

Les neurosciences intégratives : de la performance à la santé

Integrative neuroscience : from performance to health

CHERON G.

Laboratoire de Neurophysiologie et de Biomécanique du Mouvement (LNMB),
Faculté des Sciences de la Motricité, Campus Erasme, Université libre de Bruxelles (ULB)

RÉSUMÉ

Les neurosciences intégratives s'appliquent aujourd'hui dans de nombreux domaines de l'activité humaine. Cet article aborde l'intérêt croissant d'une meilleure compréhension du fonctionnement du cerveau notamment lors de la performance sportive de haut niveau où la réussite nécessite de plus en plus de connaissances par rapport aux déterminants de l'activité neuronale qui pilotent les stratégies neuromotrices et les états mentaux propices à l'excellence. L'état du « flow » psychologique a été récemment revisité à l'aide de l'enregistrement de l'électroencéphalographie dynamique lors de performances sportives et artistiques. La nouvelle conception oscillatoire du fonctionnement du cerveau est au centre de ces nouvelles démarches expérimentales qui peuvent déboucher sur des applications diverses non seulement dans le domaine du sport mais aussi dans l'éducation et dans la santé en général.

Rev Med Brux 2020 ; 41 : 389-393

ABSTRACT

Integrative neuroscience is today applied in many areas of human activity. This article addresses the growing interest for a better understanding of brain functioning, especially during high-level sports performance where success requires more and more knowledge about the determinants of neuronal activity that drive neuromotor strategies and the related mental states conducive to excellence. The state of psychological “flow” was recently revisited using dynamic electroencephalography recording during athletic and artistic performances. The new oscillatory conception of the brain functioning is at the center of these new experimental approaches which can lead to various applications not only in the field of sport but also in education and in health in general.

Rev Med Brux 2020 ; 41 : 389-393

Key words : neuroscience, sport, performance, neuronal oscillations

INTRODUCTION

Les neurosciences intégratives s'accordent sur le fait que le cerveau est un générateur de mouvements. Il s'agit non seulement du mouvement du corps et des membres, mais aussi de celui impliqué dans le langage, dans l'articulation de la pensée, dans le fonctionnement de notre tube digestif, de notre système cardio-pulmonaire et finalement de tous les types de mouvements cellulaires ou biologiques. Le mouvement peut-être aussi envisagé comme un sens additionnel¹, une langue du corps vivant agissant comme une partie intégrante de la conscience^{2,3}. Le moment est donc venu d'oser ouvrir la porte des laboratoires de neurophysiologie à l'analyse des mouvements sportifs et d'appliquer les nouveaux outils des neurosciences intégratives à l'activité sportive sous tous ses angles allant de la performance de haut niveau au handisport. Ces démarches scientifiques peuvent non seulement contribuer

à mieux comprendre les stratégies neuromotrices mises en œuvre chez les sportifs mais aussi à pouvoir les appliquer à la santé, à l'éducation et au bien-être en général.

Il n'est pas surprenant que les approches neurophysiologiques modernes alliant les nouvelles technologies d'enregistrement tridimensionnel du mouvement, l'électromyographie (EMG) multiple associée aux accéléromètres et à l'électroencéphalographie (EEG) dynamique ont pu voir le jour au cours de ces dix dernières années⁴. L'arrivée en force des GAFAs dans le domaine des neurosciences dont le tout dernier « buzz » d'Elon Musk⁵ rendant possible l'implantation dans le cortex d'un cochon d'une puce électronique fonctionnant sans fil, peut avoir un impact médiatique considérable sur le grand public et soulève chez les chercheurs en neurosciences des sentiments contradictoires. D'une part, nous pouvons être émerveillés par les technologies développées par cette société privée, mais d'autre part, en dehors des questions politiques

relatives à l'insuffisance d'investissement par les Etats dans la recherche fondamentale, il est dangereux de faire naître des espoirs thérapeutiques immédiats par rapport aux maladies du cerveau. Les neurosciences intégratives sont en effet confrontées à la complexité des circuits neuronaux de l'ensemble du système nerveux. Comme nous le savons, le cerveau assume des fonctions physiologiques diverses de régulation de l'homéostasie tout en produisant nos états mentaux, notre pensée, nos sentiments, notre créativité et nos actes. L'introduction de puces électroniques dans le cerveau n'est pas neuve et les neurosciences n'ont pas attendu l'arrivée des GAFA pour réaliser des approches similaires chez le singe, pouvant contrôler un bras robotisé à l'aide d'une puce implantée dans son cortex moteur. Mais là aussi les questions fondamentales concernant le fonctionnement du cerveau demeurent largement ouvertes et mériteraient à elles seules un investissement comparable à celui mis en place aujourd'hui par les GAFA.

Nous allons dans cet article montrer qu'il est possible d'approcher la complexité des processus cérébraux mis en place lors de la production de mouvements sportifs ainsi que les états mentaux qui les accompagnent. Nous devons en conclure que le temps n'est sans doute pas encore venu où la haute performance s'accomplira par l'introduction de puces électroniques dans le cerveau, mais que des procédures non invasives ont déjà démontré leur efficacité sur le terrain.

LES OSCILLATIONS CÉRÉBRALES AU SERVICE DE LA PERFORMANCE ET DE L'AMÉLIORATION DES ÉTATS MENTAUX

Non seulement nous pouvons capter avec une grande précision la trajectoire parfois fort complexe des mouvements, mais nous pouvons aussi avoir accès aux états mentaux du sujet grâce à l'enregistrement des activités électriques du cerveau par l'EEG dynamique.

De quoi s'agit-il ? La grande majorité des neuroscientistes s'accorde sur le fait que le cerveau utilise les oscillations neuronales pour communiquer. Ces oscillations peuvent être enregistrées sur le cuir chevelu à l'aide d'électrodes remplies de gels conducteurs. Elles sont le reflet fidèle des potentiels électriques que présentent les neurones, elles sont notamment de plus grande amplitude si la quantité et la synchronie des neurones recrutés sont plus grandes. La fréquence de ces oscillations va des basses fréquences, les ondes delta (1-2 Hz) qui apparaissent lors du sommeil profond, aux ondes de hautes fréquences, les ondes gamma (30-80 Hz) lors d'efforts perceptivo-cognitifs, en passant par les ondes thêta (3-6 Hz), alpha (8-13 Hz) et bêta (15-30 Hz). Ces trois dernières oscillations ont été plus souvent abordées dans le domaine du mouvement sportif⁶ car elles sont les moins contaminées par la présence des artéfacts liés aux mouvements et à l'activité électrique des muscles. Chacune de ces différentes bandes jouent des rôles spécifiques dont l'ajustement fin et les transitions dynamiques sont à la base des états mentaux. Ces états évoluent selon un

continuum allant des états de sommeils (sommeil lent et sommeil rapide) aux états d'éveils pouvant passer de la déambulation mentale aux états d'attention sélective maximale liés à la performance physique ou cognitive. Il s'agit plutôt d'une sorte de polyphonie où les rythmes se succèdent parfois de façon complexe et où la phase d'une oscillation par rapport à un événement à venir, une action à accomplir, devient déterminante. Certains rythmes comme le rythme alpha (oscillation à la fréquence de 10 Hz) sont de plus en plus étudiés et permettent notamment de prédire le niveau de performance⁷.

La grande amplitude du rythme alpha résulterait d'un entraînement cortical cohérent impliquant des circuits corticaux aux structures sous-corticales telle que le thalamus. La direction des messages véhiculés par les ondes alpha dans les boucles cortico-corticales (d'une aire cérébrale à une autre) est encore aujourd'hui fort discuté. Une étude récente⁸ réalisée lors d'interventions chirurgicales chez des patients épileptiques montre que la transmission des informations liées aux oscillations alpha se dirige des zones corticales hiérarchiquement supérieures vers les zones corticales plus primaires et ensuite vers les noyaux sous-corticaux. Nous étudions actuellement les oscillations alpha chez différents sportifs afin de tester leurs capacités à produire ces oscillations. Pour ce faire, nous utilisons un paradigme expérimental mis au point lors de nos missions spatiales dans l'ISS⁹. La réaction d'arrêt du rythme alpha déjà décrite par Hans Berger lors de la découverte de l'EEG est centrale dans notre approche. Lorsqu'on ferme les yeux, le rythme alpha apparaît le plus souvent sous la forme de fuseaux, la mesure de la puissance de cette oscillation est mesurée durant 10 secondes après la fermeture des yeux. Cette augmentation de puissance est qualifiée comme une synchronisation liée à l'évènement (*event-related-synchronization*, ERS) (dans le cas présent, la fermeture des yeux). L'ordre est ensuite donné d'ouvrir les yeux. Lorsque les yeux sont ouverts, on assiste à une réduction de l'amplitude de l'alpha. Il s'agit là de la réaction d'arrêt et on parle communément de désynchronisation liée à l'évènement (*event-related desynchronization*, EDR). La différence de puissance entre les deux états que l'on répète une dizaine de fois représente un indice de la dynamique alpha qui peut subir des variations en fonction des circonstances et des états mentaux dans lesquels le sujet se trouve. Selon l'hypothèse du projecteur (*searchlight hypothesis*) de Francis Crick¹⁰, c'est la réduction des entrées sensorielles (visuelles dans le cas de la fermeture des yeux) qui produit un entraînement cortical cohérent en provenance du thalamus. Ceci suggère qu'un athlète détendu mais bien focalisé montrerait une grande amplitude alpha avant l'accomplissement de la tâche motrice. On peut noter que chez les golfeurs, l'amplitude de la ERD alpha à 10-12 Hz est plus élevée lors de la préparation du mouvement réussi¹¹ alors qu'une ERS alpha apparaissait juste avant la frappe. Il a aussi été proposé que le rythme alpha agit comme un mécanisme permettant d'augmenter le rapport signal/bruit dans le cortex cérébral en inhibant les processus inutiles ou conflictuels de l'ac-

tion en cours^{12,13}, ceci à la manière d'un essuie-glace qui nous débarrasse de la pluie afin de mieux voir la route qui est devant nous. Les oscillations alpha devraient donc nous permettre de choisir le meilleur programme moteur pour accomplir un geste précis ou pour percevoir une entrée sensorielle, pour traiter un problème complexe ou accomplir une activité créatrice ou encore pour rentrer en contact et parler à nos congénères. Par ailleurs, la mesure du pic de la fréquence maximale de l'alpha pouvant varier de 8 à 13 Hz est également très importante pour la détermination de la performance sportive. Plus fondamentalement, il a été montré¹⁴ que la résolution temporelle de la perception visuelle mesurée par deux flashes arrivant à des intervalles de temps de plus en plus courts déterminent de la sorte le seuil de fusion où le sujet ne perçoit qu'un seul flash. Ce temps mesuré en millisecondes est d'autant plus court que la fréquence du rythme alpha est grande (plus proche de 13 Hz que de 10 Hz). De plus, c'est d'abord la fréquence de l'alpha les yeux fermés qui détermine le seuil de discrimination visuel du sujet. Lors de situations plus complexes, comme celles que l'on rencontre en compétition sportive ou dans la vie de tous les jours, la fréquence maximale de l'alpha peut se ralentir afin de pouvoir intégrer des éléments divers correspondants à des durées et des contextes différents¹⁴.

Contrairement aux conceptions classiques que notre capacité de perception dépend de l'agencement et des caractéristiques des stimuli gérés par des processus en *bottom-up* (du bas vers le haut), des propositions et des résultats récents¹⁴ suggèrent que les expériences perceptives sont élaborées de façon active. Cela signifie que les influences prédictives (*top-down* : du haut vers le bas) élaborées par le cerveau jouent un rôle crucial. Selon ces conceptions nouvelles, notre cerveau incorpore chaque nouvelle expérience visuelle ou sensori-motrice au sein de boucles oscillatoires produisant un rythme alpha optimisé dans l'attente de nouvelles entrées sensorielles. Cette conception est séduisante et est actuellement testée chez nos sportifs de haut niveau.

L'approche de ces mécanismes liés à cette oscillation de base mérite d'être investiguée non-seulement dans le domaine sportif mais aussi dans certaines conditions psychiatriques ou neurologiques (autisme, TDAH, schizophrénie...). De plus, étant donné qu'il est reconnu que l'activité électrique des neurones s'accompagne de la production de courants électriques qui peuvent influencer en retour l'activité des neurones¹⁵, la production de courants électriques exogènes produits par un générateur externe de courant, continu (tDCS) ou alternatif (tACS), peut influencer l'activité des neurones et par-là, agir sur les états mentaux des patients. Comment cela se passe-t-il ? Brièvement, les neurones en tant que cellules excitables peuvent présenter des oscillations de leur potentiel de membrane (situé à -65mV au repos) qui peuvent soit rester en dessous du seuil de décharge des potentiels d'action ou au contraire, atteindre le seuil de décharge des potentiels d'action à chaque cycle oscillatoire. Dès lors, il est possible de modifier ce potentiel de membrane

à partir de courant externe (tDCS/tACS) dans les deux sens, favoriser l'excitation ou l'inhibition neuronale en ciblant spécifiquement certaines régions cérébrales. Il devient alors possible d'induire une plasticité oscillatoire neuronale ciblée par exemple sur l'oscillation alpha frontale identifiée préalablement à l'aide de l'EEG dynamique et de moduler son amplitude et sa distribution à l'aide de la tACS. Il s'agit là d'une méthode que nous préconisons dans le cadre de la recherche-développement effectuée par la spin-off Human Waves et proposée dans le cadre de la prévention à la maladie d'Alzheimer¹⁶.

A LA RECHERCHE DE L'ÉTAT DE « FLOW »

Une autre approche neuroscientifique a été initiée au cours de ces dernières années par notre laboratoire et concerne la mise en évidence neurophysiologique de l'état de *flow* psychologique. La notion de « *flow* » a été introduite il y a plus de 40 ans par Csikszentmihalyi¹⁷ et se définit comme un état accompagnant une performance exceptionnelle qui nécessite la maîtrise par un entraînement intense d'un acte moteur réalisé face à un défi. Il s'agit d'une sensation unique qui accompagne l'action et qui survient le plus souvent chez les sportifs et les musiciens de haut niveau. La première difficulté à laquelle nous avons été confronté se rapportait à la caractérisation neurophysiologique de cet état de « *flow* »¹⁸. Il s'agissait de définir à la fois les caractéristiques du mouvement réalisé, son niveau de performance et l'état mental associé. De nombreuses situations comportementales ont été étudiées dans notre laboratoire allant de la pratique de l'équilibre sur corde tendue (*slackline*) à la pratique du violon, de la guitare, de la batterie et du chant, le plus souvent chez des professionnels toujours à la recherche de cet état de « *flow* ». Nous avons d'abord considéré le *flow* psychologique comme un état de conscience spécifique nécessitant l'implication des aires corticales participant aux corrélats neuronaux de la conscience (CCN), initialement définis par Crick & Koch¹⁹ comme les mécanismes neuronaux minimaux et conjointement activés pour toute expérience consciente spécifique. Nous avons ensuite émis l'hypothèse que le *flow* soutenu par le CCN est une propriété émergente impliquant un recrutement spécifique de certaines structures au sein du réseau neuronal qui donneraient naissance à cette sensation de fluidité et d'aisance dans la production de mouvement. Le *flow* en tant qu'état physiologique devrait satisfaire à trois prérequis essentiels¹⁸ : (1) un état de repos central approprié, globalisant à la fois les éléments mémorisés des expériences précédentes et une motivation actuelle ; (2) une intention de mouvement se traduisant par une commande motrice descendante sur les interneurons et les motoneurons de la moelle épinière à destination des muscles, ceci afin de produire les forces nécessaires à la production de mouvement et (3) les signaux somesthésiques ascendants produisant les signaux d'une rétroaction idéale fermant ainsi la boucle entre l'action et la sensation.

Nous avons pu appliquer notre méthodologie expérimentale à la recherche du « *flow* » chez un funambule

professionnel avant, pendant et après avoir marché sur un long câble (160 m) à une altitude de 15 m dans des conditions écologiques. Il s'agit pour les expérimentateurs d'une situation comportementale idéale, dans laquelle l'attention du sujet est focalisée sur son équilibre corporel durant une locomotion parfaite sur la corde. Nous avons pour la première fois pu enregistrer non seulement l'activité des muscles et du cœur mais aussi l'activité électrique du cerveau durant toute la traversée²⁰. De plus, par hasard, le funambule a rencontré un défi inattendu lors de l'enregistrement de cette traversée. Un problème est survenu à mi-parcours avec son mousqueton qui le reliait à son câble de vie. La première partie de la traversée s'est accomplie dans une aisance qualifiée par le funambule de très proche de l'état de *flow* alors que durant la dernière partie de la traversée survenue après le problème du mousqueton, son état mental restait perturbé, stressé et pressé de terminer la performance. L'existence de ces deux situations contrastées vérifiées par la modification des paramètres cardiaques a pu mettre en évidence au moins deux états mentaux différents, l'un correspondant à l'état de *flow* et l'autre à l'état de stress. Pour ce faire, l'enregistrement de l'EEG dynamique traité par des modèles mathématiques (modèle inverse de localisation des générateurs EEG, swLORETA) a permis de caractériser les zones du cerveau responsables des signaux oscillatoires enregistrés à la surface du cuir chevelu lors de cette performance unique réalisée dans le *flow* et dans le stress²⁰. Sans rentrer dans les détails de cette dernière publication où il est possible de trouver

une vidéo du déroulement de l'expérience, nous pouvons conclure que l'état de *flow* se distingue de l'état de stress par une contribution accrue des structures sous-corticales représentées par les noyaux de la base (le globus-pallidus droit et le putamen) associés au gyrus temporal supérieur (BA38) comme générateur des oscillations delta, alpha et bêta. A l'inverse, l'état de stress a recruté le gyrus temporal moyen (BA39) comme le générateur delta et la partie médiane du gyrus frontal (BA10) comme générateur alpha et bêta. L'interprétation de ces résultats est complexe mais elle peut se résumer de la façon suivante : dans l'état de *flow* ou proche du *flow*, des régions sous-corticales où se logent les circuits régulateurs des commandes motrices sont en quelque sorte libérés d'un contrôle inhibiteur exercé par le cortex frontal. A l'inverse de cette « hypo-frontalité transitoire » liée à l'état de *flow*, l'état de stress reste sous un contrôle renforcé du cortex frontal lors de la performance motrice. L'application du modèle swLORETA centré sur l'activité EEG relative à la commande motrice envoyée sur le muscle tibial antérieur, actif à chaque pas du funambule, a permis de confirmer la prévalence du recrutement des oscillations en provenance des noyaux de la base lors de l'état de *flow* alors que dans le même temps, le cervelet ipsilatéral et le cortex sensorimoteur controlatéral intervenaient de la même manière dans les deux états mentaux différents, ce qui s'explique par leur implication dans la tâche d'équilibration qui doit être assurée quel que soit l'état mental du funambule.

CONCLUSION

Nous venons de montrer par ces quelques exemples, que les neurosciences intégrées peuvent s'adresser à des situations complexes non seulement dans le domaine du sport, mais aussi dans celui de la santé en général et que tout en restant non invasif, il est possible d'aborder des aspects fondamentaux relatifs à la complexité du fonctionnement du cerveau. Il nous est bien entendu possible de rêver qu'une partie des fonds investis par les GAFA à la mise au point de nouvelles technologies à visées spectaculaires puissent aussi être mis à la disposition des chercheurs universitaires qui depuis plusieurs générations tentent une exploration des mécanismes fondamentaux du fonctionnement du cerveau avec des moyens dérisoires. Il est plus que temps qu'une nouvelle alliance entre les structures privées et les universités puisse voir le jour et que la recherche sur le cerveau puisse prendre enfin son véritable envol, il en va de notre survie.

Conflits d'intérêt : néant.

BIBLIOGRAPHIE

1. Berthoz, A. Le Sens du mouvement. Paris: Odile Jacob;1997.
2. Andrieux B. La langue du corps vivant. Emersologie 2. Librairie Philosophique J. Vrin;2018.
3. Cebolla AM, Cheron G. Understanding Neural Oscillations in the Human Brain: From Movement to Consciousness and Vice Versa. *Front. Psychol.* 2019;10:1930.
4. Cheron G. From biomechanics to sport psychology: the current oscillatory approach. *Front. Psychol.* 2015;6:1642.
5. Futura Tech. Consulté le 01/09/2020. Neuralink : Elon Musk fait une démonstration de l'implant sur des cochons. [Internet] <https://www.futura-sciences.com/tech/actualites/intelligence-artificielle-neuralink-elon-musk-fait-demonstration-implant-cochons-66830/>
6. Cheron G, Petit G, Cheron J, Leroy A, Cebolla, A, Cevallos C *et al.* Brain Oscillations in Sport: Toward EEG Biomarkers of Performance. *Front. Psychol.* 2016;7:246.
7. di Fronso S, Fiedler P, Tamburro G, Haueisen J, Bertollo M, Comani S. Dry EEG in Sports Sciences: A Fast and Reliable Tool to Assess Individual Alpha Peak Frequency Changes Induced by Physical Effort. *Front. Neurosci.* 2019;13:982.
8. Halgren M, Ulbert I, Bastuji H, Fabó D, Erőss L, Rey M *et al.* The generation and propagation of the human alpha rhythm. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 2019;116:23772-82.
9. Cheron G, Leroy A, De Saedeleer C, Bengoetxea A, Lipshits M, Ceboll A *et al.* Effect of gravity on human spontaneous 10-Hz electroencephalographic oscillations during the arrest reaction. *Brain Res* 2006;1121:104-16.
10. Crick F. Function of the thalamic reticular complex: the searchlight hypothesis. *Proc Natl Acad Sci. U S A.*1984;81:4586-90.
11. Babiloni C, Del Percio C, Iacoboni M, Infarinato F, Lizio R, Marzano N *et al.* Golf putt outcomes are predicted by sensorimotor cerebral EEG rhythms. *J Physiol.* 2008;586:131-9.
12. Sadaghiani S, Scheeringa R, Lehongre K, Morillon B, Giraud AL, D'Esposito M *et al.* α -band phase synchrony is related to activity in the fronto-parietal adaptive control network. *J Neurosci.* 2012;32:14305-10.
13. Samaha J, Postle BR. The Speed of Alpha-Band Oscillations Predicts the Temporal Resolution of Visual Perception. *Curr Biol.* 2015;25(22):2985-90.
14. Wutz A, Melcher D, Samah, J. Frequency modulation of neural oscillations according to visual task demands. *Proc Natl Acad Sci USA.* 2018;115:1346-51.
15. Nitsche MA, Paulus W. Excitability changes induced in the human motor cortex by weak transcranial direct current stimulation. *J Physiol.* 2000;527 Pt 3:633-9.
16. Cheron G, Leroy A, Cheron J, Ris L. Electrical Brain System Perspective for Alzheimer Disease Prevention and Therapy. *J Alzheimers Park.* 2019;9:1.
17. Mao Y, Roberts S, Pagliaro S, Csikszentmihalyi M, Bonaiuto M. Optimal Experience and Optimal Identity: A Multinational Study of the Associations Between Flow and Social Identity. *Front Psychol.*2016;7:67.
18. Cheron G. How to Measure the Psychological "Flow"? A Neuroscience Perspective. *Front Psychol.* 2016;7:1823.
19. Crick F, Koch C. Towards a neurobiological theory of consciousness. *Semin Neurosci.* 1990;263-75.
20. Leroy A, Cheron G. EEG dynamics and neural generators of psychological flow during one tightrope performance. *Sci Rep.* 2020;10:12449.

Travail reçu 7 septembre 2020 ; accepté dans sa version définitive le 20 octobre 2020.

CORRESPONDANCE :

G. CHERON
Faculté des Sciences de la Motricité
Campus Erasme
Route de Lennik, 808 - CP640 - 1070 Bruxelles
Email : gcheron@ulb.ac.be
Site internet : <http://www.cheron.be>