau PTF (voir (Fair et al., 2007, 2008)). Troisièmement, l'architecture entrelacée place les régions somatomotrices VSA dans une position centrale entre les zones pariétale et frontale du PTF, qui sont elles-mêmes reliées par le réseau pariétal-frontal. Les régions somatomotrices peuvent commander des actions en fonction à la fois des objectifs et des sous-objectifs (liens avec les régions frontales) et de l'interprétation des scènes (liens avec les régions pariétales).

#### **IV L'architecture en double anneau et la plasticité du cerveau**

Il existe des preuves bien documentées de changements neuroplastiques intermodaux importants à la suite d'une privation sensorielle chez les personnes atteintes de cécité ou de surdité

précoce. Plus précisément, il semble qu'il y ait un recrutement fonctionnel des zones corticales normalement associées au traitement de la modalité sensorielle perdue par les autres sens intacts. Ces changements neuroplastiques peuvent être de nature adaptative et compensatoire (Bavelier & Neville, 2002; Pascual-Leone et al., 2005; Rauschecker, 1995). Par exemple, le cortex occipital est normalement associé au traitement des informations visuelles, mais en cas de cécité, il est recruté pour traiter les informations tactiles (y compris la lecture du braille et la reconnaissance de formes tactiles complexes), les informations auditives (pour la localisation des sons et le traitement de la parole) et les tâches de mémoire verbale (Collignon et al., 2007; Merabet et al., 2005; Théoret et al., 2004).

Dans une étude qui a exploré à l'aide de l'IRMf les corrélats neuronaux associés au traitement du langage chez un individu unique, aveugle précoce, sourd congénital et possédant un haut niveau de fonction langagière, des résultats très intéressants ont été obtenus pour l'anneau VSA (Obretenova et al., 2010). En effet, la tractographie basée sur l'imagerie du tenseur de diffusion a révélé des différences compatibles avec une connectivité occipitale-temporale accrue chez le sujet sourd-aveugle. Les zones corticales activées chez ce sujet sourd-aveugle sont cohérentes avec les régions corticales caractéristiques du VSA.

## **V L'architecture en double anneau et la gestion énergétique.**

À l'aide de données de la Tomographie à Emission de Positons (TEP) existantes et de parcellations de réseaux fonctionnels, certains auteurs ont examiné les différences métaboliques dans les réseaux fonctionnels corticaux différemment myélinisés. Les réseaux d'association cognitive légèrement myélinisés ont tendance à présenter une glycolyse aérobie plus élevée que les réseaux sensori-moteurs précoces fortement myélinisés (Glasser et al., 2014). En effet, dans ces travaux, il a été trouvé une glycolyse aérobie plus faible dans les réseaux sensori-moteurs, auditifs et visuels. Ces réseaux appartenant à l'anneau VSA reflètent peut-être des processus corticaux anaboliques dynamiques plus importants.

## **VI Émergence : fonctionnement à deux échelles temporelle**

L'ensemble des contraintes d'un fonctionnement complexe auxquelles répondent l'architecture en double anneaux entrelacée semble faire émerger à l'échelle fonctionnelle un double processus d'intégration : l'anneau VSA effectue une intégration multimodale rapide en temps réel des informations sensorimotrices, pour contrôler les interactions avec l'environnement, tandis que l'anneau PTF effectue des intégrations multi-temporelle (c'est-à-dire mettre en relation les représentations passées, présentes et futures à différentes échelles temporelles), comme décrit ci-dessous. Le traitement sensorimoteur dans l'anneau VSA implique de fortes contraintes "temps réel", conçues pour relier un

ensemble de diverses sources d'informations auditives, visuelles et somatomotrices et pour contrôler le comportement réel. Ces interactions en temps réel sont importantes, non seulement au sein de chaque modalité comme sensorielle ou motrice, mais aussi pour toutes leurs interactions bimodales : entre visuel et moteur (par exemple, saisir, atteindre, imiter) ; entre information auditive et somatomotrice (par exemple, reconnaître et produire des phonèmes) ; et entre information auditive et visuelle (importante pour la communication). L'anneau PTF met en œuvre au moins quatre groupes principaux de fonctions : (1) régulation biologique, olfaction, goût et émotion, (2) mémoire de travail et attention, (3) cognition sociale et (4) langage. Les processus neuronaux communs qui soutiennent ces fonctions (par opposition aux processus sensorimoteurs en temps réel) intègrent différentes sources d'information de manière "multi-temporelle", à différentes échelles de temps, y compris le rappel du passé et les projections dans le futur.

Les régulations et les rythmes biologiques (dans la partie médiane et antérieure de l'anneau PTF (Laird et al., 2011), fonctionnent à différentes échelles de temps et sont fortement influencés par (1) l'hypothalamus et les régulations hormonales allant de quelques minutes à quelques jours et mois et par (2) le système dopaminergique impliqué dans la conduite, la récompense et le renforcement, allant de quelques minutes à quelques heures. De même, les émotions sont des réactions prolongées, qui durent beaucoup plus longtemps que les stimulus sensoriels émotionnels induits : l'olfaction et le goût produisent des effets neuronaux qui

durent beaucoup plus longtemps que ceux produits par la vision, l'audition ou le toucher en temps réel.

### **Remerciements**

Ce travail a été réalisé dans le cadre de l'équipement d'excellence "MATRICE". ([matricememory.fr](http://matricememory.fr)) et du programme de la prématuration de CNRS-innovation. Le programme MATRICE est parrainé administrativement par l'Université HESAM. Nous tenons également à remercier l'Allen Institute for Brain Science pour avoir partagé ses données d'expression génétique du cerveau humain.

### **Références**

- Bassett, D. S., & Gazzaniga, M. S. (2011). Understanding complexity in the human brain. *Trends in Cognitive Sciences*, *15*(5), 200.  
<https://doi.org/10.1016/j.tics.2011.03.006>
- Eckert, M. A., Kamdar, N. V., Chang, C. E., Beckmann, C. F., Greicius, M. D., & Menon, V. (2008). A cross-modal system linking primary auditory and visual cortices: Evidence from intrinsic fMRI connectivity analysis. *Human Brain Mapping*, *29*(7), 848–857.  
<https://doi.org/10.1002/hbm.20560>
- Mesmoudi, S., Perlberg, V., Rudrauf, D., Messe, A., Pinsard, B., Hasboun, D., Cioli, C., Marrelec, G., Toro, R., Benali, H., & Burnod,

Y. (2013). Resting State Networks' Corticotopy: The Dual Intertwined Rings Architecture. *PLoS ONE*, 8(7), e67444.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0067444>

Mesmoudi, S., Rodic, M., Cioli, C., Cointet, J.-P., Yarkoni, T., & Burnod, Y. (2015). LinkRbrain: Multi-scale data integrator of the brain. *Journal of Neuroscience Methods*, 241, 44–52.

<https://doi.org/10.1016/j.jneumeth.2014.12.008>

van den Heuvel, M. P., & Sporns, O. (2011). Rich-Club Organization of the Human Connectome. *The Journal of Neuroscience*, 31(44), 15775–15786. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.3539-11.2011>