

CHAMPS ELECTROMAGNETIQUES: DEFIS ACTUELS ET FUTURS POUR LA SANTE ET LA SECURITE AU TRAVAIL

Introduction

Inodores, inaudibles et invisibles, les champs électromagnétiques (CEM), émis par les téléphones mobiles, les antennes radio, les routeurs Wi-Fi, les lignes électriques, etc., sont omniprésents dans la société moderne. Le nombre et la diversité des sources présentes dans les foyers, les lieux publics et les lieux de travail ne cessent d'augmenter. Ces dernières années, de nouvelles technologies, omniprésentes et basées sur les CEM, ont en effet vu le jour, telles que la nouvelle génération de technologies de téléphonie mobile (la cinquième, également connue sous le nom de 5G), le transfert de puissance sans fil et plusieurs applications médicales. Les avancées technologiques sans fil sont d'ailleurs considérées comme des éléments moteurs essentiels de la numérisation du travail¹ et de l'industrie 5.0 (CE, 2022). Ces avancées ont une incidence sur de nombreux domaines liés à l'avenir du travail², tels que l'internet des objets (IDO), le travail hybride ou les environnements de travail virtuel. Elles jouent également un rôle déterminant dans la conduite autonome, les véhicules aériens sans pilote (UAV), les capteurs et la robotique de pointe. Cependant, en raison de l'omniprésence des sources de CEM, les débats autour des champs électromagnétiques suscitent un intérêt croissant, tant dans les cercles scientifiques qu'au sein du grand public. En outre, compte tenu de leur déploiement rapide et de leur utilisation accrue dans les milieux professionnels, la Commission européenne (CE) a récemment souligné l'importance d'analyser l'exposition des travailleurs aux CEM ainsi que les effets néfastes potentiels sur la santé d'une telle exposition (CE, 2021).

Le présent document vise à identifier les évolutions émergentes et futures des applications professionnelles des CEM ainsi que leurs possibles conséquences pour la santé et la sécurité au travail (SST). Il vise également à mettre en évidence les lacunes existantes en matière de connaissances concernant les niveaux (sûrs) d'exposition. En outre, il formule des recommandations à l'intention des travailleurs et des employeurs, des professionnels de la santé et de la sécurité au travail, ainsi que des décideurs politiques afin de réduire les risques associés à l'exposition aux CEM. Pour obtenir des informations sur les risques et avantages indirects en matière de SST des applications liées à l'avenir du travail rendues possibles par les CEM, il convient de se référer aux publications pertinentes de l'EU-OSHA^{1,2}.

Que sont les champs électromagnétiques?

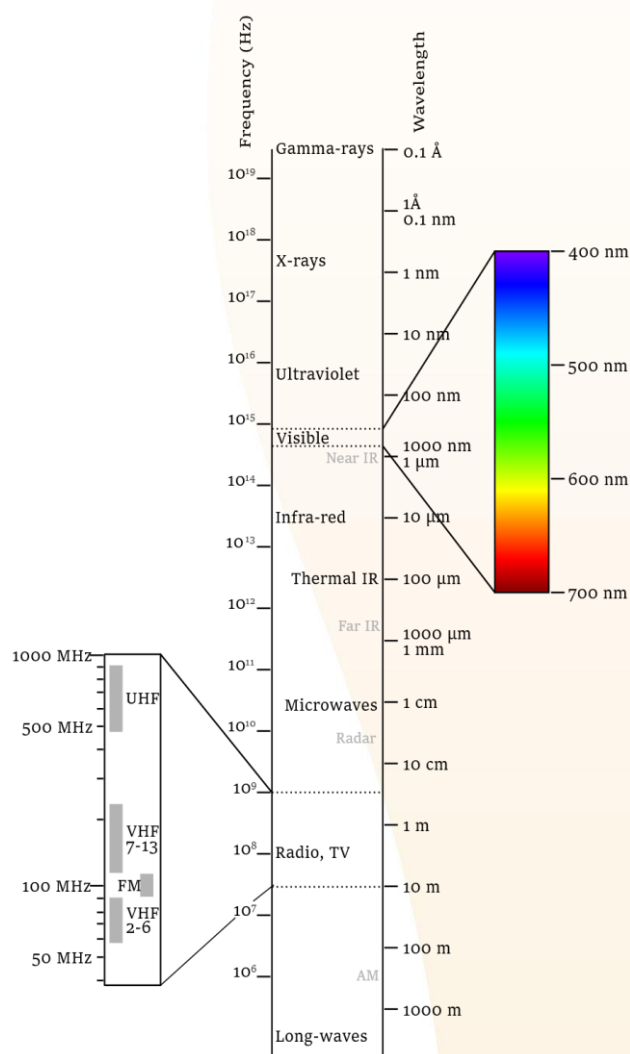
En substance, les CEM sont générés par des charges électriques en mouvement et se propagent sous la forme d'une combinaison d'ondes électriques et magnétiques oscillantes à la vitesse de la lumière. Le champ électrique provient des forces que les particules chargées exercent les unes sur les autres, tandis que le champ magnétique est produit par des charges en mouvement (courants électriques). Les CEM se caractérisent par leur fréquence ou leur longueur d'onde, les caractéristiques de leurs signaux et leur intensité. La fréquence, exprimée en hertz (Hz), renvoie au nombre de cycles effectués par l'onde en une seconde. La longueur d'onde, exprimée en mètres (m), correspond à la distance séparant deux crêtes successives d'une onde. Les caractéristiques des signaux renvoient, par exemple, à des CEM continus sinusoïdaux ou pulsés. L'intensité représente l'énergie de l'onde, corrélée à l'amplitude (hauteur de la crête) de cette onde. Le niveau d'exposition correspond à l'intensité de l'onde incidente à l'endroit où se trouve le corps, généralement pondérée dans le temps, le volume et/ou l'espace (moyenne calculée sur une période, une surface et/ou un volume donnés). Ce niveau est exprimé en densité de puissance (en watt par mètre carré) ou en intensité du champ électrique (en

¹ Voir: <https://osha.europa.eu/en/themes/digitalisation-work>

² Voir les documents de réflexion de l'EU-OSHA traitant de thèmes liés à l'avenir du travail à l'adresse suivante: https://osha.europa.eu/en/publications?f%5B0%5D=facet_tags%3A51&f%5B1%5D=publication_type%3A9&search_api_fulltext=&search_api_language_1%5B0%5D=en&sort_by=field_publication_date

volt par mètre). La fréquence et la longueur d'onde sont inversement liées (figure 1): la longueur d'onde (en mètre) peut être calculée en divisant la vitesse de la lumière (30 millions de mètres par seconde, dans le vide) par la fréquence (en hertz, Hz). Il convient de noter que, généralement, les champs électrique et magnétique sont couplés lorsque la distance par rapport à la source dépasse 10 longueurs d'onde; cette région est appelée le «champ lointain».

Figure 1: Le spectre électromagnétique



La gamme des fréquences extrêmement basses (FEB) et une partie de la gamme des fréquences intermédiaires (FI) (1 Hz – 100 kHz) ne sont pas représentées dans ce graphique.

Liste des abréviations: MHz = mégahertz, Hz étant l'unité de fréquence indiquant le nombre de cycles/ondes sinusoïdales par seconde; UHF = ultra-haute fréquence, VHF = très haute fréquence; AM = modulation d'amplitude; FM = modulation de fréquence; IR = infrarouge; m = mètre, cm = centimètre; mm = millimètre; μm = micromètre, nm = nanomètre, Å = ångström = 0,1 nm.

Source: Wikimedia Commons [licence Creative Commons Attribution-ShareAlike 2.5 Generic]

Il existe des sources de CEM naturelles et artificielles. De manière générale, les sources artificielles émettent des CEM manipulés afin de transmettre soit des informations, soit de l'énergie. Cependant, les applications pratiques sont aussi variées que leurs fréquences: des fréquences extrêmement basses (FEB, c'est-à-dire des fréquences comprises entre 1 Hz et 300 Hz), observées dans la production d'électricité, aux fréquences intermédiaires (FI, c'est-à-dire des fréquences comprises entre 300 Hz et 10 MHz, 1 MHz correspondant à 10^6 Hz; figure 1), jusqu'aux radiofréquences (RF, c'est-à-

dire des fréquences comprises entre 10 MHz et 300 GHz, 1 GHz correspondant à 10^9 Hz; figure 1) utilisées dans les applications radar et de communication mobile.

Il convient de noter que le présent document ne prend en considération que les CEM ayant des fréquences allant jusqu'à quelques térahertz ($1 \text{ THz} = 10^{12} \text{ Hz}$; figure 1), à savoir les ondes dites «radio» (UIT, 2020), qui se situent en dessous de la lumière visible et appartiennent à la partie du spectre considérée comme non ionisante, c'est-à-dire dépourvue de l'énergie nécessaire pour arracher des électrons fortement liés à des atomes ou des molécules (ce qui peut entraîner des dommages moléculaires et des effets sur la santé). Cela signifie que, outre l'infrarouge et la lumière visible, d'autres parties bien connues du spectre électromagnétique, telles que les rayonnements UV, les rayons X et les rayons gamma, ne sont pas examinées ici.

Dernières évolutions concernant les CEM sur le lieu de travail

Réseaux de communication mobile

La **cinquième génération de réseaux de télécommunication (5G)** fonctionne à des fréquences jusqu'ici inutilisées, dont certaines sont nettement plus élevées que celles employées par les générations précédentes [jusqu'à 71 GHz ($1 \text{ GHz} = 10^9 \text{ Hz}$); figure 1]. Elle introduit des avancées technologiques permettant à une même station de base de desservir simultanément un nombre accru d'utilisateurs. Ce résultat est obtenu par le découpage de l'énergie transmise dans l'espace et sa concentration sous forme de faisceau dirigé vers les utilisateurs. Dans la plupart des pays européens, les régulateurs ont désormais attribué et mis aux enchères les nouvelles fréquences.

Le déploiement mondial des réseaux 5G s'est heurté à des inquiétudes du public quant aux risques présumés pour la santé liés à une augmentation supposée de l'exposition globale aux CEM et à l'utilisation de fréquences plus élevées (dont les effets biologiques possibles n'ont pas encore été étudiés de manière approfondie), ainsi qu'à une mésinformation et même des actes de vandalisme visant les infrastructures (UIT, 2021). Bien que l'ajout de réseaux 5G puisse effectivement accroître l'exposition totale aux CEM, cette situation devrait perdurer tant que les réseaux des générations précédentes resteront en service (CSRSEE, 2023a). Afin d'atténuer les préoccupations du public concernant la 5G et de surveiller l'incidence réelle sur l'exposition totale aux CEM RF, quatre études internationales ont été financées dans le cadre du programme Horizon de l'UE, avec pour objectif d'évaluer les effets du déploiement de la 5G sur la santé et l'environnement, y compris dans les milieux professionnels³. Ces projets, lancés en 2022, doivent s'achever entre 2025 et 2027.

À des fréquences plus élevées, un nombre accru de stations de base est nécessaire pour maintenir des liaisons sans fil de haute qualité. C'est pourquoi des stations de base de type petites cellules sont utilisées, installées sur des arbres, des lampadaires ou des bâtiments, à seulement quelques centaines de mètres les unes des autres (CSRSEE, 2023a). Les petites cellules sont également de plus en plus utilisées dans les réseaux privés/d'entreprise⁴ et déployées dans de grandes usines, des halls de production, des (aéro)ports, des campus, etc.

Les techniques de transmission de la 5G combinées aux fréquences plus élevées ainsi qu'à la densification concomitante du réseau permettent des communications sans fil à des débits de données (très) élevés et à une latence (ultra-)faible, ce qui en fait un élément moteur essentiel de la numérisation du travail et de nombreuses applications futures. Cependant, les innovations technologiques introduites par la 5G ne devraient se concrétiser pleinement qu'avec la génération suivante, la 6G, dont le lancement est prévu en 2030. Le projet phare Hexa-X⁵ de l'UE prévoit même que la 6G devienne une technologie «tous usages» plutôt qu'une simple technologie générique, permettant la téléprésence (pleinement immersive) telle que le métavers; le jumelage massif [à savoir des tableaux de bord en temps réel et des modèles virtuels d'appareils et d'installations (de production)]; la santé en ligne pour tous; les cobots (c'est-à-dire des robots assistant les humains dans leurs tâches); ainsi que l'intégration complète de l'IDO, avec une multitude de capteurs, sur et autour du corps. Cela signifie que la 6G devrait avoir une incidence considérable sur les transformations sociétales et industrielles

³ Voir: <https://www.emf-health-cluster.eu/>

⁴ Les réseaux 5G privés/d'entreprise ne sont pas accessibles au public et sont très sécurisés.

⁵ Voir: <https://hexa-x.eu/>. La Commission européenne a lancé plusieurs projets phares visant à relever les grands défis scientifiques et technologiques et à stimuler l'innovation dans l'UE: <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/activities/flagships>.

(industrie 5.0). À cette fin, la 6G utilisera des parties du spectre des radiofréquences bien supérieures à celles utilisées ou prévues pour la 5G (>100 GHz), ce qui permettra non seulement des débits ultra-élevés, mais aussi une localisation et une détection à l'échelle du centimètre.

Transition énergétique

La transition en cours vers des sources d'énergie renouvelables nécessite des extensions et des modernisations du réseau électrique (par exemple, le déploiement de lignes à haute tension et de stations onduleurs), ainsi qu'un meilleur suivi de la consommation instantanée d'énergie au niveau individuel (par exemple, au moyen d'un réseau sans fil de capteurs, appelés compteurs intelligents). Les risques d'exposition pour les travailleurs (par exemple, les constructeurs, les électriciens et les ingénieurs de maintenance) et les travailleurs participant au développement et à l'entretien des nouvelles infrastructures (énergétiques), avec une exposition potentiellement élevée en raison de forts courants, sont bien connus. Les travailleurs des centrales électriques semblent être bien conscients de ces risques et des moyens de s'en protéger (Steger et al., 2020), et même si les sous-traitants intervenant dans ces centrales ne sont pas nécessairement pleinement informés; les responsables santé, sécurité et environnement (SSE) peuvent cependant leur transmettre les consignes nécessaires. En outre, les compteurs intelligents contribuent généralement peu à l'exposition totale aux CEM RF, en raison de leurs émissions sporadiques et de leurs emplacements spécifiques (Aerts et al., 2019). Enfin, les applications de chauffage (industrielles) passent de plus en plus des combustibles hydrocarbonés à l'induction électrique, entraînant une augmentation des sources de champs magnétiques à basse fréquence, qui peuvent potentiellement avoir une intensité élevée, mais peuvent être maintenues bien en deçà des valeurs limites d'exposition (CE, 2015a, b).

Transfert de puissance sans fil

Le transfert de puissance sans fil (WPT) s'est imposé comme la technologie privilégiée pour la recharge des appareils personnels (par exemple, les smartphones et les ordinateurs portables, mais aussi les outils électriques) et est également à l'étude ou déployé pour des dispositifs médicaux (par exemple, les stimulateurs cardiaques), des véhicules électriques, des drones et d'autres véhicules ou robots autonomes industriels. Le WPT applique soit des CEM de radiofréquences focalisés (faisceaux), soit des technologies inductives ou résonantes, qui émettent des CEM à des fréquences comprises entre 10 kHz et 50 MHz (ETSI, 2019). Dans le premier cas, le transfert de puissance sans fil permet un fonctionnement continu des appareils, des machines, des robots et des drones. Dans les milieux professionnels, le WPT est principalement utilisé dans les secteurs de la maintenance et de la réparation, l'industrie manufacturière, le secteur du transport et de la logistique, ainsi que dans tous les secteurs où les opérations recourent à la robotique (mobile). La recharge sans fil des véhicules sera également mise en œuvre à plus grande échelle grâce à son intégration dans les infrastructures (en bord de route). Par exemple, divers véhicules, tels que des voitures, des autobus et des camions, sont déjà rechargés par des boucles⁶ situées sur des parkings et aux arrêts de bus. En outre, dans un avenir (proche), des boucles de recharge seront intégrées dans les routes afin de recharger en continu les véhicules en mouvement. Des études récentes – bien qu'elles n'aient pas été réalisées dans des environnements professionnels – indiquent que l'exposition à proximité des systèmes WPT est inférieure aux valeurs limites d'exposition (Stam, 2022). Toutefois, une augmentation future de la puissance des systèmes, par exemple pour recharger de grands véhicules électriques, pourrait entraîner une exposition accrue, en particulier dans les environnements professionnels.

Soins de santé

Dans le domaine des soins de santé, les applications des CEM tendent à évoluer vers des méthodes plus précises et toujours plus puissantes, utilisant souvent des fréquences plus élevées, des faisceaux focalisés et/ou des puissances (localisées) plus importantes. Les nouveaux développements en matière d'outils diagnostiques comprennent l'imagerie par particules magnétiques (5-50 kHz) (Billings et al., 2021), qui pourrait augmenter de manière significative l'exposition des travailleurs du secteur médical, le radar pour l'imagerie superficielle (1-60 GHz) (de Waard-Schalkx et al., 2015) et le suivi des signes vitaux (jusqu'à 120 GHz) (Cardillo et Caddemi, 2020), ainsi que l'utilisation de fréquences térahertz pour l'imagerie, la spectroscopie et le traitement (Amini et al., 2021). En outre, de nouveaux

⁶ Les boucles de recharge transfèrent la puissance sans fil par induction électromagnétique. Cette méthode est également utilisée à grande échelle dans les appareils électroménagers tels que les brosses à dents électriques et les stations de charge sans fil pour smartphones.

traitements esthétiques utilisant des CEM pulsés à basse fréquence (15 Hz) ou des CEM de radiofréquences (27 MHz-5,8 GHz) pourraient également présenter des risques pour les travailleurs du secteur médical (Stam, 2022).

Sécurité

Les fréquences térahertz et les ondes millimétriques sont également utilisées dans des applications de sécurité et de détection, telles que les scanners corporels dans les aéroports, les scanners postaux et les essais non destructifs. Ces applications peuvent différer considérablement en intensité: si les niveaux de champ des scanners de sécurité sont limités à des intensités inférieures aux valeurs d'exposition, en raison de l'exposition du grand public, les applications médicales et industrielles peuvent en revanche utiliser des intensités plus élevées et doivent être manipulées par des travailleurs correctement formés.

Les implications des CEM pour la santé et la sécurité au travail

Effets néfastes sur la santé et réglementation de l'exposition aux CEM

Les recherches menées sur les incidences des CEM sur la santé sont nombreuses, mais les lignes directrices en matière d'exposition portent principalement sur les effets aigus, à court terme. Ces effets dépendent de la fréquence des CEM, de leur intensité et de la durée d'exposition. Par exemple, les effets d'une exposition à des CEM à basse fréquence dépassant les limites d'exposition en matière de santé et de sécurité au travail comprennent la perception de charges électriques surfaciques, ainsi que l'apparition de phosphènes rétinien (c'est-à-dire de faux flashes lumineux). À des fréquences plus élevées (100 kHz-300 GHz, figure 1), les effets de la stimulation nerveuse et les modifications de la perméabilité des membranes cellulaires (à des niveaux d'exposition très élevés) diminuent, avec une augmentation possible de la température locale et de la température corporelle centrale, induisant des effets dits thermiques. En outre, il est établi que les CEM peuvent également produire des effets indirects susceptibles d'entraîner des risques pour la sécurité, tels que des courants de contact, des décharges électrostatiques et des interférences électromagnétiques avec des dispositifs médicaux implantés ou provoquant leur échauffement.

Tous ces effets sont bien connus et constituent la base des lignes directrices actuelles en matière d'exposition, établies par des organismes internationaux tels que la Commission internationale de protection contre les rayonnements non ionisants (CIPRNI), qui a compilé les preuves scientifiques relatives aux effets néfastes sur la santé dus à l'exposition aux CEM dans trois publications: l'une consacrée aux champs magnétiques statiques (CIPRNI, 2009), une seconde portant sur la gamme des basses fréquences (1 Hz à 10 MHz) (CIPRNI, 2010), dans laquelle les champs électrique et magnétique doivent être traités séparément car ils ne sont pas couplés dans un seul champ électromagnétique comme c'est le cas dans le champ lointain, les travailleurs opérant le plus souvent à une distance ne relevant pas encore du champ lointain, et une troisième relative à la gamme comprise entre 100 kHz et 300 GHz (CIPRNI, 2020). Sur la base de ces données scientifiques, la CIPRNI a établi des limites d'exposition appelées restrictions de base et niveaux de référence. Les niveaux de référence sont dérivés des restrictions de base et offrent une classe de protection équivalente, mais sont beaucoup plus simples à évaluer sur les lieux de travail. Il convient de noter que les limites d'exposition sont définies par fréquence (bande), et que la CIPRNI prévoit une méthode de pondération pour l'exposition simultanée à plusieurs sources situées à un même endroit, qu'elles relèvent de la même bande de fréquence ou d'autres bandes. Afin de tenir compte des incertitudes scientifiques (y compris de la variabilité de la physiologie thermique au sein de la population, des niveaux d'activité physique et des conditions environnementales), des facteurs de réduction supplémentaires ont été appliqués aux restrictions de base, qui sont cinq fois moins élevés pour l'exposition professionnelle que pour le grand public, ce dernier étant considéré comme présentant une plus grande variabilité en matière d'âge et d'état de santé, et étant moins conscient ou moins en mesure de contrôler les risques potentiels (CIPRNI, 2020). Le respect des niveaux de référence et/ou des restrictions de base de la CIPRNI est considéré comme suffisant pour protéger contre les effets néfastes établis sur la santé.

En outre, les orientations et la législation de l'UE concernant l'exposition aux CEM reposent sur les lignes directrices de la CIPRNI et comprennent la recommandation du Conseil de 1999 (1999/519/CE)

relative à la limitation de l'exposition du public aux champs électromagnétiques et la directive 2013/35/UE de 2013 relative à l'exposition professionnelle, mise en œuvre dans tous les États membres depuis 2017, avec certaines variations nationales.

Plusieurs études (par exemple, Rijs et Stam, 2019) ont étudié les liens possibles entre l'exposition prolongée aux CEM et divers problèmes de santé, notamment le cancer, les problèmes de reproduction, les retards de développement et les troubles neurodégénératifs. Cependant, malgré de nombreuses recherches, les preuves scientifiques restent toutefois peu concluantes, certaines études indiquant une association mais aucune relation causale scientifiquement prouvée, telle que des réponses dose-effet, tandis que d'autres n'observent aucun lien significatif (CIPRNI, 2020).

Exposition aux CEM sur le lieu de travail

La CE a fourni des informations détaillées afin d'aider les employeurs à comprendre ce qu'ils doivent faire pour se conformer à la directive 2013/35/UE, au moyen de trois guides pratiques non contraignants (CE, 2015a; 2015b; 2015c), ciblant les environnements de travail susceptibles de présenter des CEM d'intensité élevée. En outre, plusieurs matrices source-exposition et emploi-exposition existent à des fins de référence (Vila et al., 2017; Migault et al., 2019). Toutefois, les nouveaux développements des applications CEM décrits ci-dessus pourraient conduire à une exposition supplémentaire, accrue ou modifiée aux CEM dans les environnements professionnels, comme suit.

- La densification des réseaux de téléphonie mobile (c'est-à-dire davantage d'antennes de stations de base par unité de surface) fait qu'un nombre plus élevé de personnes travaillent plus près qu'auparavant des antennes de télécommunication, en particulier lorsque des stations de base de type petites cellules sont déployées. Cela vaut de manière générale (par exemple, pour les couvreurs et les électriciens), mais plus particulièrement pour les lieux de travail disposant de leurs propres réseaux sans fil (c'est-à-dire des réseaux mobiles, Wi-Fi et/ou de capteurs privés/d'entreprise), surtout lorsque le nombre d'appareils sans fil et de capteurs (personnels) augmente dans ces environnements de travail. Les capteurs portés sur le corps (par exemple, pour surveiller l'exposition à des fins de santé personnelle), en particulier, pourraient augmenter l'exposition des travailleurs aux CEM, de manière localisée toutefois (c'est-à-dire limitée à la zone du corps où le capteur est appliqué). Ces innovations technologiques devraient devenir omniprésentes et ne pas être liées à un secteur spécifique.
- La présence accrue de systèmes WPT (à grande échelle) pourrait accroître l'exposition aux CEM à des fréquences dépendant de la technologie (voir section 3) dans les secteurs du transport et de la logistique (par exemple, les conducteurs d'autobus et de camions). Cela s'applique également aux lieux de travail où des outils personnels et des robots/UAV sont rechargés sans fil sur des plateformes similaires à celles utilisées pour les téléphones mobiles, mais de plus grande taille, plutôt que par contact avec des broches.
- L'électrification pourrait accroître l'exposition aux champs magnétiques à basse fréquence (provenant de lignes à haute tension, d'onduleurs et de procédés de chauffage industriel, tels que le chauffage par induction) (CSRSEE, 2023b).
- Avec l'augmentation du nombre d'applications CEM dans le secteur médical, davantage de membres du personnel médical (y compris le personnel non technique) pourraient être exposés à des CEM dans une large gamme de fréquences (Stam et Yamaguchi-Sekino, 2017; Turuban, 2023).
- L'utilisation de fréquences toujours plus élevées (non seulement dans les réseaux de téléphonie mobile, mais aussi dans les applications médicales et de scanners de sécurité) pourrait entraîner des expositions localisées, mais superficielles, dont les risques ne sont pas encore clairement établis.

Prévention des risques liés aux CEM en matière de SST

En vertu de la directive 2013/35/UE, les employeurs sont tenus d'évaluer l'ensemble des risques découlant des expositions aux CEM sur le lieu de travail et de mettre en place des mesures de prévention adéquates. Ils doivent notamment veiller au respect des niveaux limites fixés par la directive. Pour ce faire, ils s'appuient dans un premier temps sur des informations facilement accessibles: les spécifications communiquées par le fabricant (par exemple, indiquant si l'application concernée répond

aux exigences de la législation européenne relative aux produits, qui peut imposer des niveaux de sécurité plus stricts que ceux prévus par la directive 2013/35/UE), les matrices source-exposition et emploi-exposition (Vila et al., 2017; Migault et al., 2019), les études de synthèse, et/ou les guides pratiques publiés par l'UE, les institutions nationales et les organismes de normalisation. Par exemple, les documents (CE, 2015a; 2015b) contiennent des listes d'équipements et de lieux de travail pouvant nécessiter des **évaluations spécifiques des risques**. Ils fournissent également des orientations concernant l'évaluation des risques liés aux CEM pour les travailleurs exposés à des risques particuliers, tels que ceux porteurs de dispositifs médicaux actifs, notamment des stimulateurs cardiaques (Modenese et Gobba, 2021). Toutefois, ces informations peuvent s'avérer insuffisantes pour déterminer si les valeurs limites d'exposition seront respectées dans le cas de nouvelles applications CEM et des risques SST qui leur sont associés. Dans ce cas, des mesures *in situ* ou des calculs dosimétriques doivent être réalisés et comparés aux limites légales, en tenant compte de toutes les incertitudes qui leur sont inhérentes.

Si les niveaux limites sont dépassés, des mesures de protection et de prévention doivent être mises en place (des exemples sont fournis dans [CE, 2015a; 2015b]). Étant donné que l'intensité des CEM diminue rapidement à mesure que la distance par rapport à la source augmente, la mesure de réduction de l'exposition la plus efficace consiste à accroître la distance entre la source et le travailleur. Un tel résultat peut être obtenu à l'aide de mesures techniques et organisationnelles telles que des barrières, une signalisation ou des consignes de travail. En outre, le blindage constitue une mesure efficace pour toutes les formes de CEM, à l'exception des champs magnétiques de basse fréquence. Les documents d'orientation de la CE (CE, 2015a) contiennent également des informations en matière de réduction de l'exposition aux CEM, notamment des mesures de conception des postes de travail et des dispositions concernant l'équipement et les méthodes de travail. Par exemple, les bobines, les transformateurs et les plateformes de charge sans fil devraient être conçus de manière à ne pas présenter de danger lorsqu'ils sont installés à distance des postes de travail. Il ne devrait pas être possible de se tenir directement devant des antennes émettrices.

Lacunes, besoins, priorités et recommandations concernant les CEM et la SST

Recherche scientifique

Il convient de noter l'absence générale d'études concernant les effets sur la santé et l'intensité d'exposition aux CEM:

1. aux fréquences utilisées dans les technologies émergentes de communication mobile (c'est-à-dire entre 6 et 300 GHz);
2. aux fréquences intermédiaires utilisées pour le transfert de puissance sans fil;
3. aux fréquences (sub-)térahertz utilisées dans les nouvelles technologies d'imagerie et de balayage (et dont l'utilisation est attendue avec la 6G). Les lacunes les plus importantes en matière de recherche concernent les points suivants:
 - a. les niveaux d'exposition, en particulier dans les professions utilisant des équipements générant des champs magnétiques, électriques ou électromagnétiques potentiellement élevés (Turuban, 2023);
 - b. les effets potentiels sur la santé (et les mécanismes d'interaction biologique potentiels) (Jeschke, 2022);
 - c. l'exposition cumulative à long terme aux CEM dans les environnements professionnels (Hansson Mild, 2023); et
 - d. la mesure d'exposition la plus pertinente (Turuban, 2023).

En outre, les effets sensoriels et sur la santé dus à l'exposition aux CEM peuvent varier considérablement d'un travailleur à l'autre. L'exposition aux CEM est influencée par divers facteurs personnels et environnementaux, parmi lesquels:

- les caractéristiques personnelles: anatomie, caractéristiques corporelles, présence d'implants ou de piercings, prise de médicaments;

- la posture de travail: position et mouvements du corps pendant le travail;
- l'environnement de travail:
 - matériaux de construction: le béton peut atténuer et partiellement bloquer les CEM RF grâce aux armatures métalliques, tandis que le bois offre une protection;
 - utilisation d'outils: la manipulation ou l'usage d'outils (Jeschke, 2023) peut influencer les niveaux d'exposition.

Cette variabilité, à la fois chez un même travailleur et d'un travailleur à l'autre, engendre une incertitude considérable dans les études actuelles d'évaluation de l'exposition et dans les matrices d'exposition qui utilisent ces données (Turuban, 2023).

Il est dès lors nécessaire de concevoir des études qui utilisent des scénarios réalistes d'exposition sur le lieu de travail [par exemple, des pics d'exposition élevés suivis de périodes sans exposition (Hansson Mild, 2023) ou des expositions proches des niveaux limites sur des durées de huit heures ou plus (Jeschke, 2022)] et/ou qui collectent des données descriptives et détaillées sur:

- (a) les critères professionnels typiques tels que l'anatomie des travailleurs, les positions et postures de travail, l'activité physique, les environnements difficiles et l'usage d'outils, en particulier ceux qui émettent des CEM (Jeschke, 2022);
- (b) les caractéristiques d'émission des CEM [par exemple, fréquence et modulation des sources professionnelles (Jeschke, 2022)];
- (c) les expositions potentielles tout au long de la vie professionnelle (Hansson Mild, 2023);
- (d) les effets sur la santé autres que ceux déjà connus (par exemple, dus aux effets thermiques dans le cas des CEM RF) (Jeschke, 2022).

De tels types d'études amélioreraient considérablement la compréhension scientifique des niveaux et durées d'exposition aux CEM dans les divers environnements professionnels et pourraient constituer un point de départ plus précis pour des études épidémiologiques sur les effets sur la santé de l'exposition aux CEM, qui à l'heure actuelle tiennent à peine compte de l'exposition professionnelle. Cependant, ce qui est nécessaire, ce sont des données individuelles à long terme sur les niveaux d'exposition professionnelle combinées à d'autres expositions environnementales/professionnelles (pertinentes) (par exemple, via des réseaux de capteurs IDO), afin d'identifier des facteurs de confusion ou des déterminants (Rijs et Stam, 2019; Hansson Mild et al., 2023). Malheureusement, les dispositifs de mesure adaptés, à faible coût, nécessaires à l'acquisition de ces données ne sont (souvent) pas encore disponibles et devront être développés et distribués, en particulier aux personnes (très) exposées.

Politique de l'UE

Étant donné que la CIPRNI a publié en 2020 de nouvelles lignes directrices auxquelles renvoient déjà plusieurs normes techniques (par exemple, IEC 62232:2023 et IEC TR 63377:2022) et que la directive 2013/35/UE repose toujours sur les lignes directrices de 1998, 2009 et 2010, la situation juridique s'est complexifiée. Le Comité scientifique des risques sanitaires, environnementaux et émergents (CSRSEE) a donc récemment «émis un avis favorable sur la nécessité d'une révision technique des annexes de la recommandation 1999/519/CE du Conseil et de la directive 2013/35/UE en ce qui concerne les CEM de radiofréquences (100 kHz à 300 GHz)» (CSRSEE, 2023a). En effet, par rapport aux lignes directrices de 1998, celles de 2020 contiennent également des adaptations pertinentes concernant l'exposition à des sources émergentes de CEM, telles que les télécommunications 5G, sur la base d'expositions brèves et localisées à des fréquences plus élevées (jusqu'à 300 GHz). Il est clair que l'introduction de nouvelles technologies CEM accroît la complexité de l'évaluation de l'exposition aux CEM sur le lieu de travail, ce qui exige des responsables SSE une connaissance de plus en plus détaillée des méthodes de mesure et de modélisation (Jeschke, 2022; Stam, 2022).

Par conséquent, des considérations pratiques pertinentes pour l'évaluation de l'exposition aux CEM sur le lieu de travail, notamment concernant les durées d'exposition pendant les heures de travail sur plusieurs décennies, sont essentielles pour une pratique fiable d'évaluation des risques SST (Jeschke et al., 2022). Ces considérations doivent encore être développées, tout comme les dispositifs de

mesure appropriés, et pourraient être abordées dans les versions mises à jour de la documentation de la CE (CE, 2015a; 2015b; 2015c) ou figurer dans les normes techniques appropriées.

Enfin, il convient de noter que, bien que la CIPRNI (2020) souligne l'importance de la «capacité sensorielle et comportementale» des travailleurs à «être conscients des risques potentiels liés aux CEM RF et à mettre en œuvre des mesures appropriées d'atténuation des dommages», Jeschke et al. (2022) rappellent à juste titre que la directive-cadre de l'UE de 1989 (89/391/CEE) «donne la priorité aux mesures de protection techniques et organisationnelles collectives par rapport aux mesures de protection personnelles (individuelles)». Toutefois, en matière de SST, la réalisation d'évaluations des risques (individuelles) pour les travailleurs exposés à des risques particuliers est obligatoire. Des lignes directrices adéquates sont donc nécessaires et pourraient être facilement étendues à l'ensemble des travailleurs.

Employeurs, travailleurs et experts en SST

Malgré l'existence de matrices d'exposition et de guides pratiques relatifs à l'exposition aux CEM dans les environnements professionnels (y compris les mesures de réduction de l'exposition), les connaissances des travailleurs concernant les sources professionnelles de CEM et l'exposition à celles-ci sont «généralement faibles» (Turuban, 2023). En outre, les travailleurs peuvent ne pas les percevoir comme dangereuses et, par conséquent, ne pas accorder l'attention nécessaire à la prévention, considérant parfois même les mesures de prévention comme contraignantes (Stege, 2022). Afin d'informer plus efficacement les employeurs, les travailleurs et les experts en SST, des capteurs mesurant l'exposition aux CEM (Bhatt et al., 2022) pourraient être fournis par l'employeur afin d'être portés par les travailleurs ou installés dans des environnements présentant des CEM d'intensité élevée. Ces dispositifs portables serviraient de système d'alerte précoce et fourniraient également les données nécessaires aux études scientifiques sur l'exposition professionnelle aux CEM et les effets potentiels sur la santé (voir section 5.1). Les groupes cibles spécifiques qu'il convient de surveiller à l'aide de capteurs à porter sur soi comprennent les travailleurs qui utilisent activement des sources de CEM (par exemple, les kinésithérapeutes et le personnel de sécurité) ou qui travaillent à proximité de ces sources, tels que les électriciens. Plus important encore, ils incluent les travailleurs susceptibles de s'approcher de sources de CEM actives sans en avoir conscience, et donc sans être informés des risques potentiels, tels que les infirmiers ou le personnel de maintenance et de nettoyage. Ce dernier groupe devient de plus en plus important avec l'introduction de réseaux 5G privés et de systèmes WPT.

Bien que les mesures *in situ* soient largement utilisées dans le cadre des évaluations SST liées aux CEM, lorsqu'il existe des raisons de supposer que les niveaux limites sont dépassés, des simulations et des mesures numériques sont nécessaires pour déterminer la conformité aux limites d'exposition, ce qui s'avère particulièrement difficile pour les praticiens SST en raison des coûts et de l'expertise requis (Jeschke, 2022). Par conséquent, il existe une demande pour des règles empiriques permettant un calcul rapide afin de garantir le respect des limites. Plusieurs pays ont d'ores et déjà élaboré de telles lignes directrices; voir, par exemple, Bolte et Pruppers (2006).

Conclusions

Le présent document fournit un aperçu complet des implications des applications émergentes des CEM dans le domaine de la santé et de la sécurité au travail, en mettant en lumière l'omniprésence des CEM dans les environnements de travail modernes en raison des avancées technologiques qui en font des éléments moteurs essentiels de la numérisation du travail et de l'industrie 5.0 (y compris l'automatisation avancée, la robotique, la virtualisation, le travail à distance, les salles de contrôle, etc.).

L'évaluation des risques d'exposition aux CEM est très complexe en raison de la diversité des sources en ce qui concerne la fréquence, l'intensité et l'utilisation, en particulier dans les environnements professionnels, ainsi que de la variété des effets néfastes sur la santé qui leur sont associés. En outre, si les effets aigus d'une exposition à des CEM de forte intensité aux fréquences actuellement utilisées sont bien compris, des controverses et des lacunes subsistent en ce qui concerne les effets à long terme des expositions de faible intensité et l'utilisation future de fréquences de plus en plus élevées. Par conséquent, les normes réglementaires et les lignes directrices (pratiques) visant à protéger les travailleurs doivent être continuellement mises à jour sur la base des recherches les plus récentes. À cette fin, il est vivement recommandé de procéder à une surveillance à long terme des niveaux d'exposition aux CEM sur les lieux de travail, dans les bandes de fréquences pertinentes, au moyen de capteurs fixes et portables et en combinaison avec les paramètres de santé des travailleurs.

En résumé, une approche multidisciplinaire de l'évaluation de l'exposition aux CEM et de la prévention des risques est nécessaire, impliquant des recherches propres à chaque profession, une adaptation continue des politiques et une communication efficace entre les parties prenantes chargées de la SST, afin de garantir la santé et la sécurité des travailleurs dans un environnement de plus en plus connecté et alimenté sans fil.

Remerciements

Nous tenons à remercier Rianne Stam (Institut national pour la santé publique et l'environnement des Pays-Bas – RIVM), Stefania Marassi (droit, THUAS), ainsi qu'Emanuelle Brun et Annick Starren (EU-OSHA) pour leur relecture critique et leurs échanges fructueux.

Références

- Amini, T., Jahangiri, F., Ameri, Z., et Hemmatian, M. A. (2021). A review of feasible applications of THz waves in medical diagnostics and treatments. *Journal of Lasers in Medical Sciences*, 12, e92.
- Bhatt CR, Henderson S, Brzozek C, Benke G. (2022) Instruments to measure environmental and personal radiofrequency-electromagnetic field exposures: An update. *Physical and Engineering Sciences in Medicine*, 45(3), 687-704. <https://link.springer.com/article/10.1007/s13246-022-01146-y>
- Bolte, J.F.B. et Pruppers, M.J.M., 2006. Electromagnetic fields in the working environment (juin 2006). SZW-report RIVM-nr 610015001, Ministry of Social Affairs and Employment (SZW) / National Institute for Public Health and the Environment (RIVM). <https://www.rivm.nl/bibliotheek/rapporten/610015001.pdf>
- Billings, C., Langley, M., Warrington, G., Mashali, F. et Johnson, J. A. (2021). Magnetic particle imaging: Current and future applications, magnetic nanoparticle synthesis methods and safety measures. *International Journal of Molecular Sciences*, 22.
- Cardillo, E., et Caddemi, A. (2020). A review on biomedical MIMO radars for vital sign detection and human localization. *Electronics*, 9(9), Article 9.
- De Waard-Schalkx, I., Stam, R., van der Schaaf, M. et Bijwaard, H. (2015). Recent developments in medical techniques involving ionising or non-ionising radiation: Update 2014. *RIVM Report 2014-0070*, Bilthoven, National Institute for Public Health and the Environment.
- EU-OSHA – Agence européenne pour la sécurité et la santé au travail. (2023). *Note d'orientation: Systèmes de surveillance numériques intelligents pour la sécurité et la santé au travail: opportunités et défis*. <https://osha.europa.eu/en/publications/smart-digital-monitoring-systems-occupational-safety-and-health-opportunities-and-challenges>.
- Commission européenne (CE). (2021). *Communication de la Commission au Parlement européen, au Conseil, au Comité économique et social européen et au Comité des régions – Cadre stratégique de l'Union européenne en matière de santé et de sécurité au travail pour la période 2021-2027 – Santé et sécurité au travail dans un monde du travail en mutation*. COM(2021) 323 final. Consulté sur <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/HTML/?uri=CELEX%3A52021DC0323>
- Commission européenne (CE), direction générale de l'emploi, des affaires sociales et de l'inclusion. (2015a). *Guide non contraignant de bonnes pratiques pour la mise en œuvre de la directive 2013/35/UE champs électromagnétiques. Volume 1, Guide pratique*. Bruxelles, Belgique.
- Commission européenne (CE), direction générale de l'emploi, des affaires sociales et de l'inclusion. (2015b). *Guide non contraignant de bonnes pratiques pour la mise en œuvre de la directive 2013/35/UE champs électromagnétiques. Volume 2, Études de cas*. Bruxelles, Belgique.
- Commission européenne (CE), direction générale de l'emploi, des affaires sociales et de l'inclusion. (2015c). *Guide non contraignant de bonnes pratiques pour la mise en œuvre de la directive 2013/35/UE champs électromagnétiques. Volume 3, Guide à l'intention des PME*. Bruxelles, Belgique.

- Commission européenne (CE) (2022). Industry 5.0: A Transformative Vision for Europe - ESIR Policy Brief No. 3. Office des publications de l'Union européenne, ISBN 978-92-76-43352-1.
- Institut européen de normalisation des télécommunications (ETSI). (2019). *ETSI TR 103 493 V1.1.1.: System Reference document (SRdoc); Wireless Power Transmission (WPT) systems operating below 30 MHz*. Sophia Antipolis Cedex, France.
- Hansson Mild K, Mattsson MO, Jeschke P, Israel M, Ivanova M, et Shalamanova T. (2023). *Occupational exposure to electromagnetic fields—Different from general public exposure and laboratory studies*. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 20(16), 6552.
- Union internationale des télécommunications (UIT). (2020). *Radio Regulations Articles: Edition of 2020*.
- Union internationale des télécommunications (UIT). (2021). *Executive report ITU regional assessment for Europe on EMF exposure limits and risk communication challenges*.
- Jeschke, P., Alteköster, C., Hansson Mild, K., Israel, M., Ivanova, M., Schiessl, K., Shalamanova, T., Soyka, F., Stam, R., et Wilén, J. (2022). Protection of workers exposed to radiofrequency electromagnetic fields: A perspective on open questions in the context of the new ICNIRP 2020 guidelines. *Frontiers in Public Health*, 10.
- Migault, L., Bowman, J. D., Kromhout, H., Figuerola, J., Baldi, I., Bouvier, G., Turner, M. C., Cardis, E., et Vila, J. (2019). Development of a job-exposure matrix for assessment of occupational exposure to high-frequency electromagnetic fields (3 kHz–300 GHz). *Annals of Work Exposures and Health*, 63(9), 1013–1028.
- Modenese, A., et Gobba, F. (2021). Occupational exposure to electromagnetic fields and health surveillance according to the European Directive 2013/35/EU. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(4), 1730.
- Rijs KJ et Stam R. (2019). Onderzoek naar mogelijke langetermijneffecten van elektromagnetische velden op de gezondheid van werknemers – update 2019 [Research into possible long-term effects of electromagnetic fields on the health of workers – update 2019]. *RIVM Report 2019-0010*. Bilthoven: RIVM.
- Comité scientifique des risques sanitaires, environnementaux et émergents (CSRSEE). (2023a). *Opinion on the need of a revision of the annexes in the Council Recommendation 1999/519/EC and Directive 2013/35/EU, in view of the latest scientific evidence available with regard to radiofrequency (100kHz - 300GHz)*.
- Comité scientifique des risques sanitaires, environnementaux et émergents (CSRSEE). (2023b). *Potential health effects of exposure to electromagnetic fields (EMF): 14 Update with regard to frequencies between 1Hz and 100 kHz*.
- Stam, R., et Yamaguchi-Sekino, S. (2018). Occupational exposure to electromagnetic fields from medical sources. *Industrial Health*, 56(2), 96–105. <https://doi.org/10/g8hwgs>
- Stam, R. (2021). Occupational exposure to radiofrequency electromagnetic fields. *Industrial Health*, 60(3), 201–215.
- Stam, R. (2022) Bronnen van blootstelling van werknemers aan elektromagnetische velden: Nieuwe ontwikkelingen [Sources of worker exposure to electromagnetic fields: New developments]. *RIVM-briefrapport 2022-0109*. Bilthoven: RIVM.
- Stege, T. A. M., Bolte, J. F. B., Claassen, L., et Timmermans, D. R. M. (2020). Electromagnetic field exposure in power plants: A qualitative assessment of work safety perceptions among employees. *Journal of Risk Research*, 23(12), 1650–1660.
- Stege, T. A. M. (2022). *Development of risk communication tools for occupational exposures*. (PhD-thesis) Amsterdam Free University (VU) and National Institute for Public Health and the Environment of the Netherlands (RIVM), The Netherlands, advisors D.R.M. Timmermans, L., Claassen, J.F.B. Bolte, ISBN 978-94-6421-796-4. Consulté sur: <https://research.vu.nl/en/publications/development-of-risk-communication-tools-for-occupational-exposure>

- Turuban, M., Kromhout, H., Vila, J., Vallbona-Vistós, M., Baldi, I., et Turner, M. C. (2023). Personal exposure to radiofrequency electromagnetic fields in various occupations in Spain and France. *Environment International*, 180, 108156.
- Vila, J., Bowman, J. D., Figuerola, J., Moriña, D., Kincl, L., Richardson, L., et Cardis, E. (2017). Development of a source-exposure matrix for occupational exposure assessment of electromagnetic fields in the INTEROCC study. *Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology*, 27(4), 398–408.

Auteurs: Sam Aerts, John Bolte.

Smart Sensor Systems research group, Faculty Technology, Innovation & Society, The Hague University of Applied Sciences (THUAS), the Netherlands.

Direction de projet: Annick Starren, Emmanuelle Brun, Agence européenne pour la sécurité et la santé au travail (EU-OSHA).

Le présent document de réflexion a été commandé par l'EU-OSHA. Son contenu, y compris les avis et conclusions qui peuvent y être exprimés, n'engage que ses auteurs et ne reflète pas nécessairement l'opinion de l'EU-OSHA.

Ni l'EU-OSHA ni aucune autre personne agissant pour le compte de cette agence n'est responsable de l'utilisation qui pourrait être faite des informations suivantes.

© Agence européenne pour la sécurité et la santé au travail, 2026

Reproduction autorisée, moyennant mention de la source.

Toute utilisation ou reproduction de photographies ou d'autres éléments qui n'appartiennent pas à l'EU-OSHA doit faire l'objet d'une demande d'autorisation directement adressée au titulaire des droits d'auteur.