

The Role of neuronal oscillations in local computations and network brain dynamics

Le rôle des oscillations neuronales dans les processus computationnels locaux et la dynamique des réseaux cérébraux

by Tommy CLAUSNER

These de doctorat de l'Université de Lyon
PhD thesis



Ecole Doctorale N° 476 - NSCO
Ecole Doctorale Neurosciences et Cognition
l'Université Claude Bernard Lyon 1
France

thesis director | Mathilde BONNEFOND (INSERM, Lyon)

reviewer | Simon HANSLMAYR (University of Glasgow)
reviewer | Floris DE LANGE (Donders Institute, Nijmegen)
examiner | Johanna ZUMER (Aston University, Birmingham)
examiner | Rémi GERVAIS, (University Lyon 1)

November 7, 2022
N°d'ordre NNT: xxx

English summary

The human brain is a vastly expensive information processing machine with respect to its relative energy uptake compared to other organs. This cost must be outweighed by potential benefits in order to be a viable solution. Hence, it can be hypothesized that the human brain is an extremely efficient information processing apparatus that outperforms any artificial system in terms of energy efficiency by far. Thereby, an understanding of general underlying compute principles not only reveals potential new insights into how artificial neural network systems can be improved but furthermore would have a major impact on clinical applications, such as brain computer interfaces (BCI), artificial sensory organs (e.g. cochlea implants) or robotic prosthetics that communicate directly with the nervous system. It has been demonstrated countless times that neuronal oscillations - rhythmically synchronized neuronal activity - play an important role in cortical signal processing. However, their exact role with respect to the actual ongoing information processing remains still widely unclear. A major problem thereby is that neuronal oscillations and respective cortical computation models make predictions on the level of cortical laminae. While relatively easy accessible in animal models, cortical activity with laminar level resolution ($< 1 \text{ mm}$) is difficult to obtain in healthy subjects. The present thesis not only aims to demonstrate how to bridge the gap between human and animal model methodologically by implementing state of the art neuro-imaging pipelines, but furthermore targets core predictions derived from animal models and patient studies with respect to the role of neuronal oscillations in local computations and network brain dynamics. A simultaneous EEG-fMRI experiment was conducted with a voxel size of 0.8 mm . Thereby, stimulus feature specific α activity could be shown to differentially respond to preferred compared to not preferred stimuli predominantly in deep and middle cortical layers of V1, separately for low and high α . γ band oscillations have been found to be correlated with the feature processing itself, predominantly in deep and superficial layers. Both findings are in line with previous literature. Additionally two laminar level MEG experiments have been conducted in order to refine respective findings from the previous experiment. Thereby, one MEG experiment has been specifically designed to target low level cortical interactions, whereas the second has been designed to target low to higher order communication for multiple frequency bands. Due to the pandemic and other circumstances, the recordings of the MEG data have been delayed by more than a year. For this reason only preliminary results can be presented. Additionally, it has been planned to investigate different possibilities to test respective hypotheses using neural network simulations. However, as expected, only the initial planning and piloting phase has been reached. In summary, this thesis provides new insights into differential α and γ band activity in different cortical layers, confirming predictions from animal and theoretical models.

Résumé français

Le cerveau humain est une machine de traitement de l'information extrêmement coûteuse en termes de consommation d'énergie par rapport à d'autres organes. Pour être une solution viable, ce coût doit être compensé par les avantages potentiels. On peut donc émettre l'hypothèse que le cerveau humain est un appareil de traitement de l'information extrêmement efficace qui surpasse de loin tout système artificiel en terme d'efficacité énergétique. Ainsi, la compréhension des principes généraux de calcul sous-jacents ne révèle pas seulement de nouvelles perspectives potentielles sur la façon dont les systèmes de réseaux neuronaux artificiels peuvent être améliorés, mais aurait également un impact majeur sur les applications cliniques telles que les interfaces cerveau-machine, les organes sensoriels artificiels (par exemple, les implants de cochlée) ou les prothèses robotiques qui communiquent directement avec le système nerveux. Il a été démontré à maintes reprises que les oscillations neuronales - activité neuronale synchronisée de manière rythmique - jouent un rôle important dans le traitement des signaux corticaux. Cependant, leur rôle exact par rapport au traitement de l'information en cours reste encore très flou. Un problème majeur est que les oscillations neuronales et les modèles de calcul cortical respectifs font des prédictions au niveau des couches corticales. Bien que relativement facile d'accès dans les modèles animaux, l'activité corticale avec une résolution au niveau laminaire ($< 1 \text{ mm}$) est difficile à obtenir chez les sujets sains. La présente thèse vise non seulement à démontrer comment combler le fossé entre les modèles humains et animaux d'un point de vue méthodologique en mettant en œuvre des pipelines de neuro-imagerie de pointe, mais aussi à cibler les prédictions fondamentales dérivées des modèles animaux et des études sur les patients en ce qui concerne le rôle des oscillations neuronales dans les calculs locaux et la dynamique des réseaux cérébraux. Une expérience EEG-IRMf simultanée a été menée avec une taille de voxel de $0,8 \text{ mm}$. Il a ainsi été démontré que l'activité α spécifique aux caractéristiques du stimulus répondait de manière différentielle aux stimuli préférés des neurones activés par rapport aux stimuli non préférés par ces neurones, principalement dans les couches corticales profondes et moyennes de V1, séparément pour les oscillations α de fréquence élevée et basse. On a constaté que les oscillations de la bande γ étaient corrélées au traitement des caractéristiques du stimulus, principalement dans les couches profondes et superficielles. Ces deux résultats sont en accord avec la littérature antérieure. En outre, deux expériences MEG au niveau laminaire ont été menées afin d'affiner les résultats respectifs de l'expérience précédente. Ainsi, une expérience MEG a été spécifiquement conçue pour cibler les interactions corticales de bas niveau, tandis que la seconde a été conçue pour cibler la communication de bas à haut niveau pour des bandes de fréquences multiples. En raison de la pandémie, les enregistrements des données MEG ont été retardés de plus d'un an. Pour cette raison, seuls des résultats préliminaires peuvent être présentés. En outre, il a été prévu d'étudier différentes possibilités de tester les hypothèses respectives à l'aide de simulations de réseaux neuronaux. Cependant, comme prévu, seule la phase initiale de planification et de visualisation a été atteinte. En

résumé, cette thèse fournit de nouvelles informations sur l'activité différentielle des bandes α et γ dans différentes couches corticales, confirmant les prédictions des modèles animaux et théoriques.