



ELSEVIER

Contents lists available at [SciVerse ScienceDirect](http://www.sciencedirect.com)

## Comptes Rendus Physique

[www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)

Champs électromagnétiques : de la dosimétrie à la santé humaine

## Effets des radiofréquences sur le système nerveux central chez l'homme : EEG, sommeil, cognition, vascularisation

*Effects of radiofrequencies on the central nervous system in human: EEG, sleep, cognition, vascularisation*Rania Ghosn<sup>a,b</sup>, Anne-Sophie Villégier<sup>a,b</sup>, Brahim Selmaoui<sup>a,b</sup>, Georges Thuróczy<sup>a,b</sup>, René de Sèze<sup>a,b,\*</sup><sup>a</sup> Unité mixte PériTox EA 4285 – UMI 01 Ineris, parc Alata, BP2, 60550 Verneuil-en-Halatte, France<sup>b</sup> Université de Picardie–Jules-Verne, UFR de médecine, 3, rue des Louvels, 80036 Amiens, France

## I N F O A R T I C L E

*Historique de l'article :*

Disponible sur Internet le 30 mars 2013

*Mots-clés :*RF  
Système nerveux central  
EEG  
Sommeil  
Cognition  
Vascularisation*Keywords:*RF  
Central nervous system  
EEG  
Sleep  
Cognition  
Vascularisation

## R É S U M É

La plupart des études cliniques avec des champs radiofréquences (RF) ont porté sur les effets d'expositions caractéristiques des téléphones portables, habituellement au niveau de la tête, sur un certain nombre de fonctions physiologiques comprenant le sommeil, l'activité électrique du cerveau (EEG), la cognition, la vascularisation cérébrale et, plus généralement, les systèmes cardiovasculaire et endocrinien. La majorité des études a été effectuée chez des adultes en bonne santé. L'effet décrit sur l'amplitude des ondes alpha de l'EEG, notamment pendant le sommeil, semble reproductible. Il semble cependant important de préciser si et comment l'absence d'interférence entre l'exposition RF et l'enregistrement est vérifiée. Il ne se dégage pas de consensus sur des effets cognitifs. Quelques effets décrits sur la vascularisation cérébrale nécessitent des études complémentaires.

© 2013 Académie des sciences. Publié par Elsevier Masson SAS. Tous droits réservés.

## A B S T R A C T

Most of clinical studies on radiofrequency electromagnetic fields (RF) were directed at mobile phone-related exposures, usually at the level of the head, at their effect on some physiological functions including sleep, brain electrical activity (EEG), cognitive processes, brain vascularisation, and more generally on the cardiovascular and endocrine systems. They were frequently carried out on healthy adults. Effects on the amplitude of EEG alpha waves, mainly during sleep, look reproducible. It would however be important to define more precisely whether and how the absence of electromagnetic disturbance between RF exposure and the recording systems is checked. No consensus arises about cognitive effects. Some effects on cerebral vascularisation need complementary work.

© 2013 Académie des sciences. Publié par Elsevier Masson SAS. Tous droits réservés.

\* Auteur correspondant à : Unité mixte PériTox EA 4285 – UMI 01 Ineris, parc Alata, BP2, 60550 Verneuil-en-Halatte, France. Tel. : +33 3 44 55 65 94 ; fax : +33 3 44 55 67 67.

Adresse e-mail : [rene.de-seze@ineris.fr](mailto:rene.de-seze@ineris.fr) (R. de Sèze).

## 1. Introduction

De nombreuses études cliniques avec des champs radiofréquences ont étudié les effets d'expositions caractéristiques des téléphones portables, habituellement au niveau de la tête, sur un certain nombre de paramètres physiologiques comprenant le sommeil, l'activité électrique du cerveau, la cognition et la vascularisation cérébrale. Cet article propose une synthèse des études effectuées et essaie d'en dégager les principaux résultats.

## 2. Études sur l'EEG et le sommeil

L'électroencéphalogramme (EEG) trace l'activité électrique des cellules nerveuses du cortex au niveau du cuir chevelu. L'EEG se compose de « bandes » distinctes définies par la fréquence des ondes. Les bandes à basse fréquence (8 à 12 Hz), appelées bandes alpha, s'observent mieux dans la zone pariéto-occipitale. Celles à plus haute fréquence, appelées bandes bêta (12 à 30 Hz), sont habituellement proéminentes dans les zones frontale et centrale. Le rythme alpha s'observe mieux lorsque le sujet est éveillé mais calme, et qu'il a les yeux fermés.

Dans une revue, Cook et al. [1] notent que l'EEG et d'autres techniques similaires peuvent s'utiliser plus facilement sur des sujets volontaires que les méthodes d'imagerie cérébrale, car elles ne produisent aucun rayonnement ionisant ni aucun champ magnétique élevé. Il peut toutefois exister des interférences provenant des champs d'extrêmement basses fréquences – ou *extremely low frequencies* (ELF) en anglais – et de radiofréquences.

### 2.1. EEG d'éveil

Röschke et Mann [2] n'ont révélé aucun changement chez des volontaires de sexe masculin exposés à des fréquences de 900 MHz, et Hietanen et al. [3] n'ont observé aucun effet sur les EEG à la suite d'une exposition à des téléphones mobiles utilisant des fréquences de 900 et de 1800 MHz. Utilisant un EEG téléométrique, Kramarenko et Tan [4] ont constaté qu'après une exposition de 20 à 40 s à un signal téléphonique de 900 MHz, les sujets présentaient une activité à ondes lentes dans les zones frontales et temporales contralatérales, qui durait une seconde et se répétait toutes les 15 à 20 s. Les ondes lentes ont progressivement disparu dans les dix minutes qui ont suivi la fin de l'exposition. Hinrikus et al. [5] ont observé des changements dans le rythme alpha de certains sujets, sans pour autant noter de changement statistiquement significatif entre l'exposition réelle et l'exposition factice (appelée Sham). Vecchio et al. [6] ont mesuré la puissance spectrale de l'EEG chez des volontaires masculins sains, qui ont été exposés au signal d'un téléphone GSM situé sur le côté gauche de la tête, contrebalancée par un téléphone non opérationnel sur le côté droit. L'exposition a modifié la connectivité<sup>1</sup> entre les deux hémisphères du cerveau dans certaines parties de la bande alpha (8–12 Hz). Dans les zones frontales du cerveau, la connectivité a diminué, tandis qu'elle a augmenté dans les régions temporales.

La plupart des études montrent une augmentation de la puissance des bandes alpha de l'EEG chez des sujets éveillés au repos. Reiser et al. [7] ont observé une augmentation de cette puissance dans les bandes de fréquences alpha 2, bêta 1 et bêta 2 dans la région occipitale, pendant et après l'exposition à des champs RF à 900 MHz, mais d'autres chercheurs ont fait valoir que de tels changements pouvaient être provoqués par une modification du niveau d'attention. Huber et al. [8] ont étudié l'effet du signal GSM 900 MHz modulé par impulsions et l'effet du signal 900 MHz continu sur l'EEG pendant l'éveil. Le côté gauche de la tête de chaque volontaire a été exposé à ces deux types de signaux pendant 30 min avant l'endormissement, sur trois soirées distinctes, à des intervalles hebdomadaires. Ils ont observé une augmentation de puissance dans la gamme alpha pendant l'exposition à un signal modulé par impulsions, mais pas au signal d'onde continu. Regel et al. [9] ont obtenu des résultats similaires 30 min après une exposition à des ondes modulées par impulsion, mais n'ont également observé aucun changement durant une exposition à des ondes continues. Curcio et al. [10] ont enregistré l'EEG chez la moitié des sujets après la fin de l'exposition et durant les 7 dernières minutes d'exposition chez l'autre moitié. Une légère augmentation dans les fréquences 9 et 10 Hz de la bande alpha a été mentionnée. Cette augmentation était plus prononcée durant l'exposition qu'après la fin de l'exposition. Selon Cook et al. [11], l'activité des bandes alpha était significativement plus élevée dans la région occipitale après 15 min d'exposition au champ électromagnétique pulsé par rapport à l'exposition fictive. De même, Hinrikus et al. [12] ont trouvé une augmentation dans la puissance des bandes alpha (8–13 Hz) et bêta (15–20 et 22–38 Hz) pendant la moitié de la première minute de chaque exposition à un signal radiofréquence de 450 MHz, avec modulation d'impulsion à 14 et 21 Hz. La variabilité entre les sujets était élevée et les moyennes rapportées ont été fortement influencées par les valeurs de quelques sujets. Croft et al. [13] ont réalisé une étude avec un grand nombre de volontaires adultes ( $n = 120$ ) exposés à un téléphone GSM 875 MHz dans une étude en double aveugle et ils ont évalué l'EEG dans les premières et dernières dix minutes des 30 min d'exposition. Une augmentation globale de la puissance des bandes alpha lors de l'exposition a été confirmée (par rapport au contrôle Sham), avec effet supérieur du côté homolatéral par rapport au côté contralatéral au niveau des régions postérieures. Il n'a pas été observé de changement dans l'activité des bandes alpha après l'arrêt de l'exposition. Ces résultats confirment ceux des études précédentes, qui ont rapporté un effet de l'exposition RF sur la puissance de l'EEG dans la bande alpha. Comme dans les études antérieures, Croft et al. [14] ont trouvé une augmentation dans cette bande alpha chez les jeunes adultes à la suite

<sup>1</sup> Cohérence du spectre entre les paires d'électrodes droites et gauches (F3–F4, C3–C4, P3–P4).

d'une exposition 2G par rapport à l'exposition Sham ; cependant, aucun effet n'a été observé dans les groupes d'adolescents ou de personnes âgées. D'autre part, aucun effet de l'exposition 3G n'a été trouvé dans les trois groupes d'âges déjà cités.

Huber et al. [15] ont observé une diminution de la puissance de l'EEG de repos dans la gamme de fréquence comprise entre 10,5 et 11 Hz après l'exposition des volontaires sains pendant 30 min à un signal GSM 900 MHz, immédiatement avant l'endormissement. Quant à Croft et al. [16], ils ont constaté une diminution de l'activité dans l'hémisphère droit, dans la bande de fréquences de 1 à 4 Hz, et une augmentation tribulaire de la durée d'exposition dans la bande des fréquences 8–12 Hz, dans les zones postérieures à la ligne médiane. Dans cette étude, la durée d'exposition était de 20 min et le téléphone 900 MHz a été maintenu en position radiale à 5 cm du cuir chevelu, entre Oz et Pz, à l'aide d'un support métallique externe.

## 2.2. EEG de sommeil

Le tracé normal de l'EEG varie dans les deux stades principaux de sommeil. Ainsi, les ondes bêta sont plus fréquentes durant le sommeil paradoxal (mouvements oculaires rapides), que l'on associe au stade de traitement de l'information. Le stade de sommeil lent est, quant à lui, associé aux ondes delta et thêta. Les deux stades durent environ 90 min et se répètent environ cinq fois par nuit.

Quelques études ont examiné les effets du rayonnement RF sur des sujets endormis. Wagner et al. [17] n'ont pas réussi à reproduire les résultats antérieurs de son groupe [18] faisant état d'un effet de suppression des mouvements oculaires rapides (REM) avec réduction de la durée et du pourcentage de REM et d'une augmentation de la puissance spectrale de l'EEG durant le sommeil REM chez des hommes volontaires sains exposés à des champs électromagnétiques de 900 MHz. Borbély et al. [19] ont observé un nombre réduit d'épisodes d'éveil après l'endormissement et des changements dans les spectres de puissance EEG lors du premier épisode de sommeil lent de la nuit, qui se traduisent par une augmentation significative de la puissance de l'EEG pour des fréquences comprises entre 11 et 11,5 Hz. Aucun effet sur la latence et l'état de sommeil n'a été observé. Selon Huber et al. [15], une exposition de 30 min à un champ RF avant le sommeil modifiait l'EEG enregistré pendant la période de sommeil suivante, en augmentant la puissance spectrale dans les bandes alpha et bêta dans la première phase de sommeil. Toutefois, aucune différence n'a été relevée dans la latence du sommeil, dans les stades de sommeil, ni dans l'éveil des sujets endormis. Les mêmes auteurs (Huber et al. [8]) ont trouvé des résultats similaires dans une étude menée en 2002, bien que les changements n'aient alors été observés qu'avec un signal modulé par impulsions.

Lebedeva et al. [20] ont découvert une augmentation de la densité de puissance alpha et des modifications de la structure du sommeil, mais fournissent peu de détails sur l'exposition RF utilisée dans leur expérience. Loughran et al. [21] ont constaté une diminution de la latence du sommeil paradoxal. Ces auteurs notent également une augmentation de la densité spectrale de puissance dans la gamme alpha, durant la période initiale du sommeil suivant l'exposition. D'autres groupes ont aussi observé ce résultat (Borbély et al. [19] et Huber et al. [15]).

Hung et al. [22] ont étudié l'effet de signaux GSM 900 MHz avec différentes modulations d'impulsions ELF sur l'endormissement et l'architecture du sommeil. Ils ont exposé les sujets à un téléphone mobile en modes « conversation », « écoute », « veille » et « exposition sham ». Ils ont constaté qu'après l'exposition en mode « conversation », il y avait une augmentation dans la latence du sommeil par rapport au mode « écoute » et « exposition sham ». Le débit d'absorption spécifique (DAS) était le plus élevé en mode « conversation » et aux modulations d'impulsions 8 et 217 Hz.

Les études sur les effets des ondes RF de la téléphonie mobile sur l'EEG d'éveil paraissent trop fluctuantes et non concluantes. Cependant, plusieurs études montrent un effet de l'exposition principalement sur les bandes alpha du spectre EEG. Les études de l'EEG de sommeil paraissent avoir des résultats plus robustes que les études sur l'EEG d'éveil. Les deux observations majeures sont une augmentation dans la densité spectrale de puissance dans la gamme alpha durant la période initiale du sommeil suivant l'exposition, et aucun changement dans la latence du sommeil, ni dans les stades de sommeil, ni dans l'éveil après endormissement. Dans plusieurs études, les informations sur la maîtrise de l'interférence entre le champ électromagnétique et les électrodes d'EEG n'ont pas été fournies. Une telle interférence peut aboutir à des résultats erronés. D'où la nécessité, dans les nouvelles études, de préciser la méthodologie de contrôle d'éventuelles interférences qui pourraient aboutir à des résultats douteux.

## 3. Effets sur les fonctions cognitives

Une large gamme de tests comportementaux permet d'examiner les fonctions cognitives et d'attention chez l'Homme. Ces tests incluent des réponses à un stimulus simple (test du temps de réaction (TR) simple) et des tests plus complexes faisant intervenir un traitement plus élaboré de l'information et la présentation de plusieurs stimuli et des choix (tests d'attention, test « *n*-back », etc.). Un certain nombre d'études ont examiné les effets des expositions aux champs électromagnétiques du téléphone portable sur les fonctions cognitives par l'utilisation de ces tests (pour revue : Kwon et Hämmäläinen [23]).

Plusieurs arguments expérimentaux indiquent une tendance à un effet facilitateur sur la cognition, des expositions aux champs électromagnétiques des téléphones portables. En effet, les premières études rapportaient une amélioration des performances sous exposition dans des tâches d'attention et de mémoire de travail [24–27]. Preece et al. [24] ont rapporté une réduction dépendante de la puissance du TR dans une tâche de choix ( $1\text{ W} < 0,125\text{ W} < \text{sham } 0\text{ W}$ ).

Sur les mêmes tâches d'attention et de mémoire adaptées pour les enfants, Preece et al. [28] ont regardé si des effets pouvaient être observés lors d'émissions à 0,25 et 0,025 W. Leurs résultats ont montré une tendance à l'amélioration des performances, notamment une réduction dans le test de TR simple ( $P < 0,02$ ), pour la plus forte puissance.

Koivisto et al. [25,26] ont rapporté une réduction du TR dans des tâches de mémoire de travail (3-back) et des mesures du TR (simple, soustraction, vigilance). Curcio et al. [29] ont montré une réduction des TR simples ( $P < 0,004$ ) et de choix ( $P < 0,007$ ) pour six variables. Keetley et al. [30] ont rapporté une amélioration du temps de réactivité dans la tâche de « trail making ». Une méta-analyse conduite sur dix études [31] concernant les effets des signaux GSM sur les fonctions d'attention et de mémoire révélait une réduction du TR dans les tâches de soustraction ( $\Delta = -0,09$ , 95 % CI :  $-0,16$  to  $-0,02$ ), et dans le test « 0-back target » ( $\Delta = -0,04$ , 95 % CI :  $-0,06$  à  $-0,02$ ). Wiholm et al. [32] ont rapporté que les performances de navigation virtuelle chez un groupe de sujets hypersensibles étaient améliorées à la suite d'une exposition réelle.

Cependant, un certain nombre d'éléments limitants dans les expérimentations ou l'interprétation des résultats ne permettent pas de conclure à un effet facilitateur des champs électromagnétiques RF sur la cognition. Ainsi, dans le premier cas, les études testaient un large nombre de variables obtenues à partir d'une série de tâches sans y apporter les corrections appropriées en lien avec les comparaisons multiples [24–27]. De plus, ces premiers résultats n'ont pas toujours été confirmés, en particulier au sein des mêmes groupes de recherche. Certains résultats, comme la réduction puissance-dépendante du TR dans une tâche de choix étaient les seuls significatifs ( $P < 0,003$ ) parmi 15 variables testées obtenues à partir de dix tâches d'attention et de mémoire [24].

Dans la plupart des études, malgré des tendances à l'amélioration des performances, aucune des variables n'atteint la significativité statistique après les corrections de Bonferroni (22 tests) [28]. De même, malgré des tendances, les TR dans les tâches simples ( $P < 0,026$ ) et de soustraction ( $P < 0,044$ ) n'ont pas atteint la significativité statistique après correction en lien avec les tests multiples (14 tests) [25,26]. Finalement, une diminution des performances en lien avec l'exposition sham ayant probablement eu lieu par hasard peut expliquer les effets apparents des champs électromagnétiques, en l'absence d'autres différences parmi les groupes hypersensibles (exposition réelle) et contrôles (exposition réelle, exposition sham) [32].

En réponse à ces faiblesses dans les protocoles et les analyses, des ajustements ont été proposés. Les études de confirmation avec amélioration du protocole de l'étude (taille d'échantillon plus importante, double aveugle, etc.) n'ont pas montré d'effet significatif dans les mesures des TR [33] ou de mémoire de travail [34,35]. Des études complémentaires incluant des conditions supplémentaires d'exposition [36] et les enfants [37] n'ont pas non plus montré d'effet significatif. Russo et al. [38] et Cinel et al. [39,40] ont testé l'effet facilitateur de la cognition sur les fonctions d'attention [26], de mémoire [25], sur un large échantillon de 168 sujets pour augmenter le pouvoir statistique, mais aucune des études n'a montré d'effet significatif.

Cependant, des arguments expérimentaux complémentaires ont permis de rejeter l'hypothèse des effets facilitateurs. Regel et al. [9,41] n'ont pas trouvé d'effet facilitateur dans les tâches de TR simple ou impliquant un choix, et seulement des résultats variables dans les tâches de mémoire « *n*-back ». Keetley et al. [30] ont observé un déficit dans les tâches de TR simples et impliquant un choix. Cependant, ces résultats ( $P < 0,005$ – $0,043$ ) n'ont pas été ajustés pour les tests multiples (18 tests ; voir également [42]). Curcio et al. [43] n'ont pas montré d'effet significatif dans les mêmes tâches de TR simple (le TR impliquant un choix n'ayant pas été testé).

Dans une tâche de soutien d'attention, Lee et al. [44] ne montrent pas d'effet après correction de la valeur de  $P$  en lien avec les comparaisons multiples (quatre tests), malgré une tendance de réduction du TR ( $P < 0,019$ ). Eltiti et al. [45] ont rapporté l'absence d'effet significatif des signaux des stations de base GSM ou UMTS sur les fonctions d'attention ou de mémoire après l'application des corrections de Bonferroni (trois tests).

Besset et al. [46] et Fritzer et al. [47] n'ont pas montré d'effet d'expositions cumulatives à long terme de signaux GSM du téléphone sur les fonctions d'attention, de mémoire ou exécutives. Une méta-analyse conduite sur 10 études concernant les effets des signaux GSM sur les fonctions d'attention et de mémoire révélait une augmentation du niveau d'erreur dans le test « 2-back nontarget » ( $\Delta = 0,05$ , 95 % CI :  $0,03$ – $0,07$ ) [31]. En plus des fonctions d'attention et de mémoire, fréquemment étudiées, Maier et al. [48] ont rapporté une augmentation des seuils dans des tâches de mémoire auditive, mais d'autres études ont montré l'absence d'effet des signaux 2G sur les seuils visuels de discrimination de luminance [49], les seuils critiques de fusion d'images [50], le traitement de l'information visio-motrice [51] et les saccades [52]. Aucune des études sur les signaux 3G (ou UMTS) n'a montré d'effet significatif sur différentes fonctions cognitives [45,53–56]. Dans ces études, quelques biais limitent l'interprétation des données. Elyahu et al. [57] et Luria et al. [58] ont combiné les données du côté droit et du côté exposé sham pour obtenir des résultats significatifs par rapport au côté gauche exposé. Smythe et Costall [59] ont comparé seulement deux groupes avec exposition réelle ou sham, parce que la comparaison initiale, comprenant une condition « sans téléphone », ne montrait pas de résultat.

En résumé, les premières études de comportement rapportaient des effets significatifs de l'exposition RF du téléphone portable sur les fonctions d'attention et de mémoire (amélioration des performances cognitives), qui semblaient avoir eu lieu par hasard en raison de comparaisons multiples. Les études plus récentes tenant compte de ces dernières n'ont pas reproduit les résultats précédents. Dernièrement, les études sur les fonctions cognitives autres que l'attention et la mémoire ou sur les signaux 3G n'ont pas mis en évidence d'effet significatif.

**Tableau 1**  
Flux sanguin cérébral régional.

Paramètres mesurés	Conditions d'exposition	Réponse	Commentaires	Références
FSCr chez des hommes sains, 20–25 ans ( $n = 13$ ). TEP 10 min après exposition.	902 MHz, signal d'un téléphone mobile, DAS = 1 W kg <sup>-1</sup> , pendant 30 min, une semaine entre l'exposition réelle et l'exposition fictive (témoin).	FSCr relativement augmenté dans le cortex dorsolatéral préfrontal du côté de l'exposition.	Exposition moins localisée qu'avec un téléphone mobile réel.	Huber et al. [8]
FSCr pendant une tâche de mémorisation chez des volontaires sains, 21–35 ans ( $n = 14$ ). TEP pendant l'exposition.	Téléphone mobile GSM à 902 MHz, fonctionnant à 0,25 W (DAS ~ 1,2 W kg <sup>-1</sup> ), pendant 45 min ; pas d'intervalle entre l'exposition réelle et l'exposition fictive.	Diminution relative du FSCr dans le cortex auditif, pas dans la zone d'exposition RF maximale.	Signal auditif possible. Séquence d'événements pas claire.	Haarala et al. [34]
FSCr chez des hommes sains, 20–25 ans ( $n = 12$ ). TEP 10 min après exposition.	902 MHz, signal d'un téléphone mobile ou d'une station de base, DAS = 1 W kg <sup>-1</sup> , pendant 30 min, une semaine entre l'exposition réelle et l'exposition fictive (témoin).	FSCr relativement augmenté dans le cortex dorsolatéral préfrontal du côté de l'exposition, avec le signal d'un téléphone mobile, mais pas avec celui d'une station de base. Pas de lien avec la distribution locale du DAS.	Exposition moins localisée qu'avec un téléphone mobile réel.	Huber et al. [61]
FSCr par TEP pendant une tâche cognitive et pendant l'exposition à un téléphone mobile chez des hommes sains, 25 ± 2 ans ( $n = 12$ ).	Téléphone mobile GSM à 902 MHz, fonctionnant à 0,25 W pendant 30 min.	Diminution du FSCr près de l'antenne, augmentation dans d'autres zones diverses. Pas d'effet sur le temps de réaction.	Séquence d'événements pas claire.	Aalto et al. [60]
Métabolisme du glucose par ( <sup>18</sup> F)fluorodeoxyglucose ( <sup>18</sup> FDG).	Téléphone mobile à 837,8 MHz, fonctionnant en mode réception pendant 50 min.	Augmentation du métabolisme du glucose dans quelques zones localisées : cortex orbitofrontal droit et partie inférieure du gyrus temporal supérieur droit.	Pas de contrôle de la température.	Volkow et al. [62]

#### 4. Effets sur la vascularisation

Les effets les plus cohérents d'une exposition aiguë sur les sujets humains sont les réponses thermorégulatrices liées à l'échauffement induit par les RF, dont les plus immédiates sont la vasodilatation cutanée et l'évaporation liée la sudation.

Quelques modifications du flux sanguin cérébral régional (FSCr) ont été publiées pendant et après une exposition RF, mais les données disponibles sont équivoques [8,34,60–62] (Tableau 1). Huber et al. [8] ont observé une augmentation significative de 5 à 7 % du FSCr dans le cortex préfrontal dorsolatéral de l'hémisphère gauche du cerveau après 30 min d'exposition à un téléphone GSM. Le flux sanguin a été mesuré par tomographie par émission de positons (TEP) de l'oxygène. Quelques années plus tard, ils ont confirmé cet effet avec des RF modulées par impulsions (comme dans le signal du téléphone mobile), mais pas avec une émission continue comme le signal des antennes relais, au même DAS pic de 1 W kg<sup>-1</sup> [61]. Haarala et al. [34] ont trouvé une diminution bilatérale du FSCr dans le cortex auditif avec une exposition pendant l'examen TEP : ils ont donc trouvé une diminution pendant l'examen, tandis qu'Huber et al. [8] ont trouvé une augmentation après l'examen. Quand Aalto et al. [60] ont amélioré le protocole précédent en éliminant de possibles artefacts acoustiques, ils ont également observé une diminution du FSCr près de l'antenne et une augmentation dans d'autres régions variées plus profondes dans le cerveau. Dans leur revue, Kwon et Hämäläinen [23] concluent que les résultats des mesures hémodynamiques de réponse cérébrale sont prometteurs, mais encore peu nombreux et non concluants. Toutefois, ces résultats, quoique non convergents, ne sont pas non plus contradictoires : ils indiquent une diminution de débit pendant l'exposition dans le cortex auditif à proximité des antennes émettrices et une augmentation plus tardive dans d'autres régions du cerveau plus éloignées, qui pourrait être réactionnelle. D'autres travaux sont nécessaires pour établir si une telle cohérence spatiale et temporelle existe ou si ces résultats sont aléatoires et non cohérents.

En lien avec le flux sanguin cérébral, une autre étude plus récente par Volkow et al. [62] a montré, par PET du glucose, une augmentation du métabolisme cérébral local après exposition à un téléphone portable en mode réception. Ce résultat va dans le sens de ceux de Huber et al. Cependant, l'échauffement comparatif du téléphone allumé ou éteint n'était pas contrôlé ou pas mentionné. Il n'est alors pas évident de savoir si l'effet est réellement dû à l'émission RF ou à une réaction intracrânienne indirecte due à l'échauffement du visage par l'électronique du téléphone portable.

En résumé, l'exposition aux RF du téléphone portable peut induire une augmentation ou une diminution du flux sanguin régional, selon la technique utilisée et le moment ou la zone d'enregistrement. L'échauffement par conduction de chaleur des téléphones devrait être strictement contrôlé entre les dispositifs réels et fictifs.

Ces changements du FSCr ne constituent pas en soi une altération de la santé. Des modifications du FSCr pourraient refléter ou produire des modifications localisées de l'activité neuronale.

Par ailleurs, il n'y a pas d'indication claire de ce qu'une exposition RF du type téléphone portable aurait un effet sur la fréquence cardiaque au repos ou sur la tension artérielle [63–67]. Cependant, de légères modifications ont été rapportées sur la variabilité de la fréquence cardiaque dans deux études contradictoires [68,69].

## 5. Conclusion

L'ensemble des travaux analysés fait ressortir un effet reproductible sur la puissance spectrale des ondes alpha de l'EEG, avec une amplitude augmentée notamment pendant le sommeil, et peut-être sur la vascularisation cérébrale. Les faibles modifications de l'activité électrique du cerveau et possiblement de la vascularisation cérébrale n'ont pas en soi de signification fonctionnelle. En dépit d'un grand nombre d'études, et bien que l'utilisation d'une grande variété de techniques d'évaluation des fonctions cognitives rende difficile une comparaison directe des résultats de ces différentes études, aucun effet robuste n'a été trouvé sur les fonctions cognitives.

Un avantage des études de laboratoire avec des volontaires humains est que les résultats indiquent la réponse probable d'autres personnes exposées dans les conditions semblables ; les inconvénients incluent la durée souvent courte de l'exposition, du petit nombre et d'une plus grande hétérogénéité de volontaires, en comparaison avec les études animales.

Une conséquence est la puissance souvent faible pour détecter un effet significatif. En outre, les sujets sont habituellement choisis en bonne santé et peu susceptibles de refléter la gamme des réponses rencontrées dans l'ensemble de la population. Par exemple, les personnes très jeunes et les personnes âgées, ou les personnes bénéficiant d'un traitement pharmaceutique, ont rarement fait l'objet d'études expérimentales. Néanmoins, dans ce contexte limité, les études avec des volontaires apportent une contribution utile à l'étude des effets physiologiques de l'exposition chez les personnes en bonne santé. Il apparaît aussi important maintenant d'étudier les effets des champs RF chez les enfants et les adolescents, étant donné la connaissance croissante d'une maturation continue du cerveau jusqu'à un stade avancé de l'adolescence ; quelques études récentes de type écologique ont été effectuées dans cet objectif sur des écoliers. Des études cliniques seraient aussi utiles chez l'enfant, mais nécessitent des précautions éthiques et une validation physiologique préalable de la méthodologie et des paramètres analysés. Une étude de cohorte a démarré en France pour étudier l'influence de diverses expositions environnementales sur des enfants suivis de la naissance jusqu'à l'âge adulte, la cohorte ELFE. Une quantification de l'exposition aux champs électromagnétiques dans cette cohorte est prévue.

## Références

- [1] C.M. Cook, et al., Exposure to ELF magnetic and ELF-modulated radiofrequency fields: The time course of physiological and cognitive effects observed in recent studies (2001–2005), *Bioelectromagnetics* 27 (8) (2006) 613–627.
- [2] J. Röschke, K. Mann, No short-term effects of digital mobile radio telephone on the awake human electroencephalogram, *Bioelectromagnetics* 18 (1997) 172–176.
- [3] M. Hietanen, et al., Human brain activity during exposure to radiofrequency fields emitted by cellular phones, *Scand. J. Work Environ. Health* 26 (2000) 87–92.
- [4] A.V. Kramarenko, U. Tan, Effects of high-frequency electromagnetic fields on human EEG: A brain mapping study, *Int. J. Neurosci.* 113 (2003) 1007–1019.
- [5] H. Hinrikus, et al., Changes in human EEG caused by low level modulated microwave stimulation, *Bioelectromagnetics* 25 (2004) 431–440.
- [6] F. Vecchio, et al., Mobile phone emission modulates interhemispheric functional coupling of EEG alpha rhythms, *Eur. J. Neurosci.* 25 (2007) 1908–1913.
- [7] H. Reiser, et al., The influence of electromagnetic fields on human brain activity, *Eur. J. Med. Res.* 1 (1995) 27–32.
- [8] R. Huber, et al., Electromagnetic fields, such as those from mobile phones, alter regional cerebral blood flow and sleep and waking EEG, *J. Sleep Res.* 11 (4) (2002) 289–295.
- [9] S. Regel, et al., Pulsed radio frequency radiation affects cognitive performance and the waking electroencephalogram, *NeuroReport* 18 (2007) 803–807.
- [10] G. Curcio, et al., Is the brain influenced by a phone call? An EEG study of resting wakefulness, *Neurosci. Res.* 53 (2005) 265–270.
- [11] C. Cook, et al., Resting EEG is affected by exposure to a pulsed ELF magnetic field, *Bioelectromagnetics* 25 (3) (2004) 196–203.
- [12] H. Hinrikus, et al., Effect of 7, 14 and 21 Hz modulated 450 MHz microwave radiation on human electroencephalographic rhythms, *Int. J. Radiat. Biol.* 84 (2008) 69–79.
- [13] R. Croft, et al., The effect of mobile phone electromagnetic fields on the alpha rhythm of human electroencephalogram, *Bioelectromagnetics* 29 (2008) 1–10.
- [14] R. Croft, S. Leung, R.J. McKenzie, S.P. Loughran, S. Iskra, D.L. Hamblin, N.R. Cooper, Effects of 2G and 3G mobile phones on human alpha rhythms: Resting EEG in adolescents, young adults, and the elderly, *Bioelectromagnetics* 31 (6) (2010) 434–444.
- [15] R. Huber, et al., Exposure to pulsed high-frequency electromagnetic field during waking affects human sleep EEG, *NeuroReport* 11 (15) (2000) 3321–3325.
- [16] R.J. Croft, et al., Acute mobile phone operation affects neural function in humans, *Clin. Neurophysiol.* 113 (2002) 1623–1632.
- [17] P. Wagner, et al., Human sleep under the influence of pulsed radiofrequency electromagnetic fields: A polysomnographic study using standardized conditions, *Bioelectromagnetics* 19 (3) (1998) 199–202.
- [18] K. Mann, J. Röschke, Effects of pulsed high-frequency electromagnetic fields on human sleep, *Neuropsychobiology* 33 (1996) 41–47.
- [19] A.A. Borbély, et al., Pulsed high-frequency electromagnetic field affects human sleep and sleep electroencephalogram, *Neurosci. Lett.* 275 (20) (1999) 207–210.
- [20] N. Lebedeva, et al., Investigation of brain potentials in sleeping humans exposed to the electromagnetic field of mobile phones, *Crit. Rev. Biomed. Eng.* 29 (1) (2001) 125–133.
- [21] S.P. Loughran, et al., The effect of electromagnetic fields emitted by mobile phones on human sleep, *NeuroReport* 16 (17) (2005) 1973–1976.
- [22] C.S. Hung, et al., Mobile phone 'talk-mode' signal delays EEG-determined sleep onset, *Neurosci. Lett.* 421 (1) (2007) 82–86.
- [23] M.S. Kwon, H. Hämäläinen, Effects of mobile phone electromagnetic fields: Critical evaluation of behavioral and neurophysiological studies, *Bioelectromagnetics* 32 (4) (2011) 253–272.

- [24] A. Preece, et al., Effect of a 915-MHz simulated mobile phone signal on cognitive function in man, *Int. J. Radiat. Biol.* 75 (4) (1999) 447–456.
- [25] M. Koivisto, et al., The effects of electromagnetic field emitted by GSM phones on working memory, *NeuroReport* 11 (8) (2000) 1641–1643.
- [26] M. Koivisto, et al., Effects of 902 MHz electromagnetic field emitted by cellular telephones on response times in humans, *NeuroReport* 11 (2) (2000) 413–415.
- [27] N. Edelstyn, A. Oldershaw, The acute effects of exposure to the electromagnetic field emitted by mobile phones on human attention, *NeuroReport* 13 (1) (2002) 119–121.
- [28] A. Preece, et al., Effect of 902 MHz mobile phone transmission on cognitive function in children, *Bioelectromagnetics* 26 (Suppl. 7) (2005) S138–S143.
- [29] G. Curcio, et al., Time-course of electromagnetic field effects on human performance and tympanic temperature, *NeuroReport* 15 (1) (2004) 161–164.
- [30] V. Keetley, et al., Neuropsychological sequelae of digital mobile phone exposure in humans, *Neuropsychologia* 44 (10) (2006) 1843–1848.
- [31] A. Barth, et al., Pulsed and continuous wave mobile phone exposure over left versus right hemisphere: Effects on human cognitive function, *Bioelectromagnetics* 28 (2007) 289–295.
- [32] C. Wiholm, et al., Mobile phone exposure and spatial memory, *Bioelectromagnetics* 30 (2009) 59–65.
- [33] C. Haarala, et al., Effect of a 902 MHz electromagnetic field emitted by mobile phones on human cognitive function: A replication study, *Bioelectromagnetics* 24 (2003) 283–288.
- [34] C. Haarala, et al., Effects of a 902 MHz mobile phone on cerebral blood flow in humans: A PET study, *NeuroReport* 14 (2003) 2019–2023.
- [35] C. Haarala, et al., 902 MHz mobile phone does not affect short term memory in humans, *Bioelectromagnetics* 25 (2004) 452–456.
- [36] C. Haarala, et al., Pulsed and continuous wave mobile phone exposure over left versus right hemisphere: Effects on human cognitive function, *Bioelectromagnetics* 28 (2007) 289–295.
- [37] C. Haarala, et al., Electromagnetic field emitted by 902 MHz mobile phones shows no effects on children's cognitive function, *Bioelectromagnetics* 26 (Suppl. 7) (2005) S144–S150.
- [38] R. Russo, E. Fox, C. Cinel, A. Boldini, M.A. Defeyter, D. Mirshekar-Syahkal, A. Mehta, Does acute exposure to mobile phones affect human attention?, *Bioelectromagnetics* 27 (2006) 215–220.
- [39] C. Cinel, et al., Does the use of mobile phones affect human short-term memory or attention? *Appl. Cogn. Psychol.* 22 (2008) 1113–1125.
- [40] C. Cinel, et al., Exposure to mobile phone electromagnetic fields and subjective symptoms: A double-blind study, *Psychosom. Med.* 70 (2008) 345–348.
- [41] S. Regel, et al., Pulsed radio-frequency electromagnetic fields: Dose-dependent effects on sleep, the sleep EEG and cognitive performance, *J. Sleep Res.* 16 (2007) 253–258.
- [42] M. Lewis, Mobile phones are good for you,  $p < 0.36!$  Observations on Keetley, Wood, Spong and Stough (2006), *Neuropsychologia* 45 (2007) 1580–1581.
- [43] G. Curcio, et al., Psychomotor performance is not influenced by brief repeated exposures to mobile phones, *Bioelectromagnetics* 29 (2008) 237–241.
- [44] T. Lee, et al., The effect of the duration of exposure to the electromagnetic field emitted by mobile phones on human attention, *NeuroReport* 14 (2003) 1361–1364.
- [45] S. Eltiti, et al., Short-term exposure to mobile phone base station signals does not affect cognitive functioning or physiological measures in individuals who report sensitivity to electromagnetic fields and controls, *Bioelectromagnetics* 30 (2009) 556–563.
- [46] A. Besset, et al., No effect on cognitive function from daily mobile phone use, *Bioelectromagnetics* 26 (2) (2005) 102–108.
- [47] G. Fritzer, et al., Effects of short- and long-term pulsed radiofrequency electromagnetic fields on night sleep and cognitive functions in healthy subjects, *Bioelectromagnetics* 28 (4) (2007) 316–325.
- [48] R. Maier, et al., Effects of pulsed electromagnetic fields on cognitive processes – A pilot study on pulsed field interference with cognitive regeneration, *Acta Neurol. Scand.* 110 (2004) 46–52.
- [49] L. Irlenbusch, et al., Influence of a 902.4 MHz GSM signal on the human visual system: Investigation of the discrimination threshold, *Bioelectromagnetics* 28 (2007) 648–654.
- [50] J. Wilen, et al., Psychophysiological tests and provocation subjects with mobile phone related symptoms, *Bioelectromagnetics* 27 (3) (2006) 204–214.
- [51] Y. Terao, et al., Effects of thirty-minute mobile phone use on visuo-motor reaction time, *Clin. Neurophysiol.* 117 (11) (2006) 2504–2511.
- [52] T. Terao, et al., Effects of thirty-minute mobile phone exposure on saccades, *Clin. Neurophysiol.* 118 (2007) 1545–1556.
- [53] M. Unterlechner, et al., No effect of an UMTS mobile phone-like electromagnetic field of 1.97 GHz on human attention and reaction time, *Bioelectromagnetics* 29 (2) (2008) 145–153.
- [54] G. Schmid, et al., No influence on selected parameters of human visual perception of 1970 MHz UMTS-like exposure, *Bioelectromagnetics* 26 (4) (2005) 243–250.
- [55] S. Regel, et al., UMTS base station-like exposure, well-being, and cognitive performance, *Environ. Health Perspect.* 114 (2006) 1270–1275.
- [56] I. Riddervold, et al., Cognitive function and symptoms in adults and adolescents in relation to RF radiation from UMTS base stations, *Bioelectromagnetics* 29 (2008) 257–267.
- [57] I. Eliyahu, et al., Effects of radiofrequency radiation emitted by cellular telephones on the cognitive functions of humans, *Bioelectromagnetics* 27 (2006) 119–126.
- [58] R. Luria, et al., Cognitive effects of radiation emitted by cellular phones: The influence of exposure side and time, *Bioelectromagnetics* 30 (3) (2009) 198–204.
- [59] J. Smythe, B. Costall, Mobile phone use facilitates memory in male, but not female, subjects, *NeuroReport* 14 (2003) 243–246.
- [60] S. Aalto, et al., Mobile phone affects cerebral blood flow in humans, *J. Cereb. Blood Flow Metab.* 26 (7) (2006) 885–890.
- [61] R. Huber, et al., Exposure to pulse-modulated radio frequency electromagnetic fields affects regional cerebral blood flow, *Eur. J. Neurosci.* 21 (2005) 1000–1006.
- [62] N.D. Volkow, et al., Effects of cell phone radiofrequency signal exposure on brain glucose metabolism, *JAMA – J. Am. Med. Assoc.* 305 (8) (2011) 808–813.
- [63] A.T. Barker, et al., The effect of GSM and TETRA mobile handset signals on blood pressure, catechol levels, and heart rate variability, *Bioelectromagnetics* 28 (2007) 433–438.
- [64] S. Braune, et al., Resting blood pressure increase during exposure to a radio-frequency electromagnetic field, *Lancet* 351 (1998) 1857–1858.
- [65] S. Braune, et al., Influence of a radiofrequency electromagnetic field on cardiovascular and hormonal parameters of the autonomic nervous system in healthy individuals, *Radiat. Res.* 158 (3) (2002) 352–356.
- [66] K. Nam, et al., Effects of RF exposure of teenagers and adults by CDMA cellular phones, *Bioelectromagnetics* 27 (2006) 509–514.
- [67] K. Tahvanainen, et al., Effects of cellular phone use on ear canal temperature measured by NTC thermistors, *Clin. Physiol. Funct. Imaging* 27 (2007) 162–172.
- [68] R. Huber, et al., Radio frequency electromagnetic field exposure in humans: Estimation of SAR distribution in the brain, effects on sleep and heart rate, *Bioelectromagnetics* 24 (2003) 262–276.
- [69] M. Parazzini, et al., Electromagnetic fields produced by GSM cellular phones and heart rate variability, *Bioelectromagnetics* 28 (2007) 122–129.