



**Le neurofeedback  
comme entraînement  
supplémentaire pour  
l'optimisation de la  
performance des athlètes**  
Une revue systématique  
avec des implications pour  
la recherche future.

*Manuscrit Accepté*

*Titre Auteurs: Arash Mirifar, Jürgen Beckmann, Felix Ehrlenspiel*

*PII: DOI: Référence:*

*A paraître dans:*

*Date de réception: Date de révision: Date d'acceptation:*

*S0149-7634 (16) 30486-9*

*<http://dx.doi.org/doi:10.1016/j.neubiorev.2017.02.005> NBR 2768*

*18-8-2016 1-2-2017 5-2-2017*

*Merci de citer cet article: Mirifar, Arash, Beckmann, Jürgen, Ehrlenspiel, Felix, Neurofeedback en tant que formation complémentaire pour l'optimisation de la performance des athlètes: une revue systématique avec des implications pour la recherche future. Neuroscience et analyses biocomportementales <http://dx.doi.org/10.1016/j.neubiorev.2017.02.005>*

# **Le Neurofeedback comme entraînement supplémentaire pour optimiser la performance des athlètes:**

Une revue systématique avec des implications pour la recherche future

***Arash Mirifar \**, *Jürgen Beckmann*, *Felix Ehrlenspiel***

Département des sciences du sport et de la santé, chaire de psychologie du sport, Technische Universität München - Campus D - Georg-Brauchle-Ring 60/62 - 80992 München, Allemagne

\* Auteur correspondant. Tél: ++ 49 157 56146879 \_ Fax: ++ 49 89 289 24555

Adresse e-mail: [arash.mirifar@tum.de](mailto:arash.mirifar@tum.de) (A. Mirifar)

## Résumé

Le Neurofeedback est une approche non invasive prometteuse pour modifier l'oscillation cérébrale humaine et peut être utilisé dans le développement des compétences pour l'autorégulation de l'activité cérébrale. Jusqu'à présent, l'efficacité du neurofeedback a été évaluée en ce qui concerne non seulement son application dans les populations cliniques mais aussi l'amélioration de la performance en général. Cependant, les examens de l'application de l'entraînement neurofeedback dans le domaine du sport sont absents, bien que cette application remonte à 1991, quand il a été appliqué en tir à l'arc. Les scientifiques du sport ont montré un intérêt croissant pour ce sujet ces dernières années. Cet article donne un aperçu des études empiriques examinant les effets du neurofeedback dans le sport et évalue ces études par rapport aux critères cardinaux et méthodologiques. En outre, il comprend des lignes directrices et des suggestions pour les évaluations futures de l'entraînement neurofeedback dans le sport.

### 1. Introduction

Dans des revues systématiques récentes, l'efficacité du neurofeedback a été évaluée non seulement en ce qui concerne son application dans les populations cliniques, mais aussi pour l'amélioration de la performance en général. Dans ces revues, cependant, un champ d'application intéressant de la formation de neurofeedback a été complètement négligé - la psychologie du sport.

Un élément essentiel pour stabiliser et améliorer la performance sportive est de promouvoir les compétences d'autorégulation chez les athlètes; par exemple, les techniques de relaxation et de concentration (Beckmann et Elbe, 2015). Parce que le biofeedback en général (Cashmore, 2008) et le neurofeedback

en particulier sont supposés fournir des voies directes d'autorégulation, ils ont également attiré des professionnels et des chercheurs qui tentent d'améliorer la performance des athlètes. Le but de cette revue est de fournir un aperçu des études évaluant l'efficacité de la formation de neurofeedback (NFT) pour améliorer la performance des athlètes et d'examiner les méthodes et les résultats de ces études.

***L'article est structuré comme suit :***

Tout d'abord, nous décrivons la nature du neurofeedback et décrivons l'activité cérébrale électrique. La connaissance des éléments essentiels de l'activité cérébrale électrique permet une meilleure compréhension de sa relation avec les états mentaux et de la reconnaissance de la différenciation du protocole de neurofeedback.

Ensuite, un bref historique du neurofeedback et de son application, à la fois en général et en particulier au sport. Par la suite, la méthode de recherche et de balayage des articles et les critères d'inclusion et d'exclusion de la revue seront décrits. Les articles inclus sont présentés et classés selon les protocoles des chercheurs. Les résultats des études précédentes sont ensuite présentés et discutés pour répondre aux questions de recherche. Enfin, nous discutons des conclusions basées sur les preuves examinées et nous suggérons des recherches futures axées sur la promotion de l'application de NFT pour les compétences fondamentales dans le sport.

**1.1. Nature du neurofeedback et de l'activité cérébrale électrique**

Le biofeedback est basé sur l'observation que, alors qu'une personne ne peut habituellement pas modifier intentionnellement les fonctions autonomes, les individus sont capables de réguler ces fonctions biologiques dès lors qu'ils ont un meilleur accès à des informations détaillées sur leurs signaux (Lawrence, 2002). À cette fin, dans le biofeedback, les

signaux psychophysologiques des fonctions autonomes sont transformés en signaux externes. Ces signaux sont «renvoyés» à l'individu qui peut apprendre à les changer et à les influencer (Strack et Sime, 2011). Le contrôle des processus physiologiques est supposé être acquis par un principe de conditionnement opérant (Hammond, 2011).

Le neurofeedback est un exemple d'information psychophysologique en retour, dans lequel une personne est consciente de son activité cérébrale. L'activité du cerveau peut être mesurée par différents signaux, par exemple, le flux sanguin, la consommation d'oxygène ou l'activité électrique, et chaque signal peut être utilisé pour la rétroaction. Pourtant, l'enregistrement et la restitution de l'activité électrique par électroencéphalographie (EEG) reste la forme traditionnelle et courante du neurofeedback (Hammond, 2011). Cette revue se concentre donc sur "la formation de biofeedback EEG", et nous utilisons "NFT" de manière interchangeable avec elle.

L'EEG est le plus souvent enregistré à partir de la surface du cuir chevelu, et il enregistre les courants dans le cortex cérébral qui se développent au cours des excitations synaptiques des dendrites des neurones pyramidaux. Les courants synaptiques sont générés dans les dendrites, une fois que les neurones (cellules cérébrales) sont activés. Les signaux EEG sont formés par le flux ionique provenant de grands groupes de dendrites dus à la transmission synaptique, et l'alternance entre potentiels postsynaptiques excitateurs et inhibiteurs dans ces synapses produit le signal oscillatoire familier dans l'EEG (Sanei et Chambers, 2007). L'EEG permet d'enregistrer des activités avec une résolution spatiale de surface corticale d'environ 5 cm (1 mm de profondeur, 100+ millions de neurones) et une résolution temporelle élevée, permettant des études directes de la fonction cérébrale à des millisecondes (Ullsperger et Debener, 2010).

Le cerveau humain n'est jamais au repos et l'EEG du cortex cérébral montre des activités spontanées dont la fréquence

varie (Zagha et McCormick, 2014). Le signal EEG peut être analysé dans le domaine fréquentiel et les fréquences du signal EEG sont généralement distinguées par cinq grandes bandes EEG, présentées dans le tableau 1, de haute à basse fréquence (Gruzelier et Egner, 2004). Depuis l'apparition de l'EEG, la recherche a tenté d'identifier les relations entre l'activité cérébrale électrique et les bandes de fréquence d'un côté et les états mentaux de l'autre. Les premières recherches, par exemple, ont identifié la gamme Alpha liée à un état d'attention détendue (Klimesch, 1999). La recherche clinique a identifié une suractivation dans la gamme Thêta dans le trouble déficitaire de l'attention / hyperactivité (Lubar et Shouse, 1976). L'activité EEG spontanée a également été liée aux exigences de performance; par exemple, l'exécution d'une tâche d'attention particulière est liée à une plus grande activité EEG dans la gamme du rythme moteur sensoriel (SMR). Dans le domaine du sport, de telles relations d'activités cérébrales électriques et d'états mentaux de performance optimale ont également été examinées. Il a été soutenu, par exemple, que lorsqu'une personne exécute une tâche bien entraînée et surentraînée, une puissance élevée dans la bande alpha peut être trouvée (synchronisation alpha), reflétant une diminution du traitement de l'information corticale. Selon Fitts et Posner (Mierau et al., 2015), une telle observation correspond au stade «automatique» plutôt que «cognitif» de la théorie de l'acquisition des compétences sensorimotrices.

**En résumé**, le neurofeedback applique l'EEG pour enregistrer et restituer l'activité électrique du cerveau. Le signal EEG est composé de différentes fréquences qui peuvent être organisées en différentes bandes de fréquence. Chaque bande est censée refléter différents états du cerveau et peut être associée à un comportement différent et à des résultats comportementaux (performance). Maintenant, l'idée de neurofeedback est d'enseigner aux individus à réguler l'activité cérébrale dans une bande de fréquence pour améliorer l'état mental ou le comportement associé. Pour la conception du TVN approprié,

cela implique que la relation entre les activités cérébrales électriques et les besoins spécifiques est déterminée a priori.

## **1.2. Un bref historique du neurofeedback**

L'origine du neurofeedback (NF) remonte aux années 1960 quand il a été montré que les humains peuvent s'entraîner pour montrer une activité cérébrale dominante dans la gamme Alpha (Kamiya, 1962). Simultanément, on a montré que les chats produisaient une activité dominante dans la gamme Bêta basse (ou SMR) à un moment spécifique par le conditionnement opérant (Wyrwicka et Serman, 1968). Le NF, en tant qu'alternative au traitement pharmacologique, était lié au domaine médical lorsque Serman utilisait le NF comme traitement pour un groupe d'astronautes et de personnel de service exposés au carburant de fusée et souffrant de maux de tête, de nausées et de crises (Larsen et Sherlin, 2013). Il a décidé d'augmenter la puissance dans la gamme de 12-15 Hz (SMR). Il avait constaté que les chats préalablement formés dans son laboratoire présentaient plus de résistance aux crises que ceux qui ne l'étaient pas. L'effet positif de la formation SMR a été très rapidement reproduit pour le traitement de l'épilepsie par d'autres chercheurs. Ces résultats ont encouragé encore d'autres chercheurs à commencer à chercher des dimensions pour réguler le cerveau grâce à la NF. Par exemple, Lubar et Shouse (1976) ont découvert que grâce à le NF, ils pouvaient aider les enfants qui souffraient de TDAH en régulant leurs structures cérébrales. Par rapport aux personnes normales, ce groupe présente normalement un profil d'ondes cérébrales déséquilibré, c'est-à-dire une activité élevée dans la gamme Thêta et une faible activité dans la gamme Bêta sur le lobe temporal gauche. Ainsi, les chercheurs ont décidé d'augmenter la puissance dans la gamme SMR et les fréquences adjacentes et en même temps inhiber l'activité dans la gamme Theta (Lubar et Shouse, 1976). Cette expérience a été la première à appliquer des fonctions d'inhibition avec un objectif évident concernant la distribution équilibrée des ondes cérébrales (Budzynski et al., 2009).

Aujourd'hui, il existe un grand nombre de preuves de l'efficacité du TVN (par exemple, voir Gruzelier, 2014a). Il y a aussi des preuves de la stabilité des changements neurophysiologiques après la formation de (Becerra et al., 2006, Gevensleben et al., 2010, Kouijzer et al., 2009). Ces changements sont supposés être basés sur les mécanismes de neuroplasticité du cerveau (Ninaus et al., 2015). L'imagerie par résonance magnétique (IRM) a confirmé que les modifications de l'activité cérébrale après le TVN sont associées à des changements microstructuraux dans la substance blanche et grise (Ghaziri et al., 2013) qui surviennent généralement dans le gyrus et le cortex cérébral. Surtout en ce qui concerne la matière grise, ces changements peuvent indiquer le potentiel de neuroplasticité du cerveau. Le volume de matière grise a été lié à l'apprentissage d'une tâche avec succès (Ninaus et al., 2015).

Il semble donc que le TVN puisse conduire à un meilleur traitement cognitif et à un meilleur apprentissage via l'augmentation de la vitesse de conduction dans les réseaux neuronaux par des modifications des voies de la substance blanche et du volume de matière grise.

Le TVN a également été appliqué pour améliorer les performances. Par exemple, l'augmentation de puissance dans la plage SMR conduit à une meilleure précision et rapidité dans les compétences chirurgicales (Ros et al., 2009), l'inhibition de la puissance dans la gamme Theta diminue le nombre d'erreurs dans les tâches de détection radar (Beatty et al. ), l'augmentation de la puissance dans la gamme bêta intermédiaire et l'inhibition de la gamme Theta entraînaient un temps de réaction plus rapide dans une tâche d'attention (Egner et Gruzelier, 2004), et une augmentation de la puissance dans la gamme alpha élevée (Escolano et al. ., 2011; Zoefel et al., 2011).

En outre, le NFT a été appliqué pour améliorer la performance des athlètes. Dans l'étude pionnière de Landers et al. (1991), les archers ont reçu le NFT pour améliorer leur performance de

tir. L'intervention était basée sur une compréhension profonde de la tâche et des associations entre l'activation cérébrale et la performance dans la tâche. Des études antérieures (Hatfield et al., 1984, Salazar et al., 1990) ont montré qu'une bonne exécution en tir à l'arc était associée à une activation dans l'hémisphère droit du cerveau, associée au traitement visuo-spatial, et, en même temps, diminution de l'activation dans le lobe temporal gauche. Cette diminution de l'activation dans les zones temporales gauches et spécifiquement dans les zones analytiques verbales était associée à une réduction de l'attention aux stimuli et à la suppression des informations non pertinentes. Ainsi, Landers et al. (1991) ont émis l'hypothèse que la performance devrait s'améliorer si l'activation dans l'hémisphère gauche était supprimée. Les résultats ont confirmé ces attentes et montré une augmentation des performances de tir à l'arc dans le groupe d'archers ayant reçu le TVN pour diminuer l'activation temporelle gauche, par rapport au groupe ayant reçu le TVN pour diminuer l'activation dans l'hémisphère droit.

Des recherches approfondies ont été menées sur le TVN pour le traitement des troubles psychologiques, comme en témoignent les revues et les méta-analyses (par exemple, Arns et al., 2009, Coben et al., 2010, Moore, 2000, Tan et al., 2009). Récemment, une série considérable d'études de revue ont également porté sur l'optimisation de la performance à travers le TVN (par exemple, Gruzelier, 2014a, b, c). Malgré l'examen fructueux de NFT en tir à l'arc par Landers et al. (1991), les études sur l'application des TVN pour améliorer les performances sportives sont encore rares. Malgré des études récentes fournissant des preuves de l'efficacité du TVN dans les applications cliniques, la chirurgie et la performance musicale, il n'existe aucun examen de ce type concernant l'application dans les sports.

### **1.3. L'objectif de cette revue**

L'utilisation du Neurofeedback semble être un outil puissant pour la performance de formation en améliorant l'autorégulation des états cérébraux. En tant que tel, il a été jugé utile pour améliorer les performances sportives. Cependant, bien que l'application de la TVN pour améliorer la performance des athlètes ait été décrite depuis 1991, aucun examen évaluant son efficacité dans le sport n'existe jusqu'à aujourd'hui. Même dans la dernière revue générale de Gruzelier (2014a), le domaine spécifique de la performance sportive n'était pas sujet à examen. Compte tenu de la recherche d'interventions fondées sur des données probantes en psychologie du sport, un tel examen est nécessaire. Les interventions de TVN pour améliorer les performances sportives ne doivent pas uniquement reposer sur les résultats d'autres domaines d'application en raison des différences entre la population sportive et la population clinique ou même générale (Del Percio et al., 2008, Iwadate et al., 2005). De plus, l'objectif de NFT diffère entre les athlètes et les échantillons cliniques parce que les athlètes visent à améliorer leur performance, alors que les patients sont intéressés à traiter une condition négative (Wilson et Peper, 2011). Ainsi, il est nécessaire de déterminer si les résultats peuvent être transférés d'autres populations aux athlètes. Avec l'avènement d'un plus grand nombre d'appareils mobiles pour l'évaluation EEG (Park et al., 2015), il semble également temps de fournir des lignes directrices pour de futures recherches pouvant jeter les bases des applications sportives NFT.

### **1.4. Questions de recherche**

Cette revue a trois objectifs. Le premier consiste à donner un aperçu des études empiriques portant sur l'efficacité de la TVN dans les sports. La seconde consiste à évaluer les résultats par rapport à des critères méthodologiques et théoriques. Cette évaluation devrait déboucher sur des conclusions concernant les preuves de l'efficacité de la TVN pour améliorer la

performance sportive. Le troisième objectif est de fournir des lignes directrices et des suggestions pour les futures évaluations NFT dans le sport.

## **2. Méthodes**

Une revue systématique a été réalisée en utilisant la méthodologie PRISMA. Son objectif principal était de trouver la TVN liée à la performance des athlètes. Par conséquent, nous avons principalement cherché à récupérer des études qui utilisaient explicitement les termes de recherche suivants: "biofeedback EEG ET athlète OU sport OU performance", "Neurofeedback ET athlète OU sport OU performance" et "Potentiel cortical lent ET athlète OU sport OU performance". Une recherche complète et systématique des sept bases de données suivantes couvrant la plupart des domaines scientifiques a été menée: Scopus, Science Direct, PubMed, Google Scholar, PsycINFO, SPORTDiscus et Web of Science.

### **2.1. Tamiser les études récupérées**

Les études récupérées ont été passées au crible en deux étapes: les résultats ont d'abord été examinés par titre et résumé, puis par texte intégral. À chaque étape, les études qui ne respectaient pas les critères d'inclusion et d'exclusion de la revue ont été supprimées. Les études incluses dans cette revue devaient être 1) en utilisant dix données empiriques originales, données / données primaires; 2) publié (soit dans un article ou dans une revue scientifique en ligne évaluée par des pairs); 3) en anglais. Les études ont été exclues de cette revue si un rapport complet de leurs méthodes (en particulier la fréquence et la localisation des électrodes) n'a pas été proposé.

### **2.2. Recherche - retours**

Le processus de recherche, achevé le 30 juin 2016, a initialement donné lieu à 30 études potentiellement pertinentes. Après l'élimination des doublons (une étude) et des études

abstraites (trois études), les résumés et la méthodologie des articles cibles potentiels restants (n = 26) ont été évalués. De plus, 12 études ont dû être éliminées faute de rapport complet sur les méthodes, réduisant ainsi les cibles potentielles à 14 articles.

## **2.3. Organisation des résultats**

Ces 14 études empiriques ont été organisées en fonction du protocole de neurofeedback appliqué et du type de variable de résultat. Comme la plupart des études utilisaient une combinaison de protocoles et que certaines études mesuraient différents types de résultats, une étude pouvait être assignée à plusieurs catégories. De plus, pour détecter les effets possibles des modérateurs, les études ont également été classées selon les modérateurs. En outre, afin de présenter un aperçu complet de la littérature, les résultats des 12 rapports pratiques seront également présentés.

### **2.3.1. Protocole de neurofeedback**

Pour appliquer le TVN, un thérapeute ou un chercheur doit d'abord déterminer la bande de fréquences à entraîner ainsi que la zone du cerveau à partir de laquelle les fréquences sont enregistrées. En NFT, un "protocole" définit la fréquence (ou les fréquences) d'apprentissage et le site de l'électrode (ou des électrodes) d'enregistrement. Comme présenté dans le tableau 1, les fréquences cérébrales sont classiquement subdivisées en bandes de fréquences fixes telles que Theta (4-8 Hz) ou Alpha (8-12 Hz). La procédure la plus courante pour le TVN consiste à sélectionner une (ou plusieurs) de ces bandes de fréquences, sur la base de considérations théoriques ou de preuves empiriques antérieures. L'entraînement d'une bande de fréquence peut consister à augmenter ou inhiber l'amplitude de la bande correspondante.

Au-delà de ces protocoles communs, d'autres protocoles plus individualisés existent parce que l'évaluation EEG montre que

la relation entre les fréquences cérébrales (et les bandes) et les états mentaux peut varier en fonction de divers facteurs tels que l'âge. Pour la bande alpha, par exemple, même les participants appariés selon l'âge ont montré une variabilité significative de la fréquence alpha. Par conséquent, les protocoles NFT évaluent parfois et font remonter l'activité cérébrale basée sur la fréquence alpha individuelle (IAF, pour une description plus détaillée, voir l'étude de revue par Klimesch, 1999).

Une étape supplémentaire vers un protocole individualisé NFT est basée sur le profil EEG personnalisé. Pour un tel profil, d'abord, l'activité corticale associée aux meilleures et pires performances lors de l'exécution de la tâche dans une condition de base est évaluée. L'interprète reçoit un neurofeedback personnalisé basé sur cette comparaison dans une seconde étape.

Alors que la NFT classique vise des fréquences spécifiques, l'entraînement des potentiels corticaux lents (SCP) vise plus généralement le niveau d'excitabilité des aires corticales et sous-corticales. SCP sont les changements de courant continu de l'EEG qui durent de quelques centaines de millisecondes à quelques secondes. L'excitation de zones corticales plutôt grandes est liée à une SCP négative en surface qui se produit pendant la préparation comportementale et cognitive. En revanche, une diminution de l'excitation sous-jacente des zones corticales se rapporte à un SCP positif en surface observé pendant l'inhibition comportementale. Grâce à la formation SCP, les participants apprennent à réguler l'excitabilité corticale et à changer entre un état et un état désactivé / relaxé en modulant leur SCP vers des amplitudes plus négatives et positives, respectivement.

La localisation des électrodes sur le cuir chevelu suit généralement le système international 10-20, dans lequel une lettre identifie l'une des cinq zones du cerveau, et les chiffres identifient l'hémisphère cérébral. Les lettres F, T, P et O

représentent respectivement les lobes frontal, temporal, pariétal et occipital. La lettre C représente la zone centrale. Un "z" se réfère à une électrode placée sur la ligne médiane (de Nasion à Inion). Les nombres pairs se réfèrent aux positions des électrodes sur l'hémisphère droit, les nombres impairs à ceux de l'hémisphère gauche. Ainsi, par exemple, C3 se réfère à la localisation de l'électrode dans l'hémisphère gauche au niveau de la zone centrale (ligne entre les points auriculaires).

### **2.3.2. Variables de résultats**

La principale préoccupation de l'entraînement sportif est l'optimisation des performances. Ainsi, la principale question de recherche aborde l'efficacité de NFT dans l'amélioration de la performance des athlètes (par exemple, les changements dans la précision de mise en place du golf). Cependant, d'autres résultats ont également été la cible d'études d'intervention qui peuvent être reconnues comme des facteurs préalables ou des facteurs médiateurs liés au rendement. Ces résultats ont été classés en résultats affectifs (par exemple, changements du niveau d'anxiété ou de stress des interprètes) et cognitifs (par exemple, changements dans un test d'attention).

### **2.3.3. Variables du modérateur**

L'évaluation des études NF peut être particulièrement fructueuse lorsqu'on examine les effets probables des modérateurs. Le genre et l'expérience ont été choisis parmi tous les modérateurs possibles dans cette revue parce qu'ils ont été principalement rapportés en tant qu'informations démographiques. En outre, il existe un débat considérable concernant les différences entre les sexes ainsi que le niveau d'expertise des participants et l'efficacité de la TVN. 13

## **3. Vue d'ensemble des études empiriques sur les TVN dans le sport .**

Le but premier de cette revue est de fournir un aperçu des études empiriques qui ont étudié l'application et l'efficacité des interventions de TVN dans le domaine du sport. Malgré une multitude d'études dans d'autres domaines, en particulier cliniques, notre résultat de recherche a donné seulement 13 études après l'étude séminale sur les archers par Landers et al. en 1991. Un aperçu de la distribution, des résultats et des caractéristiques de ces études est présenté au tableau 2.

### **3.1. Résultats**

#### **3.1.1. Beta band**

Quatre des 14 études ont appliqué le NFT dans la bande Beta, et deux avaient pour but d'améliorer la performance sportive directement. L'inhibition de Beta élevé (20-30 Hz) et l'augmentation concomitante SMR (13-15 Hz) aux sites C3 et C4 ont conduit à une meilleure performance dans le tir à la carabine dans un groupe expérimental comparé à un groupe témoin (Rostami et al., 2012). Cependant, l'inhibition de Beta (22-26 Hz) et de Theta (4-7 Hz) élevés tout en augmentant SMR (12-15 Hz) au site Cz en tir à l'arc n'a pas eu d'effet significatif sur la performance dans un groupe expérimental (Paul et al. ., 2011).

Malgré tout, l'inhibition de la bande Bêta haute (22-37 Hz) et l'augmentation de la bande Beta moyenne (15-18 Hz) aux sites C3 et C4 en natation ont entraîné une réduction et une amélioration de la régulation de l'anxiété dans le groupe expérimental (Faridnia et al., 2012). De plus, l'inhibition de Bêta élevé (21-35 Hz) et de Thêta (4-7 Hz) tout en augmentant la Bêta moyenne (15-20) en C3 et C4 a entraîné des changements significatifs dans les niveaux d'engagement autotélique dans le groupe expérimental par rapport au témoin. groupe (Mikicin, 2015). Le groupe expérimental a également montré une amélioration significative dans les variables d'un test arithmétique mentale («test de courbe de travail») par rapport au groupe témoin (Mikicin, 2015).

### 3.1.2. Rythme sensorimoteur (SMR)

Six des 14 études ont appliqué le TVN dans la bande SMR, et quatre de ces études ont appliqué le SMR pour améliorer la performance. Comme mentionné ci-dessus, augmenter SMR (13-15 Hz) concomitant avec l'inhibition de Bêta élevé (20-30 Hz) aux sites C3 et C4 a conduit à de meilleures performances en tir à la carabine dans un groupe expérimental par rapport à un groupe témoin (Rostami et al., 2012). De plus, l'augmentation de SMR (12-15 Hz) chez Cz a montré une amélioration significative de la performance de putting du golf dans le groupe expérimental par rapport à un groupe témoin (Cheng et al., 2015). Un protocole de biofeedback mixte incluant l'augmentation SMR (13-15 Hz) et l'inhibition Theta (4-7 Hz) aux sites Cz et T3, ainsi que le biofeedback de la variabilité cardiaque (HRV) dans une étude non contrôlée en gymnastique ont également montré un effet positif sur l'équilibre (Shaw et al., 2012b). Mais encore une fois, l'augmentation SMR (12-15 Hz) et l'inhibition de Bêta élevé (22-26 Hz) et Theta (4-7 Hz) au site Cz n'ont pas eu d'effets significatifs sur la performance de tir à l'arc dans le groupe expérimental (Paul et al. ., 2011).

Bien que Paul et al. (2011) n'ont pas trouvé d'effet significatif de l'augmentation de SMR sur la performance des archers, leur étude a montré un effet significatif sur l'état psychologique, c'est-à-dire le niveau d'excitation avant et après compétition et le niveau de plaisir avant compétition que dans un groupe témoin (Paul et al., 2011). Comme mentionné ci-dessus, dans un groupe de nageurs, l'augmentation SMR (12-15 Hz) et l'inhibition bêta (22-37 Hz) et Theta (4-8 Hz) aux sites C3 et C4 ont également conduit à une réduction de l'anxiété dans le groupe expérimental comparé à un groupe témoin (Faridnia et al., 2012). Dans un échantillon d'athlètes de divers sports, l'augmentation de SMR (12-15 Hz) concomitante avec l'inhibition de Theta (4-7 Hz) et de Bêta élevé (21-35 Hz) à C3 et C4 dans le groupe expérimental a entraîné des changements significatifs dans les niveaux de l'engagement autotélique et la performance

en arithmétique mentale par rapport à un groupe témoin (Mikicin, 2015).

### **3.1.3. Bande alpha**

Six des 14 études ont appliqué le TVN dans la bande Alpha, deux incluant la performance comme variable de résultat. Encore une fois, l'entraînement croisé (passage d'un protocole à un autre) consistant en une augmentation de l'alpha (8-12 Hz) et de la thêta (4-8 Hz) et de l'inhibition de la bêta haute (20-30 Hz) sur le site Pz au tir à la carabine a conduit à une meilleure performance dans le groupe expérimental par rapport à un groupe témoin (Rostami et al., 2012).

L'inhibition de l'activité alpha élevée (10-12 Hz) et thêta (4-8 Hz) au site Fz chez les golfeurs n'a cependant pas amélioré les performances du groupe expérimental par rapport à un groupe témoin (Ring et al., 2015). De même, l'inhibition de l'alpha (8-11 Hz) tout en augmentant le thêta (5-8 Hz) à la Pz n'a pas montré d'effet positif sur la performance de danse (Gruzelier et al., 2014b). Cependant, une étude précédente en danse qui avait appliqué un protocole similaire, c'est-à-dire inhiber l'alpha tout en augmentant le thêta (basé sur les bandes IAF) à Pz, a montré de meilleures performances dans le groupe expérimental (Raymond et al., 2005).

L'augmentation de la bande de fréquence alpha individuelle (IAF  $\pm$  2 Hz) aux sites C3 et C4 chez les gymnastes n'a pas montré de changements significatifs dans l'humeur (stress et excitation) et dans les expériences d'entraînement (séances d'entraînement perçues). Cependant, deux échelles du questionnaire qui ont évalué «être en forme» ont montré une amélioration significative dans le groupe expérimental par rapport à un groupe témoin (Dekker et al., 2014).

Un protocole mixte consistant en l'augmentation de l'Alpha sur les sites C3 et C4 et l'entraînement par biofeedback de HRV dans une étude mono-discipline en athlétisme ont conduit à une

meilleure réaction (plus rapide que la norme) dans une tâche de temps de réaction GO / NOGO ( Ziólkowski et al., 2012).

### **3.1.4. Bande thêta**

Trois des quatorze études ont appliqué le TVN dans la bande thêta et tous ont évalué la performance comme un résultat. Comme présenté ci-dessus, l'augmentation de Theta et l'inhibition de Alpha (fréquences basées sur les bandes IAF) à Pz en danse ont montré une meilleure performance dans le groupe expérimental par rapport à un groupe témoin (Raymond et al., 2005). Cependant, une étude récente en danse, appliquant un protocole similaire (augmentation de Theta [5-8 Hz] et inhibition Alpha [8-11 Hz] à Pz) n'a pas montré un effet positif du NFT sur la performance (Gruzelier et al., 2014b). L'inhibition de l'activité thêta (4-8 Hz) au site Fz chez un sujet unique et une étude d'une séance au golf ont permis de meilleures performances de mise en place (Kao et al., 2014).

Cependant, la même étude n'a pas montré d'effets significatifs de réduction ou de régulation de l'anxiété et de la confiance (Kao et al., 2014). De même, l'augmentation du thêta (5-8 Hz) et l'inhibition de l'alpha (8-11 Hz) au site Pz n'ont pas influé sur les mesures de dépression, d'anxiété et de stress des danseurs (Gruzelier et al., 2014b). Néanmoins, cette étude a fourni des preuves d'une augmentation de la créativité dans le groupe expérimental par rapport à un groupe témoin (Gruzelier et al., 2014b).

### **3.1.5. Protocoles de potentiel cortical lent (SCP)**

Seule l'étude séminale de Landers et al. (1991) ont appliqué SCP. Les archers ont reçu une intervention SCP à une seule session, et les participants ont été divisés en deux groupes expérimentaux qui ont reçu des commentaires du site T3 ou T4. Les participants qui ont reçu des commentaires du site T3 (à droite) ont montré un effet positif sur la performance du tir à l'arc (Landers et al., 1991).

### **3.1.6. Profil EEG personnalisé à événement verrouillé**

Parmi les 14 études, une étude sans contrôle a récupéré un profil d'EEG verrouillé événementiel personnalisé pour le NFT sur le site FPz, montrant un effet positif de l'entraînement sur la performance au golf (Arns et al., 2008).

### **3.1.7. Modérateurs potentiels**

Les résultats des études ont également été examinés en fonction de l'influence potentielle des modérateurs. Ces modérateurs incluaient le genre des athlètes et leur niveau d'expertise. Le tableau 2 démontre la conclusion qu'il n'existe pas d'association claire entre les deux modérateurs et les résultats. Aucune étude n'a comparé directement les modérateurs.

### **3.1.8. Rapports pratiques**

Comme l'indique la section 2.2, 12 des 26 études initialement incluses ont révélé des informations incomplètes sur leurs méthodes et ont donc été exclues de toute analyse ultérieure. Toutes ces 12 études ont présenté les résultats d'interventions pratiques présentées ici pour donner un aperçu plus complet. La NFT améliorerait la performance sportive chez les joueurs de soccer (Wilson et al., 2006), les patineurs de vitesse sur courte piste (Beauchamp et al., 2012), les gymnastes (Shaw et al., 2012a), les golfeurs (Sherlin et al., 2015) et chez un joueur de tennis (Gracz et al., 2007) et un tireur de fusil (Harkness, 2009). Les résultats affectifs ont également été signalés après le NFT avec un danseur (Singer, 2004), un skieur (Pop-Jordanova et Demerdzieva, 2010), un athlète d'athlétisme (Todd, 2011), des athlètes olympiques d'hiver (Dupee et Werthner, 2011), les patineurs de vitesse sur courte piste (Beauchamp et al., 2012) et les joueurs de baseball (Sherlin et al., 2013) ainsi qu'un athlète de canoë (Christie et Werthner,

2015). L'observation la plus frappante qui ressort des données de cette partie est que les rapports pratiques ne font état d'aucune amélioration ou non-amélioration.

### **3.2. Discussion, conclusion et réponse à la première question**

En ce qui concerne l'efficacité du NFT dans les sports, les résultats montrent que 12 des 14 études complètes ont rapporté des effets positifs pour les athlètes. Sept des 10 études (avec au moins une variable de performance) ont montré des effets positifs sur la performance.

De plus, trois des six études évaluant les variables affectives ont montré un effet positif de NFT sur le résultat affectif. Enfin, trois des trois études ont montré des effets positifs sur les résultats cognitifs.

Bien que le tableau 2 n'indique pas les effets des modérateurs, et les niveaux des modérateurs n'ont été directement comparés dans aucune de ces études, il y a des indications pour les effets des modérateurs du niveau d'expertise des athlètes, la gamme de fréquences et la forme d'évaluation de la performance.

Alors que pour les athlètes d'élite et d'élite en tir à l'arc et en tir à la carabine, on a constaté des effets positifs de la TVN (Landers et al., 1991; Rostami et al., 2012), les athlètes de niveau universitaire n'ont pas montré d'amélioration des performances de tir à l'arc (Paul et al., 2011). Les études diffèrent également en ce qui concerne la définition de la gamme de la bande de fréquences sélectionnée. Par exemple, Paul et al. (2011) a défini la SMR bande de façon plus libre (c'est-à-dire 12 à 15 Hz) et n'a pas réussi à montrer un effet positif sur la performance des archers, alors que Rostami et al. (2012) ont défini la bande SMR de façon plus étroite (c.-à-d., 13 à 15Hz) et a trouvé un effet positif sur la performance des tireurs de fusil. Une analyse systématique du choix de la bande passante pour la performance de la TVN n'est pas encore disponible dans la littérature, mais constituerait un objectif souhaitable pour les recherches futures. En ce qui concerne les

effets modérateurs de l'évaluation des performances, deux études ont utilisé un protocole NFT similaire dans la bande de rapport Thêta / Alpha mais ont trouvé des effets différents sur les performances de danse. Raymond et al. (2005) ont montré des effets positifs significatifs sur la performance. Cependant, Gruzelier et al. (2014) n'a pas démontré les effets significatifs de la TVN sur la performance des danseurs et a soutenu que le temps limité pour l'évaluation de la performance en danse dans leur étude peut avoir conduit à des différences.

L'objectif principal de la revue actuelle était de déterminer l'efficacité du NFT sur la performance des athlètes. À première vue, les résultats suggèrent un rôle pour NFT dans l'optimisation de la performance et aussi dans les variables affectives et cognitives indirectement liées à la performance.

Cette impression de l'analyse des études complètes est reprise par les rapports d'études pratiques d'intervention et corrobore les conclusions dans des revues précédentes plus générales (Gruzelier, 2014a). Cependant, après une inspection plus approfondie des données, nous ne pouvons pas déduire ou conclure que le TVN est utile pour améliorer la performance des athlètes et / ou les aspects sous-jacents pertinents de la cognition et de l'affect. Cela est dû à ce qui suit. Premièrement, les données montrent un désaccord entre les protocoles et les résultats. Par exemple, des résultats similaires ont été obtenus dans la même discipline à travers différents protocoles (par exemple, dans le golf, l'augmentation de SMR ou la suppression de Thêta conduit à de meilleures performances). De même, des résultats différents dans la même discipline ont été obtenus par le biais de protocoles identiques ou similaires (par exemple, en danse, le protocole Alpha / Thêta a conduit à des résultats contradictoires dans deux études différentes).

Une deuxième source d'incertitude est la validité des données. À cette fin, nous avons besoin d'examiner les résultats pour la deuxième question de ce réexamen.

## **4. Évaluation des études empiriques.**

Pour évaluer la qualité des données probantes sur l'efficacité du NFT dans le sport, nous devons définir des critères à partir desquels les études peuvent être examinées. Nous avons d'abord (1) suivi les critères énoncés dans la revue la plus récente mais plus générale de Gruzelier (2014a, 2014c) qui fait référence à la spécificité du protocole en termes de fréquence et de site (Gruzelier, 2014c, Hammond, 2011). En outre, nous avons considéré comme autres critères cardinaux (2) le type de feedback (Vernon, 2005) et (3) le nombre de sessions de formation (Hammond, 2011). En plus de ces critères cardinaux précédemment utilisés (4), des critères méthodologiques plus généraux s'appliquent également.

### **4.1. Critères d'évaluation**

#### **4.1.1. Spécificité de la fréquence et du lieu d'enregistrement**

Gruzelier (2014c) et Hammond (2011) indiquent que la sélection des fréquences pour la TVN et le choix du site d'enregistrement sont deux aspects cardinaux d'un protocole NFT. La justification de la sélection d'une bande de fréquences devrait être théoriquement et empiriquement des associations établies entre la bande de fréquences spécifique de l'EEG et un résultat comportemental, affectif ou cognitif particulier. Si une telle association est établie, l'idée d'appliquer le TVN consiste à changer, c'est-à-dire à renforcer ou inhiber la bande de fréquences EEG pertinente pour améliorer le résultat. Une association théorique et empirique solide est importante pour deux raisons. Tout d'abord, seulement s'il existe une association positive entre la bande de fréquences et le résultat cible, peut-on s'attendre à des effets NFT positifs dans la bande respective. Deuxièmement, l'application du TVN peut avoir des effets néfastes; ainsi, pour des raisons éthiques, il faut établir une association positive entre une bande de fréquences et une variable cible. Une étude précoce menée auprès de patients

atteints de TDA et de TDAH a mis en évidence que les symptômes du trouble pouvaient être améliorés par neurofeedback ou aggravés par des TVN similaires. Dans une conception d'inversion A-B-A, Lubar et Shouse (1976) ont trouvé que lorsque le Thêta (4-7 Hz) était inhibé et que le rythme sensorimoteur était renforcé, les symptômes du TDAH s'amélioraient. Cependant, lorsque Theta a été renforcée, il y avait une détérioration et une inversion des améliorations positives (Hammond et Kirk, 2007).

Conformément à la spécification de la fréquence, le site d'enregistrement EEG doit également être spécifié, sur la base d'une association établie entre la fréquence spécifique sur ce site et un résultat cible. L'étude séminale de Landers et al. (1991) est un bon exemple de l'importance de choisir le bon site. La tâche des participants consistait à augmenter les potentiels corticaux lents dans l'hémisphère gauche (T3, "feedback correct") ou dans le droit (T4, "feedback incorrect"). Comme prévu, les performances de tir à l'arc améliorées de manière significative ont été trouvées uniquement dans le groupe de rétroaction correct, tandis que le groupe de rétroaction incorrect a montré une diminution significative des performances avant et après le test.

Notamment, la justification de la sélection de la spécificité de la fréquence et du site d'enregistrement peut être fournie à différents niveaux de spécificité de tâche. La sélection peut être basée sur des preuves neurophysiologiques et psychologiques directement dérivées d'examens antérieurs d'associations entre les modèles cérébraux et les résultats dans la tâche spécifique. Par exemple, dans l'étude séminale de Landers et al. (1991), d'abord, une association entre l'activation temporelle inférieure gauche et la performance optimale en tir à l'arc a été établie. Ensuite, les archers ont reçu le NFT pour diminuer l'activation temporelle gauche afin d'améliorer les performances dans cette tâche spécifique. Mais la logique peut également provenir plus indirectement des associations établies entre les structures cérébrales et les résultats dans des tâches ou des résultats

similaires dans des exigences de tâches plus générales (par exemple, "concentration"). Par exemple, Cheng et al. (2015) a décidé d'augmenter SMR pour améliorer le golf en ne se basant pas sur l'analyse précédente du golf putt, mais parce que «SMR NFT a un effet bénéfique sur la performance liée à l'attention dans diverses tâches attentionnelles» (p.627). Enfin, une justification de la sélection d'un protocole spécifique peut ne pas être fournie du tout ou être simplement liée à des preuves générales (par exemple, les effets connus du TVN sur l'amélioration de la performance).

#### **4.1.2. Type de commentaires**

Pour que la boucle de rétroaction fonctionne correctement, il est essentiel que le type de rétroaction soit choisi avec soin, c'est-à-dire qu'il faut examiner comment et par quelle modalité sensorielle les informations relatives à la bande de fréquence doivent être renvoyées à l'individu. Les données provenant de la psychologie générale indiquent que les personnes répondent plus efficacement à une cible présentée dans plus d'une modalité (Giray et Ulrich, 1993). En accord avec de telles découvertes générales, il a été trouvé que, par exemple, la pression artérielle peut être abaissée plus efficacement en utilisant une rétroaction audiovisuelle combinée que d'utiliser une simple rétroaction audio (Lal et al., 1998). De plus, l'analyse de Vernon et al. (2004) montre que la plupart des études qui ont appliqué la TVN pour traiter le TDAH ont utilisé la rétroaction audiovisuelle. Vernon et al. (2004) ont suggéré que fournir une rétroaction à la fois auditive et visuelle pourrait être une méthode plus efficace pour informer le participant de son état psychophysique. Par exemple, même si l'attention à un signal disparaît, le signal restant peut rediriger l'attention sur la tâche (Vernon et al., 2004).

#### **4.1.3. Nombre de sessions**

Comme dans tout type de formation, la quantité de formation est cruciale pour déterminer son efficacité. Bien que des

modifications temporaires et transitoires de l'EEG surviennent après une seule séance de TVN (Vernon et al., 2003), d'autres séances sont généralement nécessaires pour révéler des effets plus prolongés. Konareva (2005) a supposé qu'une réglementation NFT réussie pourrait nécessiter un minimum de trois à quatre séances. Il a soutenu que le stagiaire s'habitue à l'équipement, au cadre et au régime d'entraînement durant cette période (Konareva, 2005). Cette opinion est soutenue par Hammond (2011) qui estime que les améliorations initiales ne peuvent être remarquées que dans les cinq à dix premières sessions. Gruzelier et al. (2006) ont également soutenu que les bénéfices de la TVN ne pouvaient être observés qu'après 10 sessions de formation et ont mentionné que les échantillons cliniques nécessiteraient une formation plus longue (Gruzelier et al., 2006). De plus, un grand nombre de séances d'intervention se sont révélées efficaces à partir du constat qu'une intervention de TVN de 40 séances d'intervention a causé des changements microstructuraux dans la matière blanche et grise du cerveau (Ghaziri et al., 2013).

#### **4.1.4. Critères méthodologiques généraux**

Les interventions fondées sur des données probantes reposent sur des études d'évaluation expérimentales saines qui tiennent généralement compte de la population à partir de laquelle l'échantillon est prélevé, de la sélection aléatoire et de la taille de l'échantillon, du groupe témoin et de l'assignation aléatoire aux groupes. Ainsi, si une étude vise à démontrer l'efficacité de la TVN dans les sports d'élite, l'échantillon doit provenir d'une population d'athlètes d'élite. En outre, l'échantillon doit être tiré au hasard, composé de membres de plusieurs équipes, par exemple. Lorsque l'on utilise un plan d'intervention standard comportant deux points de mesure et deux groupes pour trouver la taille de l'effet moyen, l'échantillon doit comporter au minimum 17 personnes par groupe (basé sur un calcul de taille d'échantillon a priori utilisant G \* Power avec  $\alpha = 0,05$ ,  $\beta = 0,80$ , Faul et al., 2007). Comme c'est le cas avec la plupart des modalités thérapeutiques, l'effet de la TVN est largement

influencé par ce que les patients attendent, c'est-à-dire l'effet placebo (Hammond, 2011). Ainsi, pour démêler ces facteurs de confusion des véritables effets d'intervention, non seulement un contrôle, mais aussi un groupe placebo est primordial.

#### **4.2. Évaluation et discussion en ce qui concerne les critères**

La deuxième question de ce réexamen portait sur la question de savoir si les preuves de l'efficacité de la TVN sont encore valables lorsque les études sont testées par rapport à des critères cardinaux, spécifiquement liés au TVN, et à des critères méthodologiques. En ce qui concerne le critère cardinal de spécificité (fréquence et site), la sélection d'un protocole basé sur l'association directe des résultats dans une tâche spécifique avec des modèles cérébraux peut être considérée comme un «étalon-or». protocole (s) basé sur une logique directe-parmi eux l'étude par Landers et al. (1991). La plupart des études (n = 7) ont appliqué des protocoles fondés sur des constatations selon lesquelles ils ont été appliqués avec succès dans des études sur des sports extérieurs ou dans d'autres disciplines sportives. De plus, trois études n'ont pas fourni de justification claire pour les protocoles sélectionnés. De toute évidence, seules quelques études ont porté sur la spécificité du protocole, du moins en ce qui concerne la fourniture de preuves suffisantes et directes pour la sélection. Cependant, étant donné que la mobilité dans la plupart des sports limite encore l'évaluation de l'EEG (artefacts de mouvement), l'étalon-or peut être simplement hors d'atteinte pour de nombreuses tâches sportives. D'après une inspection du tableau 2, la justification du protocole ne semble pas avoir une grande influence sur l'efficacité de la TVN. Cependant, étant donné l'absence de justifications directes, les études qui étudient l'efficacité de la NFT dans les tâches sportives devraient prendre grand soin de dériver et de transférer les protocoles NFT d'autres disciplines ou domaines.

Le second critère cardinal fait référence au type de feedback. Seules quatre des quatorze études ont utilisé simultanément la rétroaction visuelle et auditive, et aucune étude n'a directement comparé l'efficacité de la rétroaction unimodale ou bimodale. Le tableau 2 montre que la plupart des études ont utilisé la rétroaction audio seule, et encore moins la rétroaction audiovisuelle combinée. Cela contraste avec les études cliniques, par exemple, sur le TDAH, pour lesquelles Vernon et al. (2004) ont indiqué que la majorité utilisait une combinaison de rétroaction visuelle et auditive. Bien qu'il ait été soutenu que la rétroaction audio et visuelle combinée peut augmenter l'efficacité (Vernon, 2005), l'efficacité réelle peut dépendre de la tâche. Si le TVN doit être mieux intégré dans les applications de terrain, le type de rétroaction doit correspondre aux exigences de la tâche. Par exemple, lorsque les golfeurs reçoivent un TVN pendant la préparation et l'exécution d'un swing de golf, la rétroaction audio semble plus adaptée à la tâche que la rétroaction visuelle ou audiovisuelle (voir Ring et al., 2015).

Le troisième critère cardinal fait référence au nombre de séances d'intervention. Plus de la moitié des études (neuf sur 14) ont été menées avec cinq séances d'intervention ou plus. Les études suivent donc souvent des recommandations pour des périodes d'intervention prolongées. Cependant, aucune relation avec l'efficacité de NFT n'apparaît dans le tableau 2, et aucune étude n'a directement comparé l'efficacité de différents programmes d'entraînement.

Néanmoins, la durée de la formation peut être liée au but de la formation. Par exemple, des études montrent que pour traiter l'anxiété ou l'insomnie, seulement 15 à 20 séances peuvent être nécessaires, alors que pour d'autres affections, comme le TDA ou le TDAH, 30 à 50 séances peuvent être nécessaires (Hammond, 2011). Jusqu'à présent, toutefois, il y a eu peu de discussions sur le nombre de séances pour les athlètes et encore moins sur les différents niveaux d'expertise ou de disciplines sportives. Wilson et Peper (2011) croient que les athlètes pourraient bénéficier davantage du biofeedback en

général que les non-athlètes. Les athlètes sont très motivés pour réussir et faire ce qui est nécessaire pour améliorer la performance. De même, l'interaction avec le processus de rétroaction est beaucoup plus facile pour les athlètes parce qu'ils éprouvent divers types de rétroaction pendant l'entraînement et la pratique de toute façon. Ils passent aussi la plus grande partie de leur vie à chercher et à croire en des mesures efficaces.

Les derniers critères, mais non les moindres, se rapportent à des questions méthodologiques qui comprennent la population, la sélection aléatoire de l'échantillon et la taille de l'échantillon. Sur les 14 études examinées, 12 souffrent d'une petite taille d'échantillon. Comme mentionné ci-dessus en ce qui concerne la taille de l'effet moyen, l'échantillon doit être composé d'un minimum de 17 personnes par groupe; cependant, l'éventail des participants dans la plupart des études était de un à 13 (sauf Gruzelier et al., 2014b, Mikicin, 2015). En outre, 10 des 14 études ont utilisé un modèle d'évaluation consistant en une mesure pré- et post-intervention dans différents groupes. Parmi ces 10 études, quatre comprenaient un groupe témoin placebo. L'étude de Ring et al. (2015) est un exemple qui souligne l'importance d'un groupe de contrôle. Ils ont signalé que, bien que les participants du groupe d'intervention aient appris à réduire leur puissance alpha avant les putts (un modèle d'expert), le régime d'entraînement a échoué de façon sélective pour améliorer la performance, puisque les groupes d'intervention et de contrôle amélioraient la performance. même degré. De plus, sept des huit études ont assigné au hasard leurs participants (Dekker et al., 2014, Mikicin, 2015 n'a pas rapporté l'allocation de groupe).

L'aperçu des études empiriques portant sur l'efficacité de la NFT dans le sport a révélé que 12 études ont montré des effets positifs en général. Plus précisément, sur les 10 études ayant étudié les effets sur la performance sportive, sept ont montré des effets positifs. L'objectif de la deuxième question était de vérifier si cette preuve était efficace en ce qui concerne les

critères. Trois des sept études portant sur le rendement ont présenté une justification directe, et aucune étude de cinq études portant sur les résultats affectifs ou cognitifs n'a indiqué de justification directe. Deux des sept études liées au rendement ont rapporté une rétroaction bimodale, et deux des cinq études portant sur les résultats affectifs ou cognitifs ont fait état d'une rétroaction bimodale. Quatre des sept études liées à la performance ont rapporté plus de cinq séances, et quatre des cinq études portant sur les résultats affectifs ou cognitifs ont rapporté plus de cinq séances. Quatre des sept études liées à la performance utilisaient un plan d'évaluation complet et quatre des cinq études liées aux résultats affectifs ou cognitifs utilisaient un plan d'évaluation complet.

Aucune étude ne répondait aux critères aux quatre niveaux, et seulement trois études - Paul et al. (2011) en tir à l'arc, Rostami et al. (2012) en tir à la carabine, et Mikicin (2015) en athlétisme satisfait à trois niveaux: rétroaction bimodale, plus de cinq séances d'intervention, et une conception d'évaluation complète. Ainsi, bien que la plupart des études montrent des effets NFT positifs dans le sport, la qualité de conception des études peut ne pas permettre une image complètement positive.

En ce qui concerne les études qui n'ont pas fourni de preuves initiales d'efficacité (trois études évaluant le rendement et trois études évaluant les résultats affectifs et cognitifs), une seule étude (sauf Gruzelier et coll., 2014b) a recueilli des données d'un échantillon adéquat. Ceci indique qu'avec des tailles d'échantillon plus grandes, des effets moyens ou plus petits peuvent éventuellement être détectés.

## **5. Discussion générale et recommandations**

L'entraînement en Neurofeedback (NFT) a été reconnu comme une méthode pour améliorer l'autorégulation. Des études récentes montrent l'efficacité de NFT dans l'amélioration des symptômes dans les échantillons cliniques et dans

l'amélioration de la performance dans des échantillons non cliniques, par exemple des musiciens (Gruzelier, 2014a, b). Le sport est un domaine qui pourrait très bien profiter de l'utilisation du NFT. Cependant, les examens concernant l'application du TVN dans les sports, c'est-à-dire l'évaluation de son efficacité dans l'amélioration de la performance sportive, font défaut. Ainsi, l'objectif principal de la revue actuelle était de déterminer l'efficacité du NFT sur la performance des athlètes. À cette fin, nous avons d'abord présenté un aperçu des études empiriques examinant les effets du NFT dans le sport, puis évalué les études par rapport aux critères cardinaux et méthodologiques.

Notre revue indique que, jusqu'à présent, la majorité des études publiées soutiennent que le TEN améliore efficacement la performance des athlètes dans une tâche sportive spécifique et / ou dans les aspects sous-jacents pertinents de la cognition et de l'affect. Divers protocoles ont été testés et ont abouti à des effets principalement positifs. Cette constatation est en ligne avec les conclusions de Gruzelier (2014a, b) pour d'autres domaines d'applications. En y regardant de plus près, cependant, les preuves de l'efficacité des protocoles spécifiques pour améliorer la performance sportive sont plutôt faibles, cette conclusion finale prenant en compte la validité des études est assez différente des conclusions positives de Gruzelier (2014a, b). Tout d'abord, dans certains cas, le même protocole a eu des effets différents au sein d'une même tâche ou d'une tâche similaire; dans un autre cas, différents protocoles ont conduit à des effets similaires dans un sport. Deuxièmement, la qualité des études semble être non optimale. Aucune étude ne satisfait à tous les critères cardinaux et méthodologiques avancés par cette revue, et seuls quelques-uns répondent à la plupart des critères. Ainsi, malgré certaines indications que l'utilisation des TVN est efficace pour améliorer les performances sportives, il manque des preuves substantielles de son efficacité.

La revue montre également que le développement d'interventions de TVN dans un contexte appliqué est prématuré, car les preuves sont très faibles pour des interventions spécifiques qui reposent sur des associations entre la formation d'une bande de fréquences spécifique et une mesure de performance. Ces résultats soulignent également que malgré la reconnaissance précoce de l'utilité potentielle de NFT dans les sports (par Landers et al., 1991), l'application de TVN pour optimiser la performance des athlètes en est encore à ses balbutiements. Par conséquent, ce serait un domaine fructueux pour d'autres travaux, mais pour que les études sur la NF progressent, les chercheurs doivent se pencher sur des critères qui ont soulevé des questions sur la validité des protocoles. Ainsi, il y a un besoin certain d'études avec des échantillons de plus grande taille (voir Schweizer et Furley, 2016, pour une discussion générale). Les études devraient également appliquer au moins cinq séances d'intervention, car les données probantes semblent suggérer cinq comme le nombre minimum pour habituer un stagiaire au régime et aux conditions d'entraînement. Cependant, en ce qui concerne le calendrier NFT, encore deux autres questions demeurent. Premièrement, combien de temps devrait durer chaque séance d'entraînement, et deuxièmement, comment la séance d'entraînement devrait-elle être espacée au fil du temps? Il a été avancé que les sessions de formation ne devraient pas être trop longues ou trop courtes. Une longue session rend les participants épuisés et somnolents, d'un autre côté, le changement demande du temps. En général, cependant, des données provenant de plusieurs sources ont montré que l'entraînement d'une durée de 20 à 30 minutes mène au succès (voir par exemple Ghaziri et al., 2013, Raymond et al., 2005, Rostami et al., 2012). En ce qui concerne l'espacement, les données empiriques ne sont pas concluantes mais suggèrent un espacement plus long. D'après l'application générale du TVN, certaines études qui ont appliqué des séances d'entraînement massées en une journée n'ont pas réussi à démontrer le succès (Albert et al., 1974, Nan et al., 2015). Vernon et al. (2009) ont souligné que, comme les autres types

d'apprentissage, l'entraînement par espacement sur plusieurs jours et / ou semaines devrait être plus efficace que la formation regroupée en un seul jour (voir Vernon et al., 2009 pour plus de détails).

Pour les études futures, il est également nécessaire de mettre davantage l'accent sur la logique des protocoles (en ce qui concerne la spécificité de la fréquence et du site). Une justification plausible pour un protocole doit certainement répondre aux demandes de tâches. En outre, le type de feedback doit être adapté au but de l'intervention et à la conception de l'étude.

En accord avec ces questions, l'un des objectifs de la présente étude était de fournir un certain nombre de recommandations que les futurs chercheurs devraient adopter pour la performance sportive. D'autres recommandations sont les suivantes:

1) Concernant les questions éthiques liées à un groupe placebo, nous suggérons d'utiliser une intervention de rétroaction factice qui dure seulement une ou deux sessions. Il est très injuste, voire contraire à l'éthique, que les participants investissent beaucoup de temps et d'efforts pour améliorer leur performance, mais reçoivent seulement une rétroaction factice qui ne devrait pas être efficace en premier lieu. Une stratégie pour faire face à cette difficulté est d'offrir aux participants du groupe placebo la possibilité de recevoir l'intervention réelle par la suite, une fois qu'il a été prouvé efficace et sécurisé. Cependant, il semble que les participants ne sont pas intéressés à recevoir l'option TVN plus tard (La Vaque et Rossiter, 2001).

2) Jusqu'à présent, les études n'ont pas fourni (beaucoup) de preuves de changements dans les bandes de fréquences formées au cours des sessions et entre les formations. Cependant, de telles informations sont importantes pour évaluer pourquoi certaines interventions ont échoué ou produit seulement de petits effets (Gruzelier et al., 2014b). Ainsi, les bandes de fréquences doivent non seulement être surveillées pour le TVN, mais aussi enregistrées pour des analyses ultérieures.

3) Comme Cheng et al. (2015) ont affirmé que des changements neurophysiologiques se produisent non seulement dans des fréquences entraînées sur des sites sélectionnés, mais aussi dans des fréquences et des sites adjacents. Ainsi, la surveillance EEG et les enregistrements pour des analyses ultérieures doivent appliquer une disposition d'électrode plus dense.

4) Il ne fait aucun doute qu'un apprentissage de qualité requiert également une véritable motivation. Ainsi, le maintien de la motivation et de la conformité des participants au cours des longues et nombreuses sessions d'intervention de la TVN est primordial. Cette question peut être atteinte de différentes manières, par exemple, un protocole d'entraînement qui, après certaines sessions, fournit aux participants une rétroaction sous la forme d'un nouveau stimulus audio et / ou visuel. En outre, il est préférable d'utiliser des environnements de rétroaction plus attrayants plutôt que des rétroactions ennuyeuses et basiques comme une barre classique. Une rétroaction devrait être intrinsèquement motivant et pertinent pour l'apprenant et avoir un attrait de nouveauté, de défi, de pertinence dans le monde réel ou de valeur esthétique. La rétroaction en matière de jeu, de 3D ou de réalité virtuelle s'est avérée plus efficace que la rétroaction simple, comme une barre classique (Friedrich et al., 2015).

5) Un problème général avec le NFT est que la compétence pour changer volontairement les modèles cérébraux doit être transférée d'un environnement d'entraînement au terrain de jeu, ce qui peut inclure des compétitions réelles (Vernon, 2005). Ainsi, il est important de concevoir une intervention intégrant le NFT dans la tâche sportive actuelle (voir par exemple l'étude de Ring et al., 2015).

La revue actuelle donne également un aperçu de la direction de la recherche future. Il est clair que le nombre de séances de TVN et leur durée nécessitent davantage de recherches qui tiennent compte du fait que les athlètes peuvent différer des autres populations et tiennent également compte du niveau d'expertise individuel. Par exemple, un expert est plus

expérimenté qu'un non-expert en termes de transfert intensif des compétences apprises dans la pratique à l'application en compétition, ce qui nécessite moins de séances d'intervention. En outre, des études ont jusqu'ici étudié des compétences fermées telles que le golf et le tir à l'arc, pour une compréhension plus globale de l'efficacité du NFT dans le sport, plus de recherche doit être faite avec des compétences ouvertes comme le football et le basketball.

Dans le monde réel du sport, la plupart des comportements se produisent en mouvement, dans un courant comportemental qui a des signaux de départ ambigus et des conditions imprévisibles qui ne sont pas directement comparables aux conditions du laboratoire (Walsh, 2014). Ainsi, le dernier, mais non le moindre, point à considérer dans les recherches futures est d'étendre les conditions d'étude du laboratoire au terrain, y compris les situations réelles de performance. Ce transfert ou cette expansion a deux aspects: Le premier est directement lié à la recherche qui doit prouver que ses découvertes en laboratoire ont une validité externe ou écologique. Si l'efficacité de la TVN pour améliorer la performance sportive doit être testée, elle doit être testée en évaluant les résultats directement liés à la performance dans une compétition, sinon la performance dans un concours en premier lieu. La formation ainsi que l'évaluation des résultats doivent se dérouler dans des conditions plus réalistes sur le terrain ou sur le terrain.

Le deuxième aspect concerne la façon dont les athlètes peuvent être aidés dans le transfert des compétences acquises par le biais de la TVN, habituellement dans des conditions de laboratoire, dans le monde réel de la compétition. Les études rapportées ne donnent pas beaucoup de détails sur ce problème. Cependant, les interventions futures et les études évaluant ces interventions pourraient être guidées par l'approche en cinq étapes de Wingate (W5SA, Boris et Iris, 2014). Le W5SA est conçu pour transférer en cinq étapes les compétences d'autorégulation acquises et formées en laboratoire aux conditions de terrain et aux contextes de

pratique et de compétition. Dans le W5SA, les trois premières étapes (introduction à la formation professionnelle, identification de la modalité de retour et simulation de la compétition) sont fournies au laboratoire et les deux dernières étapes (transformation, réalisation) sont proposées dans les paramètres d'entraînement / compétition.

Sur la base de cette méthode, une intervention dans le domaine des TVN peut être conçue d'une phase très générale à une phase spécifique. Par exemple, dans une phase de simulation, le TVN peut être appliqué pendant que les athlètes sont excités, par exemple en observant des films de compétitions, ou pendant que les athlètes sont distraits (par exemple en appliquant des bruits de compétitions). Pour un transfert ultérieur, le TVN pourrait être limité dans le temps et la durée pour correspondre aux exigences de la discipline sportive (par exemple, correspondre à une phase de préparation avant la compétition). Enfin, le TVN pourrait être intégré dans des routines de pratique ou d'entraînement régulières (par exemple pendant l'échauffement).

Prises ensemble, les conclusions finales sur la validité des résultats de cette étude de revue sont assez différentes des conclusions positives de Gruzelier (2014a, b). Des efforts de recherche supplémentaires doivent donc être faits dans le domaine du sport pour découvrir les contraintes et les spécifications du NFT dans le sport.

### **Conflit d'intérêt**

Aucun

### **Les références**

Albert, I.B., Simmons, J., Walker, J., 1974. Pratique étendue et espacée dans l'amélioration d'alpha. Compétences perceptives et motrices 39, 1039-1042.

Arns, M., de Ridder, S., Strehl, U., Breteler, M., Coenen, A., 2009. L'efficacité du traitement neurofeedback dans le TDAH: les effets sur l'inattention, l'impulsivité et l'hyperactivité: une méta-analyse. *Clin EEG Neurosci* 40, 180-189.

Arns, M., Kleinnijenhuis, M., Fallahpour, K., Breteler, R., 2008. Amélioration de la performance de golf et entraînement de neurofeedback réel en utilisant des profils EEG verrouillés événementiels personnalisés. *Journal of Neurotherapy* 11, 11-18.

Barlow, D.H., Lehrer, P. M., Woolfolk, R.L., Sime, W.E., 2007. *Principes et pratique de la gestion du stress*. Guilford Press.

Beatty, J., Greenberg, A., Deibler, W.P., O'Hanlon, J.F., 1974. Contrôle de l'opérateur du rythme thêta occipital affecte la performance dans une tâche de surveillance radar. *Science* 183, 871-873.

Beauchamp, M.K., Harvey, R.H., Beauchamp, P.H., 2012. Programme intégré de biofeedback et d'entraînement psychologique pour l'équipe olympique canadienne de patinage de vitesse sur courte piste. *Journal de psychologie du sport clinique* 6, 67.

Becerra, J., Fernandez, T., Harmony, T., Caballero, MI, Garcia, F., Fernandez-Bouzas, A., Santiago Rodriguez, E., Prado-Alcala, RA, 2006. Étude de suivi de l'apprentissage Enfants handicapés traités avec neurofeedback ou un placebo. *Clin EEG Neurosci* 37, 198-203.

Beckmann, J., Elbe, A.-M., 2015. *Interventions psychologiques sportives dans les sports de compétition*. Cambridge Scholars Publishing.

Boris, B., Iris, O., 2014. *Biofeedback pour le sport et l'amélioration de la performance*. Oxford University Press

Budzynski, T.H., Budzynski, H.K., Evans, J.R., Abarbanel, A., 2009. Introduction à l'EEG quantitatif et neurofeedback: théorie avancée et applications, deuxième édition ed. Presse académique.

Cashmore, E., 2008. Psychologie du sport et de l'exercice: les concepts clés. Routledge.

Cheng, M.Y., Huang, C.J., Chang, Y.K., Koester, D., Schack, T., Hung, T. M., 2015. Sensorimotor Rhythm Neurofeedback améliore les performances de golf. J Sport Exerc Psychol 37, 626-636.

Cheron, G., Petit, G., Chéron, J., Leroy, A., Cebolla, A., Cevallos, C., Petieau, M., Hoellinger, T., Zarka, D., Clarinval, A.- M., 2016. Oscillations du cerveau dans le sport: vers des biomarqueurs de performance EEG. Frontières en psychologie 7.

Christie, S., Werthner, P., 2015. Profil psychophysiological Prestart d'un athlète de canoë de 200 m: une comparaison des meilleurs et des pires moments de réaction. Biofeedback 43, 73-83.

Coben, R., Linden, M., Myers, T. E., 2010. Neurofeedback pour trouble du spectre autistique: une revue de la littérature. Psychophysiology appliquée et biofeedback 35, 83-105.

Dekker, M.K., Van den Berg, B.R., Denissen, A.J., Sitskoorn, M.M., Van Boxtel, G.J., 2014. Faisabilité des yeux ouverte formation de puissance alpha pour l'amélioration mentale dans les gymnastes d'élite. Journal des sciences du sport 32, 1550-1560.

Del Percio, C., Rossini, PM, Marzano, N., Iacoboni, M., Infarinato, F., Aschieri, P., Lino, A., Fiore, A., Toran, G., Babiloni, C., Eusebi, F., 2008. Y a-t-il une «efficacité neurale»

chez les athlètes? Une étude EEG haute résolution. *NeuroImage* 42, 1544-1553.

Dupee, M., Werthner, P., 2011. Gérer la réponse au stress: L'utilisation du biofeedback et du neurofeedback avec les athlètes olympiques. *Biofeedback* 39, 92-94.

Egner, T., Gruzelier, J.H., 2004. Biofeedback EEG des composants à faible bande bêta: effets spécifiques de la fréquence sur les variables de l'attention et des potentiels cérébraux liés à l'événement. *Neurophysiologie clinique: journal officiel de la Fédération internationale de neurophysiologie clinique* 115, 131-139.

Escolano, C., Aguilar, M., Minguez, J., 2011. Formation de neurofeedback alpha supérieur basée sur l'EEG améliore la performance de la mémoire de travail, EMBC, 2011 Conférence internationale annuelle de l'IEEE. IEEE, pp. 2327-2330.

Faridnia, M., Shojaei, M., Rahimi, A., 2012. L'effet de l'entraînement neurofeedback sur l'anxiété des nageuses élités. *Annals of Biological Research* 3, 1020-1028.

Faul, F., Erdfelder, E., Lang, A.-G., Buchner, A., 2007. G \* Power 3: Un programme flexible d'analyse de puissance statistique pour les sciences sociales, comportementales et biomédicales. *Méthodes de recherche comportementale* 39, 175-191. Friedrich, E.V., Wood, G., Scherer, R., Neuper, C., 2015. Mind sur le cerveau, le cerveau sur l'esprit: les causes cognitives et les conséquences du contrôle de l'activité cérébrale. *Frontiers Media SA*.

Gevensleben, H., Holl, B., Albrecht, B., Schlamp, D., Kratz, O., Studer, P., Rothenberger, A., Moll, GH, Heinrich, H., 2010. Entraînement Neurofeedback chez les enfants avec ADHD: suivi de 6 mois d'un essai contrôlé randomisé. *Psychiatrie européenne des enfants et des adolescents* 19, 715-724.

Ghaziri, J., Tucholka, A., Larue, V., Blanchette-Sylvestre, M., Reyburn, G., Gilbert, G., Lévesque, J., Beauregard, M., 2013. L'entraînement de neurofeedback induit des changements dans le blanc et la matière grise. Clin EEG Neurosci 44, 265-272.