



LE NEUROFEEDBACK ET LA THÉORIE D'APPRENTISSAGE DE BASE: IMPLICATIONS POUR LA RECHERCHE ET LA PRATIQUE

**Leslie H. Sherlin 1,2,3 , Martijn Arns 4,5 , Joel Lubar 6 , Hartmut Heinrich 7,8 ,
Cynthia Kerson 9,10,11 , Ute Strehl 12 , M. Barry Serman 13**

Résumé

L'activité cérébrale évaluée par électroencéphalographie (EEG) a été démontrée pour répondre aux techniques de conditionnement. Le concept de modulation de cette activité a été appelé EEG biofeedback, plus récemment neurofeedback, et est basé sur les principes d'apprentissage opérant. Les progrès technologiques ont considérablement amélioré la facilité et l'accessibilité de l'enregistrement et de l'analyse de l'activité cérébrale. Ainsi, les praticiens correctement formés peuvent mettre en œuvre ces stratégies de conditionnement dans leur pratique. Des recherches récentes indiquant une efficacité démontrée ont fait de cette technique une option plus viable pour l'intervention clinique. **L'objectif de cet article est de mettre en évidence les principes d'apprentissage qui ont fourni les bases de cette approche neuromodulatrice.** En outre, il est recommandé que les futures applications dans le travail

clinique, la recherche et le développement adhèrent à ces principes.

INTRODUCTION

Il a été démontré que l'activité cérébrale électroencéphalographique (EEG) réagit au conditionnement opérant et classique. Cette technique a été appelée EEG biofeedback et plus récemment neurofeedback. Les développements des technologies informatiques ont progressé, et maintenant il est abordable et pratique pour les fournisseurs privés d'accéder à des logiciels et du matériel qui

peut être utilisé pour conditionner l'EEG. Cet article met en évidence les principes d'apprentissage fondamentaux pour la mise en œuvre réussie de cette approche de neuromodulation. Nous sommes d'avis que les applications futures du travail clinique, de la recherche et du développement ne devraient pas s'écarter des principes de base de la théorie de l'apprentissage déjà démontrés jusqu'à ce que des preuves empiriques démontrent le contraire.

Nous reconnaissons la contribution de l'assistante de recherche Noel Larson, MA, pour son implication dans la recherche de la littérature précédente ainsi que sa revue et la rédaction du manuscrit. les principes de la théorie de l'apprentissage bien développés devraient être mis en œuvre dans la mise en œuvre pratique du neurofeedback.



Le conditionnement classique

dit Pavlovien

PERSPECTIVE HISTORIQUE

Ivan Pavlov a établi le conditionnement classique en 1927 dans une série d'expériences mesurant la salivation des chiens en relation avec la présentation de la nourriture. En bref, les réponses inconditionnelles, appelées à l'origine «réflexes innés» (Pavlov, 1927), sont des réactions à des stimuli qui ne nécessitent aucun apprentissage. Ces réponses inconditionnées sont souvent le résultat de stimuli naturels et sont utiles dans la survie, comme la salivation à la vue de la nourriture pour augmenter la vitesse de digestion. Dans cet exemple, la nourriture est étiquetée comme un stimulus inconditionnel, ou un stimulus qui déclenche automatiquement une réponse inconditionnelle (salivation, Pavlov, 1927). Pavlov a rapidement découvert qu'une réponse conditionnée, comme la salivation au moment d'entendre les pas de la personne apportant de la nourriture au chien, peut être déclenchée par un stimulus conditionné, en l'occurrence les pas. Il a inventé ce processus de conditionnement classique (Pavlov, 1927). Cependant, le conditionnement classique n'explique pas tous les changements de comportement ou l'émergence de nouveaux comportements.



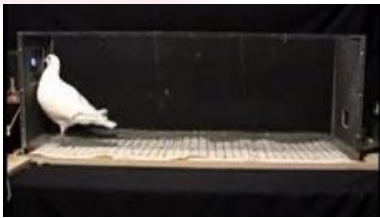
Pour expliquer l'émergence de comportements nouvellement acquis qui n'étaient pas le résultat d'un conditionnement classique, Thorndike (1911 = 1999) a conceptualisé le conditionnement opérant en proposant la «loi de l'effet», qui énonce des réponses produisant un effet satisfaisant dans une situation particulière. de plus en plus susceptibles de se reproduire dans cette situation, et les réponses qui produisent un effet gênant ont moins de chance de se reproduire dans cette situation.

Le conditionnement opérant a été plus affiné par le psychologue révérend B.F. Skinner (1948).

Grâce à son travail, les règles de conditionnement opérant étaient clairement définies. Le conditionnement opérant peut augmenter un comportement préféré et diminuer un comportement indésirable en fournissant une récompense ou une punition. Une récompense est tout événement (présentation de nourriture, tons, etc.) qui suit une réponse spécifique qui est considérée comme souhaitable et qui est destinée à promouvoir la réponse spécifique à se reproduire dans les mêmes conditions. D'autre part, une punition est un événement qui suit une réponse spécifique qui n'est pas souhaitable et est conçue pour empêcher que la réponse spécifique ne se répète. Si la conséquence de la récompense ou de la punition augmente ou diminue la probabilité de la réponse, la réponse devient renforcée. Par conséquent, tout événement qui suit la réponse à un stimulus (récompense ou punition) et augmente ou diminue la probabilité d'un



comportement est considéré comme un renforcement. Il est important de noter que les termes récompense et punition ne signifient pas la même chose que le renforcement. Une récompense ou une punition se réfère spécifiquement à l'événement après une réponse, alors que le renforcement est une récompense ou une punition efficace pour augmenter ou diminuer la probabilité que la réponse se reproduise respectivement (à savoir, le renforcement de la réponse). Nous reconnaissons que cette séquence peut être difficile à conceptualiser. Dans l'ordre chronologique, un stimulus survient suivi d'une réponse comportementale. Une récompense ou une punition est présentée en réaction à la réponse afin de promouvoir ou de supprimer la réponse. Si la récompense ou la punition atteint ce but, il est étiqueté comme un renforcement.



Le conditionnement opérant
dit Skinnerien

Les termes positifs et négatifs dans la terminologie du conditionnement opérant impliquent la présentation ou l'élimination du renforcement. Il y a plusieurs façons de combiner ces termes qui ont des effets sur le comportement. Pour illustrer les combinaisons possibles, quelques exemples sont fournis. Un enfant peut être plus susceptible de faire attention en classe si des autocollants sont présentés par la suite (récompense positive). Inversement, un enfant pourrait être plus susceptible de faire attention s'il est autorisé à sauter le temps de la salle d'étude (récompense négative). Un enfant peut être plus susceptible de faire attention en classe si on lui donne un travail supplémentaire à compléter s'il ne fait pas attention (punition positive). Enfin, un enfant peut être plus susceptible de faire attention s'il n'est pas autorisé à participer aux loisirs s'il ne fait pas attention (punition négative). En général, le terme positif est un processus additif de récompense ou de punition, et le terme négatif est la suppression d'une récompense ou d'une punition pour promouvoir le comportement désiré. Le moment du renforcement d'un comportement est essentiel à l'apprentissage, car des retards aussi minimes qu'une fraction de seconde peuvent diminuer la force du conditionnement (Skinner, 1958). La relation contingente entre le comportement et le renforcement doit être évidente pour l'apprenant. Les calendriers de renforcement sont principalement soit un renforcement continu (ceci décrit un calendrier où une réponse est renforcée rapidement chaque fois qu'il se produit), soit un renforcement intermittent (c'est-à-dire que toutes les occurrences de la réponse ne sont pas récompensées).

Il existe quatre types de programmes de renforcement intermittent:

1. Calendrier de renforcement à ratio défini, dans lequel le sujet doit reproduire la bonne réponse un certain nombre de fois avant que le renforcement ne soit présenté. Une planification à taux fixe ne dépend pas de la vitesse des réponses, mais seulement du nombre de réponses.

2. Les programmes à rapport variable nécessitent un nombre imprévisible de réponses pour atteindre le renforcement.

3. Les horaires à intervalles fixes sont similaires aux programmes de renforcement à ratio défini, sauf que la réponse doit avoir lieu ainsi qu'un intervalle de temps défini.

4. Les horaires à intervalles variables nécessitent que la réponse et des segments de temps variés se produisent avant que le renforcement soit rendu disponible.



Éric Kandel - Prix Nobel

Pour le neurofeedback, la plupart des implémentations et études actuelles ont utilisé un programme de renforcement continu au sein des sessions. Pour faciliter le transfert de la compétence d'autorégulation à la vie quotidienne, certains protocoles utilisent des essais de transfert. Les essais de transfert sont ceux pour lesquels aucun retour d'information n'est fourni pendant la période donnée, seuls les commentaires indiquant si l'essai était «correct» ou «incorrect» (Rockstroh, Elbert, Birbaumer, & Lutzenberger, 1982). Ce processus fait référence à une généralisation de réponse, qui est expliquée plus tard. Cependant, il est très important pour le neurofeedback que la représentation finale d'une réponse puisse être atteinte en renforçant des approximations successives de la réponse désirée, un processus appelé mise en forme (Skinner, 1958).

La mise en forme peut être utilisée pour réduire le temps d'apprentissage de la réponse finale en divisant l'information en petites étapes qui sont plus faciles à accomplir, nécessitant progressivement plus d'étapes avant que le renforcement ne se produise. En utilisant l'enchaînement, on peut augmenter la complexité de la réponse finale. Comme de nombreux maillons d'une chaîne, les réponses comportementales peuvent d'abord être renforcées individuellement, mais finalement la séquence complète des événements doit se produire avant le renforcement. Par exemple, les pigeons auxquels Skinner a appris à «jouer» au ping-pong sont une illustration de l'enchaînement (Skinner, 1962). Les pigeons ont appris des comportements successivement, mais chacun dépendait du précédent pour se produire. Un tel comportement complexe ne peut être conditionné qu'en utilisant **les principes de la théorie de l'apprentissage en enchaînant et en renforçant les approximations successives du comportement.**



Barry Serman

Deux autres concepts associés à la théorie de l'apprentissage sont l'habituation et la sensibilisation, qui sont toutes deux des formes d'apprentissage non associatif.

L'accoutumance est le processus d'apprentissage qui se traduit par un individu qui diminue la réponse à un stimulus en raison de la réduction de la réaction à la nouveauté. Cela se produit en raison d'une exposition répétée et est typique lorsque l'individu est continuellement exposé aux mêmes stimuli (Groves et Thompson, 1970). Dans des études expérimentales plus récentes de l'apprentissage, il a été démontré que des taux différentiels d'accoutumance (par exemple, à un nouveau champ ouvert) se produisent entre des animaux de capacités d'apprentissage générales élevées et faibles.

Parce que les principes de conditionnement du neurofeedback ont été largement appliqués dans le cadre clinique, il existe une possibilité d'accoutumance et de conditionnement du comportement chez les individus ayant des capacités d'apprentissage plus faibles (Light, Grossman, Kolata, Wass, & Matzel, 2011).

La sensibilisation, semblable à l'habituation seulement par la nature répétitive des stimuli, se produit quand l'individu a une amplification d'une sensation ou conscience du stimulus particulier. L'individu peut trouver une réponse normale douloureuse ou gênante et tenter d'éviter le stimulus, même s'il était agréable ou s'il était une récompense. La sensibilisation du système nerveux est influencée par des comportements qui sont augmentés ou diminués par un renforcement positif et négatif. La présence d'une symptomatologie clinique peut en outre amplifier la présentation et entraver les améliorations (Treisman et Clark, 2011).

Cette considération devrait également être donnée lors de la détermination des réponses d'apprentissage et en tant qu'explication de réponses de conditionnement moins qu'idéales. Les bases neuronales de l'habituation et de la sensibilisation ont été démontrées dans des expériences avec la limace de mer *Aplysia* (Kandel & Taut, 1965a, 1965b), démontrant que ces principes d'apprentissage représentent des formes d'apprentissage très basiques même dans les systèmes «simples». Ce travail a valu à Kandel le prix Nobel et a récemment été décrit par Hawkins, Kandel et Bailey (2006).

LE CONDITIONNEMENT CLASSIQUE DE L'ACTIVITÉ CÉRÉBRALE

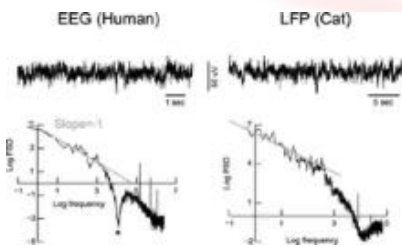
Les premières démonstrations que l'activité cérébrale, plus spécifiquement la réponse alpha bloquante, pourraient être classiquement conditionnées ont été rapportées presque simultanément en France par Durup et Fessard (1935) et aux États-Unis par Loomis, Harvey et Hobart (1936). Loomis et al. décrit que, dans une pièce complètement obscure, un faible tonus auditif avec un stimulus lumineux aboutissait à ce que le stimulus auditif devienne le stimulus conditionné conduisant à la réponse conditionnée - dans ce cas, le blocage de l'alpha. Ils ont également observé que l'extinction avait lieu si le ton bas était présenté plusieurs fois en l'absence du stimulus lumineux.



Les premières études systématiques sur le conditionnement classique de la réponse alpha-bloquante ont été menées plusieurs années plus tard. Jasper et Shagas (1941a) ont démontré que la réponse conditionnée simple du blocage alpha était égale ou plus longue avec le stimulus conditionné comme elle l'était par le stimulus inconditionné après seulement 10 présentations jumelées (Jasper & Shagas, 1941a). En outre, ils ont démontré que la réponse conditionnée alpha-bloquante pouvait être conditionnée par de nombreux types de renforcement (cyclique, différé, tridimensionnel, différentiel, différentiel retardé et rétrograde) et démontrait donc que le conditionnement de la réponse alpha bloquante remplissait tous les types pavloviens de réponses conditionnées.

La même année, Knott et Henry (1941) étant sceptiques quant au conditionnement du bloc alpha, ils menèrent leurs propres recherches pour différencier le conditionnement et la sensibilisation.

Toujours en 1941, Jasper et Shagis collaborèrent pour construire le conditionnement pavlovien du blocage alpha occipital. A partir des recherches antérieures, ils ont résumé qu'il est clair que le blocage alpha n'est pas simplement une réponse inconditionnelle à la lumière. Il peut également devenir une réponse conditionnée de stimuli au-delà de la lumière seule. Dans leur nouvelle étude, Jasper et Shagis (1941b) ont réussi à démontrer le conditionnement opérant du bloc alpha en demandant aux sujets de dire volontairement " bloquer " et d'appuyer sur un bouton suivi d'un " arrêt " sous -vocal et de la libération du bouton. Le bouton a allumé la lumière, servant de réponse inconditionnée, associant la commande subvocale au blocage alpha et devenant ainsi la réponse conditionnée. C'était en fait la première démonstration du «contrôle volontaire» de l'EEG chez l'homme.



Échelles de fréquences EEG

En 1963, Sterman, et plus tard dans la même année Clemente, Sterman et Wyrwicka, ont mené ce conditionnement classique de l'activité cérébrale un peu plus loin. Ils ont démontré chez les chats que la synchronisation EEG et les manifestations comportementales du sommeil pouvaient être conditionnées avec un tonus (stimulus conditionné) et une stimulation du cerveau antérieur basal (stimulus inconditionné), où le stimulus conditionné aboutissait finalement à un comportement préparatoire au sommeil.

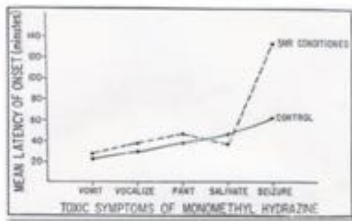
En outre, ils ont également signalé que la généralisation pour différentes fréquences de tonalité et la discrimination de la réponse conditionnée s'était produite, suggérant que des principes de conditionnement pourraient être appliqués. Milstein (1965) a résumé la controverse sur les réponses EEG, notant qu'il semblait clair que le blocage alpha était toujours le résultat de la présentation de la lumière (Bagchi, 1937) et que cette réponse inconditionnée pouvait être conditionnée à des stimuli neutres (Gastaut et al. 1957, Jasper et Shagass, 1941b, Jus et Jus, 1957, Knott et Henry, 1941, Loomis et coll., 1936, F. Morrell et Ross, 1953, Travis et Egan, 1938). Cependant, Milstein (1965) a indiqué le nombre d'études qui n'ont pas réussi à démontrer la cohérence de tous les individus dans la réponse alpha-bloquante (Redlich, Callahan et Mendelson, 1946) et la variabilité de la durée de réponse (Jus & Jus, 1960 L. Morrell & Morrell, 1962) ou même la réduction de la réponse tous ensemble (Wells, 1963).



Joe Kamya

Avec tout cela à l'esprit, Milstein a conçu une étude pour déterminer si un stimulus neutre pouvait produire un blocage alpha sans être associé à un stimulus qui provoque généralement la réponse. Inversement, Milstein a également essayé de tester ce qui suit: Si le stimulus conditionné était associé au stimulus inconditionné pendant l'activité EEG non alpha, le stimulus conditionné pourrait-il déclencher la réponse alpha-bloquante durant les essais d'activité alpha?

Dans l'expérience de Milstein, il y avait 11 conditions différentes pour répondre à ces questions, y compris les périodes d'accoutumance, les périodes d'essai et les périodes de repos, et toutes ont été suivies d'une période de conditionnement classique. Les résultats indiquent que le blocage alpha pourrait être conditionné. Cependant, comme il n'était pas nécessaire de coupler le stimulus conditionné avec le stimulus inconditionné, il est possible que l'idée de Knott et Henry (1941) selon laquelle les sujets étaient simplement sensibilisés au ton semblaient plausibles. Par conséquent, il n'a toujours pas été déterminé si les résultats qui viennent d'être résumés doivent être considérés comme un conditionnement classique ou simplement comme une sensibilisation par réflexion. Cependant, les résultats démontrent que l'EEG est soumis à des principes d'apprentissage.



L'expérience de l'hydrazine
par Barry Serman

LE CONDITIONNEMENT OPÉRANT DE L'ACTIVITÉ CÉRÉBRALE

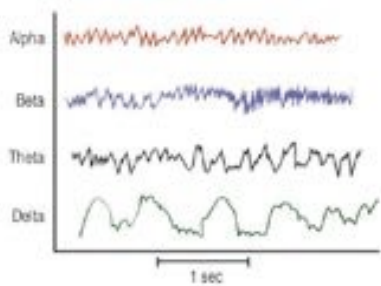
En 1962, Kamiya (2011) a présenté les premiers résultats du contrôle volontaire de l'activité alpha basé sur les principes de conditionnement opérant. Plusieurs années après les rapports de Kamiya, le laboratoire de Serman a démontré un conditionnement opérant de l'activité du rythme moteur sensoriel chez le chat (Wyrwicka et Serman, 1968), dont les propriétés anticonvulsivantes ont été démontrées (voir aussi Serman, LoPresti et Fairchild, 1969, 2011).

Cette étude a initié le début des applications cliniques du conditionnement opérant de l'EEG.

Compte tenu de certains résultats contradictoires dans les premières années sur le conditionnement opérant de l'activité alpha, Hardt et Kamiya (1976) ont suggéré qu'il y avait des différences méthodologiques entre les résultats positifs et négatifs. En particulier, ils ont rapporté que ceux qui utilisaient l'amplitude intégrée pour quantifier la réponse alpha affirmaient le processus de conditionnement, alors que ceux qui utilisaient le temps en pourcentage ne supportaient pas la réponse de conditionnement. Hardt et Kamiya ont souligné la classification binaire utilisée dans le système en pourcentage, au-dessus ou en dessous du seuil, qui ignore clairement des informations considérables sur la force réelle du signal alpha. L'écrasement d'une variable continue, comme la vaste gamme de valeurs d'amplitude du signal alpha, en une variable binaire ou dichotomique entraîne toujours la perte d'informations sur la variable " brute " ou " vraie " (Tabachnick & Fidell, 2007). Cela signifie que si l'amplitude de alpha devait augmenter à la présentation du stimulus conditionné mais que cette augmentation tombe juste en dessous du seuil arbitraire utilisé pour la catégorisation en pourcentage de temps, alors cette réponse ne peut pas être observée et il semblera que le conditionnement n'a pas eu lieu. De plus, Hardt et Kamiya (1976) ont fait remarquer que si le renforcement est refusé aux individus qui se situent juste en deçà du seuil, ils abandonneront plus que probablement les «stratégies réussies» qui entraînent une augmentation de l'alpha. D'autre part, la méthode d'intégration de l'amplitude affiche l'information continue et est plus sensible aux petits changements de l'amplitude alpha, un élément important pour déterminer si le conditionnement des réponses EEG peut se produire. Deux aspects des résultats incitent Hardt et Kamiya (1976) à dire que «ensemble [ces résultats] suggèrent que la mesure en pourcentage peut être comparée non seulement à une règle avec des graduations inégalement espacées, mais pire, à une règle en caoutchouc avec des graduations inégales qui requièrent des degrés d'étirement différents pour tenir compte des différents réglages de seuil.

Lansky, Bohdaneck, Indra et Raddi-Weiss (1979) ont tenté de contrer Hardt et Kamiya (1976) en ce qui concerne la rétroaction alpha en pourcentage par rapport à l'intégration en amplitude. Ils ont commencé en soulignant que le pourcentage de temps est une variable continue car il varie de 0 à 100% (mais ne comprend pas l'importance pour l'individu de voir de petits changements pendant l'entraînement).

Lansky et al. On a ensuite noté que dans les périodes d'entraînement plus longues, disons en quelques minutes, la méthode de l'amplitude intégrale ne permet pas l'affichage rapide des broches alpha, contrairement au ratio pourcentage-temps. Ils défient aussi les idées que (a) une méthode intégrale pourrait entrer dans une distribution de Poisson (La distribution de Poisson est comme la distribution binomiale, mais traite d'une situation continue plutôt que discrète) qu'elle est discrète ainsi que (b) la distribution de probabilité de distribution uniforme de la méthode de pourcentage-temps qui a été rapportée par Hardt et Kamiya. La distribution de probabilité de distribution uniforme n'a été confirmée par aucun test statistique et est supposée être discordante avec les résultats empiriques rapportés par Lansky et al. Enfin, il est souligné que la longueur de la broche et la puissance (ou amplitude) de la fréquence alpha sont des aspects importants de la recherche future, car ils ont probablement une certaine relation les uns aux autres et offrent des informations uniques sur la réponse EEG. En outre, pour l'instant, aucune des deux méthodes ne s'est révélée meilleure que l'autre.



Les différentes ondes cérébrales

En 1964, Clemente, Serman et Wyrwicka ont rapporté une synchronisation EEG alphalike dans le cortex pariéto-occipital, visible juste après le renforcement de l'animal, qu'ils ont appelé **la synchronisation post-renforcement (PRS)**. Poschel et Ho (1972) ont démontré que cette activité dépend de façon critique de la réponse opérante, car fournir le renforcement seul sans exiger une réponse opérante (c'est-à-dire une pression sur le levier) affaiblit progressivement ou habitue le PRS bien développé.

Ce phénomène a également été observé chez les singes (Saito, Yamamoto, Iwai et Nakahama, 1973) et chez les humains (Hallschmid, Moëlle, Fischer et Born, 2002). Dans une tentative de comprendre les implications du conditionnement opérant du comportement et de l'activité cérébrale sur l'apprentissage, Marczyński, Harris et Livezey (1981) ont émis l'hypothèse que la PRS de l'EEG qui survient chez les animaux après la consommation d'une récompense alimentaire attendue serait corrélée à plus grande capacité à apprendre.

Cette hypothèse a été dérivée de la connaissance que le PRS se produit non seulement dans le cortex visuel primaire et secondaire mais aussi sur le cortex d'association (gyrus suprasylvien) des deux hémisphères »(Marczyński et al., 1981, p 214). Après avoir formé avec succès 25 des 27 chats à appuyer sur un levier pour recevoir 1 ml de lait, les auteurs ont pu démontrer une corrélation positive significative entre des indices PRS plus élevés et un apprentissage plus rapide.

Les drogues altérant la cognition comme la scopolamine et l'atropine bloquent le PRS (Marczyński, 1971), soutenant davantage le rôle du PRS dans la consolidation du traitement de l'information. Hallschmid et al. (2002) ont étudié la PRS plus avant chez l'homme et ont trouvé qu'une synchronisation alpha inférieure chez l'homme indique «des similarités distinctes avec les phénomènes PRS observés chez les animaux dans des conditions comparables» (p.214). Il est suggéré qu'il existe une corrélation entre l'ampleur de la SRP et les capacités d'apprentissage chez les chats (Marczyński et al., 1981). De même, chez les humains, des relations fonctionnelles entre l'activité alpha et thêta inférieure au cours des processus d'apprentissage ont été suggérées (Doppelmayr, Klimesch, Pachinger et Ripper, 1998, Klimesch, 1999), confirmant ainsi le rôle du PRS dans l'apprentissage.



IMPLICATIONS POUR LA PRATIQUE

la base des principes théoriques d'apprentissage établis, il existe des techniques qui sont des éléments cruciaux dans la conception d'une étude de neurofeedback et qui sont des aspects importants à mettre en pratique. Nous discutons ensuite des concepts de la théorie de l'apprentissage mentionnés précédemment et de l'implication spécifique pour la recherche et la pratique.

La vitesse de renforcement

Il est bien connu que différents filtres EEG possèdent des propriétés différentes. L'aspect le plus important est que plus un filtre est spécifique (souvent appelé filtre d'ordre supérieur), plus il faut de points de données pour effectuer un tel calcul. Ceci entraîne un retard plus long du signal de retour. Comme l'a souligné Skinner (1958), **le moment du renforcement ou de la punition d'un comportement est essentiel à l'apprentissage, car un retard aussi petit qu'une fraction de seconde peut diminuer la force du conditionnement.** Par conséquent, il est important de comprendre les paramètres de filtre spécifiques utilisés et de les régler de manière appropriée. En général, plus le temps de réponse du filtre est rapide, mieux c'est. Il n'y a pas de règle fixe sur le délai minimal ou maximal acceptable d'un filtre, et cela dépend aussi de la «spéci fi cité requise», mais d'après Felsing et Gladstone (1947) et Grice (1948), la latence ne devrait pas dépasser 250 à 350 ms (voir Figure 1, de Grice, 1948). En pratique, cela équivaut à un filtre FIR avec un filtre Butterworth de cinquième ordre. Cela nécessite une configuration de retour discrète ressemblant le plus étroitement à l'équipement de neurofeedback précoce des années 1970 qui avait des filtres à 4 pôles Butterworth discrets pour des bandes de fréquences spécifiques décrites par Serman, Macdonald et Stone (1974). Lorsque tous les critères ont été atteints pour 0,5 s, il y a eu un feu vert et un son «ding», ce qui a donné lieu à une récompense discrète permettant la mise en place d'une SRP.

Le type de renforcement

Comme on l'a vu plus haut, le concept de SRP est une réflexion du renforcement et la quantité de SRP est clairement associée à la vitesse d'apprentissage (Hallschmid et al., 2002, Marczyński et al., 1981). Par conséquent, pour que l'apprentissage optimal ait lieu, il est important que le «feedback» soit conçu de telle sorte qu'un PRS puisse se produire.

Cela nécessite une configuration de retour discrète ressemblant le plus étroitement à l'équipement de neurofeedback précoce des années 1970 qui avait des filtres à 4 pôles Butterworth discrets pour des bandes de fréquences spécifiques décrites par Serman,

Macdonald et Stone (1974). Lorsque tous les critères ont été atteints pour 0,5 s, il y a eu un feu vert et un son «ding», ce qui a donné lieu à une récompense discrète permettant la mise en place d'une SRP

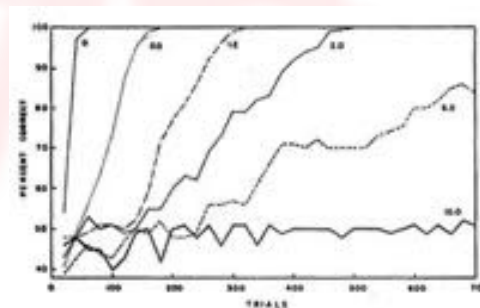


FIGURE 1. Nombre d'essais requis pour l'acquisition de la réponse en fonction du retard du renforcement. Remarque. Cette figure montre clairement que plus le renforcement est rapide, plus l'apprentissage est rapide. De " La relation entre le renforcement secondaire et la récompense différée dans l'apprentissage de la discrimination visuelle " par G. R. Grice, 1948, *Journal of Experimental Psychology*, 38, pp. 1-16. Copyright 1948 par l'American Psychological Association. Reproduit avec permission.

Par conséquent, **les jeux complexes offerts dans certains produits sont contre-indiqués**, étant donné que le niveau de rétroaction continue ne permet pas l'apparition d'un complexe PRS parce qu'il est trop difficile pour l'apprenant d'extraire des informations significatives. L'apprentissage opérant implique la formation d'une association réponse-renforcement.

Les jeux complexes sont beaucoup plus susceptibles d'«éclipser» l'association réponse-renforcement par la formation d'une association plus stimulante de stimulus contre les forcer (Pearce & Hall, 1978). Cela signifie pratiquement qu'ils vont associer le renforcement au stimulus plutôt qu'à la réponse au comportement cérébral spécifique désirée. De plus, la présentation d'un signal pendant l'intervalle entre la réponse et le renforcement peut bloquer l'apprentissage (Williams, 1999). Par conséquent, dans l'application du neurofeedback, **on devrait «forcer l'exercice plutôt que le divertissement» (Egner et Serman, 2006).**



jeu vidéo

Le renforcement devrait conduire à la «connaissance des résultats». Par conséquent, il devrait spécifiquement informer l'apprenant que la réponse était bonne ou mauvaise et dans quelle mesure le signal cérébral a changé. A ce jour, aucune étude n'a pu être trouvée empiriquement testant l'efficacité d'une rétroaction continue, telle qu'un jeu ou une présentation vidéo, à des applications avec une rétroaction discrète de présentations de jeux ou de vidéos. Cependant, la théorie et l'évidence précédemment décrites fournissent une indication suffisante pour montrer que la rétroaction discrète obtiendrait des résultats supérieurs.

Le façonnage

Un autre aspect de la théorie de l'apprentissage implique la «procédure de mise en forme» du conditionnement opérant. Lors du conditionnement opérant d'un comportement, ou dans ce cas, de l'activité cérébrale, la mise en forme se fait en ajustant les seuils dans une direction a priori pour favoriser l'apprentissage. Sur la base des travaux antérieurs de Hardt et Kamiya (1976), **les paramètres de rétroaction et la récompense ne devraient pas utiliser le calcul automatique des seuils.** La mise à jour continue d'un seuil est une " cible mouvante " et le retour de récompense peut être fourni à l'apprenant pour un pourcentage donné même lorsque l'activité souhaitée change dans la direction opposée. En auto-seuillage, le retour de récompense sera donné pour se déplacer dans la direction souhaitée dans une réponse momentanée. Cela ne peut en fait augmenter ou diminuer l'amplitude dans la direction d'entraînement souhaitée en tenant compte du niveau de base. Par conséquent, les techniques de seuillage automatique provoquent des effets différentiels, qui peuvent également être compris à partir de la théorie de l'apprentissage.

Ceci peut être illustré par un exemple pratique d'un enfant qui hurle. Le but est d'apprendre à l'enfant à ne plus crier, et nous "punissons" l'enfant chaque fois qu'il crie. Dans un modèle de seuillage automatique, l'enfant sera éventuellement puni pour avoir «élevé sa voix», c'est-à-dire que le seuillage automatique est aveugle à la qualité du comportement en cours de formation. En plus de ce point, si l'apprenant commence à se fatiguer, à perdre tout intérêt ou même à cesser de participer activement à la formation, les signaux de récompense continuent d'être fournis, qu'il produise ou non le comportement souhaité. En fait, ils sont récompensés pour avoir seulement changé le comportement en fonction de la période moyenne précédente, qui peut ne pas être un changement réel par rapport au point de départ. Pire encore, il se peut que ce soit dans la direction opposée au paramètre d'entraînement souhaité. Si l'on demande à l'apprenant de réduire l'amplitude d'une bande de fréquences donnée et que le seuil est calculé automatiquement, il obtiendra toujours un pourcentage de rétroaction même si les amplitudes augmentent dans le temps. Si cela se produit, au mieux, l'apprenant peut montrer des améliorations seulement s'il démontre continuellement le changement dans la direction désirée. Il est possible qu'ils ne montrent aucun apprentissage et aucun effet. Enfin, au pire, ils pourraient s'entraîner efficacement dans la direction opposée et entraîner une augmentation des comportements aberrants et négatifs. Encore une fois, bien qu'aucune étude n'ait comparé directement une procédure de seuillage automatique à une procédure de seuillage non automatique dans le neurofeedback, il existe un ensemble considérable de preuves théoriques et empiriques soutenant la procédure de seuillage non automatisée pour le conditionnement opérant.

Si le façonnage est nécessaire, tout dépend si le comportement désiré ultime peut être opérationnalisé. Par exemple, dans les paradigmes tels que la rétroaction des potentiels corticaux lents (SCP), il n'y a pas un tel objectif connu. Peu importe que le décalage du SCP dévie d'environ 2 ou 7 mV par rapport à la ligne de base. Il n'y a pas de «norme» à atteindre par un apprenant. Seul l'écart positif ou négatif par rapport à la ligne de base est important. Si c'est le cas, les procédures de mise en forme sont utilisées ici pour les comportements «comorbides» comme étant incapables de rester assis, de ne pas produire d'artefacts, et ainsi de suite.

Par conséquent, la connaissance de l'activité cérébrale à entraîner est également cruciale dans l'application des principes théoriques d'apprentissage appropriés, comme cela est décrit plus en détail dans la prochaine section sur la spécificité.

Enfin, comme décrit précédemment, **la procédure d'auto-seuillage exclut la possibilité d'appliquer le neurofeedback de manière «aveugle»**. Lorsque l'on étudie en double aveugle, il faut recourir à des techniques comme le «seuillage automatique» pour forcer la méthodologie en aveugle sur l'intervention de neurofeedback. Cela contribuera à des conclusions nulles, car l'un des principaux composants de l'entraînement de neurofeedback est basé sur le principe d'apprentissage de la mise en forme qui sera complètement enfreint dans la procédure de seuillage automatique.

La Spécificité

Philippens et Vanwersch (2010) voulaient aborder ce qu'ils percevaient comme un manque d'études scientifiques bien contrôlées sur l'efficacité du neurofeedback. En conséquence, ils ont conçu une étude en laboratoire utilisant le neurofeedback télémétrique avec des singes Marmoset (N = 4) pour déterminer si, par le conditionnement opérant, ces singes pourraient augmenter le SMR. Ils ont récompensé la présence d'un «alpha élevé», et ils ont clarifié cela comme une fréquence de crête entre 11 et 14 Hz. Les quatre singes ont été capables d'augmenter significativement la présence de cette fréquence, bien que chaque singe ait eu une courbe d'apprentissage unique. Un singe a appris à augmenter si bien cette fréquence qu'à la troisième session, les 35 récompenses possibles ont été obtenues dans les deux dernières des six périodes de 5 minutes. En raison de cet apprentissage rapide, ce singe a été exposé à une formation d'extinction, où l'enregistrement a été fait sans possibilité de récompenses. Dans cet essai d'extinction, Philippens et Vanwersch ont rapporté que ce singe exprimait clairement le comportement attendu après des changements EEG réussis, qu'ils citent **comme preuve que le singe a appris à augmenter l'alpha pour obtenir la récompense**. Ils ont signalé que le court temps d'entraînement nécessaire à ce niveau de succès était possible en ce qui concerne les électrodes intracorticales, car cela diminue de manière significative le bruit mesuré par les électrodes du cuir chevelu. Ceci a démontré que plus la spécificité du signal ou du comportement est élevée, plus l'apprentissage a lieu rapidement, en accord avec ce que l'on attendrait de la théorie de l'apprentissage.

Pour le conditionnement opérant, il est très important d'être conscient de la spécificité du comportement à adopter pour apprendre et améliorer la spécificité. Dans le cas du neurofeedback, la connaissance des rythmes cérébraux formés et la connaissance de la neurophysiologie de l'EEG sont cruciales. Par exemple, lors de l'exécution du neurofeedback SMR, il est important d'être conscient de la façon dont SMR se produit, à savoir, dans les fuseaux avec une durée spécifique. Par conséquent, de meilleurs résultats sont obtenus quand un fuseau SMR spécifique d'une durée de 0,25s est renforcée, plutôt que de renforcer toute excursion au-dessus du seuil d'amplitude SMR. En incluant des mesures telles que «temps au-dessus du seuil» ou «période de récompense soutenue», le retour d'information deviendra plus spécifique au vrai rythme SMR. Le même concept a été illustré dans l'exemple de Hardt et Kamiya (1976) concernant le neurofeedback alpha. Comme cela a été décrit précédemment, la même chose s'applique au neurofeedback SCP, où spécifiquement la polarité de l'EEG est renforcée (c'est-à-dire négativité vs. positivité), ne nécessitant pas de mise en forme mais simplement une réponse dans la bonne direction.

Les artefacts

L'activité musculaire, les mouvements oculaires, l'électrocardiogramme, la respiration et d'autres facteurs environnementaux peuvent produire des artefacts. Que ce soit intentionnel ou non, dès qu'une telle activité n'est pas détectée comme un artefact et est récompensée, un processus d'apprentissage incorrect aura lieu, comme récompenser les clignements des yeux. Inversement, il est facile pour l'apprenant de réduire le delta frontal dans le temps simplement en apprenant à produire moins de clignements d'yeux. Par conséquent, l'équipement devrait être capable de détecter les artefacts en ligne, ou mieux en temps réel. De plus, le thérapeute ou l'investigateur doit observer de près l'apprenant pour éviter ce retour d'information, ce qui améliore également la spécificité de ce qui est entraîné.

Le renforcement secondaire

Comme nous l'avons vu dans l'étude de Clemente et al. (1964), une récompense doit être non seulement discrète mais aussi gratifiante étant donné que la SRP était plus clairement présente lorsque la récompense était le lait par opposition à l'eau. Alors, comment pouvons-nous rendre le feedback employé plus intéressant pour l'apprenant? Pour certaines cliniques, les récompenses monétaires ou les prix sont utilisés comme un renforcement secondaire. Par exemple, **si un enfant obtient un nombre spécifique de points, il obtient un prix.** Il est très important que toute forme de renforcement secondaire, monétaire ou autre, soit liée au processus d'apprentissage et non à la simple participation (par exemple, se présenter à des rendez-vous sans produire de modification de l'EEG). Plusieurs études animales ont démontré une facilitation de l'apprentissage en utilisant un renforçateur secondaire (par exemple, Grice, 1948). Cependant, cela n'a pas été étudié pour les périodes d'entraînement plus longues utilisées en pratique clinique (après une séance de 20 minutes), donc pour le moment il ne s'agit que d'une observation clinique.



La généralisation

Lorsqu'un participant effectue un entraînement de neurofeedback à la clinique, il finira par apprendre à exercer un contrôle sur le paramètre appris. Cette compétence est - dans une certaine mesure - associée à l'environnement de la clinique et à la relation avec le praticien et ne peut être utilisée en dehors de ce contexte. Pour avoir aussi les avantages de cette habileté d'autorégulation dans la vie quotidienne, un processus appelé généralisation devrait avoir lieu, de sorte que le contrôle appris est également exercé en dehors de la clinique et sans la rétroaction. Dans la plupart des études SCP et dans de nombreux contextes cliniques, cela a été facilité en incluant également des essais de transfert, qui sont des essais de neurofeedback sans retour en temps réel. Au lieu de cela, l'essai de transfert ne fournit des informations qu'à la fin de l'essai, qu'il ait réussi ou non (par exemple, Drechsler et al., 2007). Dans le cadre clinique, le client peut être invité à évaluer l'essai avant de connaître le score. Cette approche est étayée par des études sur l'apprentissage moteur où une meilleure performance a été observée par rapport à une condition où le feedback était fourni à 100% du temps (Winstein et Schmidt, 1990). De plus, dans les études SCP, les patients reçoivent une carte imprimée de l'écran «succès». Il sert de repère (stimulus discriminatif) pour obtenir l'état cérébral adéquat. Les situations critiques où et quand l'autorégulation est la plus importante (TDAH: tests avant l'école = épilepsie: dans les situations de crise) sont évaluées pendant le traitement et pratiquées soit dans des situations réelles, soit dans des jeux de rôles.

Il est intéressant de noter que plusieurs études ont démontré que la généralisation, à la fois dans le temps et entre les états, a lieu. Par exemple, Gani, Birbaumer et Strehl (2008) ont démontré que la compétence pour réguler le SCP était encore préservée dans un suivi de 2 ans.

Récemment, il a également été démontré chez un singe que l'activité neuronale volontairement modulée pouvait en effet produire des changements spécifiques de la fonction cognitive (Schafer & Moore, 2011) suggérant une généralisation des paramètres EEG formés au comportement. Enfin, Sterman, Howe et Macdonald (1970) ont démontré que l'entraînement SMR (12-15 Hz) pendant l'éveil entraînait aussi la facilitation des fuseaux du sommeil (12-15 Hz) pendant le sommeil et une réduction des brèves perturbations du sommeil pendant le sommeil. a également été récemment démontré chez l'homme (Hoedlmoser et al., 2008). Ces deux dernières études démontrent également spécifiquement qu'un conditionnement opérant réussi a eu lieu.

CONCLUSION

Les auteurs s'inquiètent de la plupart des études récentes qui prétendent avoir étudié le neurofeedback, dont beaucoup montrent des résultats médiocres, **mais ne présentent pas non plus d'indication d'un processus d'apprentissage administré et / ou ayant lieu.**

Ces résultats sont rapportés en tant qu'études de neurofeedback. Cependant, il se peut que des études aient utilisé des conditions de contrôle mal conçues, des protocoles inappropriés, des conceptions inappropriées ou des équipements inappropriés. En fait, ces études n'ont pas étudié le neurofeedback, un processus d'apprentissage utilisant des mécanismes d'apprentissage actifs.

Cette préoccupation est basée sur la compréhension des presque quatre-vingt-dix années de recherche sur le conditionnement, des humains et des animaux, résumées dans cet article. Ainsi, nous espérons que les futures études de neurofeedback et les applications cliniques seront conçues en utilisant ces principes de base de la théorie de l'apprentissage. Si des déviations par rapport aux techniques établies sont souhaitables pour une raison quelconque, elles devraient être évaluées empiriquement par rapport à celles qui démontrent déjà l'efficacité avant la mise en œuvre dans des contextes privés. Nous encourageons fortement le praticien à appliquer ces mêmes concepts et connaissances de base tout en comprenant parfaitement les exigences d'une configuration adéquate de l'équipement ainsi que les paramètres de formation et la mise en œuvre.

Nous espérons également que ces concepts de théorie de l'apprentissage bien établis et testés empiriquement seront pris en compte lors de l'évaluation des études de résultats, en veillant à ne pas rejeter les interventions efficaces basées sur des études qui ne respectent pas ces concepts. Bagchi, B. K. (1937). L'adaptation et la variabilité de la réponse du rythme cérébral humain. *Journal of Psychology*, 3, 355 à 384.

RÉFÉRENCES

Clemente, C.D., Sterman, M.B., & Wyrwicka, W. (1963). Mécanismes inhibiteurs du cerveau antérieur: Conditionnement de la synchronisation EEG basale induite par le cerveau antérieur et sommeil. *Experimental Neurology*, 7, 404-417.

Cortoos, A., De Valck, E., Arns, M., Breteler, M.H., et Cluydts, R. (2010). Une étude exploratoire sur les effets du télé-neurofeedback et du télébiofeedback sur le sommeil objectif et subjectif chez les patients souffrant d'insomnie primaire. *Psychophysiology appliquée et biofeedback*, 35, 125134. doi: 10.1007 = s10484-009-9116-z

Doppelmayr, M. M., Klimesch, W., Pachinger, T., et Ripper, B. (1998). La signification fonctionnelle du pouvoir absolu par rapport à la désynchronisation liée à l'événement. *Brain Topography*, 11, 133-140.

Drechsler, R., Straub, M., Doehnert, M., Heinrich, H., Steinhausen, H. C., & Brandeis, D. (2007). Évaluation contrôlée d'un entraînement neurofeedback des potentiels corticaux lents chez les enfants avec un trouble de l'attention = hyperactivité (TDAH). *Comportement et fonction cérébrale*, 3 (1), 35.

Durup, G., & Fessard, A. (1935). I. L'lectrence'phalogramme de l'homme. Observations psycho-physiologiques apparentées à l'action des stimuli visuels et auditifs [Electroencéphalographie humaine. Observations psychophysiques relatives à l'action des stimuli visuels et auditifs. *L'anne'e psychologique*, 36 (1), 1-32. doi: 10.3406 = psy. 1935.30643

Egner, T., et Serman, M. B. (2006). Neurofeedback traitement de l'épilepsie: De la justification de base à l'application pratique. *Revue d'experts de Neurotherapeutics*, 6, 247-257. doi: 10.1586 = 14737175.6.2.247

Felsing, J. M., et Gladstone, A. I. (1947). Latence de réaction (StR) en fonction du nombre de renforts (N). *Journal of Experimental Psychology*, 37, 214-228.

Gani, C., Birbaumer, N., et Strehl, U. (2008). Effets à long terme après retour des potentiels corticaux lents et des amplitudes thêta-bêta chez les enfants avec un trouble de l'attention = trouble d'hyperactivité (TDAH). *International Journal of Bioelectromagnetism*, 10, 209-232.

Gastaut, H., Jus, C., Morrell, F., tempête Van Leeuwen, W., Dongier, S., Naquet, R., . . . Étaiant, J. (1957). Etude topographique des réactions électroencéphalographiques conditionnées chez l'homme. *EEG et neurophysiologie clinique*, 9, 1-34.

Grice, G. R. (1948). La relation du renforcement secondaire à la récompense différée dans l'apprentissage de la discrimination visuelle. *Journal of Experimental Psychology*, 38 (1), 1-16.

Groves, P. M., et Thompson, R. F. (1970). Habituation: Une théorie duale. *Psychological Review*, 77, 419. Hallschmid, M., Moëlle, M., Fischer, S., et Born, J. (2002). Synchronisation EEG sur récompense chez l'homme. *Neurophysiologie clinique*, 113, 1059-1065.

Hardt, J.V., & Kamiya, J. (1976). Les résultats contradictoires dans les études de rétroaction alpha EEG: Pourquoi l'intégration de l'amplitude devrait remplacer le pourcentage de temps. *Biofeedback et autorégulation*, 1 (1), 63-75.

Hawkins, R.D., Kandel, E.R., et Bailey, C.H. (2006). Les mécanismes moléculaires du stockage de la mémoire dans l'aplysie. *Bulletin de biologie Symposium virtuel sur les modèles d'apprentissage et de mémoire des invertébrés marins*, 210, 174-191.

Hoedlmoser, K., Pecherstorfer, T., Gruber, G., Anderer, P., Doppelmayr, M., Klimesch, W., & Schabus, M. (2008). Le conditionnement instrumental du rythme sensorimoteur humain (12-15 Hz) et son impact sur le sommeil ainsi que l'apprentissage déclaratif. *Sommeil*, 31, 1401-1408.

Jasper, H., et Shagass, C. (1941a). Conditionner le rythme alpha occipital chez l'homme. *Journal of Experimental Psychology*, 28, 373-387.

Jasper, H., et Shagass, C. (1941b). Les jugements temporels conscients liés aux intervalles de temps conditionnés et au contrôle volontaire du rythme alpha. *Journal of Experimental Psychology*, 28, 503-508. Jus, A., & Jus, C. (1957). L'application des réactions EEG conditionnées en neuropsychiatrie [L'application des réactions sont conditionnées EEG en neuropsychiatrie]. *Electroenceph. Clin. Neurophysiol.* (Supplément 7), 344-370.

Jus, A., & Jus, C. (1960). Etude électro-clinique des altérations de la conscience dans le petit mal [Étude des altérations électro-cliniques de la conscience dans le petit mal]. *Studii si cercetari de Neurol*, 5, 243-254. Kamiya, J. (2011). Les premières communications sur le conditionnement opérant de l'EEG. *Journal of Neurotherapy*, 15 (1), 65-73.

Kandel, E.R., & Taut, L. (1965a). Facilitation hétérosynaptique dans les neurones du ganglion abdominal de l'aplysie depilans. *Journal de physiologie*, 181

Kandel, E.R., & Taut, L. (1965a). Facilitation hétérosynaptique dans les neurones du ganglion abdominal de l'aplysie depilans. *Journal of Physiology*, 181, 1-27.

Kandel, E.R., & Taut, L. (1965b). Mécanisme de facilitation hétérosynaptique dans la cellule géante du ganglion abdominal de l'aplysie depilans. *Journal of Physiology*, 181, 28-47.

Klimesch, W. (1999). Les oscillations EEG alpha et thêta reflètent les performances cognitives et de la mémoire: une revue et une analyse. *Brain Research Brain Research Reviews*, 29 (2-3), 169-95.

Knott, J. R., et Henry, C. E. (1941). Le conditionnement du blocage du rythme alpha de l'électroencéphalogramme humain. *Psychologie expérimentale*, 28, 134-144.

Lansky, P., Bohdaneck, Z., Indra, M., et RadiiWeiss, T. (1979). Détection alpha: Quelques commentaires sur Hardt et Kamiya, " Résultats contradictoires dans les études de rétroaction alpha EEG. " *Biofeedback et autorégulation*, 4, 127-131.

Light, K.R., Grossman, H., Kolata, S., Wass, C., et Matzel, L.D. (2011). La capacité générale d'apprentissage régule l'exploration par son influence sur le taux d'accoutumance. *Behavioral Brain Research*, 223, 297-309.

Loomis, A.L., Harvey, E.N., et Hobart, G. (1936). Potentiels électriques du cerveau humain. *Journal of Experimental Psychology*, 19, 249.

Lubar, J. F. (2003). Neurofeedback pour la gestion des troubles de l'attention. *Biofeedback: Un guide du praticien*, pp. 409-437.

Marczynski, T. J. (1971). Le mécanisme cholinergique détermine l'occurrence de la variation positive contingente de récompense (RCPV) chez le chat. *Brain Research*, 28 (1), 71-83.

Marczynski, T.J., Harris, C.M., et Livezey, G.T. (1981). L'importance de la synchronisation EEG (PRS) post-renforcement chez les chats reflète la capacité d'apprentissage. *Brain Research*, 204, 214-219.

Milstein, V. (1965). Blocage alpha éventuel: conditionnement ou sensibilisation? *Electroencéphalographie et neurophysiologie clinique*, 18, 272-277.

Morrell, F., & Ross, M. (1953). Inhibition centrale dans les réflexes corticaux conditionnés. *A.M. A. Archives of Neurology Psychiatry*, 70, 611-616.

Morrell, L., et Morrell, F. (1962). Oscillation non-aléatoire dans la courbe de réponse-durée de l'activation électrographique. *Electroencéphalographie et Clinical Neurophysiology*, 14, 724-730. doi: 10.1016 = 0013-4694 (62) 90086-X

Pavlov, I. P. (1927). Réflexes conditionnés: Une étude de l'activité physiologique du cortex cérébral (G. V. Anrep, Trans. & Ed.). Londres, Royaume-Uni: Oxford University Press.

Pearce, J. M., et Hall, G. (1978). Surmonter le conditionnement instrumental d'une réponse de levier par un prédicteur plus valide du renforçateur. *Journal de la psychologie expérimentale: Processus de comportement animal*, 4, 356.

Philippens, I.H. H. M., et Vanwersch, R.A.P. (2010). Entraînement au neurofeedback sur le rythme sensorimoteur chez le singe marmot. *NeuroReport*, 21, 328-332.

Poschel, B.P., & Ho, P. M. (1972). La synchronisation EEG de post-réarmement dépend de la réponse de l'opérateur. *Electroencéphalographie et neurophysiologie clinique*, 32, 563-567.

Redlich, F.C., Callahan, A., et Mendelson, R.H. (1946). Changements électroencéphalographiques après ouverture des yeux et stimulation visuelle. *Yale Journal of Biology and Medicine*, 18, 367-376.

Rockstroh, B., Elbert, T., Birbaumer, N., et Lutzenberger, W. (1982). *Ralentir les potentiels et le comportement du cerveau*. Baltimore, MD: Urban et Schwarzenberg.

Saito, H., Yamamoto, M., Iwai, E., & Nakahama, H. (1973). Corrélation comportementales et électrophysiologiques au cours de l'apprentissage de la discrimination par fluorescence chez les singes. *Electroencéphalographie et neurophysiologie clinique*, 34, 449-460.

Schafer, R.J., et Moore, T. (2011). L'attention sélective du contrôle volontaire des neurones dans le cortex préfrontal. *Science (New York, N.Y.)*, 332, 1568-1571. doi: 10.1126 = science.1199892

Skinner, B. F. (1948). " Superstition " chez les pigeons. *Journal of Experimental Psychology*, 38, 168-

- Skinner, B. F. (1958). Renfort aujourd'hui. *Psychologue américain*, 13, 94-99.
- Skinner, B. F. (1962). Deux «relations sociales de synthèse». *Journal of Experimental Analysis of Behaviour*, 5, 531-533.
- Sterman, M. B. (1963). Les mécanismes du cerveau dans le sommeil, chapitre 4, le conditionnement de l'EEG induit et les modèles de sommeil comportementaux: Doctoral Dissertation, Université de Californie à Los Angeles, 80-99.
- Sterman, M.B., Howe, R.C., et Macdonald, L.R. (1970). Facilitation du sommeil en rafale par conditionnement de l'activité électroencéphalographique en état d'éveil. *Science*, 167, 1146-1148.
- Sterman, M.B., LoPresti, R.W., & Fairchild, M.D. (1969). Etudes électroencéphalographiques et comportementales de la toxicité de la monométhyldiazine chez le chat. Alexandria, VA: l'assaut des médias.
- Sterman, M.B., LoPresti, R.W., et Fairchild, M.D. (2010). Etudes électroencéphalographiques et comportementales de la toxicité de la monométhyldiazine chez le chat. *Journal of Neurotherapy*, 14, 293-300.
- Sterman, M.B., Macdonald, L.R., & Stone, R.K. (1974). Entraînement par biofeedback du rythme EEG sensorimoteur chez l'homme: effets sur l'épilepsie. *Epilepsie*, 15, 395-417.
- Tabachnick, B. G., et Fidell, L. S. (2007). Utilisation de statistiques multivariées (5 e éd.). Boston, MA: Allyn et Bacon.
- Thorndike, E. L. (1999). L'intelligence animale (p v). Bristol, Royaume-Uni: Thoemmes. (Ouvrage original publié en 1911)
- Travis, L.E., & Egan, J.P. (1938). Conditionnement de la réponse électrique du cortex. *Journal of Experimental Psychology*, 22, 524-531. doi: 10.1037 = h0056243

Treisman, G. J. et Clark, M. R. (2011). Une perspective behavioriste. *Advances in Psychosomatic Medicine*, 30, 8-21.

Wells, C. (1963). Corrélats électroencéphalographiques de réponses conditionnées. Dans G. H. Glaser (Ed.), *EEG et comportement* (pp. 60-108). New York, NY: Livres de base.

Williams, B.A. (1999). Compétition associative en conditionnement opérant: blocage de l'association réponse-renforceur. *Psychonomic Bulletin & Review*, 6, 618-623.

Winstein, C.J., & Schmidt, R.A. (1990). La réduction de la fréquence de la connaissance des résultats améliore l'apprentissage de la motricité. *Journal of Experimental Psychology: Apprendre, Mémoire et Cognition*, 16, 677-691.

Wyrwicka, W., & Serman, M.B. (1968). Conditionnement instrumental des broches EEG du cortex sensorimoteur chez le chat éveillé. *Physiology & Behaviour*, 3 (5), 703-707.