

Bruxelles Environnement



Rapport 2025 du comité d'experts des radiations non-ionisantes

Président : Prof. Isabelle Lagroye

Membres : Ir. Véronique Beauvois, Prof. Michele Cincera, Ir. David Erzeel, Prof. Daniel R. Kattnig, Prof. Jérôme Louveaux, Prof. Sofie Pollin, Prof. François Rottenberg, Dr. Muriel Sacco, Dr. Brahim Selmaoui

Table des matières

1.	Évaluation de l'application de l'ordonnance	4
1.1.	Application générale des aspects techniques	4
1.2	Drive Test.....	5
1.3	Simulations vs. Mesures	6
1.4	Efforts visant à diffuser l'information au public.....	6
2.	État d'avancement et calendrier de la 6G.....	7
3.	Rapport de l'ANSES « Radiofréquences et cancer ».....	9
3.1.	Revue systématique commandées par l'OMS	11
3.1.1.	La cognition chez l'homme et les symptômes non spécifiques	12
3.1.2	Revue systématique du lien entre l'exposition aux RF et la fertilité.....	13
3.1.3	Revue systématique relative au cancer	15
3.1.4	Revue systématique relative au stress oxydatif	16
3.2.	Conclusion.....	16
	Bibliographie.....	17
4.	La situation en matière de 5G en Belgique en 2025	20
4.1	Taille du marché belge (2024-2025).....	20
4.2	Opérateurs et trajectoire du réseau.....	21
4.3.	Canaux macroéconomiques et synthèse contextuelle.....	21
4.4	Faire évoluer la politique vers la performance : canaux macroéconomiques et effets au niveau des entreprises	22
4.5	Note de sécurité : drones et réseaux radio	24
4.6.	Indicateurs en matière de politique et d'investissement pour 2025	24
	Références	25
5.	Déchets de la 6G.....	27
	Conclusion	30
	Références	30
6.	Consommation d'énergie du réseau 5G.....	33
6.1	Études sur la consommation d'énergie des réseaux existants	33
6.2.	Littérature sur l'évolution des réseaux 4G vers les réseaux 5G.....	36
6.3.	Discussion.....	38
6.3.1.	Réseau central et centres de données	38
6.3.2.	Appareils des utilisateurs.....	39
6.3.3.	Énergie intrinsèque.....	39
6.3.4.	Trafic de données et choix de déploiement	39
6.3.5.	Effets rebond	40

6.3.6 Caractéristiques d'économie d'énergie	40
6.3.7 Impact des politiques	41
6.4. Conclusions	42
Bibliographie.....	42
7. Commentaires sur les effets des champs électromagnétiques de radiofréquence associés à la technologie de cinquième génération sur la flore et la faune	45
7.1. À propos des conditions d'exposition modifiées des animaux.....	46
7.2. Mécanismes d'interaction sensorielle spécifiques qui influencent la sensibilité aux CEM-RF. 47	
7.3 À propos des effets non sensoriels des champs électromagnétiques des radiofréquences	48
7.4. À propos des résultats récents sur les insectes	51
7.5. Recommandation générale.....	52
7.6. Commentaires et recommandations sur les lignes directrices synthétisées pour l'installation d'antennes EM dans les zones Natura 2000	54
Bibliographie.....	55

1. Évaluation de l'application de l'ordonnance

1.1. Application générale des aspects techniques

L'Administration Bruxelles Environnement se conforme à l'ordonnance relative à la protection de l'environnement contre les effets potentiellement nocifs et les nuisances causés par les rayonnements non ionisants et met en œuvre toutes les mesures techniques et administratives nécessaires pour s'assurer de son application effective. Notre rapport souligne les points forts de cette mise en œuvre et contient quelques remarques destinées à contribuer au processus d'amélioration continue de l'application de cette ordonnance.

Cette ordonnance, initialement adoptée en 2007, a été modifiée en 2023 afin de tenir compte du déploiement de la cinquième génération de téléphonie mobile (5G).

Les principaux changements apportés concernent l'ajustement à la hausse des limites d'exposition et l'inclusion des émissions générées par les antennes de radio et de télévision. Il en résulte une limite plus stricte de 9,19 V/m (équivalent à 900 MHz) en intérieur et de 14,57 V/m en extérieur.

Le comité d'experts sur les radiations non ionisantes a évalué la méthode de mesure des rayonnements non ionisants sur la base de divers documents fournis par l'administration, notamment le rapport annuel du département « Technologies et rayonnements » et du service « Rayonnements électromagnétiques et trafic aérien » de Bruxelles Environnement. Dans ce rapport, la répartition des émetteurs par technologie montre que les principales technologies actuellement utilisées sont la 4G+, la 4G, la 3G et la 2G. L'activation de la 5G avance progressivement et on s'attend à ce qu'en 2025 le nombre des autorisations augmente.

Bruxelles Environnement a lancé le « Projet Diagrammes » dont le but est d'améliorer les simulations électromagnétiques, qui devraient mieux refléter toutes les conditions opérationnelles potentielles. Nos commentaires seront repris dans le prochain rapport annuel, car ce projet est encore en cours d'élaboration au sein de Bruxelles Environnement. À ce sujet, le comité attend des informations supplémentaires qui devraient figurer dans le prochain rapport annuel de l'administration.

Certaines définitions et certains termes utilisés dans le rapport du département sont ambigus (notamment la définition d'« antenne active » ou d'« émetteur actif »). Après avoir reçu des précisions supplémentaires du département, ces définitions ont pu être clarifiées. Le comité recommande que, dans les futurs rapports du département, les termes utilisés soient clairement définis.

Le comité a demandé au département des éclaircissements concernant l'effet de saturation observé en raison du déploiement de la 5G, similaire à la situation avant la fixation des nouvelles limites (passage de 6 V/m à 9,19 V/m). Le comité a estimé que la réponse du département était satisfaisante.

Le comité a également soulevé une question relative à l'étalonnage utilisé pour les mesures. Le département a fourni des informations sur l'étalonnage de l'analyseur de spectre, qui est effectué une fois par an, conformément au décret sur les mesures (article 6, § 2). Le comité juge la réponse satisfaisante et recommande que l'année prochaine, les certificats d'étalonnage soient fournis avec le rapport annuel.

Le comité a posé une question au département concernant la durée des mesures concernant les durées rapportées de 6 minutes et de 2 minutes par opérateur. Le comité a reçu de plus amples informations du département et a estimé la réponse satisfaisante. Le décret actuel sur les mesures stipule que chaque technologie est mesurée pendant au moins 2 minutes, ce qui correspond à la durée de mesure actuellement appliquée pour chaque opérateur et pour chaque technologie (2G, 3G, 4G et 5G). Un projet est en cours pour mettre à jour le décret sur les mesures et porter la durée à 6 minutes. Le comité soutient fortement cette mise à jour.

Le comité a également soulevé certaines questions concernant la mise en œuvre des fonctions de contrôle de puissance (Power Control Functions (PCF) utilisées pour évaluer le rayonnement des technologies d'antennes actives 5G (MIMO massif). Le département a répondu de manière satisfaisante à ces questions. Qui plus est, des tests inopinés sont également effectués à proximité des sites 5G. Ces tests permettent de vérifier « 1) tout dépassement de la norme, 2) la correspondance avec les résultats des simulations et 3) l'activation correcte des PCF en demandant les compteurs d'antennes aux opérateurs ». Le rapport sur ces tests sera communiqué au comité dans le prochain rapport annuel.

1.2 Drive Test

Le comité a aussi évalué le deuxième rapport du Drive test « *Rapport Drive Test 2024 - EN.pdf* ». Le comité apprécie ce rapport qui fournit des données utiles pour vérifier le respect de l'ordonnance. Nous notons toutefois plusieurs points d'attention susceptibles d'être améliorés.

Le comité avait noté une incohérence entre la plage de mesures et l'antenne mentionnée. Bruxelles Environnement a apporté des éclaircissements en corrigeant l'antenne et en rassurant le comité sur une fonction de l'appareil de mesure qui permet de détecter ce type d'incohérence. Le comité rappelle néanmoins à l'administration de rester vigilante.

Le rapport pourrait préciser le nombre de réalisations liées à un site physique.

Si elle était fournie, la définition des valeurs aberrantes permettrait d'améliorer leur interprétation dans les figures.

Le comité apprécie l'ajout des simulations à côté des mesures pour en permettre la comparaison. Bien qu'il s'agisse d'une évolution positive, un certain nombre d'aspects peuvent encore être améliorés :

- L'outil exact utilisé pour cette simulation pourrait être précisé.
- Le rapport fait état de la nature « worst case » (pire scénario) des simulations, qui se situent le plus souvent à des niveaux supérieurs aux intensités de champ mesurées correspondantes. Cela requiert d'être nuancé et d'être consolidé (quantitativement) sur la base d'une étude statistique. Plus particulièrement, les quatre intensités de champ les plus élevées mesurées ont toutes été sous-estimées dans les simulations. Un échantillonnage différent du site

physique pour s'assurer que la simulation fournisse les performances « worst-case » est présenté au point suivant.

- Le rapport mentionne que « La première étape du prétraitement des données du Drive Test est le repositionnement des points par rapport au milieu de la route. Cette étape permet de compenser l'inexactitude potentielle des relevés GPS, qui peut être significative. » Une autre approche de prétraitement consisterait à considérer un "cloud" (nuage) de points proches du milieu de la route et à prendre l'exposition la plus défavorable. Cette approche serait plus « prudente », car il est plus sûr de surestimer que de sous-estimer l'exposition. Cet échantillonnage amélioré pourrait contribuer à résoudre les artefacts et les effets spéciaux dus aux composants multivoies, aux obstructions ou à d'autres facteurs susceptibles de générer un écart entre les mesures et les prévisions, et surtout à éviter les cas où l'exposition est sous-estimée.

Enfin, le comité apprécie que le tableau des incertitudes de mesure soit désormais fourni jusqu'à 6 GHz, ce qui répond aux commentaires formulés précédemment par le comité.

1.3 Simulations vs. Mesures

Le comité estime que les améliorations apportées aux calculs effectués par le logiciel de simulation pourraient être décrites de manière plus détaillée.

1.4 Efforts visant à diffuser l'information au public

Le comité note que l'administration poursuit ses efforts pour mettre à jour et améliorer le site web afin de diffuser des informations sur les radiations non ionisantes à un public le plus large possible. Le comité identifie également quelques domaines à améliorer.

La composition du COMEX doit être mise à jour (au moment de la rédaction du présent rapport, sa dernière mise à jour remontait au 03/09/2025).

Nous réitérons la remarque formulée l'année dernière concernant la nécessité d'informer le public sur les bandes de fréquences « Broadcast ».

La majorité des informations contenues dans le rapport du département concernant ces aspects semblent remonter à 2023 et ont déjà été présentées dans un rapport précédent. Le comité préférerait que le rapport ne contienne que les mises à jour et les modifications par rapport au précédent.

2. État d'avancement et calendrier de la 6G

Le développement de l'IMT-2030, souvent appelé 6G, a été officiellement lancé avec l'adoption de la recommandation UIT-R M.2160, qui définit le cadre et les objectifs généraux de la 6G¹. Ce document définit la vision, les indicateurs de performance et les cas d'utilisation qui devraient façonner la prochaine génération de technologie mobile. Ce cadre prévoit les étapes suivantes dans le processus vers l'IMT-2030 :

- Définition des spécifications et des exigences (phase jusqu'en 2027).
- Élaboration d'une norme et de spécifications techniques (phase jusqu'en 2030)
- Déploiement et amélioration de la norme (à partir de 2030)

L'UIT entrevoit six cas d'utilisation de la 6G, illustrés dans la Figure 2.1. Trois d'entre eux sont une extension des scénarios 5G existants et se concentrent sur les débits de données élevés pour la communication immersive (eMBB), la communication avec un grand nombre de petits capteurs (mMTC) et la communication ultra-fiable à faible latence pour les applications robotiques.

De plus, la 6G offre également trois nouveaux cas et tendances d'utilisation : l'utilisation de réseaux de communication pour la localisation et la conscience de l'environnement, l'intégration de l'intelligence artificielle et enfin la couverture, partout où c'est possible, grâce à l'utilisation de réseaux de communication par satellite, par exemple.

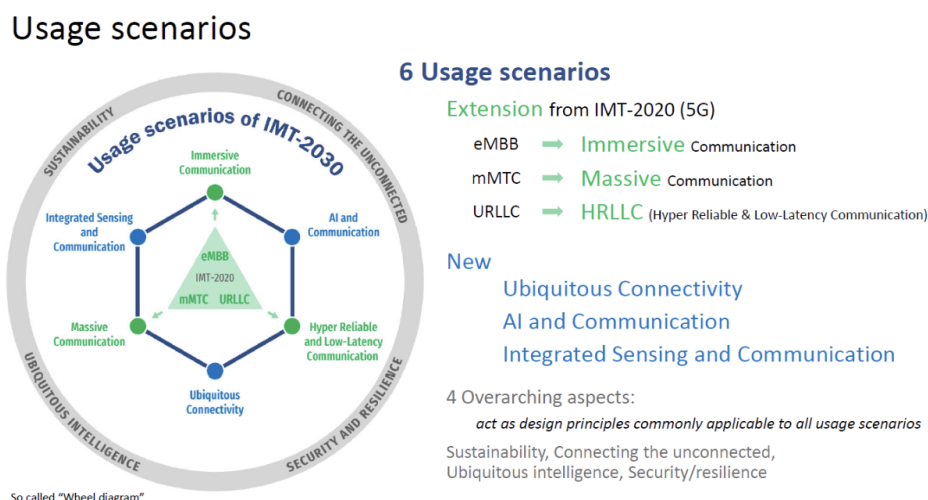


Figure 2.1 : l'IMT-2030 entrevoit 6 cas d'utilisation de la 6G. [2]

Actuellement, l'accent est mis sur l'optimisation des spécifications, des exigences et des critères techniques pour les technologies candidates. Selon le cadre IMT-2030, des capacités nettement plus élevées sont recherchées : des vitesses de pointe pouvant atteindre 50 à 200 Gb/s, des latences inférieures à 1 ms, une densité de connexion extrêmement élevée et des fonctionnalités intégrées

¹ UIT-R M.2160 – Cadre et objectifs généraux du développement futur de l'IMT-2030.

² <https://www.itu.int/en/ITU-R/study-groups/rsg5/rwp5d/imt-2030/pages/default.aspx> [accessed Nov 16 2025]

comme, par exemple, la détection ambiante et la gestion de réseau basée sur l'IA³. Ces objectifs témoignent de l'ambition de considérer la 6G non seulement comme une technologie mobile plus rapide, mais aussi comme une plateforme qui rassemble la communication, la détection et l'intelligence.

Les systèmes 6G n'en sont encore qu'au début de leur développement. Mais malgré cela, ils nécessitent une action proactive de la part des gouvernements et des décideurs politiques afin d'en comprendre les avantages, les défis et les implications générales. Dans cet environnement en mutation rapide, il est logique de se concentrer sur l'anticipation des développements futurs pour maximiser les avantages de la 6G et minimiser les risques.

Au niveau mondial, trouver un consensus entre les pays sur l'attribution des fréquences peut s'avérer difficile. Cette difficulté souligne l'importance des discussions en cours relatives au point 1.7 à l'ordre du jour de la CMR-27 (UIT-R 2024b). ⁴

³ Rapport IUT-R M.2516 (UIT-R 2022).

⁴Point 1.7 de l'ordre du jour de la CMR-27 : « examiner les études sur le partage et la compatibilité et élaborer les conditions techniques pour l'utilisation des télécommunications mobiles internationales (IMT) dans les bandes de fréquences 4,4-4,8 GHz, 7,125-8,4 GHz (ou parties de celles-ci) et 14,8-15,35 GHz, en tenant compte des services primaires existants fonctionnant dans ces bandes de fréquences et dans les bandes adjacentes, conformément à la Résolution 256 (CMR-23) ».

3. Rapport de l'ANSES « Radiofréquences et cancer »

Le 30 septembre 2024, l'ANSES, agence nationale française de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail, a mis en consultation publique son rapport « Radiofréquences et cancer ».

Ce rapport de 364 pages répond à la Saisine n° 2016-SA-0176 « radiofréquences et cancer » est le résultat d'une revue systématique sur les articles publiés entre janvier 2013 et septembre 2021 et une recherche complémentaire des données épidémiologiques publiées jusqu'en 2024. Ceci a permis d'inclure les articles issus des études MobiKids (Castano-Vinyals et al., 2022), UK Biobanks (Zhang et al., 2023) et COSMOS (Feychting et al., 2024).

Les bases de données principales consultées sont Pubmed, Scopus et EMF-Portal. Sur les 4877 articles ainsi identifiés, 232 études de bonne qualité ou présentant des limites méthodologiques mineures ont été évaluées.

L'analyse des effets cancérigènes des radiofréquences est faite de façon exhaustive sur la base des niveaux de preuve, pour chaque organe, en considérant les études épidémiologiques et expérimentales, ces dernières rassemblant les études animales et les études cellulaires ou portant sur les mécanismes.

Le niveau de preuve est issu de l'analyse globale des éléments de preuve (suffisant, limité, non conclusif, absence de données ou absence de données de qualité) pour les approches épidémiologiques et expérimentales et pour chaque organe ou système physiologique. Ainsi, l'analyse peut conclure à :

- Un effet cancérigène avéré des radiofréquences chez l'Humain,
- Un effet cancérigène probable des radiofréquences chez l'Humain,
- Un effet cancérigène possible des radiofréquences chez l'Humain,
- Il n'est pas possible de conclure à l'existence d'un effet cancérigène ou à l'absence d'un effet cancérigène des radiofréquences chez l'humain.

Les cancers considérés dans ce rapport ANSES sont les cancers de la tête (y compris les cancers cérébraux) et du cou, du sang et du plasma, du système immunitaire, du système endocrinien, du système cardiovasculaire, du système pulmonaire, du système digestif, du foie, des seins/glandes mammaires, des reins, du système urinaire et de la vessie, du système reproducteur (chez les 2 sexes), de la peau, des os, des muscles et des nerfs (hors système nerveux central). Les cancers pendant le développement ont également été analysés.

Globalement⁵, le groupe d'experts conclut que « quels que soient la localisation tumorale ou les systèmes biologiques analysés dans le présent rapport, les données disponibles **ne permettent pas de**

⁵ On note, dans le rapport, l'avis contradictoire d'un des 13 membres du groupe d'experts.

conclure à l'existence ou à l'absence d'effets cancérogènes. Cette réponse s'applique également à la question globale d'un effet cancérogène chez l'humain ».

Concernant les cancers cérébraux, le groupe d'experts a estimé que les éléments de preuve analysés **ne permettent pas de conclure à l'existence ou à l'absence d'un effet cancérogène des radiofréquences**

- dans le cerveau chez l'humain pour l'ensemble des tumeurs cérébrales
- dans le cerveau chez l'animal.
- sur l'induction d'un ensemble de mécanismes impliqués dans la cancérogenèse des tumeurs cérébrales dans les modèles humains.

En conclusion, pour les auteurs du rapport, « **Les données disponibles ne permettent pas de conclure à l'existence ou à l'absence d'un effet des radiofréquences sur l'apparition des tumeurs cérébrales** ».

Nous présentons ci-dessous les principaux éléments qui ont abouti aux conclusions du groupe d'experts de l'ANSES.

- Considérant l'étude épidémiologique Interphone qui suggérait une augmentation significative du risque de gliome chez les adultes réalisant plus de 1640 h d'appel, le groupe d'experts affirme que ces résultats sont « incompatibles avec l'absence de modification des tendances temporelles d'incidence des gliomes au Danemark, en Finlande, en Norvège, en Suède et aux Etats-Unis ». On souligne également que les auteurs du rapport indiquent qu'un risque (odd ratio) de 2,7 tel que décrit par le groupe de l'épidémiologiste suédois Hardell dans de nombreux articles « **peut être exclu à 100%** ».

Depuis la classification du CIRC en 2011 qui a vu les RF assignées dans le groupe 2B (cancérogènes possibles), 21 études épidémiologiques ont été publiées sur les tumeurs cérébrales.

Les études de cohorte ne montrent pas d'augmentation du risque de tumeurs du cerveau. Cependant, au regard du développement très lent de tumeurs telles que les gliomes, les temps de suivis dans ces études de cohorte, jusqu'à 7 ans, peuvent être considérés comme relativement courts. Les études cas-témoins considérées ont porté sur les gliomes, les méningiomes et le neurinome (ou schwannome) de l'acoustique. Le groupe d'Hardell, évoqué plus haut, a publié 4 articles concluant toujours à une augmentation significative du risque des tumeurs du cerveau. Enfin, une étude concernant les expositions professionnelles aux radiofréquences ne suggère pas d'augmentation du risque de gliome et de méningiome.

Les études de méta-analyse ont globalement montré un « méta » risque relatif non significatif.

Les études portant sur les enfants et les adolescents exposés aux RF sont peu nombreuses. On peut citer une étude sur l'exposition aux RF des antennes de téléphonie mobile (Hauri et al., 2014) et l'étude cas-témoin Mobikids (Castaño-Vinyals et al., 2022) sur l'exposition aux RF des téléphones portables. Ces deux études n'ont pas mis en évidence de relation entre l'exposition lointaine ou proche aux radiofréquences et les tumeurs du cerveau en particulier

- Concernant les études de cancérogenèse sur le cerveau chez le rongeur, deux études récentes ont été plus particulièrement analysées.

L'étude de Falcioni et al (2018) chez le rat mâle et femelle (200/groupe) a conclu, malgré l'absence de données statistiquement significatives, à un effet d'une exposition corps entier à des radiofréquences à 1800 MHz (DAS de 0,1 W/Kg) sur le gliome chez les femelles exposées.

L'étude dite « du NTP⁶ » a porté sur 90 animaux / groupe chez le rat et la souris, mâles et femelles exposés corps-entier à des signaux radiofréquences GSM ou CDMA (DAS de 1,5 ; 3 et 6 W/Kg chez le rat et DAS de 2,5 ; 5 et 10 W/Kg chez la souris).

Le groupe de travail estime que, bien que ces données n'aient pas été publiées et évaluées par les pairs dans une revue à comité de lecture, l'audit externe mis en place par le NTP équivaut à cette évaluation par les pairs. Le groupe d'experts considère qu'« aucune induction significative de tumeurs n'a été observée dans le cerveau en GSM et en CDMA » chez les rats femelles, ainsi que chez des souris mâles et femelles. Chez les rats mâles, le NTP a conclu qu'il existait « certaines preuves » pour l'induction du gliome.

- Enfin, les nombreuses études investiguant les effets des radiofréquences sur la génotoxicité, la mort cellulaire, la prolifération, l'apoptose, l'autophagie, la réponse aux lésions de l'ADN, le stress oxydant, l'inflammation ou l'immunosuppression, n'ont pas permis de mettre en évidence l'implication d'un de ces mécanismes-clés dans la cancérogenèse in vivo et in vitro.

3.1. Revues systématiques commandées par l'OMS

Nous présentons ci-dessous un résumé des revues systématiques commandées par l'Organisation mondiale de la santé (OMS) et publiées entre fin 2024 et mi-2025. Ces revues portent sur les effets biologiques des champs électromagnétiques radiofréquence (RF). Ces travaux s'inscrivent dans le cadre du programme permanent de l'OMS visant à évaluer les conséquences potentielles de l'exposition aux RF sur la santé humaine.

Ces publications apportent de nouveaux éléments de compréhension concernant un éventuel lien entre l'exposition aux radiofréquences et divers effets sanitaires. Chacune de ces revues repose sur une méthodologie stricte et transparente, avec une attention particulière portée à l'identification et à la maîtrise des biais susceptibles d'influencer les résultats, afin de garantir la fiabilité des conclusions.

Les analyses publiées se concentrent plus spécifiquement sur les thématiques suivantes :

- La cognition chez l'homme et les symptômes non-spécifiques
- La fertilité masculine (humaine et expérimentale),
- La fertilité féminine (humaine et expérimentale),

⁶ NTP : National Toxicological Program américain

- Le risque de cancer, dans la population générale et chez les travailleurs exposés, et expérimentale
- Le stress oxydatif, étudié à la fois in vivo et in vitro.

3.1.1. Cognition et symptômes non-spécifiques

Effets des ondes RF sur les performances cognitives humaines

Pophof B, Kuhne J, Schmid G, Weiser E, Dorn H, Henschenmacher B, Burns J, Danker-Hopfe H, Sauter C. The effect of exposure to radiofrequency electromagnetic fields on cognitive performance in human experimental studies: Systematic review and meta-analyses. Approx. Int. 2024 Sep;191:108899. DOI: 10.1016/J.Envint.2024.108899. Epub 2024 Jul 22. PMID: 39265322.

Cette revue systématique et méta-analyse a exploré si l'exposition à court terme aux RF pouvait influencer les performances cognitives humaines (mémoire, attention, vitesse de réaction, raisonnement, etc.). Sur plus de 76 études regroupant environ 3800 participants, les résultats montrent aucun effet notable des ondes sur la vitesse ou la précision des tâches cognitives. Les tests sur l'attention, la mémoire et le raisonnement n'ont révélé aucune différence entre les groupes exposés et non exposés. Quelques études isolées évoquent une légère baisse de la vitesse motrice, mais ces résultats sont trop incertains pour être considérés comme significatifs. En résumé : l'exposition aux ondes, même proche de la tête, ne semble pas altérer la cognition humaine. Néanmoins, des recherches complémentaires sont nécessaires, surtout chez les personnes âgées et pour explorer d'éventuelles différences entre hommes et femmes.

Effets des ondes RF sur les symptômes non spécifiques

Bosch-Capblanch X, Esu E, Oringanje CM, Dongus S, Jalilian H, Eysers J, Auer C, Meremikwu M, Rösli M. The effects of radiofrequency electromagnetic fields exposure on human self-reported symptoms: A systematic review of human experimental studies. Approx. Int. 2024 May;187:108612. DOI: 10.1016/J.Envint.2024.108612. Epub 2024 Apr 2. Erratum in: Environ Int. 2024 Aug;190:108892. DOI: 10.1016/J.Envint.2024.108892. PMID: 38640611.

Cette revue systématique porte sur les études menées sur les symptômes non-spécifiques dans la population générale ou chez des individus se déclarant atteints d'une intolérance environnementale idiopathique attribuée aux champs électromagnétiques (IEI-EMF ou EHS). Les sources d'information incluent Medline, Web of Science, PsycInfo, Cochrane Library, Epistemonikos, Embase et le portail EMF-Portal, jusqu'en avril 2022. L'objectif est d'évaluer systématiquement les effets de l'exposition aux RF sur les symptômes non spécifiques autodéclarés, en particulier les maux de tête et les troubles du sommeil, et de vérifier la précision des perceptions concernant la présence ou non d'une exposition aux RF. Quarante et une études, dont 13 études avec des sujets IEI-EMF, impliquant 2874 participants, ont été incluses. La majorité d'entre elles ont donc été menées sur de jeunes volontaires en bonne santé. Les résultats suggèrent que les participants ne pouvaient pas percevoir leur exposition aux RF mieux que par hasard et que les individus IEI-EMF n'étaient pas plus performants à cet égard que la

population générale. De plus, aucune preuve d'individus particulièrement vulnérables dans le groupe IEI-EMF n'a été trouvée.

En résumé, les preuves disponibles indiquent que les expositions aiguës aux RF, locales ou corps-entier, à des niveaux inférieurs aux limites réglementaires, ne provoquent pas de symptômes dans la population générale et chez les personnes autodéclarées IEI-EMF. Les allégations de symptômes dans la vie quotidienne semblent être liées à la perception de l'exposition aux RF plutôt qu'à l'exposition aux RF.

3.1.2 Revues systématiques en lien avec la fertilité

Effets des ondes RF sur la santé reproductive féminine

Johnson EE, Kenny RPW, Adesanya AM, Richmond C, Beyer F, Calderon C, Rankin J, Pearce MS, Toledano M, Craig D, Pearson F. The effects of radiofrequency exposure on adverse female reproductive outcomes: A systematic review of human observational studies with dose-response meta-analysis. Approx. Int. 2024 Aug; 190:108816. doi: 10.1016/j.envint.2024.108816. Epub 2024 Jun 12. PMID: 38880062.

Cette section s'intéresse à l'impact des champs électromagnétiques radiofréquences, comme ceux des téléphones portables ou des appareils médicaux, sur la santé reproductive des femmes. Les études analysées ont exploré divers risques possibles : fausses couches, anomalies congénitales, accouchements prématurés, mort-nés ou faible poids de naissance. Globalement, les résultats sont très incertains. La majorité des travaux ne montrent aucun lien solide entre l'exposition aux ondes et des effets négatifs sur la grossesse ou le développement du fœtus. Cependant, la fiabilité de ces études est limitée : les facteurs de confusion (habitudes de vie, conditions de travail, alimentation) sont souvent mal contrôlés, les mesures d'exposition varient fortement, et la qualité des preuves est faible en raison d'échantillons trop petits ou de méthodes hétérogènes. Les chercheurs recommandent donc de mener des études plus précises, avec des outils de mesure normalisés et en tenant compte de l'exposition des deux parents. En résumé : à ce jour, il n'existe aucune preuve solide que les RF aient un impact significatif sur la reproduction féminine, mais les données restent insuffisantes pour conclure définitivement.

Effets des ondes RF sur la fertilité masculine

Pw Kenny R, Evelynne Johnson E, Adesanya AM, Richmond C, Beyer F, Calderon C, Rankin J, Pearce MS, Toledano M, Craig D, Pearson F. The effects of radiofrequency exposure on male fertility: A systematic review of human observational studies with dose-response meta-analysis. Approx. Int. 2024. Aug;190:108817. DOI: 10.1016/J.Envint.2024.108817. Epub 2024 Jun 11. PMID: 38880061.

Cette revue systématique a évalué si les RF pouvaient affecter la fertilité masculine, notamment à travers des indicateurs comme la motilité, la morphologie, la concentration ou le nombre total de spermatozoïdes. Les études analysées concernaient des hommes de 20 à 39 ans, exposés soit dans un cadre professionnel (radars, équipements militaires), soit dans la vie quotidienne (téléphones mobiles). Les résultats suggèrent des associations possibles, mais sans preuve claire. Les méta-analyses n'ont montré aucun effet cohérent ni relation dose-réponse significative. Les limites sont nombreuses

: les biais de mesure de l'exposition, la mauvaise prise en compte des facteurs de confusion (âge, tabac, alcool, IMC) et la faible qualité globale des preuves. Conclusion : les données disponibles ne confirment aucune altération certaine de la fertilité masculine due aux ondes, mais la prudence reste de mise tant que des études plus rigoureuses ne sont pas menées.

Effets des ondes RF sur la fertilité mâle

Cordelli E, Ardoino L, Benassi B, Consales C, Eleuteri P, Marino C, Sciortino M, Villani P, H, Brinkworth M, Chen G, McNamee P, Wood AW, Belackova L, Verbeek J, Pacchierotti F. Effects of radiofrequency electromagnetic field (RF-EMF) exposure on male fertility: A systematic review of experimental studies on non-human mammals and human sperm in vitro. Approx. Int. 2024 Mar;185:108509. DOI: 10.1016/J.Envint.2024.108509. Epub 2024 Feb 19. Erratum in: Environ Int. 2025 May;199:109449. DOI: 10.1016/J.Envint.2025.109449. PMID: 38492496.

Cette revue systématique a porté sur 117 études sur l'animal et 10 études sur le sperme humain in vitro. Les auteurs ont analysé les nombreux paramètres liés à la fertilité mâle in vivo et in vitro, au moyen de méta-analyses. Les paramètres évalués sont la diminution de la fertilité (taux d'infertilité mâle, etc), la qualité du sperme (numération et vitalité/mobilité des spermatozoïdes, etc), la toxicité pour les organes reproducteurs (poids et histologie des testicules, etc) et les effets hormonaux (taux de testostérone).

En résumé, les chercheurs concluent en un possible effet néfaste de l'exposition aux RF sur le taux de gestation et le nombre de spermatozoïdes chez le rat et la souris. Les DAS sont très variables, entre 0,001 et 43,6 W/kg, donnant un DAS moyen corps-entier entre 12 et 23 W/Kg. Ainsi, la réduction du taux de gestation est un effet principalement dû à une seule étude réalisée au DAS le plus fort testé, 50 000 fois supérieur à la limite pour l'exposition du public aux RF (limite corps-entier).

Effets des ondes RF sur la gestation et la mise-bas chez les femelles

Cordelli E, Ardoino L, Benassi B, Consales C, Eleuteri P, Marino C, Sciortino M, Villani P, Brinkworth MH, Chen G, McNamee JP, Wood AW, Belackova L, Verbeek J, Pacchierotti F. Effects of Radiofrequency Electromagnetic Field (RF-EMF) exposure on pregnancy and birth outcomes: A systematic review of experimental studies on non-human mammals. approx. int. 2023 Oct;180:108178. DOI: 10.1016/J.Envint.2023.108178. Epub 2023 Aug 30. Erratum in: Environ Int. 2025 Feb;196:109273. DOI: 10.1016/J.Envint.2025.109273. PMID: 37729852.

Cette revue systématique s'intéresse aux études expérimentales portant sur les effets des RF sur la fécondité chez les femelles et sur leurs portées. 88 études ont été sélectionnées à partir des bases de données Pubmed, Scopus et EMF Portal. Les paramètres considérés portent sur la réduction de la fécondité (pertes pré-implantatoires, mort fœtale, taille des portées), sur les effets délétères chez les petits à la naissance (poids et taille des fœtus, malformations fœtales et sex ratio), ainsi que sur les effets tardifs quand les rongeurs exposés *in utero* sont adultes (comportement, fertilité, pathologies cérébrales et cancéreuses)

Les méta-analyses réalisées indiquent que l'exposition aux RF n'affecte pas la fécondité chez les rongeurs ni celle de leurs descendants (taille des portées) mais pourrait impacter la santé des nouveau-nés en termes de poids des fœtus et, à plus long-terme, leur comportement.

En résumé, l'exposition *in utero* aux RF ne semble pas avoir d'effet néfaste sur la fécondité des femelles, mais pourrait avoir des effets sur la santé de la progéniture. Les chercheurs soulignent cependant que les limites méthodologiques identifiées dans ces études expérimentales rendent ces conclusions très incertaines.

3.1.3 Revues systématiques en lien avec le cancer

Exposition aux ondes RF et risque de cancer chez l'homme

Karipidis K, Baaken D, Loney T, Blettner M, Mate R, Brzozek C, Elwood M, Narh C, Orsini N, Rösli M, Paulo MS, Lagorio S. The effect of exposure to radiofrequency fields on cancer risk in the general and working population: A systematic review of human observational studies - Part II: Less researched outcomes. Approx. 2025 Feb;196:109274. DOI: 10.1016/J.Envint.2025.109274. Epub 2025 Jan 11. PMID: 39904670.

Cette revue systématique a évalué le risque de cancer, en particulier les tumeurs cérébrales (gliomes, méningiomes, neurinomes acoustiques), associé à l'usage des téléphones mobiles. Les résultats des grandes études récentes, comme COSMOS, UK Biobank et MOBI-Kids n'indiquent aucune augmentation significative du risque de cancer, y compris après plusieurs années d'utilisation. Les auteurs ont soigneusement évalué le risque de biais (sélection, rappel, données manquantes) et respecté les critères GRADE⁷ pour juger la solidité des preuves. Malgré cela, la qualité globale reste faible à modérée, principalement en raison des limites des études observationnelles. Conclusion : les données actuelles ne montrent aucun lien clair entre l'usage du téléphone portable et le développement de tumeurs cérébrales. Les chercheurs recommandent toutefois de poursuivre la surveillance, notamment avec l'arrivée de la 5G et des nouvelles formes d'exposition.

Effets des ondes RF sur le cancer chez l'animal

Mevissen M, Ducray A, Ward JM, Kopp-Schneider A, McNamee JP, Wood AW, Rivero TM, Straif K. Effects of radiofrequency electromagnetic field exposure on cancer in laboratory animal studies, a systematic review. Approx. Int. 2025 May;199:109482.

A partir de 52 études publiées jusqu'en 2022, cette revue systématique conclut qu'il existe « des preuves que l'exposition aux RF augmente l'incidence du cancer chez les animaux de laboratoire » pour le schwannome cardiaque et le gliome.

Ici encore, il apparaît que la conclusion de cette revue systématique est basée sur une seule étude, l'étude du NTP qui a observé ces effets chez les rats mâles uniquement, exposés à 6 W/Kg corps-entier. Dans cette étude, le groupe de rats sham-exposés aux RF avait connu une mortalité précoce en

⁷ GRADE = Grading of Recommendations, Assessment, Development and Evaluations
<https://www.gradeworkinggroup.org>

comparaison des groupes exposés. Les chercheurs ont ici réanalysé les résultats de l'étude NTP en utilisant un groupe de rats contrôles différents (contrôles historiques), ce qui constitue un biais important. On comprend alors pourquoi cette conclusion est en désaccord avec les conclusions du rapport de l'ANSES présentées plus haut.

3.1.4 Revue systématique en lien avec le stress oxydatif

Meyer F, Bitsch A, Forman HJ, Fragoulis A, Ghezzi P, Henschenmacher B, Kellner R, Kuhne J, Ludwig T, Sachno D, Schmid G, Tsaioun K, Verbeek J, Wright R. The effects of radiofrequency electromagnetic field exposure on biomarkers of oxidative stress in vivo and in vitro: A systematic review of experimental studies. Approx. Int. 2024 Dec;194:108940. DOI: 10.1016/J.Envint.2024.108940. Epub 2024 Aug 14. PMID: 39566441.

Cette revue s'est intéressée au stress oxydatif, un phénomène biologique impliqué dans de nombreuses maladies, pour déterminer si l'exposition aux ondes pouvait le déclencher. Les chercheurs ont compilé 56 études expérimentales, dont la majorité sur des animaux (rats, souris, lapins) et quelques-unes sur des cellules humaines. Les résultats sont hétérogènes et contradictoires : dans certains tissus (testicules, thymus), une augmentation des marqueurs du stress oxydatif a été observée, alors que dans d'autres (cerveau, foie, sang), les effets étaient incohérents ou inexistant. Ces variations s'expliquent par des erreurs méthodologiques fréquentes, des protocoles non standardisés et une mauvaise caractérisation des expositions. Les preuves d'un lien entre ondes et stress oxydatif sont faibles et incertaines. Les chercheurs appellent à des études mieux contrôlées, avec des biomarqueurs fiables et des protocoles rigoureux.

3.2. Conclusion

L'ensemble des revues systématiques présentées offre une vision d'ensemble des connaissances actuelles sur les effets des champs électromagnétiques - radiofréquences, notamment ceux issus des téléphones portables, des antennes et de certains appareils médicaux sur la santé humaine.

Malgré la diversité des thématiques abordées (reproduction, fertilité, stress oxydatif, cancer, cognition), un constat commun se dégage : les preuves disponibles sont faibles, incohérentes ou insuffisantes pour établir un lien de cause à effet entre l'exposition aux RF et des effets néfastes avérés sur la santé.

Concernant les performances cognitives, l'exposition à court terme aux ondes RF ne semble pas modifier la mémoire, l'attention ou la vitesse de réaction des individus, ni aggraver les maux de tête ou les troubles du sommeil. En condition de laboratoire, elle ne provoque pas non plus de symptômes non-spécifiques dans la population générale et chez les personnes autodéclarées IEI-EMF.

Sur le plan de la reproduction, les études n'ont pas mis en évidence d'effet clair ni chez les femmes (fausses couches, malformations, poids de naissance), ni chez les hommes (qualité du sperme). Expérimentalement, certains effets ont été détectés chez les animaux (fertilité mâle et poids fœtal) qui ne sont pas retrouvés chez l'Homme. Les expositions expérimentales sont parfois réalisées à des DAS élevés engendrant un échauffement certain des tissus. Les résultats restent incertains à cause de méthodes trop variables et d'expositions mal quantifiées.

Pour le risque de cancer, les grandes études épidémiologiques récentes ne confirment pas de lien entre l'usage du téléphone mobile et les tumeurs cérébrales. Une surveillance à long terme doit néanmoins se poursuivre, notamment avec la cohorte COSMOS.

Enfin, concernant le stress oxydatif, certaines expériences en laboratoire ont montré des signes de perturbation biologique, mais sans cohérence entre les études ni preuve solide de dommage durable.

Globalement, aucun danger sanitaire majeur n'a été démontré à ce jour, mais les incertitudes demeurent, notamment en raison de la faible qualité méthodologique de nombreuses études et de l'évolution rapide des technologies de communication.

Les chercheurs appellent donc à poursuivre les travaux avec des protocoles plus rigoureux, des mesures d'exposition précises et une prise en compte des nouvelles formes d'exposition (5G, objets connectés, antennes de proximité). Avec eux, nous rappelons que des indications pour une recherche de qualité en bioélectromagnétisme sont disponibles (Repacholi 1998, Kuster and Schonborn 2000, Simko et al. 2016, Vijayalaxmi 2016). Cette approche permettra de mieux comprendre, à long terme, si les CEM-RF représentent un risque réel pour la santé humaine, ou si les effets observés jusqu'ici relèvent surtout de la variabilité scientifique et des limites des études actuelles.

Bibliographie

Bosch-Capblanch X, Esu E, Oringanje CM, Dongus S, Jalilian H, Eysers J, Auer C, Meremikwu M, Rösli M. The effects of radiofrequency electromagnetic fields exposure on human self-reported symptoms: A systematic review of human experimental studies. *Approx. Int.* 2024 May;187:108612. DOI: 10.1016/J.Envint.2024.108612. Epub 2024 Apr 2. Erratum in: *Environ Int.* 2024 Aug;190:108892. DOI: 10.1016/J.Envint.2024.108892. PMID: 38640611.

Cordelli E, Ardoino L, Benassi B, Consales C, Eleuteri P, Marino C, Sciortino M, Villani P, H, Brinkworth M, Chen G, McNamee P, Wood AW, Belackova L, Verbeek J, Pacchierotti F. Effects of radiofrequency electromagnetic field (RF-EMF) exposure on male fertility: A systematic review of experimental studies on non-human mammals and human sperm in vitro. *Approx. Int.* 2024 Mar;185:108509. DOI: 10.1016/J.Envint.2024.108509. Epub 2024 Feb 19. Erratum in: *Environ Int.* 2025 May;199:109449. DOI: 10.1016/J.Envint.2025.109449. PMID: 38492496.

Cordelli E, Ardoino L, Benassi B, Consales C, Eleuteri P, Marino C, Sciortino M, Villani P, Brinkworth MH, Chen G, McNamee JP, Wood AW, Belackova L, Verbeek J, Pacchierotti F. Effects of Radiofrequency Electromagnetic Field (RF-EMF) exposure on pregnancy and birth outcomes: A systematic review of experimental studies on non-human mammals. *approx. int.* 2023 Oct;180:108178. DOI: 10.1016/J.Envint.2023.108178. Epub 2023 Aug 30. Erratum in: *Environ Int.* 2025 Feb;196:109273. DOI: 10.1016/J.Envint.2025.109273. PMID: 37729852.

Johnson EE, Kenny RPW, Adesanya AM, Richmond C, Beyer F, Calderon C, Rankin J, Pearce MS, Toledano M, Craig D, Pearson F. The effects of radiofrequency exposure on adverse female reproductive outcomes: A systematic review of human observational studies with dose-response

meta-analysis. *Approx. Int.* 2024 Aug;190:108816. DOI: 10.1016/J.Envint.2024.108816. Epub 2024 Jun 12. PMID: 38880062.

Karipidis K, Baaken D, Loney T, Blettner M, Mate R, Brzozek C, Elwood M, Narh C, Orsini N, Rösli M, Paulo MS, Lagorio S. The effect of exposure to radiofrequency fields on cancer risk in the general and working population: A systematic review of human observational studies - Part II: Less researched outcomes. *Approx. Int.* 2025 Feb;196:109274. DOI: 10.1016/J.Envint.2025.109274. Epub 2025 Jan 11. PMID: 39904670.

Kuster N, Schönborn F. Recommended minimal requirements and development guidelines for exposure setups of bio-experiments addressing the health risk concern of wireless communications. *Bioelectromagnetics.* 2000 Oct; 21(7):508-14. doi: 10.1002/1521-186x(200010)21:7<508::aid-bem4>3.0.co; 2-f. PMID: 11015115.

Mevisen M, Ducray A, Ward JM, Kopp-Schneider A, McNamee JP, Wood AW, Rivero TM, Straif K. Effects of radiofrequency electromagnetic field exposure on cancer in laboratory animal studies, a systematic review. *Approx. Int.* 2025 May;199:109482. DOI: 10.1016/J.Envint.2025.109482. Epub 2025 Apr 25. PMID: 40339346.

Meyer F, Bitsch A, Forman HJ, Fragoulis A, Ghezzi P, Henschenmacher B, Kellner R, Kuhne J, Ludwig T, Sachno D, Schmid G, Tsaoun K, Verbeek J, Wright R. The effects of radiofrequency electromagnetic field exposure on biomarkers of oxidative stress in vivo and in vitro: A systematic review of experimental studies. *Approx. Int.* 2024 Dec;194:108940. DOI: 10.1016/J.Envint.2024.108940. Epub 2024 Aug 14. PMID: 39566441.

Pophof B, Kuhne J, Schmid G, Weiser E, Dorn H, Henschenmacher B, Burns J, Danker-Hopfe H, Sauter C. The effect of exposure to radiofrequency electromagnetic fields on cognitive performance in human experimental studies: Systematic review and meta-analyses. *Approx. Int.* 2024 Sep;191:108899. DOI: 10.1016/J.Envint.2024.108899. Epub 2024 Jul 22. PMID: 39265322.

Repacholi MH. Low-level exposure to radiofrequency electromagnetic fields: health effects and research needs. *Bioelectromagnetics.* 1998; 19(1):1-19. PMID: 9453702.

Pw Kenny R, Evelynne Johnson E, Adesanya AM, Richmond C, Beyer F, Calderon C, Rankin J, Pearce MS, Toledano M, Craig D, Pearson F. The effects of radiofrequency exposure on male fertility: A systematic review of human observational studies with dose-response meta-analysis. *Approx. Int.* 2024. Aug;190:108817. DOI: 10.1016/J.Envint.2024.108817. Epub 2024 Jun 11. PMID: 38880061.

Simkó M, Remondini D, Zeni O, Scarfi MR. Quality Matters: Systematic Analysis of Endpoints Related to "Cellular Life" in Vitro Data of Radiofrequency Electromagnetic Field Exposure. *Int J Environ Res Public Health.* 2016 Jul 12; 13(7):701. DOI: 10.3390/iTherph13070701. PMID: 27420084; PMCID: PMC4962242.

Vijayalaxmi. Biological and health effects of radiofrequency fields: Good study design and quality publications. *Mutat Res Genet Toxicol Environ Mutagen.* 2016 Nov 1;810:6-12. DOI: 10.1016/J.Mrgentox.2016.09.007. Epub 2016 Sep 9. PMID: 27776692.

4. La situation en matière de 5G en Belgique en 2025

En Belgique, le déploiement de la 5G s'est accéléré en 2024 et début 2025. La couverture en extérieur des ménages a effectivement atteint la saturation nationale, tandis que la disponibilité en intérieur s'est améliorée grâce à la densification des réseaux et à la réattribution des fréquences par les opérateurs. Les données macroéconomiques restent conformes aux conclusions de l'année dernière : la 5G est une plateforme habilitante dont la valeur se concrétise par l'intensification des investissements dans les télécommunications et les actifs complémentaires, par l'amélioration de la productivité grâce à l'adoption du numérique dans les entreprises et par des services publics plus résilients et plus réactifs. Cette édition conserve l'orientation analytique du rapport précédent, intègre les dernières données belges sur la couverture et les stratégies des opérateurs, et introduit une note sur la sécurité concernant les survols de drones au-dessus des infrastructures critiques et leur interaction avec les réseaux radio.

4.1 Taille du marché belge (2024-2025)

Les mesures réglementaires publiées en 2024 indiquent un net - changement en termes de disponibilité. En mars 2024, l'Institut belge des services postaux et des télécommunications (IBPT) a enregistré qu'environ quatre-vingt-sept pour cent des ménages avaient accès à la 5G en extérieur et environ soixante-huit pour cent y avait accès en intérieur. Une campagne ultérieure menée en juin 2024 a fait passer ces chiffres à environ nonante-cinq pour cent en extérieur et septante-six pour cent en intérieur. Les articles parus dans la presse spécialisée -en janvier 2025 suggèrent que la couverture en extérieur est désormais pratiquement universelle et que la couverture en intérieur atteint environ quatre-vingt-cinq pour cent. La première constatation qui s'impose est celle d'une disponibilité étendue - qui arrive à maturité, suivie d'une deuxième vague concentrée sur la qualité à l'intérieur, et cela plus particulièrement dans les zones urbaines densément peuplées et les bâtiments publics.

Les stratégies des opérateurs restent globalement alignées sur cette séquence. Proximus maintient son ambition d'une couverture nationale vers 2026 et continue à développer la 5G non autonome avec des cas d'utilisation autonomes sélectionnés pour offrir des solutions aux entreprises. - Orange Belgium et Telenet/BASE se concentrent, de manière similaire, sur la densification, les performances en intérieur et les applications verticales ciblées. L'accent est fréquemment mis sur la combinaison de la densification des fréquences radio, la connexion par fibre optique et des capacités cloud-edge qui déterminent la qualité réellement perçue par les utilisateurs.

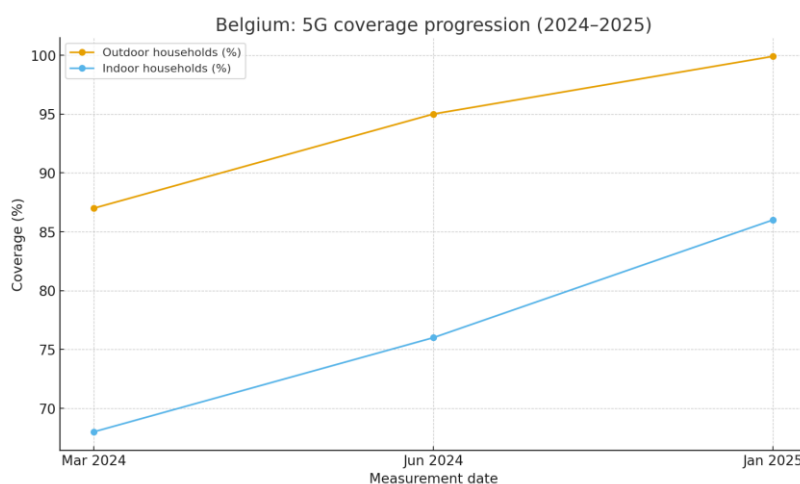


Figure 4.1. Couverture des ménages en extérieur et en intérieur de mars 2024 à janvier 2025, sur la base des mesures de l'IBPT et de rapports indépendants

4.2 Opérateurs et trajectoire du réseau

Les trois opérateurs de réseaux mobiles suivent une trajectoire globalement similaire. Proximus fait état d'une large diffusion de la 5G non autonome et positionne les capacités autonomes pour les solutions d'entreprise sous l'égide de Proximus NXT. Orange Belgium indique une densification continue, avec un accent qui est mis sur les performances en intérieur et les configurations de campus. Telenet/BASE poursuit son déploiement tout en améliorant la disponibilité en intérieur et utilise les mesures de 2024 comme référence pour les mises à niveau ultérieures. Dans chaque cas, la tendance est à une densité de sites plus élevée et à une meilleure expérience en intérieur, l'utilisation du spectre et les mises à niveau du réseau de collecte constituant les principaux leviers.

4.3. Canaux macroéconomiques et synthèse contextuelle

D'un point de vue macroéconomique, la transition des réseaux de quatrième génération (4G) vers ceux de cinquième génération (5G) représente une étape importante dans l'évolution des technologies des télécommunications. L'impact découle premièrement des investissements dans les sites radio, le spectre et le réseau de collecte par fibre optique ; deuxièmement, des gains totaux au niveau du facteur productivité résultant de l'adoption du numérique dans les entreprises, de l'amélioration des débits de données, de la latence ultra-faible et de la connectivité massive des appareils, y compris le couplage de la 5G avec le cloud, l'intelligence artificielle (IA), l'Internet des objets (IoT) et l'edge computing ; troisièmement, de la compétitivité des exportations et de la spécialisation dans les services à forte intensité de données tels que la logistique, la production médiatique et l'aérospatiale ; et enfin des avantages en termes de résilience dans les services publics, où la connectivité constitue le fondement de la continuité des opérations et de la prise de décision en temps réel. La force empirique de ces canaux dans un pays dépend de leur utilisation, et pas seulement de la couverture nominale. Cela explique pourquoi, la qualité en intérieur, la latence et les projets pilotes de découpage du réseau sont importants pour les perspectives à moyen terme.

Le réseau mobile de cinquième génération (5G) marque une avancée transformatrice dans les télécommunications et promet des débits de données améliorés, une connectivité plus large et une croissance économique significative. À l'échelle mondiale, l'adoption de la 5G devrait entraîner des

gains de productivité substantiels, la création d'emplois et des innovations technologiques. L'Europe doit faire face à ses propres défis liés, entre autres, à la complexité réglementaire et à un déploiement inégal entre les États membres. La Belgique affiche des progrès notables en matière de partenariats stratégiques et de développement des infrastructures, mais elle se heurte à des obstacles aux niveaux de la réglementation et du déploiement.

L'impact macroéconomique potentiel de la 5G est substantiel, les pays à la pointe du déploiement étant prêts à en tirer des avantages concurrentiels notables grâce à une productivité accrue et à une expansion économique. Cependant, le chemin vers une mise en œuvre généralisée de la 5G est semé d'embûches, notamment des coûts d'infrastructure élevés, des obstacles réglementaires et des niveaux variables d'acceptation par le public (IHS Markit, 2020 ; 5G Observatory Report, 2024).

Au niveau mondial, le déploiement de la 5G a commencé à la fin des années 2010, motivé par un besoin croissant de débits mobiles plus rapides, d'une latence réduite et d'une capacité de connexion de vastes réseaux de dispositifs à l'IoT. D'ici 2024, des pays tels que la Corée du Sud, la Chine et les États-Unis auront pris les devants dans le déploiement de la 5G et en récolteront les premiers bénéfices économiques. Les investissements dans les infrastructures et les technologies ont déjà entraîné une augmentation de la productivité industrielle, une accélération des progrès technologiques et la création de nouveaux segments de marché (IHS-Markit, 2020).

Les projections économiques soulignent l'importance de l'impact de la 5G. L'étude IHS-Technology 5G Economic Impact estime que d'ici 2035, la 5G contribuera à hauteur de plus de 13 000 milliards de dollars à l'économie mondiale. Cette croissance économique est attribuée aux nouvelles capacités rendues possibles par la 5G, notamment la fabrication intelligente, la télémédecine et les systèmes de transport autonomes (IHS-Markit, 2020). Le traitement des données en temps réel pris en charge par la 5G revêt un caractère crucial pour les secteurs qui dépendent de la précision et de la vitesse, limitées auparavant par les réseaux 4G.

Le déploiement mondial de la 5G s'accompagne toutefois aussi de défis substantiels. Les coûts initiaux de déploiement élevés, les désaccords sur l'attribution des fréquences et les disparités de couverture entre les zones urbaines et rurales restent des obstacles importants. En outre, les tensions géopolitiques, et plus particulièrement celles liées au leadership technologique et aux droits de propriété intellectuelle, continuent d'affecter les partenariats et le rythme d'adoption de la 5G (5G Observatory Report, 2024 ; Market Guide for 5G New Radio, 2024).

4.4 Faire évoluer la politique vers la performance : canaux macroéconomiques et effets au niveau des entreprises

Dans l'ensemble, les leviers politiques présentés dans le Tableau 1 réduisent l'incertitude et facilitent le déploiement. Des normes d'exposition claires, étendues au contexte de la radiodiffusion, réduisent le risque réglementaire et ancrent les attentes des investisseurs concernant les contraintes futures, ce qui favorise les investissements à long terme. La surveillance systématique de la consommation d'énergie améliore la visibilité des coûts d'exploitation et permet aux opérateurs de planifier des trajectoires CAPEX/OPEX durables malgré les fluctuations des prix de l'électricité. Les objectifs en matière de gestion des déchets ouvrent de nouvelles voies d'observance prévisibles et stimulent les

marchés secondaires de la rénovation et du recyclage, ce qui renforce les incitations en matière d'économie circulaire. Enfin, la numérisation des permis et la parité dans les processus de la MOC raccourcissent les cycles d'approbation et améliorent la prévisibilité, ce qui réduit le coût du capital.

Levier politique	Canal macroéconomique
Normes d'exposition, y compris au niveau du broadcasting	Réduit le risque réglementaire ; stabilise les attentes en matière d'investissement
Suivi énergétique	Soutient une planification CAPEX/OPEX durable
Objectifs en matière de gestion des déchets	Génère une garantie d'observance ; stimule les marchés de l'économie circulaire
Numérisation des permis & parité MOC	Raccourcit les délais d'obtention des permis ; baisse du coût du capital grâce à la prévisibilité

Tableau 4.1. Leviers politiques et canaux macroéconomiques [Sources: ICNIRP (2020), IEC 62232:2022, directive (EU) 2023/1791, directive 2012/19/EU, directive 2008/98/EC, règlement (EU) 2024/1309, règlement d'exécution (UE) 2020/1070 de la Commission]

Ces gains au niveau du système se traduisent directement par des résultats au niveau des entreprises dans le Tableau 2. La réduction des tensions au niveau des permis permet d'augmenter les revenus en permettant un lancement commercial plus rapide. Une meilleure fidélité des simulations (l'approche « Diagrammes ») réduit l'incertitude liée à la conception, ce qui diminue les demandes de changements et les revisites sur site. Les fonctions de contrôle de la puissance sur les MIMO massifs (p. ex. PowerLock) permettent de réaliser des économies d'énergie mesurables et d'élargir la marge d'observance par rapport aux limites d'exposition. L'intégration de KPI en matière d'énergie et de déchets dans les exigences des chaînes d'approvisionnement ouvre des niches dans les services de rénovation/réparation/recyclage et aligne les pratiques opérationnelles sur les objectifs politiques. En bref, des règles prévisibles et des processus numérisés réduisent les risques liés à l'investissement au niveau macroéconomique et se traduisent par un déploiement plus rapide, des coûts moins élevés et un fonctionnement plus vert au niveau des entreprises.

Implication au niveau de l'entreprise	Effet opérationnel/commercial
Réduction des tensions au niveau des permis	Lancement plus rapide des services → génération plus rapide de revenus
Meilleure fidélité des simulations (« Diagrammes »)	Moins de demandes de changements ; moins de revisites sur site

Contrôle de la puissance sur mMIMO (PowerLock)	Économies d'énergie ; marges de conformité plus stables
KPI énergie/déchets	Nouvelles exigences au niveau des fournisseurs : niches de la rénovation/la réparation/du recyclage

Tableau 2. Implications au niveau de l'entreprise et effets opérationnels [Sources : Ericsson, Nokia]

4.5 Note de sécurité : drones et réseaux radio

Fin 2025, la Belgique a été confrontée à des survols de drones coordonnés qui ont perturbé les opérations des aéroports de Bruxelles et de Liège et ont donné lieu à une réunion du Conseil national de sécurité. La réponse politique s'est concentrée sur un renforcement de la surveillance de l'espace aérien et une meilleure intégration des capacités de lutte contre les UAS. Les outils modernes de lutte contre les UAS combinent la détection des radiofréquences, le radar et la détection optique. Les techniques de neutralisation telles que le brouillage radio ou les interférences GNSS sont réservées par la loi aux autorités habilitées à les utiliser et soumises à des contrôles stricts. L'autorité de régulation belge, l'IBPT, interdit la possession ou l'utilisation privée de brouilleurs. Concrètement, toute neutralisation légale doit être conçue de manière à éviter toute interférence nuisible avec les réseaux mobiles publics, y compris la 5G ainsi qu'avec les communications d'urgence.

Pour les opérateurs de réseau et les propriétaires d'infrastructures, les implications opérationnelles sont concrètes. Les sites critiques devraient disposer de plans d'intervention préétablis avec les opérateurs mobiles, qui incluent la surveillance du spectre et la gestion du trafic. Les plans de résilience doivent prévoir une couverture locale de secours en cas d'interférences temporaires ou de surcharge des cellules pendant les incidents. Lorsque la neutralisation est légalement autorisée, les émissions doivent être strictement limitées en termes de puissance, de fréquence et de durée, et la coopération avec les opérateurs doit se poursuivre par le biais d'audits sur la qualité des services post-incident afin de garantir le respect de la législation et préserver l'intégrité du service.

4.6. Indicateurs en matière de politique et d'investissement pour 2025

Les politiques devraient continuer à donner la priorité à la disponibilité en intérieur dans les bâtiments situés dans les zones urbaines densément peuplées et dans les bâtiments publics, où il y a un décalage entre l'expérience réelle des utilisateurs et la couverture nominale. Le soutien aux essais 5G autonomes visant à réduire la latence et à découper le réseau peut accélérer l'adoption dans des secteurs verticaux complexes tels que les ports, la logistique, la production des médias et la sécurité publique. Parallèlement, des procédures formalisées entre les opérateurs et les autorités dans les aéroports et les bases militaires peuvent réduire les délais de réponse en cas d'incident, tout en préservant l'intégrité du réseau. Enfin, des tableaux de bord transparents sur la couverture

et la qualité, avec des mesures explicites à l'intérieur des bâtiments, contribuent à aligner les investissements privés sur les objectifs publics.

Références

BIPT — 5G roll-out reaches 95% of Belgian households (June 2024).

<https://www.bipt.be/consumers/publication/5g-roll-out-reaches-95-of-belgian-households>

BIPT — 5G network mapping & quality (March 2024).

<https://www.bipt.be/consumers/publication/5g-roll-out-in-belgium-network-mapping-and-quality>

BIPT — Jammers are illegal for private use: <https://www.bipt.be/consumers/jammers>

Commission Implementing Regulation (EU) 2020/1070 of 20 July 2020 on small-area wireless access points (small cells) under the EEC. CELEX: 32020R1070 — https://eur-lex.europa.eu/eli/reg_impl/2020/1070/oj

Directive (EU) 2023/1791 of the European Parliament and of the Council of 13 September 2023 on energy efficiency (recast). CELEX: 32023L1791 — <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2023/1791/oj>

Directive 2012/19/EU of the European Parliament and of the Council of 4 July 2012 on waste electrical and electronic equipment (WEEE). CELEX: 32012L0019 — <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2012/19/oj>

Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the Council of 19 November 2008 on waste (Waste Framework Directive). CELEX: 32008L0098 — <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2008/98/oj>

Ericsson. RAN Energy Efficiency / Massive MIMO energy-saving features (deep sleep, micro-sleep, etc.). <https://www.ericsson.com/en/reports-and-papers/white-papers/breaking-the-energy-curve>

ICNIRP (2020). Guidelines for Limiting Exposure to Electromagnetic Fields (100 kHz–300 GHz). <https://www.icnirp.org/cms/upload/publications/ICNIRPrfgdl2020.pdf>

IEC 62232:2022. Determination of RF field strength, power density and SAR in the vicinity of base stations for the purpose of evaluating human exposure. (IEC Webstore – paywalled) <https://webstore.iec.ch/search?search=62232>

Regulation (EU) 2024/1309 of the European Parliament and of the Council of 29 April 2024 on measures to reduce the cost of deploying gigabit electronic communications networks (Gigabit Infrastructure Act). CELEX: 32024R1309 — <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2024/1309/oj>

Nokia — Mobile Networks — Energy efficiency (including μ DTX, muting, dynamic power management) / 5G-Advanced features. <https://www.nokia.com/networks/mobile-networks/energy-efficiency/>

SkeyDrone — detection projects in Belgium: <https://www.skeydrone.aero/>

Trade press — Nearly all households have outdoor 5G; 86% indoor (January 2025)

<https://www.telecompaper.com/news/nearly-all-belgian-households-have-5g-coverage-outdoors--1541981>

5. Déchets de la 6G

La 6G est officiellement en cours de planification et de recherche depuis 2018 (Salameh & Tarhuni, 2022). Une telle anticipation s'explique par le fait que le développement de ce nouveau système de télécommunication nécessite la coopération entre de nombreux Etats, leurs administrations, les grandes entreprises de télécommunications et de services de cloud ou encore les industries pour s'accorder sur les normes et les standards multiples du réseau à construire en termes de connectivité et d'interopérabilité entre les secteurs et les frontières.

Dès 2019, un symposium dédié à la 6G a eu lieu et les premières publications scientifiques à son sujet ont vu le jour. Les Etats et l'Union européenne ont financé au travers de leurs politiques d'innovation des programmes de recherche et des appels à projets visant à stimuler les innovations technologiques utiles à son développement. La 6G est envisagée comme un progrès nécessaire au développement économique et comme un symbole de la modernité de nos sociétés.

Dans le livre blanc de 2024 de la Commission européenne (COM, 2024, p. 17), la modernisation des réseaux digitaux est présentée comme un levier pour la durabilité. L'argumentation appuie donc un narratif techno-solutionniste dans la mesure où le progrès technologique permettra de résoudre les enjeux écologiques.

La commercialisation est prévue à l'horizon 2030. Elle vise à parer à la saturation de la 5G causée notamment par l'augmentation des flux vidéo et de l'IA. Les défis de la géolocalisation ne peuvent être traités par le système satellitaire GNSS. Le développement de la réalité virtuelle et augmentée requiert des flux vidéo plus importants. La vitesse de la 6G sera de 1TB/sec avec 1 utilisateur par m². Et une latence, c'est-à-dire « le temps écoulé entre une commande lancée au transmetteur et le moment où l'action peut commencer à être exécutée au récepteur » (Gesbert, 2024) bien plus faible qu'avec la 5G, de l'ordre d'un mn/sec.

Les technologies nécessaires au développement des réseaux de la 6G incluent donc une nouvelle génération de technologies radio. Certaines de ces technologies sont déjà nécessaires pour les avancées de la 5G (Ronteix et al., 2024). Mais la nouvelle génération d'interface radio, des micro-ondes alternatives sont en discussion (Ronteix et al., 2024, p. 155). De nouveaux satellites situés à une plus faible altitude seront donc nécessaires réduire le temps de latence en réduisant la distance de connexion, ainsi que de nouvelles antennes phasées reconfigurables et métasurfaces.

Les déchets produits par le développement des réseaux 5 G et 6 sont peu abordés dans les documents de politiques publiques. Ainsi, le rapport 2025 de l'Observatoire de la 5G (p. 7) mentionne à propos de la durabilité dans une note de bas de page que « 6G will be designed with strict energy efficiency, carbon neutrality goals, and circular economy principles ». L'enjeu des déchets n'est donc pas abordé explicitement. Des financements de la Commission européenne ont été alloués à des recherches sur la durabilité de la 6 G (COM, 2024), mais les descriptions de ces projets demeurent assez floues et ne permettent pas de dire si des financements seront alloués à la nature et la quantification des déchets produits par les évolutions technologiques en matière de réseaux de télécommunication et leurs modes de traitement.

La production de déchets dans le développement de la 6G ne fait pas l'objet d'une littérature scientifique spécifique. Les programmes de recherches sont en cours. Selon Gesbert (2024), il est encore difficile d'identifier les briques de design qui seront choisies car la technologie est encore en phase de R&D. Toutefois, la littérature déjà existante sur la 6G évoque la nécessité d'une durabilité de la 6G de la conception à la gestion de la fin de vie (Uusitalo et al., 2021). Il s'agit d'encourager la conception pour améliorer la longévité, la collecte et le recyclage des composants en fin de vie (Chataut et al., 2024).

En outre, comme pour la 5G, la littérature sur les impacts environnementaux du déploiement de cette nouvelle technologie de communication mobile est davantage centrée sur l'efficacité énergétique et le design que cet objectif suppose. Ainsi, la production de déchets engendrée par le déploiement de la 6G ne fait pas l'objet que de simples mentions sans détails dans les textes consultés et non d'une analyse spécifique. Dans les articles centrés sur la 6G, seuls Salameh et Tarhuni (2022, p. 8) abordent explicitement la hausse du volume des DEEE entre 2005 et 2014, ainsi que le volume de DEEE de 2017, pointant qu'il s'agit d'un indicateur alarmant.

De manière générale, si les textes consultés présentent les nouvelles possibilités techniques et économiques offertes par la 6G. Ni la matérialité des infrastructures nécessaires à la 6G ni la production de DEEE afférente au développement de la 6G ne font pas l'objet d'approches quantitatives ou d'analyse en termes de DEEE produits avec des analyses de cycle de vie précises. Les articles abordent la fréquence radio nécessaire, l'accroissement de la vitesse, la connectivité augmentée grâce à des satellites situés dans une orbite de 500 kilomètres de la terre. Les DEEE produits se situent aussi bien sur terre que dans l'espace.

Pour se faire toute de même une idée de la production de déchets ce nouveau réseau, il convient de se référer aux applications et innovations potentielles que permettra la 6G pour identifier les équipements nécessaires. Toutefois, aucune analyse quantitative ou projections approfondies ne sont disponibles.

Application :

- Réalité virtuelle et augmentée
- Internet des objets
- Jumeaux numériques
- robots connectés
- Développement de l'IA
- Agriculture de précision
- Télé-chirurgie
- Robotisation de l'industrie grâce à l'IA
- ...

Ces applications vont engendrer :

- Nécessité de nouveaux routeurs pour une meilleure connectivité des entreprises

- Augmentation des objets connectés
- Augmentation de l'automatisation des processus industriels grâce à l'IA
- Augmentation des data centers et de leur capacité pour stocker un volume de données plus importants
- Augmentation des capteurs, auquel s'ajoutent les clients machines tels que les drones sans pilote et les voitures autonomes (plus exigeants en termes de qualité radio) (Gesbert, 2024)
- Satellites plus proches
- Augmentation des data centers, donc de serveurs et de systèmes de réfrigération, pour stocker les données produites

Autant d'équipements qui sont fondés sur et qui fonctionnent sur de la micro-électronique (câbles, batterie, ...), qui vont nécessiter plus de métaux rares et stratégiques. Les serveurs des centres de données sont changés en moyenne tous les deux ou trois ans pour rester performants (Izoard, 2024). Or les métaux qui composent ces équipements électroniques et microélectroniques sont extraits par des procédés métallurgiques qui consomment des quantités importantes d'eau, de gaz et de pétrole, sans compter les tonnes de roches et de pierre qu'ils contribuent à détruire. Les résidus produits par ces procédés métallurgiques sont susceptibles de polluer les eaux et nappes phréatiques.

Les recherches consultées indiquent que la fin de vie du premier usage des appareils électroniques devrait être retardée par le fait que la 6G permettrait une réduction de l'usage d'énergie pour faire fonctionner ces objets, ce qui induirait un allongement de la vie des batteries, voire des appareils sans batterie (Salameh & Tarhuni, 2022). Mais cette optimisation de l'usage des batteries risque d'être contrecarrée par l'usage plus intensif de ces appareils que génère les nouveaux usages possibles grâce à la transmission de données, phénomène connu sous le nom d'effet rebond (Bihouix, 2025).

Par ailleurs, le recyclage des métaux est difficile pour les métaux rares et stratégiques qui sont difficiles à récupérer car ils sont présents en petites quantités (de l'ordre du milligramme et du nanomètre), dans différents composants et souvent dans des alliages (Bihouix, 2025). Ainsi, le recyclage n'est réalisé que pour quelques métaux (acier, aluminium, cuivre, nickel, plomb, nickel, chrome, cobalt, or, manganèse, platine, argent, ...). Pour les métaux utiles au développement du numérique – tels que terres rares, tantale, gallium, indium, germanium, l'indium ou encore l'antimoine –, le recyclage est inférieur à 1% à l'échelle mondiale (Bihouix, 2025). Par ailleurs, ce recyclage, génère aussi des déchets industriels polluants et toxiques (Bihouix, 2025), car ils contiennent de l'arsenic (Izoard, 2024), du mercure et du chrome (Salameh & Tarhuni, 2022).

En 2025, il y a déjà 1 milliard d'appareils intelligents et de systèmes automatisés qui sont connectés, collectent et analysent des données (Enables, s.d). Le nombre de batteries en fin de vie risque donc d'augmenter de façon exponentielle au cours des prochaines années. Il y a donc une urgence à concevoir des batteries plus durables. Tous ces objets contiennent des métaux rares qui sont difficiles à recycler (Izoard, 2024).

De plus, la montée en fréquence nécessaire à la 6G va rendre les composants au silicium inopérants (Knénas et Dutoit, 2024). Ainsi, le déploiement de l'infrastructure de la 6G devrait s'accompagner de l'introduction de nouveaux matériaux pour permettre des fréquences plus hautes et l'augmentation de la bande passante. Selon Izoard (2024), le silicium est remplacé par de l'arséniure de gallium ou du silicium-germanium.

Pour lutter contre la prolifération exponentielle des DEEE, Salameh et Tarhuni (2022) évoquent la nécessité d'améliorer les standards de recyclage, mais aussi les innovations attendues des matériaux biologiques verts tels que des microbes, qui permettent des processus de recyclage moins toxiques et énergivores. Il faut noter que le déploiement de la 6G impliquera des DEEE sur terre, mais aussi dans l'espace en raison du déploiement satellites.

A la différence de la littérature sur la quantification de production et la consommation des appareils électriques et électroniques par la Responsabilité Élargie des Producteurs, l'absence de littérature sur les DEEE générés par le développement des réseaux de télécommunications mobiles et sur leur traitement montre qu'il y a un impensé plus important dans le développement des infrastructures numériques nécessaires à la 5G et à la 6G.

Par conséquent, l'analyse de leur impact environnemental est à ce jour incomplète, alors que les composants de ces nouvelles technologies peuvent, comme nous l'avons montré plus haut, engendrer des pollutions générant à leur tour des risques sanitaires et écologiques pour les humains qui manipulent ou vivent à proximité de ces DEEE, la biodiversité et la nature, ainsi que des coûts de traitement importants pour les zones où ils seront recyclés, enfouis ou incinérés. Une piste d'explication doit être évoquée dans ce rapport pour expliquer l'absence de littérature scientifique sur les déchets des infrastructures de la 5 et 6G, il s'agit de l'absence d'application du dispositif de la Responsabilité Élargie des Producteurs (REP) définie par la directive. D'après la liste des exceptions à la REP publiée par Bruxelles-Environnement sur son site internet, les antennes de télécommunication ne sont pas soumises au dispositif de responsabilité élargie des producteurs (Bruxelles-Environnement, 2024) car ils font partie de la catégorie des « équipements spécialement conçus à des fins de recherche et de développement et seulement mis à la disposition d'une entreprise par une autre entreprise »

Conclusion

La planification de la 6G a été engagée, alors que commençait au même moment le déploiement effectif de la 5G. En dépit de l'absence de données précises sur les impacts détritiques de la 5G, la conceptualisation de l'architecture et des équipements de la 6G sont envisagés, mais toujours sans analyse sérieuse de son potentiel impact en termes de production et de gestion des déchets. En RBC, des recherches pourraient être entreprises pour mieux comprendre la durée de vie des antennes et les modalités de leur traitement en fin de vie. Idéalement, ces recherches devraient intervenir avant le lancement de la 6G, car une fois une technologie introduite, l'évaluation de ses impacts environnementaux peut s'avérer extrêmement longue et complexe à analyser. Les résultats des recherches arrivent souvent au moment où les technologies sont déjà bien installées (UNEP, 2024).

Références

BIHOUIX, Philippe, Avec des illustrations de PERRIOT, Vincent, 2025. Tracts (N° 68) - L'Insoutenable Abondance. In : BIHOUIX, Philippe, Tracts (N°68) - L'Insoutenable Abondance Faut-il croire les prophètes du progrès ? Paris : Gallimard. Tracts, p.3-63. URL : <https://stm.cairn.info/tracts-n-68-l-insoutenable-abondance--9782073126979-page-3?lang=fr>.

Bruxelles-Environnement, 2024, « Que faire de vos déchets électriques et électronique », publié le 1^{er} novembre 2024, consulté le 30 octobre 2025, sur le site internet :

<https://environnement.brussels/pro/gestion-environnementale/gerer-les-dechets/que-faire-de-vos-dechets-electriques-et-electroniques>

Chataut, Robin, Mary Nankya, et Robert Akl. « 6G Networks and the AI Revolution—Exploring Technologies, Applications, and Emerging Challenges ». *Sensors* (Basel, Switzerland) 24, no 6 (2024) : 1888. <https://doi.org/10.3390/s24061888>.

Commission Européenne (COM), 2024, How to master Europe's digital infrastructures needs ?, Bruxelles, 21.2.2024 COM(2024) 81 final

Enables, s.d., European infrastructure powering the internet of things, Research Paper Infrastructure Position Paper.

GESBERT, David, 2024. La 6G : promesses et défis à l'horizon 2030. *Annales des Mines - Enjeux numériques*, 2024/3 n° 27, p.59-64. DOI : 10.3917/ennu.027.0059. URL : <https://stm.cairn.info/revue-enjeux-numeriques-2024-3-page-59?lang=fr>.

IZOARD, Celia, 2024. L'esprit qui dévorait la matière L'IA, une technologie insatiable. *Écologie & Politique*, 2024/2 N° 69, p.73-84. DOI : 10.3917/ecopo1.069.0073. URL : <https://shs.cairn.info/revue-ecologie-et-politique-2024-2-page-73?lang=fr>.

KTÉNAS, Dimitri et DUTOIT, Denis, 2024. Les composants pour les infrastructures numériques. *Annales des Mines - Enjeux numériques*, 2024/3 n° 27, p.128-134. DOI : 10.3917/ennu.027.0128. URL : <https://stm.cairn.info/revue-enjeux-numeriques-2024-3-page-128?lang=fr>.

RONTEIX, Flavien, EL JAAFARI, Mohamed, PANAITOPOL, Dorin And CHUBERRE, Nicolas, 2024. Convergence of the Telecommunication systems with 5G and 6G. *Annales des Mines - Enjeux numériques*, 2024/1 N° 25, p.147-156. URL : <https://stm.cairn.info/revue-enjeux-numeriques-2024-1-page-147?lang=en>.

Salameh, Ahmed I, et Mohamed El Tarhuni. « From 5G to 6G—Challenges, Technologies, and Applications ». *Future internet* 14, no 4 (2022) : 117. <https://doi.org/10.3390/fi14040117>.

United Nations Environment Programme (UNEP). 2024. *Digital Public Infrastructure for Environmental Sustainability*. <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/45181>

Uusitalo, Mikko A, Patrik Rugeland, Mauro Renato Boldi, Emilio Calvanese Strinati, Panagiotis Demestichas, Marten Ericson, Gerhard P Fettweis, et al. « 6G Vision, Value, Use Cases and Technologies From European 6G Flagship Project Hexa-X ». *IEEE access* 9 (2021) : 160004-20. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3130030>.

6. Consommation d'énergie du réseau 5G

L'empreinte carbone du secteur des TIC (technologies de l'information et de la communication) a récemment fait l'objet d'une attention accrue en raison de sa part croissante dans les émissions globales. Selon le périmètre défini, la consommation d'électricité des TIC est actuellement estimée à environ 4-8 % de la consommation mondiale globale d'électricité (Freitag, 2021) (Malmodin, 2024) et elle est en constante augmentation avec une croissance d'environ 6 % par an (obtenue par comparaison avec (Malmodin, 2018)). Les réseaux de communication représentent une part importante de cet impact : environ 20-30 % selon (Malmodin, 2024). Parmi les réseaux de communication, le réseau mobile est également celui dont la contribution et la croissance sont les plus élevées. Il est donc naturel d'étudier de plus près les changements attendus du déploiement de la 5G.

6.1 Études sur la consommation d'énergie des réseaux existants

La consommation d'électricité des réseaux de communication a fait l'objet d'un suivi attentif au cours des dix dernières années et est présentée, par exemple, dans (Lundén, 2022). La consommation d'électricité des opérateurs pour la période 2015-2018 est représentée dans la figure ci-dessous.

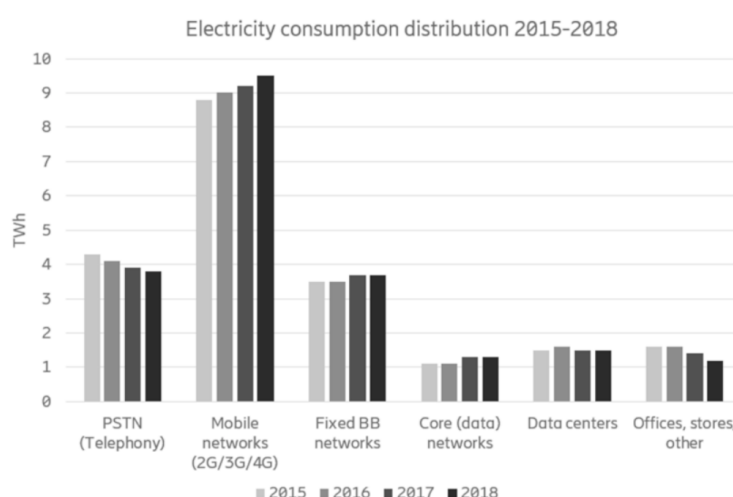


Figure 6.1 : Consommation totale d'électricité agrégée des opérateurs par type de réseau (Lundén, 2022), à l'exclusion des équipements dans les locaux du client (customer premise equipment (CPE)).

La consommation est répartie entre les différentes parties du réseau de communication, qui comprend la partie opérateur du réseau central et des centres de données, ainsi que l'infrastructure d'accès, elle-même divisée entre le réseau d'accès radio mobile, le réseau d'accès fixe (xDSL et FTTx) et le réseau téléphonique. Il est important de noter que cette évaluation ne tient pas compte des appareils des utilisateurs (par exemple les smartphones et les passerelles domestiques). La majeure partie des centres de données et du réseau central, qui ne sont pas gérés par les opérateurs, n'est pas non plus prise en compte ici. L'infrastructure mobile est manifestement largement dominante dans la consommation d'électricité des opérateurs télécom et fera donc l'objet principal de ce chapitre.

Les mêmes auteurs présentent un résultat intéressant montrant que la consommation globale *par abonné* reste relativement constante au fil des ans, sur la période analysée, à environ 20 kWh/abonné

pour le réseau mobile, et 50 kWh/abonné pour le réseau fixe. Cela semble avoir été à peu près vrai pour le réseau mobile (avec une légère augmentation d'environ 10 à 15 %) tout au long du déploiement de la 4G à partir du réseau 3G. Cela s'explique probablement par le déploiement progressif de l'infrastructure afin de garantir la couverture des abonnés au fur et à mesure que leur nombre augmente. Pour comprendre ce comportement, il est important de souligner que, jusqu'à la 4G, le profil de la consommation de l'énergie de tous les équipements (voir Figure 6.2) est constitué d'une forte consommation statique qui est présente dès que l'infrastructure fonctionne, suivie d'une augmentation linéaire dynamique en fonction de la charge, qui est d'une valeur beaucoup plus faible.

Par conséquent, le déploiement d'infrastructures en fonctionnement est le principal facteur de la consommation mondiale d'électricité. Il est tout de même remarquable qu'elle soit restée relativement constante alors que les générations d'équipements étaient très différentes. Entretemps, le trafic de données a considérablement augmenté (d'un facteur 5 entre 2015 et 2020), ce qui se traduit par une plus grande efficacité du réseau. Là encore, cela correspond au profil de puissance de l'équipement. Une station de base haute capacité, qui est initialement sous-utilisée, commence par une faible efficacité, mais sa consommation d'énergie n'augmente pas beaucoup lorsque le trafic s'accroît et son efficacité s'améliore en conséquence. La principale conclusion est que, même s'il peut sembler plus naturel d'utiliser une mesure de l'intensité des données (consommation d'énergie par bit transmis) pour prédire l'évolution de la consommation d'énergie, cette mesure n'est pas suffisamment stable dans le temps et pourrait ne pas être une bonne représentation des caractéristiques du réseau. La mesure par abonné permet de mieux prévoir la consommation réelle d'un réseau. En revanche, elle ne dit rien de l'efficacité de chaque réseau et ne peut donc pas être utilisée pour comparer les réseaux. Par exemple, il est important de noter que le réseau d'accès fixe est beaucoup plus économe en énergie que le réseau d'accès mobile, même si la consommation par abonné est inversée (le réseau d'accès fixe transmet beaucoup plus de trafic de données par abonné).

À long terme, la consommation d'énergie du réseau mobile par abonné augmente encore légèrement en raison de l'augmentation du trafic. L'augmentation du nombre d'abonnés, qui permet certains effets d'échelle, et les améliorations de l'infrastructure ont permis à l'intensité par abonné de rester à peu près constante. Toutefois, il reste à voir si la même tendance se maintiendra avec le déploiement de la 5G, en particulier parce que la partie statique de la consommation d'énergie pourrait ne plus être dominante (voir ci-dessous) et que le trafic continue de croître de manière exponentielle, ce qui rend difficile la réalisation de l'objectif de capacité croissante avec un budget d'énergie fixe.

Dans le cas particulier de la Belgique, plusieurs rapports émanant des principaux opérateurs sont disponibles. L'IBPT a résumé les résultats dans (IBPT, 2023). Les valeurs obtenues sont similaires au rapport de (Lundén, 2022), avec quelques divergences probablement liées à la manière de compter les abonnés. Toutefois, la consommation constante par abonné semble également s'appliquer. La tendance de l'efficacité énergétique (diminution de l'énergie par bit au fil des ans) est également confirmée dans le rapport.

Enfin, un rapport sur les valeurs agrégées au niveau mondial est également disponible auprès de la Banque mondiale et de l'UIT (UIT, 2024). Ce rapport ne fournit pas la normalisation par abonné mais montre les grandes différences d'efficacité énergétique des réseaux entre les différents sites. Il examine également l'évolution globale de la consommation d'énergie depuis le début de la 2G, suite à l'augmentation du nombre d'abonnés et du débit de données, qui suit clairement une forte tendance à la hausse avec chaque nouvelle génération.

Tous ces résultats sont basés sur des mesures effectuées sur des systèmes réels. Il s'agit maintenant de déterminer quelle sera l'évolution à l'avenir et, en particulier, s'il est possible de briser l'augmentation continue de la courbe énergétique avec la nouvelle génération 5G.

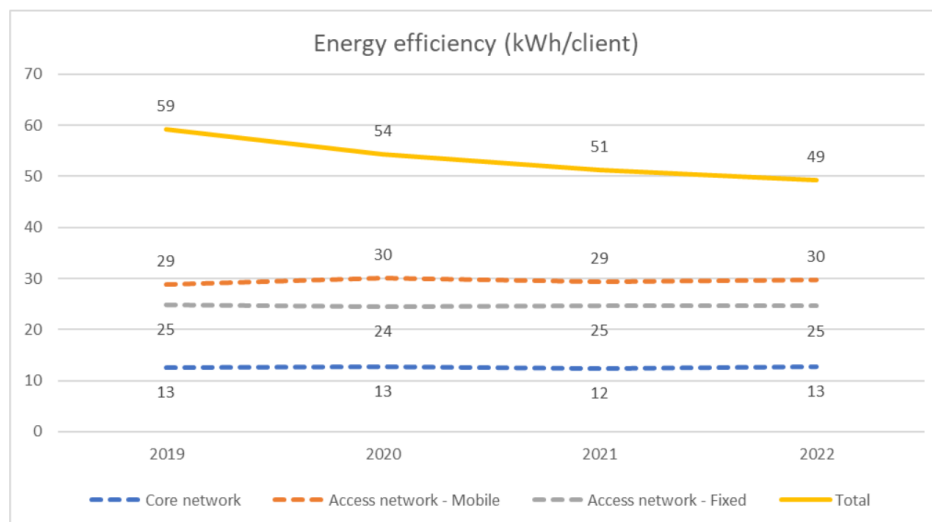
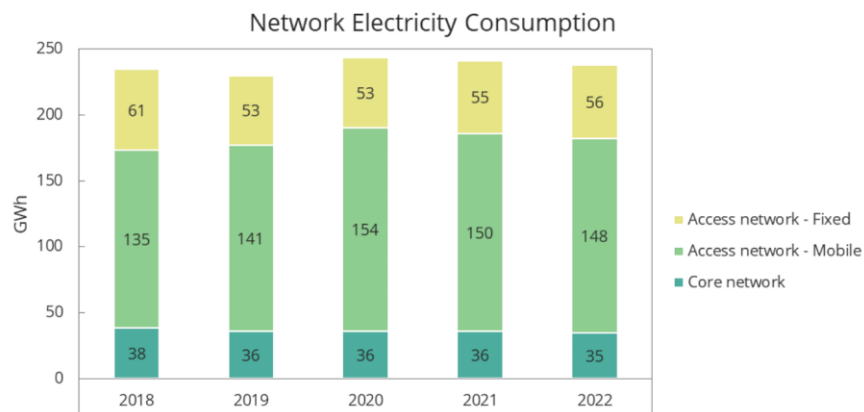


Figure 6.2 : Consommation d'électricité des différents réseaux de communication et leur consommation normalisée par abonné, agrégée sur l'ensemble des opérateurs en Belgique. D'après (IBPT, 2023).

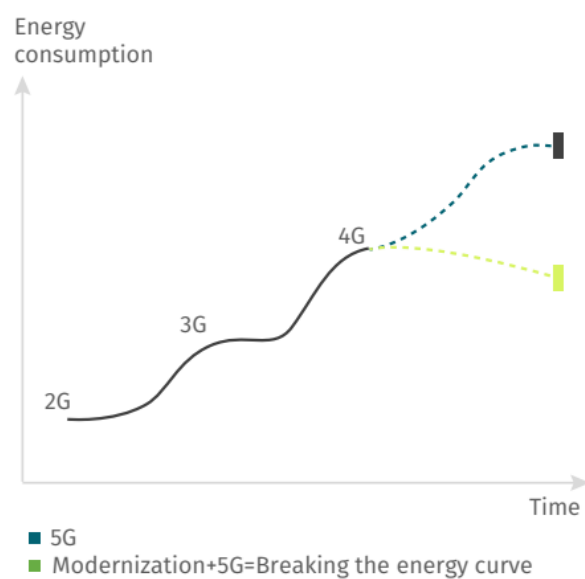


Figure 6.3 : Tendence générale de la consommation d'infrastructures de réseaux mobiles dans le monde au fil du temps. D'après (UIT, 2024).

6.2. Littérature sur l'évolution des réseaux 4G vers les réseaux 5G

On trouve dans les médias de nombreux chiffres différents, avec des conclusions souvent contradictoires. Par exemple, certains rapports alarmants indiquent (Kozioł, 2019) qu'« une station de base 5G devrait généralement consommer environ trois fois plus qu'une station de base 4G », et le nombre de stations de base devrait à peu près doubler au cours des cinq prochaines années selon le rapport sur l'état du marché des petites cellules (Small cell forum, 2018). Par ailleurs, les fabricants promettent une amélioration de l'efficacité énergétique de près de 90 % (réduction d'un facteur 10 de la consommation d'énergie par bit transmis), obtenue grâce à plusieurs technologies et notamment les stratégies d'économie d'énergie, le zooming cellulaire, les réseaux HetNets denses, le Massive MIMO, le déchargement, la mise en cache locale, le mobile edge computing, etc. (Williams, 2022).

En ce qui concerne la littérature scientifique, une revue est effectuée dans (Williams et al, 2022). Comme on pouvait s'y attendre, la plupart des publications scientifiques étudient une seule technique à la fois et se concentrent principalement sur la mesure de l'efficacité énergétique. Il y a donc un manque d'informations sur la consommation d'énergie globale prévue ou mesurée de l'ensemble du réseau. La seule littérature disponible qui considère la consommation globale du réseau date de 2010-2015 (des projets européens GreenTouch et EARTH) et utilise des évaluations obsolètes. En outre, elles n'examinent pas en détail les améliorations matérielles et ne fournissent donc pas d'informations très fiables sur l'évolution de la consommation d'énergie avec l'équipement 5G d'aujourd'hui. Les auteurs de (Williams, 2022) soulignent deux autres lacunes évidentes : le manque d'intérêt pour l'évaluation de l'énergie intrinsèque (utilisation de l'énergie liée à la production de l'équipement) dans la littérature et l'absence d'analyse numérique des effets indirects (positifs et négatifs).

Certaines prévisions proviennent de sociétés de conseil, qui peuvent avoir accès à des données plus récentes. Toutefois, ces rapports ne contiennent généralement pas suffisamment de détails sur la manière dont les calculs sont obtenus et sur ce qu'ils englobent réellement. Nous pouvons citer le rapport de (ABI Research, 2021). Celui-ci prévoit que l'efficacité énergétique du réseau 5G diminuera lentement entre 2022 et 2030, passant d'environ 600 J/Mbit à 250 J/Mbit. Comme le trafic de données est supposé augmenter d'un facteur 20 sur la même durée, la consommation globale du réseau est supposée croître assez rapidement. Il est toutefois difficile de savoir précisément d'où proviennent ces chiffres.

Dans la littérature scientifique plus récente, les travaux de (Golard, 2022) fournissent une prévision comparant différents scénarios de déploiement de la 4G et de la 5G en Belgique. Les hypothèses pour les équipements 5G sont basées sur une mise à l'échelle des équipements 4G, ce qui est évidemment une approximation et pourrait être remis en question. Elle prévoit également une réduction de la consommation d'énergie statique pouvant aller jusqu'à 75 % grâce aux modes de veille, ce qui est encore optimiste aujourd'hui mais pourrait devenir possible à l'avenir. Les résultats sont présentés dans la Figure 6.4.

Comme prévu, l'ajout de la 5G à l'infrastructure 4G augmente considérablement la consommation, mais permet également d'accroître la capacité. L'utilisation de modes de veille est essentielle pour éviter que cet impact ne devienne trop important. Là encore, les résultats montrent que la consommation supplémentaire dépendra beaucoup des choix de déploiement, notamment des types et de la capacité des stations de base, qui influenceront à leur tour le comportement de l'utilisateur par effet de rebond.

Des résultats relativement similaires sont obtenus dans (Bieser, 2023) pour le réseau mobile suisse. Sur la base de leur scénario prévisionnel, ils prévoient une amélioration de 85 % de l'efficacité énergétique, mais une augmentation globale de 20 % de la consommation d'énergie, en raison de l'augmentation du trafic des données. Ils montrent également, qu'à l'avenir, les émissions de GES (gaz à effet de serre) liées à la production pourraient devenir dominantes (voir la section sur l'énergie intrinsèque plus loin).

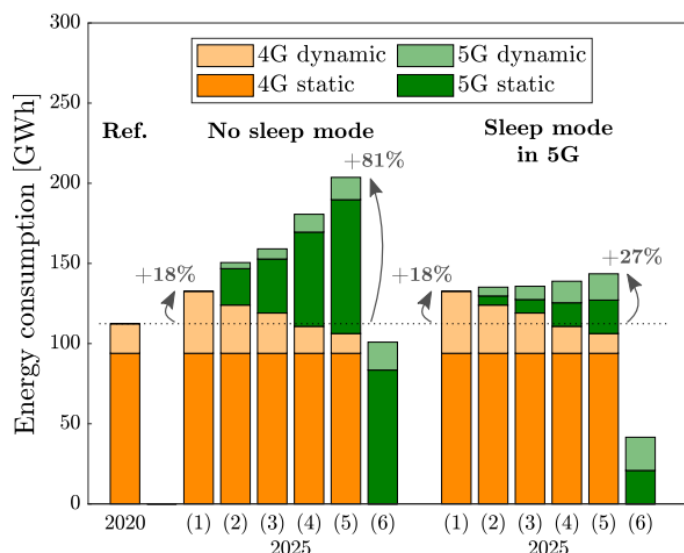


Figure 6.4 : Consommation totale d'électricité avec et sans mode de veille pour différents scénarios de déploiement. Le scénario (1) correspond à l'absence de 5G, le scénario (6) correspond au déclassement de la 4G. Les scénarios intermédiaires correspondent à des déploiements progressifs de la 5G. D'après (Golard, 2022).

Des résultats différents ont toutefois été obtenus dans (Singh, 2025), une étude qui comparait les mesures expérimentales de la 4G et de différents types de réseaux 5G. Dans cette étude, certaines configurations du réseau 5G présentent une efficacité énergétique inférieure à celle de la 4G (de 0,1 J/MB pour la 4G à 0,25 ou 0,3 J/MB dans les configurations 5G-SA et 5G-NSA). Ces résultats peuvent toutefois dépendre de la configuration exacte utilisée et du volume de trafic des données.

Dans (Golard, 2024), les auteurs fournissent une comparaison qui est à présent basée sur des mesures d'équipements de stations de base réels de la 4G et de la 5G. Cela permet donc d'avoir une bien meilleure idée de la consommation qui pourrait apparaître dans les réseaux réels. Les résultats mettent en évidence la grande variété d'équipements aux performances très différentes. Le document étudie la dépendance de plusieurs paramètres tels que le nombre de bandes, la largeur de bande, le nombre d'antennes... Le seul inconvénient de cette étude est qu'elle ne fournit pas de valeurs de trafic de données associées aux équipements correspondants. Cela se justifie par le fait que le trafic de données lui-même dépend beaucoup de la densité et de la position des utilisateurs. Pour les équipements mesurés, la consommation statique des stations de base 5G en mode actif (c'est-à-dire lorsqu'elles ne sont pas mises en veille) est supérieure à celle des équipements 4G, mais du même ordre que les plus avancés (2 Band 4Tx-4Rx). La puissance dépendante de la charge profite de l'efficacité accrue des grandes configurations MIMO et est donc inférieure à celle des versions 4G avancées. Le document examine également l'impact des fonctions d'économie d'énergie (modes de veille). Il apparaît que quand les modes de veille sont appliqués, le profil de puissance n'est plus linéaire lorsque la charge est plus faible (voir la figure 6.6 et plus de détails à ce sujet ci-dessous).

Dans la littérature, on trouve parfois des résultats contradictoires.

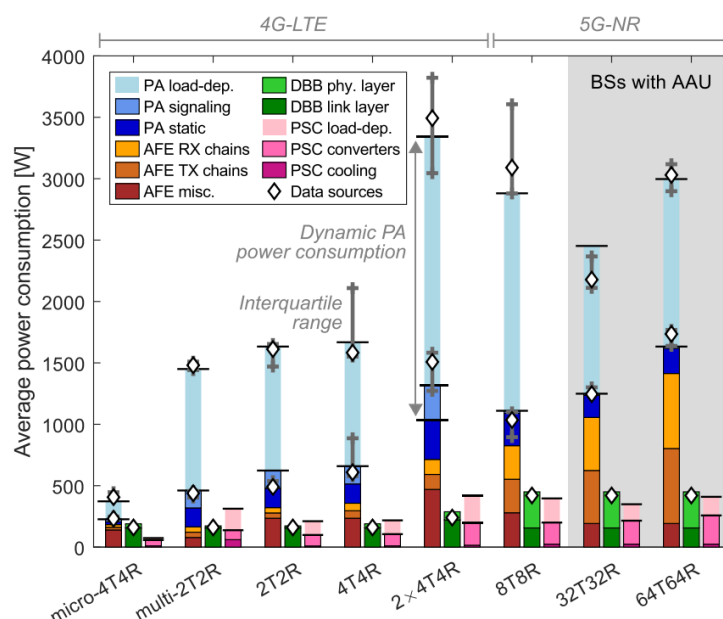


Figure 6.5 : Ventilation de la consommation d'énergie de plusieurs configurations de stations de base en mode actif. D'après (Golard, 2024).

6.3. Discussion

Dans cette dernière section, nous aimerions conclure en examinant plusieurs éléments importants et en discutant de l'influence qu'ils pourraient avoir sur la consommation d'énergie du réseau 5G à l'avenir.

6.3.1. Réseau central et centres de données

Comme nous l'avons vu précédemment, le réseau central contribue dans une moindre mesure à la consommation d'énergie du réseau 5G. Cette situation ne devrait pas changer dans un avenir proche. L'un des principaux changements est l'apparition de la technologie de virtualisation. Des études théoriques ont prédit qu'elle pourrait entraîner une réduction de la consommation d'énergie allant jusqu'à 40 % (Al-Quzeeni, 2019). Certaines mesures préliminaires effectuées avec du matériel réel (Bellin, 2023) montrent que la technique de virtualisation a peu d'influence, sauf à haut débit où elle peut saturer et même créer un certain surcoût (jusqu'à 70 %), bien qu'il soit probable qu'une meilleure optimisation et une meilleure configuration puissent atténuer ce type de problèmes. En résumé, les changements dans la consommation du réseau central représenteront probablement moins de 40 %. Il est donc probable que cela n'ait qu'un faible impact sur la consommation totale du réseau.

Le cas des centres de données est beaucoup plus délicat. Leur consommation d'énergie (en tenant compte de tous les centres de données et pas seulement de ceux gérés par les opérateurs télécom comme dans la figure 6.1) était déjà importante au cours des années précédentes, mais elle augmente très rapidement aujourd'hui avec l'avènement des IA génératives telles que chatGPT. Elle pourrait bien devenir un facteur important de la consommation d'électricité à l'avenir. Ce sujet dépasse toutefois le cadre de ce chapitre et mériterait une analyse à part entière.

6.3.2. Appareils des utilisateurs

La plupart des données étant basées sur les rapports des opérateurs, la consommation d'énergie des appareils des utilisateurs n'a pas été prise en compte dans cette analyse. En général, les appareils mobiles (tels que les smartphones ou les objets connectés) sont conçus pour fonctionner sur batterie et sont donc généralement moins gourmands en énergie. La majeure partie de leur consommation d'énergie correspond au stade de leur production. Il est évident que les appareils fixes et branchés (tels que les téléviseurs, les ordinateurs, etc.) consomment beaucoup plus d'énergie. Toutefois, ici encore, ce point sort du cadre de ce chapitre.

6.3.3. Énergie intrinsèque

L'énergie intrinsèque correspond au coût environnemental associé à la production et à la gestion des déchets des différents équipements utilisés dans le réseau. Pour les réseaux de communication mobile, elle a toujours été nettement inférieure au coût environnemental de la phase d'utilisation. Selon les estimations, l'énergie intrinsèque des réseaux 2G/3G représentait de 20 à 33 % du cycle de vie total d'une station de base (Williams, 2022), la partie restante étant principalement associée à la consommation d'énergie pendant la phase d'utilisation. Cependant, en raison de la densification du réseau, de l'amélioration de l'efficacité énergétique des stations de base 5G et de la possibilité d'utiliser des énergies renouvelables pour alimenter les stations de base, l'énergie intrinsèque devrait jouer un rôle plus important dans les futures générations de réseaux mobiles (Bieser, 2023). Cela nécessite de prendre des mesures pour améliorer la durée de vie des stations de base et ralentir le déploiement successif des nouvelles générations.

D'autre part, comme mentionné plus haut, l'énergie intrinsèque représente la plus grande part des émissions des GES dans le cycle de vie des appareils des utilisateurs (environ 80 % selon (Bieser, 2022)). Elle est également du même ordre de grandeur que la consommation d'énergie du réseau d'accès mobile. En ce sens, il est encore plus important d'améliorer la durée de vie des smartphones et autres appareils de communication. Plusieurs interventions axées sur les consommateurs sont proposées et analysées dans (Bieser, 2022) afin d'inciter les consommateurs à prendre des décisions qui ont un impact positif sur la durée de vie des smartphones. Ces interventions vont de l'information à la persuasion (marketing et conception de l'attachement), en passant par la simplification (campagne de collecte pour faciliter la réutilisation), des incitants (réductions sur les abonnements mobiles pour les téléphones plus anciens, récompenses financières en cas de remise) et la mise en place d'un renforcement de la responsabilité élargie des producteurs à ce niveau.

6.3.4. Trafic de données et choix de déploiement

La majeure partie de l'évolution de la consommation d'énergie liée à la 5G proviendra du réseau d'accès radio. Elle sera directement liée à l'augmentation du trafic de données. Toutefois, comme nous l'avons suggéré plus haut, les choses ne se réduiront certainement pas à un facteur de proportionnalité entre le trafic de données et la consommation d'énergie. L'influence du trafic de données peut être observée en deux étapes principales. Tout d'abord, il s'agit du principal moteur du nouveau déploiement. Avec l'utilisation de MIMO et de configurations MIMO massives, les opérateurs disposent d'une grande flexibilité dans le déploiement d'équipements avec différents nombres d'antennes et de largeurs de bande, ce qui entraîne de grandes différences en termes de capacité et de consommation d'énergie. Certaines études (Bjornson, 2015 et Blandino, 2020) ont analysé

l'efficacité énergétique en fonction de ces paramètres. Il apparaît dans les deux études que les valeurs autour de 100 antennes constituent un optimum en termes d'efficacité énergétique. La question de la couverture pose des problèmes d'efficacité intéressants, comme le décrit (Lorincz, 2022), qui montre que le déploiement optimal global devrait, de manière assez naturelle, être une combinaison de stations de base MIMO massives très efficaces en termes de données dans les zones denses et de stations de base à faible puissance plus éloignées dans les zones moins denses.

Dans un deuxième temps, le trafic de données pourrait continuer à augmenter au fil du temps, même après le déploiement de la 5G au niveau local. Par conséquent, la charge moyenne de l'équipement 5G augmentera probablement au fil du temps. La consommation d'énergie progressera légèrement, ce qui correspond à la partie dynamique du profil de puissance décrit ci-dessus (voir les Figures 6.2 et 6.7 ci-dessous). Cela se traduit généralement par une lente amélioration de l'efficacité énergétique au fil du temps. Les équipements ayant la capacité la plus élevée tendent à avoir le meilleur rendement à charge maximale, mais peuvent avoir un rendement très faible et une consommation d'énergie importante s'ils ne sont pas utilisés à leur plein potentiel (c'est la source des rapports sur la consommation d'énergie très élevée des premiers déploiements, comme en Chine).

6.3.5. Effets rebond

L'augmentation du trafic de données est l'un des principaux moteurs du déploiement de nouvelles stations de base gourmandes en énergie. Jusqu'à présent, l'évolution naturelle du trafic de données a été principalement déterminée par les applications (avec une influence majeure des GAFAM). Les réseaux de communication se sont toujours adaptés pour rendre ces évolutions possibles, validant indirectement l'augmentation considérable du trafic de données. Comme l'indique (Williams, 2022), « l'adoption généralisée d'abonnements illimités pour les utilisateurs de la 5G et la facilitation de services mobiles avancés et gourmands en données, tels que la RV et des jeux mobiles plus pointus, pourraient encourager des pratiques d'utilisation énergivores, contribuer à des niveaux toujours plus élevés de trafic de données et contrecarrer le potentiel d'économie d'énergie des améliorations de l'efficacité de la 5G ». Dans le contexte de la nécessaire réduction de l'empreinte carbone dans tous les secteurs, il y a certainement lieu d'étudier d'autres modèles de régulation du trafic de données, tels que l'imposition d'une tarification ou de quotas basés sur les données. Comme mentionné dans (Williams, 2022), il serait très utile de poursuivre les recherches dans ces directions.

6.3.6 Caractéristiques d'économie d'énergie

Le concept de fonctions d'économie d'énergie (ou modes de veille) a été mentionné plus haut. L'idée des fonctions d'économie d'énergie est de réduire la consommation d'énergie des stations de base en désactivant une partie de leur hardware lorsqu'elles n'émettent pas. Cette tâche est facilitée dans la 5G par ce que l'on appelle la signalisation allégée, qui laisse plus de temps entre la transmission des signaux de contrôle périodiques. Des durées de sommeil plus longues sont donc possibles, en particulier dans le cas d'un trafic de données faible à moyen. L'utilisation de fonctions d'économie d'énergie dans le matériel 5G est évidemment très importante pour réduire la consommation d'énergie de la 5G. Il existe de nombreux types de dispositifs d'économie d'énergie, avec différentes parties de l'équipement qui sont éteintes, et avec différentes durées (voir par exemple (Islam, 2023) pour la description des différents types de dispositifs). Le fait de disposer de différents niveaux de modes veille permet une plus grande optimisation et conduit donc à une réduction plus importante de la consommation d'énergie (Huertes, 2025). Ces optimisations nécessitent généralement un

modèle précis de consommation d'énergie de l'équipement de la station de base, qui peut être obtenu au niveau d'un équipement donné, en ajustant un modèle analytique aux données de mesure ou par le biais de méthodes d'apprentissage machine (Piovesan, 2022). Les méthodes de gestion optimale des modes veille, en fonction de différents critères et différentes situations, sont présentées et comparées dans (Peschiera, 2025). Certains résultats sont présentés pour les équipements actuels et montrent que la gestion de l'économie d'énergie peut permettre de réduire la consommation d'énergie d'environ 25 à 40 % à charge moyenne à faible. Il est important de noter que cela a un effet important sur le profil de consommation d'énergie. La consommation d'énergie statique tend à diminuer et la partie dynamique devient moins linéaire. En conséquence, l'efficacité énergétique des stations de base s'améliore en cas de charge faible à moyenne (par rapport à la situation sans mode de veille).

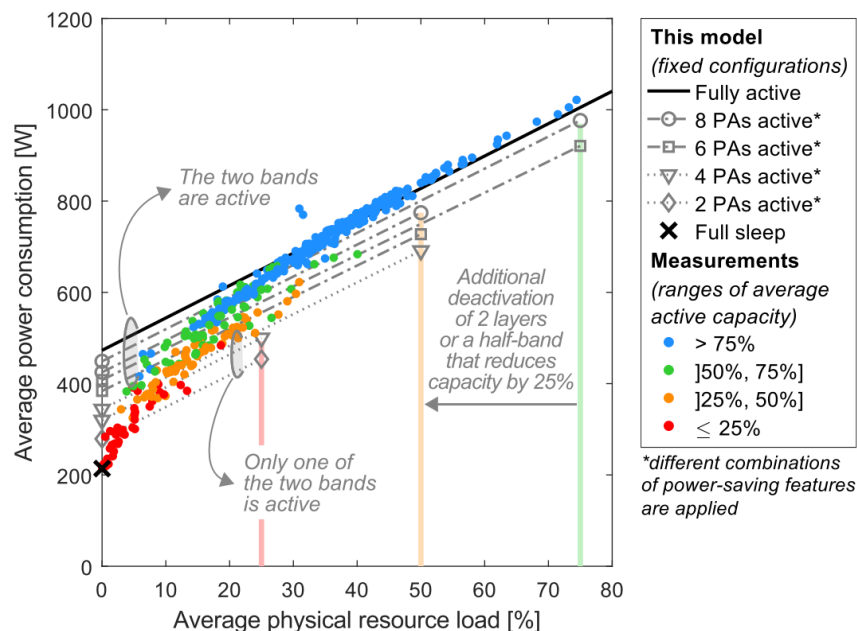


Figure 6.6 : Puissance moyenne en fonction de la charge lors de l'utilisation des fonctions d'économie d'énergie pour un exemple de RRU (Remote Radio Unit). D'après (Golard, 2024).

6.3.7 Impact des politiques

On trouve dans (Zagdanski, 2023), une analyse intéressante concernant l'impact potentiel des politiques en matière de spectre sur la consommation d'énergie et, plus généralement, sur les émissions de carbone des réseaux de communication mobile. Les principales conclusions sont les suivantes 1) permettre un spectre plus large peut contribuer à fournir un débit plus élevé par station de base, à réduire le nombre de stations de base nécessaires et, par conséquent, à réduire l'énergie intrinsèque totale du réseau ; 2) la fragmentation du spectre nuit à l'efficacité énergétique du réseau ; 3) dans l'état actuel de la technique, les équipements fonctionnant à des fréquences porteuses plus élevées consomment plus d'énergie et, par conséquent, le passage du spectre disponible à des fréquences plus élevées entraînera une hausse du coût énergétique. Des évaluations numériques sont données dans (Zagdanski, 2023). Cependant, ces évaluations reposent largement sur des prédictions basées sur des mesures d'intensité fixes, que l'on sait imprécises.

6.4. Conclusions

En conclusion, la consommation d'électricité du réseau d'accès mobile a évolué de manière significative avec chaque génération (Fig. 4). Il est très probable que cela se reproduise avec l'arrivée de la 5G. Elle était liée à l'augmentation du nombre d'abonnés dans le passé. Toutefois, pour la 5G, il semble probable que l'augmentation exponentielle continue du trafic puisse avoir un impact plus important (en raison de toutes les évolutions techniques nécessaires pour permettre cette croissance du trafic, telles que le MIMO massif). Dans ce contexte, les choix de déploiement et la mise en œuvre de fonctions d'économie d'énergie seront des facteurs clés qui détermineront la consommation d'énergie finale du réseau. En ce qui concerne le déploiement, on peut légitimement se demander si les opérateurs doivent être encouragés à poursuivre sur la voie de l'augmentation exponentielle de la capacité.

Bibliographie

Charlotte Freitag, Mike Berners-Lee, Kelly Widdicks, Bran Knowles, Gordon S. Blair, Adrian Friday, "The real climate and transformative impact of ICT: A critique of estimates, trends, and regulations, Patterns," Volume 2, Issue 9, 2021, 100340.

Jens Malmodin, Nina Lövehagen, Pernilla Bergmark, Dag Lundén, "ICT sector electricity consumption and greenhouse gas emissions – 2020 outcome", Telecommunications Policy, Volume 48, Issue 3, 2024.

J. Malmodin, and D. Lundén, "The Energy and Carbon Footprint of the Global ICT and E&M Sectors 2010–2015" Sustainability 10, no. 9: 3027, 2018.

D. Lundén, J. Malmodin, P. Bergmark, N. Lövehagen, "Electricity Consumption and Operational Carbon Emissions of European Telecom Network Operators," Sustainability 2022, 14, 2637, 2022.

P. Frenger and R. Tano, "More Capacity and Less Power: How 5G NR Can Reduce Network Energy Consumption," 2019 IEEE 89th Vehicular Technology Conference (VTC2019-Spring), Kuala Lumpur, Malaysia, 2019.

BIPT, « Communication du Conseil de l'IBPT du 19 décembre 2023 concernant la durabilité des réseaux de télécommunications en Belgique », December 2023.
<https://www.ibpt.be/opérateurs/publication/communication-du-19-decembre-2023-concernant-la-durabilite-des-reseaux-de-telecommunications-en-belgique>

Joint ITU&World Bank, « Measuring the Emissions & Energy Footprint of the ICT Sector », 2024

Kozioł M. "5G's waveform is a battery vampire", IEEE Spectrum, July 2019.
<https://spectrum.ieee.org/5gs-waveform-is-a-battery-vampire>

Small cell forum, "Small cells market status report February 2018", February 2018.
<https://www.scf.io/en/documents/050 - Small cells market status report February 2018.php>

Laurence Williams, Benjamin K. Sovacool, Timothy J. Foxon, "The energy use implications of 5G: Reviewing whole network operational energy, embodied energy, and indirect effects," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 157, 2022.

ABI Research, "5G Sustainability", 2021. <https://go.abiresearch.com/lp-5g-sustainability>

Golard, L., Louveaux, J. & Bol, D. Evaluation and projection of 4G and 5G RAN energy footprints: the case of Belgium for 2020–2025. *Ann. Telecommun.* 78, 313–327 (2023).

Louis Golard, Youssef Agram, François Rottenberg, François Quitin, David Bol, Jérôme Louveaux, « A Parametric Power Model of Multi-Band Sub-6 GHz Cellular Base Stations Using On-Site Measurements », *Proceedings of the 2024 IEEE 35th Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, Sep. 2024.

A. N. Al-Quzweeni, A. Q. Lawey, T. E. H. Elgorashi and J. M. H. Elmirghani, "Optimized Energy Aware 5G Network Function Virtualization," in *IEEE Access*, vol. 7, pp. 44939-44958, 2019.

A. Bellin, M. Centenaro and F. Granelli, "A Preliminary Study on the Power Consumption of Virtualized Edge 5G Core Networks," *2023 IEEE 9th International Conference on Network Softwarization (NetSoft)*, Madrid, Spain, 2023, pp. 420-425.

E. Björnson, L. Sanguinetti, J. Hoydis and M. Debbah, "Optimal Design of Energy-Efficient Multi-User MIMO Systems: Is Massive MIMO the Answer?," in *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 14, no. 6, pp. 3059-3075, June 2015,.

S. Blandino, C. Desset, A. Bourdoux and S. Pollin, "Energy Efficiency of Multiple-Input, Multiple-Output Architectures: Future 60-GHz Applications," in *IEEE Vehicular Technology Magazine*, vol. 15, no. 2, pp. 65-71, June 2020.

J. Lorincz, Z. Klarin and D. Begusic, "Modeling and Analysis of Data and Coverage Energy Efficiency for Different Demographic Areas in 5G Networks," in *IEEE Systems Journal*, vol. 16, no. 1, pp. 1056-1067, March 2022.

T. Islam, D. Lee and S. S. Lim, "Enabling Network Power Savings in 5G-Advanced and Beyond," in *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 41, no. 6, pp. 1888-1899, June 2023.

Jann Camilo Sánchez Huertas, Greta Vallero, Loutfi Nuaymi, Anne-Cécile Orgerie, "Review and classification of the use of SMs for energy saving in next-generation radio access networks," in *Computer Networks*, Volume 273, 2025.

Jan C.T. Bieser, Yann Blumer, Linda Burkhalter, René Itten, Marilou Jobin, Lorenz M. Hilty, "Consumer-oriented interventions to extend smartphones' service lifetime," *Cleaner and Responsible Consumption*, Volume 7, 2022.

J. Bieser, B. Salieri, R. Hischier, L.M. Hilty, (2023), " Opportunities of 5G Mobile Technology for Climate Protection in Switzerland," In: Wohlgemuth, V., Naumann, S., Behrens, G., Arndt, HK., Höb, M. (eds) *Advances and New Trends in Environmental Informatics. ENVIROINFO 2022. Progress in IS.* Springer, Cham.

N. Piovesan, D. López-Pérez, A. De Domenico, X. Geng, H. Bao and M. Debbah, "Machine Learning and Analytical Power Consumption Models for 5G Base Stations," in *IEEE Communications Magazine*, vol. 60, no. 10, pp. 56-62, October 2022.

E. Peschiera, Y. Agram, F. Quitin, L. V. d. Perre and F. Rottenberg, "On Optimizing Time-, Space- and Power-Domain Energy-Saving Techniques for Sub-6 GHz Massive MIMO Base Stations," *2025 IEEE 26th International Workshop on Signal Processing and Artificial Intelligence for Wireless Communications (SPAWC)*, Surrey, United Kingdom, 2025, pp. 1-5.

G. Guennebaud, A. Bugeau and A. Dudouit, "Assessing VoD Pressure on Network Power Consumption," *2023 International Conference on ICT for Sustainability (ICT4S)*, Rennes, France, 2023, pp. 76-86.

R. Singh, D. Jadaan, D. Ghimire, M. Berger, A. Skavhaug and L. Dittmann, "Comparative Analysis of Power Consumption in LTE, 5G-NSA, 5G-SA, and Private 5G Networks," *2025 IEEE 22nd Consumer Communications & Networking Conference (CCNC)*, Las Vegas, NV, USA, 2025, pp. 1-2.

G. Kamiya, and P. Bertoldi, "Energy consumption in data centres and broadband communication networks in the EU," (pp. 1831-9424). Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2024

J. Zagdanski, P. Castells, "The impact of spectrum policy on carbon emissions," *32nd European Conference of the International Telecommunications Society (ITS)*, Madrid, Spain, 19th-20th June 2023, Calgary.

7. Commentaires sur les effets des champs électromagnétiques de radiofréquence associés à la technologie de cinquième génération sur la flore et la faune

L'adoption croissante des technologies de communication mobile a soulevé des inquiétudes par rapport aux risques environnementaux liés à l'exposition prolongée des écosystèmes aux champs électromagnétiques dans la bande de fréquences des micro-ondes. Ces préoccupations ont été amplifiées par le déploiement des réseaux mobiles de cinquième génération (5G) (Di Ciaula, 2018), qui entraîne une augmentation de la fréquence de base qui utilise généralement 3,4 à 3,8 GHz dans la bande moyenne et potentiellement des ondes millimétriques pour les communications à haut débit et à courte portée (24,25 GHz à 71,0 GHz). Cela s'inscrit, qui plus est, dans un contexte d'incertitude scientifique et de controverse quant aux effets des champs électromagnétiques des télécommunications sur la faune et la flore (Karipidis et al., 2023 ; Thielens, 2021 ; Simko & Mattsson, 2019 ; Cucurachi et al., 2013 ; Froidevaux et al., 2023), même au niveau des bandes de fréquences établies et relativement bien étudiées centrées sur 900, 1800 et 2450 MHz, qui couvrent les téléphones mobiles et les stations de base pré-5G, ainsi que le Wi-Fi.

Aucune norme d'exposition n'a été élaborée pour évaluer les risques et limiter l'exposition des espèces non humaines aux champs électromagnétiques des radiofréquences (Pophof et al. 2023). Bien qu'il soit largement admis que les animaux, les végétaux et les écosystèmes sont protégés des effets néfastes sur la santé si les humains le sont, des conditions d'exposition et des mécanismes d'interaction uniques pourraient entraîner des effets spécifiques sur la flore et la faune, et des effets biologiques sur les espèces et les écosystèmes pourraient se manifester à des niveaux qui ne présentent pas de risque immédiat pour la santé (Cucurachi et al., 2013 ; Froidevaux et al., 2023). En général, notre compréhension de ces facteurs particuliers et des risques d'exposition qui en découlent est limitée, et les données actuelles n'ont encore permis d'atteindre aucun consensus.

Pour protéger le public et les travailleurs des effets néfastes sur la santé, scientifiquement prouvés, des champs électromagnétiques (CEM) de radiofréquence (RF) dans la gamme de 100 kHz à 300 GHz, la Commission internationale de protection contre les rayonnements non ionisants (International Commission on Non-Ionising Radiation Protection, ICNIRP) a adopté des lignes directrices en matière d'exposition qui ont été réaffirmées récemment (ICNIRP, 2020) et constituent la base de la politique en la matière dans de nombreux pays. Dans le spectre des fréquences pertinent pour les télécommunications, l'ICNIRP attribue les effets néfastes sur la santé au réchauffement des tissus induit par les champs électromagnétiques des radiofréquences. L'ICNIRP affirme actuellement qu'il n'existe aucune preuve étayée de mécanismes d'interaction « non thermiques » qui permettraient de prédire les effets nocifs d'une exposition aux CEM-RF inférieure aux niveaux des seuils de base des débits d'absorption spécifique (DAS). Toutefois, la pertinence de ces lignes directrices pour l'exposition non humaine n'est pas prouvée et, en partie, n'est pas pratique (par exemple pour les insectes, en raison de leur faible masse ; un DAS moyen de 1 mg a récemment été suggéré comme nouvelle mesure pour la biodosimétrie à petite échelle afin d'élargir la discussion ; Jeladze et al., 2025), et les effets biologiques et les effets nocifs sur la santé ne sont pas nécessairement des concepts concordants.

Les animaux, les végétaux et, par conséquent, les écosystèmes sont exposés à des risques spécifiques, dus, en partie, à la modification des schémas d'exposition, et en partie à la modification des

mécanismes d'interaction et de la possibilité d'interférence avec les systèmes sensoriels des animaux, sur lesquels nous reviendrons plus loin.

7.1. À propos des conditions d'exposition modifiées des animaux

Les animaux sont soumis à des schémas d'exposition aux champs électromagnétiques des radiofréquences souvent nettement différents de ceux liés aux humains, et cela en termes tant d'intensité que de distribution spatiale. Les espèces volantes, par exemple, les oiseaux et les insectes peuvent pénétrer dans les zones de champ proche ou dans les zones d'exclusion situées autour des émetteurs, où les intensités de champ dépassent les niveaux environnementaux types. En raison de leur petite taille, de leur morphologie distincte et des propriétés diélectriques de leurs tissus, les petits animaux, en particulier les insectes, absorbent l'énergie RF de manière plus efficace dans les gammes GHz à ondes millimétriques (Thielens et al., 2018 ; Thielens et al., 2020 ; De Borre et al., 2021 ; Herssens et al., 2022). Cette donnée s'avère particulièrement pertinente pour la 5G et les futurs réseaux sans fil, qui utilisent des fréquences porteuses plus élevées et une formation de faisceaux directionnels qui modifie les conditions d'exposition spatiale et temporelle dans les habitats naturels (Colombi et al., 2015 ; Simko & Mattsson, 2019).

Des études de modélisation indiquent que même de modestes augmentations de la fréquence de transmission peuvent considérablement amplifier l'absorption chez les petits organismes. Par exemple, chez les abeilles mellifères, une augmentation de 10 % de la densité de puissance incidente de moins de 3 GHz à plus de 6 GHz peut plus que tripler la puissance absorbée (Thielens et al., 2020). Une telle redistribution des fréquences, caractéristique des réseaux de nouvelle génération, suggère que l'exposition des insectes volants aux CEM-RF augmentera probablement aussi bien en termes d'ampleur que d'hétérogénéité spatiale. La dosimétrie numérique récente a affiné ces prédictions grâce à des modèles d'insectes hétérogènes et anatomiquement réalistes. Jeladze et al. (2025) ont quantifié les DAS spécifiques aux tissus chez l'abeille mellifère (*Apis mellifera*), la guêpe (*Vespula vulgaris*), la coccinelle (*Coccinella septempunctata*) et la mante religieuse (*Mantis religiosa*) entre 2,5 et 100 GHz. Des couches diélectriques distinctes (cuticule, tissu interne et cerveau) ont été simulées à l'aide de la méthode FDTD afin d'évaluer l'absorption en fonction de la fréquence. Les DAS neuronaux maximaux ont été enregistrés à des résonances spécifiques à chaque espèce : 25 GHz pour les abeilles mellifères ($3,6 \text{ W kg}^{-1}$), 12 GHz pour les guêpes ($5,4 \text{ W kg}^{-1}$), 25 GHz pour les mantes ($5,2 \text{ W kg}^{-1}$) et 60 GHz pour les coccinelles (10 W kg^{-1}) pour une densité de puissance incidente de 1 mW cm^{-2} . L'absorption des CEM dans les tissus cuticulaires a augmenté de manière presque linéaire avec la fréquence, ce qui suggère que l'échauffement de surface peut devenir pertinent à des longueurs d'onde millimétriques.

Collectivement, ces résultats renforcent les prédictions antérieures selon lesquelles les gammes de fréquences associées à la 5G pourraient induire une résonance partielle ou totale chez les insectes, entraînant une absorption d'énergie localisée plus élevée (Thielens et al., 2018 ; Thielens et al., 2020 ; De Borre et al., 2021 ; Herssens et al., 2022), ce qui devrait être pris en compte dans les évaluations d'impact écologique des scénarios de déploiement de la 5G, en particulier compte tenu du rôle central des insectes dans la reproduction des végétaux, les réseaux trophiques et la biodiversité globale (Balmori, 2015 ; Balmori, 2021 ; Cucurachi et al., 2013).

Les végétaux, en tant qu'organismes sessiles, sont continuellement exposés aux CEM-RF ambiants, et leurs schémas d'exposition évolueront avec l'expansion de la 5G et des futurs réseaux sans fil. Contrairement aux animaux, les végétaux ne peuvent pas se déplacer hors des zones à champ élevé, leur exposition variant en fonction de la hauteur de la canopée, de la teneur en humidité et des propriétés diélectriques des tissus qui déterminent la pénétration et l'absorption du champ (Vian et al., 2016 ; Halgamuge, 2017). L'utilisation croissante de fréquences plus élevées (> 6 GHz) et de réseaux denses à petites cellules pourrait modifier les gradients des champs électromagnétiques à proximité de la surface. Étant donné que la profondeur de pénétration dans les tissus végétaux diminue avec la fréquence, l'absorption localisée en surface dans les feuilles et les méristèmes pourrait s'intensifier à des longueurs d'onde millimétriques, ce qui pourrait affecter la perméabilité membranaire, le transport ionique et les réponses au stress oxydatif (Waldmann-Selsam et al., 2016 ; Zhong et al. 2021).

7.2. Mécanismes d'interaction sensorielle spécifiques qui influencent la sensibilité aux CEM-RF.

De nombreux animaux possèdent des systèmes sensoriels capables de détecter de faibles champs magnétiques ou électriques, ce qui pourrait, en principe, les rendre plus sensibles aux interférences électromagnétiques. La magnéto- et l'électrosensation sont répandues dans tous les taxons et soutiennent des comportements vitaux tels que la migration, la recherche de nourriture et la reproduction (Pophof et al., 2023b). La magnétoréception repose sur des mécanismes biophysiques spécialisés qui permettent aux organismes de percevoir et d'utiliser le champ magnétique terrestre. Trois mécanismes principaux ont été proposés : (i) l'induction électromagnétique dans les électrorécepteurs, (ii) les interactions magnéto-mécaniques impliquant des particules de magnétite biogéniques, et (iii) les réactions des paires de radicaux magnétiquement sensibles se produisant dans les photorécepteurs cryptochromes qui dépendent de la lumière.

Le mécanisme des paires de radicaux (radical-pair mechanism (RPM)) est censé expliquer l'orientation magnétique dépendante de la lumière chez les oiseaux migrateurs (Hore & Mouritsen, 2016) et d'autres taxons, et il est discuté dans le contexte des divers effets biologiques des faibles champs magnétiques (Zadeh-Haghighi & Simon, 2022). Dans ce modèle, les paires de radicaux photo-induites s'interconvertissent entre les états singulet et triplet en fonction du champ magnétique environnant. Des champs magnétiques oscillants faibles dans une gamme de fréquences et d'amplitudes spécifique peuvent perturber cette dynamique de spin quantique, ce qui peut perturber l'orientation. Il est intéressant de noter que le RPM s'applique également aux plantes, qui réagissent aux champs magnétiques en raison de la dynamique de spin au niveau de leur photorécepteur cryptochrome (Thoradit et al., 2023).

Des travaux expérimentaux montrent que des champs magnétiques de très faibles radiofréquences (RF) dans la gamme des fréquences moyennes (MF) à très hautes fréquences (VHF) peuvent interférer avec la magnétoréception basée sur le RPM chez les oiseaux chanteurs migrateurs nocturnes, entraînant une désorientation transitoire (Leberecht et al., 2023), et chez les végétaux (Albaqami et al., 2020). Cependant, cet effet disparaît au-dessus d'environ 116 MHz, soit bien en dessous des

fréquences gigahertz utilisées dans les communications mobiles (Leberecht et al., 2023). De manière similaire, les mécanismes basés sur la magnétite ne réagissent qu'aux champs magnétiques statiques ou à très basse fréquence et ne sont pas affectés par les signaux RF (Shaw et al., 2015). L'induction électromagnétique n'est connue que chez certains poissons élasmobranches équipés d'organes ampullaires et fonctionne à des basses fréquences comprises entre quelques hertz et quelques kilohertz, bien en dehors des bandes de télécommunication (Anderson et al., 2017).

En résumé, bien que les systèmes biologiques magnéto- et électrosensibles présentent une sensibilité remarquable aux champs faibles, leurs gammes de fréquences de fonctionnement ne chevauchent pas celles utilisées dans les communications sans fil modernes. Les preuves actuellement disponibles ne vont donc pas dans le sens d'une susceptibilité accrue des animaux ou des végétaux aux CEM-RF aux fréquences de télécommunication. Il est toutefois essentiel de poursuivre les recherches interdisciplinaires combinant la modélisation biophysique et les études comportementales et écologiques afin de clarifier les effets indirects ou cumulés potentiels.

7.3 À propos des effets non sensoriels des champs électromagnétiques des radiofréquences

De nombreuses études ont été menées pour mettre en évidence les effets nocifs des CEM RF sur les animaux et les végétaux (Karipidis et al., 2023 ; Thielens, 2021 ; Simko & Mattsson, 2019 ; Cucurachi et al., 2013). Cependant, malgré des efforts considérables, les études menées sur un large éventail de critères d'évaluation biologiques et de systèmes aboutissent à des conclusions très divergentes qui, dans l'ensemble, ne permettent pas une évaluation solide de la sécurité et soulèvent des questions quant à la fiabilité des résultats. En effet, de nombreuses études sont de mauvaise qualité, ne comportent pas de dosimétrie ou de protocoles expérimentaux en aveugle et de détails expérimentaux essentiels, n'incluent que petits groupes expérimentaux et sont basées sur des conditions d'exposition différentes des expositions réelles. Le mécanisme d'interaction physique des effets non thermiques suggérés reste flou, ce qui empêche une évaluation ascendante rationnelle des risques par rapport aux interactions thermiques. Cela souligne la nécessité de poursuivre des recherches de haute qualité sur les effets de l'exposition aux CEM-RF, y compris sur les plantes et les animaux, et de reproduire de manière indépendante les effets signalés dans le domaine subthermique, ainsi que de mener des recherches sur leurs mécanismes physiques. Il est recommandé que les politiques prévoient des mesures d'incitation pour ces derniers.

Les chercheurs ne sont pas tous d'accord sur le fait que les rayonnements non thermiques de faible intensité ont ou n'ont pas d'effets biologiques et sur le fait que des limites de sécurité basées sur les effets thermiques sont ou pas suffisantes. Il n'y a pas, non plus, de consensus sur les effets à long terme et à faible intensité sur les écosystèmes, et certaines études soulignent les risques potentiels pour les espèces vulnérables, notamment en ce qui concerne la navigation, la reproduction, les risques de cancer et la santé de l'écosystème. Les instances faisant autorité qui ont examiné l'ensemble des preuves ont conclu qu'il n'existe actuellement aucune preuve cohérente et hautement certaine de dommages causés à la flore et à la faune aux niveaux d'exposition environnementale ou aux effets non thermiques, tout en appelant à des recherches écologiques plus ciblées, à long terme et standardisées (EPRS PE 690.021, 2021 ; BfS 2023). Quoi qu'il en soit, il convient de reconnaître qu'il s'agit d'un domaine de recherche actif et que l'interprétation des résultats peut varier. Dans ce contexte, les méta-études systématiques s'avèrent précieuses pour identifier les tendances générales,

les modèles émergents, les lacunes dans les connaissances et les domaines potentiels de préoccupation. Nous allons résumer ici les conclusions des études récentes, publiées en 2024 et 2025.

Récemment, Karipidis et son équipe ont dressé une carte systématique de toutes les sources anthropiques de CEM-RF, y compris les fréquences dans l'ensemble de la gamme RF, de 100kHz à 300GHz (Brzozek et al., 2024). 334 études, publiées avant 2023, ont été jugées éligibles (237 sur la faune et 97 sur la flore) et ont été analysées en fonction de l'ampleur des effets et de la qualité de la recherche. Si l'on tient compte de la radioprotection, l'image qui en résulte n'est pas rassurante. La grande majorité des études ont été jugées de qualité médiocre, 5,6 % et 2,1 % seulement étant considérées comme de bonne qualité pour la faune et la flore, respectivement. En outre, il existe une corrélation négative significative entre le score de qualité et l'ampleur de l'effet pour les études sur la faune, ce qui indique que les études qui font état d'effets négatifs de l'exposition aux radiofréquences sur les animaux ont tendance à être de moindre qualité. En fait, le score de qualité s'est avéré plus révélateur de l'ampleur de l'effet que les paramètres du niveau d'exposition ou la durée d'exposition et, de manière contre-intuitive, les effets diminuent avec les paramètres du niveau d'exposition ou la durée d'exposition. Les auteurs concluent que cela soulève des doutes quant à la question de savoir si les animaux et les plantes sont réellement affectés à des niveaux inférieurs aux limites d'exposition humaine, soulignant la nécessité de poursuivre des recherches de haute qualité sur les effets de l'exposition aux CEM-RF des végétaux et des animaux, en particulier au-delà de quelques groupes de preuves mieux étudiés (liés à la reproduction, au développement et au comportement des insectes et des oiseaux pour les animaux, et à la germination et à la croissance des céréales et des légumineuses pour les végétaux). D'autres études d'observation sont également nécessaires pour étudier l'impact écologique des CEM-RF anthropiques.

Weller et al. (2025) ont très récemment publié leur revue exploratoire et leur cartographie des preuves évaluant les données *in vivo*, *in vitro* et épidémiologiques sur l'exposition aux champs de radiofréquence (3 kHz-300 GHz) en ce qui concerne un lien potentiel avec la génotoxicité. Conformément aux éléments de rapport privilégiés pour les revues systématiques et les méta-analyses dans le cadre des revues exploratoires (PRISMA-ScR), les auteurs ont examiné 517 études (dont 130 étaient de bonne qualité) et ont constaté des dommages à l'ADN dus à l'exposition aux CEM RF dans 59 % des études (48 % des études de bonne qualité), et plus particulièrement des dommages aux bases de l'ADN et des cassures des brins d'ADN. La sensibilité aux dommages variait selon le type de cellules, avec une vulnérabilité particulière des cellules reproductrices (testiculaires, spermatiques et ovariennes) et des cellules cérébrales. Une relation dose-réponse complexe en forme en U a été observée au niveau tant de la durée que de l'intensité de l'exposition, ce qui souligne une préoccupation potentielle concernant les expositions de faible intensité de durée moyenne (1 jour à 3 mois) et de longue durée aux CEM-RF (> 3 mois ou 1 000 h). Les auteurs ont également identifié des dommages statistiquement significatifs de l'ADN à des intensités extrêmement faibles ($DAS < 0,001$ W/kg), qui sont nettement inférieures (> 600 000 fois dans certains cas) aux limites d'exposition publique fixées par l'ICNIRP (2 W/kg pour la tête et le torse pour le grand public, en moyenne sur 10 grammes de tissu). Parmi les études à épinglez dans cette catégorie, nous noterons les études menées par Burlaka et al. (2013) et Tsybulin et al. (2013) sur des embryons de cailles japonaises exposés *in ovo* à des champs GSM 900 MHz discontinus ($0,25 \mu W/cm^2$) pendant 158 à 360 heures, qui ont montré une surproduction d'espèces réactives de l'oxygène, des signes de stress oxydatif et une altération de l'embryogenèse précoce. En général, les dommages à l'ADN ont été plus susceptibles d'être détectés dans les études *in vivo*, avec des intensités de signal très faibles ou très fortes, des durées d'exposition très longues ou très courtes, des fréquences de 900, 1 800 et 2 450 MHz, le mode appel des GSM et

des ondes pulsées, en particulier lors de l'utilisation d'appareils qui utilisent des radiofréquences dans le cadre de la vie de tous les jours. Bien qu'elles soient moins nombreuses (et leurs conclusions donc moins certaines), les études sur les espèces autres que les mammifères, et en particulier celles menées sur les végétaux, les insectes, les vers, les amphibiens et les oiseaux, ont montré une forte proportion (80 à 100 %) de résultats indiquant des dommages à l'ADN et un stress oxydatif induits par les RF. De manière similaire, 71 % des études sur les insectes ont identifié des effets statistiquement significatifs sur l'ADN. Les preuves suggèrent également des voies de dommages de l'ADN de nature mécanique, plus particulièrement liées à une augmentation de la production de radicaux libres et au stress oxydatif. La carte des preuves a également identifié plusieurs lacunes importantes dans la recherche, par exemple, le nombre limité d'études sur les effets génotoxiques des RF sur les espèces non mammifères, notamment les insectes, les oiseaux et les arbres. Il n'existe pas, non plus, d'études sur les reptiles et, chez les mammifères, les recherches se limitent aux études sur les humains et les rongeurs. Malgré leur prévalence croissante, on dispose aussi de très peu d'études sur les fréquences plus élevées, notamment celles utilisées par les technologies 5G modernes (bande moyenne 3,5 GHz ou ondes millimétriques 26-40+ GHz). La recherche est donc en retard sur les avancées technologiques et de ce fait, des risques potentiels restent largement inexplorés.

La revue systématique de Mevissen et al. (2025), conforme aux critères PECOS, conclut qu'il existe des preuves à l'appui d'une incidence accrue de certains cancers chez les animaux de laboratoire exposés aux CEM RF, avec le degré de certitude de preuve le plus élevé (Certainty of evidence (CoE)) au niveau des schwannomes cardiaques malins et des gliomes chez les rats mâles. Sur la base de 52 études, dont 20 bioessais chroniques, les auteurs ont trouvé un CoE élevé au niveau de l'augmentation des risques de gliome et de schwannome cardiaque, un CoE modéré au niveau du lymphome, du phéochromocytome (glande surrénale), de l'hépatoblastome (foie) et des néoplasies pulmonaires, ainsi que les preuves minimales ou inexistantes au niveau de la plupart des autres systèmes organiques. Les auteurs soulignent que l'extrapolation de ces résultats reste complexe en raison des incertitudes qui entourent les mesures d'exposition, les relations dose-réponse et les mécanismes sous-jacents de la cancérogénicité des CEM RF. En outre, ils impliquent ces effets dans le cadre aussi de dommages à l'ADN et de stress oxydatif induits par la production de radicaux libres, ce qui pourrait aussi laisser sous-entendre un éventuel mécanisme biologique.

La revue systématique de Danho et al. (2025) qui repose également sur les lignes directrices PRISMA, se concentre sur les effets nocifs des CEM sur les organismes vivants, tels que publiés dans des études menées entre 2017 et 2024. Les auteurs concluent que l'exposition aux CEM peut induire des effets biologiques mesurables dans toute une série d'organismes vivants, y compris la flore et la faune. Chez les animaux, les CEM ont été associés au stress oxydatif, à l'inflammation, à une baisse de la fertilité, à une altération de l'activité neuronale et à une perturbation des processus physiologiques, tandis que chez les végétaux, des études ont fait état d'une altération de la photosynthèse, de changements dans la croissance et de réponses au stress cellulaire. Bien que ces résultats suggèrent des risques écologiques et sanitaires potentiels liés à l'augmentation de l'exposition aux CEM, la certitude globale des preuves reste faible en raison de la variabilité méthodologique et des biais entre les études. Les auteurs soulignent le besoin urgent de mener des recherches standardisées, à long terme et transparentes pour mieux comprendre les impacts des CEM sur les écosystèmes et d'éclairer les politiques environnementales et de santé publique fondées sur des preuves.

En termes de résultats, la littérature primaire montre des effets biologiquement plausibles des CEM-RF (y compris les fréquences 5G, mais moins étudiées) sur les végétaux et les animaux dans certaines

conditions de laboratoire et identifie des critères d'évaluation vulnérables (pollinisateurs, petits insectes, croissance des semis, photosynthèse) et certaines similitudes mécanistiques, mais il n'existe pas encore de preuves solides et représentatives sur le terrain que les déploiements actuels de la 5G causent des dommages au niveau des populations ; pour résoudre ce problème, il faut mener des études coordonnées, écologiquement réalistes et à long terme, avec une dosimétrie standardisée et en accordant une attention particulière aux espèces et aux stades de vie particulièrement vulnérables.

7.4. À propos des résultats récents sur les insectes

Les études sur les effets des CEM-RF sur les insectes dans les environnements naturels sont rares. Une étude suggère que le rayonnement électromagnétique des antennes de télécommunication a affecté l'abondance et la composition de plusieurs guildes d'insectes pollinisateurs sauvages dans leurs habitats naturels sur deux îles de la mer Égée (l'abondance des coléoptères, des guêpes et des syrphes a diminué et celle des abeilles sauvages et des syrphes qui nichent sous terre a augmenté ; la richesse des espèces de syrphes a eu tendance à diminuer avec l'intensité du champ sur une île ; Lázaro et al., 2016). S'il est causal, l'impact négatif sur l'abondance de certaines espèces et la modification de la composition en espèces des communautés de pollinisateurs sauvages dans les habitats naturels pourraient avoir une importance écologique. En raison de l'importance des pollinisateurs pour l'homéostasie des écosystèmes, et du fait qu'aucune revue systématique n'a spécifiquement été menée sur les insectes, tandis qu'une revue non systématique (Thill et al. 2023) a suscité des controverses quant à l'interprétation des preuves (Spotlight, mai/2024 n° 2), nous résumons ci-dessous une sélection d'études récentes qui testent les fréquences RF/5G pertinentes.

Treder et al. (2023) ont exposé des colonies d'abeilles mellifères à des CEM-RF simulées (2,45 et 5,805 GHz). Dans le cadre d'une expérimentation en aveugle sur le terrain menée à l'aide d'un simulateur de rayonnement spécialement conçu (paquets Wi-Fi à 2,45 GHz et 5,805 GHz ; PIRE $\approx$ 177,8 mW à 2,45 GHz et 10 mW à 5,805 GHz, exposition continue pendant plusieurs semaines avant les tests), l'exposition à long terme a réduit le taux de réussite du retour au nid des abeilles butineuses (retour de contrôle $\sim$ 95,2 % contre $\sim$ 78,6 % pour les abeilles exposées) et a augmenté le temps de retour au nid ($\sim$ 20 % plus long), tandis que le développement du couvain et la longévité des ouvrières adultes n'ont pas été affectés ; une irradiation à court terme (40 min) n'a pas entraîné de déficit de retour au nid. Les auteurs affirment qu'une exposition à long terme, réaliste par rapport au terrain, peut modifier les critères d'évaluation au niveau de l'orientation/du comportement, et cela, même quand les mesures globales relatives à la colonie restent inchangées. Ils soulignent aussi la nécessité d'une dosimétrie et d'une réplication minutieuses.

Plus récemment, Treder et al. (2025) ont publié les résultats de leur étude de terrain en aveugle de deux ans, qui testait les effets d'une exposition réaliste à des fréquences de 2,4 et 5,8 GHz avec une source de rayonnement standardisée sur la visite des fleurs par les abeilles. Ils n'ont *trouvé* aucun effet sur la visite des abeilles mellifères à *Salvia* et *Lavandula*, mais ils ont, par contre, constaté une réduction significative des visites des fleurs par les bourdons (*Bombus* sp.) par observation quand les végétaux étaient irradiés. Ils ont ainsi documenté 2 882 pollinisateurs au total et souligné une vulnérabilité taxonomique spécifique. Les auteurs ont appelé à des études de suivi mécanistiques et font remarquer que la reproduction et la persistance de ces changements sublétaux dans le comportement de butinage pourraient avoir des effets écologiques.

Vilić et al. (2024) ont rapporté qu’une exposition prolongée à un champ de 900 MHz induit un stress oxydatif chez les abeilles mellifères. Dans le cadre d’une étude de terrain d’un an menée sur 15 colonies placées à des endroits présentant des niveaux d’exposition différents aux stations de base, les chercheurs ont trouvé des biomarqueurs de stress oxydatif (par exemple, des niveaux modifiés d’enzymes antioxydantes), en particulier chez les larves, ce qui indique que les stades de développement peuvent être plus sensibles ; les effets n’étaient pas strictement dose-linéaires et les auteurs mettent en garde contre les facteurs de confusion dans les études de terrain, mais soulignent les impacts physiologiques subtils potentiels en cas d’exposition chronique.

7.5. Recommandation générale

En réponse aux préoccupations concernant les effets potentiels des réseaux 5G sur la faune et la flore, une approche multifacette comprenant des mesures de précaution, une observation étendue et une politique ciblée est recommandée. Étant donné que les directives actuelles en matière de sécurité reposent largement sur les recommandations de l’ICNIRP et se concentrent principalement sur les effets thermiques chez l’homme, il est reconnu qu’il est nécessaire d’élaborer des directives spécifiques pour la protection de l’environnement (Vornoli et al., 2022). Les connaissances actuelles sont toutefois encore trop limitées et des études indépendantes et multidisciplinaires supplémentaires sont nécessaires, en particulier dans les contextes d’une exposition chronique et des effets non thermiques potentiels sur la faune et la flore. Ces études devraient se pencher sur les lacunes identifiées par les récentes revues systématiques, notamment celles portant sur les insectes, les oiseaux, les mammifères non rongeurs et les voies mécanistiques (Weller et al., 2025), comme discuté plus haut. Les décideurs politiques nationaux et internationaux devraient donc encourager les travaux préparatoires nécessaires en proposant un financement durable pour des recherches de grande envergure et de grande qualité.

Au niveau local, les zones abritant des écosystèmes écologiquement sensibles (telles que les zones humides, les forêts, les lieux de forte concentration de pollinisateurs et les habitats d’espèces menacées) devraient être identifiées et spécifiquement pris en compte dans la stratégie de déploiement de la 5G. Jusqu’à ce que des données plus concluantes soient disponibles sur les impacts potentiels sur la flore et la faune locales, dans ces habitats critiques les niveaux de rayonnement devraient être réduits le plus possible et les technologies haute fréquence (5G) être idéalement limitées dans les zones de forte concentration de pollinisateurs. L’emplacement des infrastructures devrait tenir compte des préoccupations relatives à la flore et à la faune, en plaçant stratégiquement les tours et les petites cellules loin des habitats sensibles tels que les voies de migration des oiseaux, les sites de nidification des insectes, les zones abritant des espèces végétales uniques et les réserves naturelles. Concernant les habitats critiques, le partage obligatoire des infrastructures de télécommunication entre les fournisseurs devrait être envisagé comme un moyen de réduire l’exposition cumulative aux CEM, même si les limites d’exposition actuelles ne sont pas dépassées par le chevauchement des équipements. Les technologies émergentes, notamment le modelage du faisceau, la gestion intelligente des ressources et le fonctionnement à faible puissance (mode nuit), devraient être utilisées pour réduire les niveaux globaux de puissance des CEM-RF (Singh et al., 2025), et cela, plus particulièrement dans les zones écologiquement sensibles. À cet égard, la 5G pourrait offrir un avantage en permettant des transmissions à plus faible puissance et plus ciblées, mais les risques associés aux fréquences plus élevées (y compris les ondes millimétriques) doivent également être évalués (Froidevaux et al., 2023).

Les niveaux de rayonnement devraient être systématiquement surveillés au-delà du simple seuil d'effet thermique, en se concentrant sur les micro-environnements habités par des organismes vulnérables. Cela comprend la mesure des niveaux de CEM-RF dans divers environnements : les zones d'exclusion autour des tours de téléphonie mobile, les habitats naturels dans les zones urbaines et rurales, les zones de nidification des oiseaux et les zones de pollinisation. Des campagnes de mesure ciblées in situ sont nécessaires pour quantifier les CEM-RF et les champs électriques et magnétiques statiques associés émis par de multiples sources anthropiques. Car, en effet, des études antérieures ont montré que l'exposition aux CEM dans les nids de cigognes varie considérablement en fonction de la distance et de l'orientation par rapport aux antennes, ce qui souligne la complexité des expositions dans le monde réel (Balmori, 2021 ; Durusoy et al., 2016). Bien que les mesures de l'exposition ne permettent pas, à elles seules, d'atténuer les dommages biologiques, elles fournissent néanmoins un contexte d'exposition essentiel et les données nécessaires à la comparaison avec les études en laboratoire. Ces données devraient être rendues publiques. En ce qui concerne l'extension des réseaux, il convient de privilégier l'utilisation des infrastructures de télécommunication existantes afin de réduire au minimum les nouvelles constructions. Quand de nouveaux sites sont nécessaires, ils doivent être implantés dans des zones moins sensibles, loin des lieux de reproduction connus, des sites de nidification et de la flore importante sur le plan écologique. Les mesures de surveillance et d'atténuation des CEM-RF doivent être intégrées dans les stratégies nationales en matière de biodiversité, les objectifs de conservation et les plans de gestion des zones protégées afin de garantir que les impacts écologiques potentiels de la 5G soient pris en compte au même titre que les autres facteurs de stress environnementaux.

Des programmes de surveillance de la biodiversité devraient être mis en place et combinés à des mesures systématiques de l'exposition. Des programmes de surveillance à long terme devraient être mis en œuvre pour suivre les changements au niveau de la biodiversité, la santé des espèces et la taille des populations après le déploiement de la 5G, surtout au niveau des insectes et des oiseaux locaux. Ces efforts pourraient être soutenus par des initiatives scientifiques citoyennes visant à recueillir des données d'observation à grande échelle (par exemple, le suivi de l'activité des pollinisateurs ou des observations des oiseaux et des schémas de migration) par rapport au déploiement des infrastructures 5G situées à proximité. Un modèle possible est celui du projet ETAIN de l'UE Horizon Europe en Grèce (<https://www.etaingroup.eu/>), qui surveille le piégeage des insectes dans des zones d'exposition constante aux CEM-RF et comprend des expériences contrôlées sur des ruches installées dans des environnements exposés et non exposés. Une initiative similaire pourrait être mise en œuvre localement avec des moyens financiers modérés.

De manière générale, compte tenu des lacunes importantes dans les connaissances sur les effets des CEM-RF sur la flore et la faune, face à l'incertitude, les décideurs politiques devraient appliquer le principe de précaution, c'est-à-dire prendre des mesures préventives et réduire au minimum les expositions partout où c'est possible. Cela pourrait aller jusqu'à un moratoire temporaire sur le déploiement de la 5G dans les zones où les écosystèmes sont sensibles, jusqu'à ce que les impacts potentiels aient pu être étudiés de manière approfondie et atténués. Il est en outre recommandé d'imposer des rapports environnementaux transparents (y compris sur la consommation d'énergie, les niveaux d'émission des CEM-RF et les aspects opérationnels du réseau). Au final, les lacunes actuelles dans la compréhension de la situation ne pourront être comblées que par la fixation et la mise en œuvre de limites d'exposition aux CEM-RF spécifiques pour la flore et la faune, différentes de celles des lignes directrices sur les effets thermiques centrées sur l'homme. Cependant, compte tenu

du niveau actuel des connaissances, il est peu probable que de telles limites spécifiques soient établies dans un proche avenir (Panagopoulos et al., 2021).

7.6. Commentaires et recommandations sur les lignes directrices synthétisées pour l'installation d'antennes EM dans les zones Natura 2000

Voici nos commentaires concernant le document « Mobile Installations in the Natura 2000 Context – Phases II and III: Mitigation Measures and Biodiversity Characterisation Form », (Installations de téléphonie mobile dans le contexte N 2000 – Phase II et III : Mesures d'atténuation et Formulaire de caractérisation des aspects biodiversité) remis dans sa version du 9 avril 2025 (référence du dossier : C1306). Ces lignes directrices synthétisées concernent l'installation/la modernisation d'antennes EM dans les zones spéciales de conservation (ZSC) Natura 2000, les zones tampons environnantes (s'étendant sur 60 m) et les réserves naturelles ou forestières.

Cette initiative représente une avancée significative et constructive vers la réconciliation entre le développement technologique et la protection de la biodiversité dans les zones Natura 2000. Les mesures d'atténuation proposées, qui visent à limiter le bruit, la lumière, la pollution et la perturbation des habitats, sont bien conçues et reflètent une volonté forte de réduire les impacts écologiques tout en maintenant la continuité des infrastructures de communication essentielles.

Le cadre structuré fourni aux opérateurs pour identifier les sensibilités environnementales et mettre en œuvre des mesures d'atténuation ciblées est clairement défini. Les listes de contrôle et les fiches d'information détaillées fournies sont faciles à utiliser et peuvent participer à la sensibilisation des parties prenantes.

Ainsi, d'une manière générale, l'initiative permettra de garantir que les approches préventives en matière de gestion environnementale sont dûment prises en compte lors de la réalisation de travaux d'installation de téléphonie mobile dans les zones Natura 2000 et les zones connexes, et elle démontrera qu'un effort important a été consenti pour mettre en œuvre les principes de durabilité dans le secteur des infrastructures numériques.

Les mesures d'atténuation sont de nature générique et ne nécessitent pas de données écologiques de référence ni d'inventaires des espèces avant d'être appliquées. Il peut s'agir d'un choix de conception, mais la préférence est donnée au fait de se concentrer sur les sensibilités écologiques réelles de chaque site spécifique. De plus, il semble que l'identification des espèces qui nécessitent de prendre des précautions particulières soit laissée à la discrétion du demandeur. Il est donc recommandé de préalablement établir une base de référence écologique et de la mentionner dans la demande, ne serait-ce que pour attirer l'attention sur les espèces particulièrement concernées. Cela pourrait se faire par le biais d'un inventaire des taxons et des habitats sensibles au sein de la ZSC Natura 2000 (et des zones tampons et des réserves forestières et naturelles prises en considération), idéalement lié à BruGIS, ou par le biais d'une évaluation écologique obligatoire (par exemple, une rapide évaluation des habitats) des sites concernés, à mettre à jour à intervalles réguliers.

Nous avons également l'impression que les lignes directrices accordent trop peu d'attention aux impacts cumulatifs et indirects, malgré l'obligation légale d'atténuer les effets significatifs résultant non seulement de projets individuels, mais aussi de combinaisons avec d'autres plans ou projets. Les

lignes directrices devraient donc identifier la nécessité d'évaluer les effets cumulatifs de multiples infrastructures de télécommunications et voies d'accès à l'intérieur ou à proximité des zones Natura 2000, par exemple en fonction de la proximité d'autres installations EM existantes ou prévues (par exemple, à moins de 500 m). En outre, les lignes directrices devraient s'efforcer de minimiser les intrusions visuelles ou la fragmentation microclimatique, qui peuvent résulter des voies d'accès et des installations multiples.

Les lignes directrices devraient en outre être étendues afin d'également tenir compte du démantèlement des anciennes installations, ce qui implique d'envisager l'élimination des déchets de ce démantèlement, la restauration des sols et la restauration des habitats.

Bien que les lignes directrices traitent de manière adéquate les impacts liés à la construction (bruit, lumière, perturbation de l'habitat), elles ne traitent pas du tout les effets potentiels des CEM sur la faune sauvage, bien qu'elles soient spécifiques aux antennes. S'il est vrai que les preuves sont mitigées et que les recherches se poursuivent, l'ensemble des preuves suggère que les effets anthropiques des CEM-RF sont probables et que les lignes directrices relatives à l'exposition humaine (ICNIRP/OMS) ne fournissent pas nécessairement des seuils de protection environnementale pour la faune sauvage. Cela plaide en faveur d'une approche prudente, fondée sur les risques, plus particulièrement dans les zones de conservation de la faune sauvage, dont l'objectif devrait être de réduire le plus possible l'exposition. Le risque pourrait être établi en évaluant les cartes de propagation des RF à partir de modèles d'exposition, en combinaison avec des informations sur les points chauds écologiques (cf. inventaire des espèces, ci-dessus), dans le but de minimiser le chevauchement en choisissant un emplacement et une orientation alternatifs (par exemple, éviter d'installer des antennes haute puissance à proximité immédiate de sites de nidification/de repos connus). Il convient également de noter qu'en n'incluant pas les considérations relatives aux CEM dans les lignes directrices, on passe à côté de l'opportunité d'atténuer les interférences potentielles par des moyens techniques, tels que l'utilisation d'antennes hautement directionnelles et le modelage du faisceau pour minimiser l'irradiation du sol et de l'espace aérien utilisés par la faune sauvage ; la gestion de la puissance pour réduire la puissance de l'émetteur au minimum nécessaire pour obtenir la couverture ; la réduction de la puissance en dehors des heures de pointe ; etc. Il faudrait travailler sur l'intégration de concepts de ce type dans les lignes directrices, non seulement dans l'évaluation de l'impact environnemental lors de l'installation de nouveaux mâts, mais aussi dans toutes les mises à niveau liées aux antennes.

Enfin, nous ferons encore remarquer que certaines formulations sont vagues, ce qui limite leur applicabilité et la comparabilité entre les projets. Par exemple, l'expression « limiter la pollution sonore » est ambiguë, car elle ne fournit pas de données utiles sur les critères à respecter et n'est donc pas vérifiable. Elle ne répond pas, non plus, à la question de savoir s'il y est fait référence à la faisabilité technique ou à l'interprétation qu'en fait le contractant. En outre, le formulaire semble reposer de manière exagérée sur l'autodéclaration, et il n'apparaît pas clairement s'il existe une obligation de déclaration et si la mise en œuvre adéquate des mesures fait ou pas l'objet d'un audit.

Bibliographie

Albaqami, M., Hammad, M., Pooam, M. *et al.* (2020). *Arabidopsis* cryptochrome is responsive to Radiofrequency (RF) electromagnetic fields. *Sci Rep* **10**, 11260. Doi: 10.1038/s41598-020-67165-5.

Anderson, J.M., Clegg, T.M., Vêras, L.V.M.V.Q. *et al.* (2017). Insight into shark magnetic field perception from empirical observations. *Sci Rep* **7**, 11042. Doi: 10.1038/s41598-017-11459-8.

Balmori, A. (2015). Anthropogenic radiofrequency electromagnetic fields as an emerging threat to wildlife orientation. *Science of the Total Environment*, 518–519, 58–60. Doi: 10.1016/j.scitotenv.2015.02.077.

Balmori, A. (2021). Electromagnetic radiation as an emerging driver factor for the decline of insects. *Science of the Total Environment*, 767, 144913.

BfS, Federal Office for Radiation Protection, Germany, (2023). Possible effects of electromagnetic fields on plants and animals. <https://www.bfs.de/EN/bfs/science-research/emf/statements/emf-animals-and-plants.html>.

Brzozek, C., Mate, R., Bhatt, C. R., Loughran, S., Wood, A. W., & Karipidis, K. (2024). Investigating the impact of anthropogenic radiofrequency electromagnetic fields on animals and plants in the environment: analysis from a systematic map. *International Journal of Environmental Studies*, 1-16.

Burlaka A, Tsybulin O, Sidorik E, Lukin S, Polishuk V, Tsehmistrenko S, et al. Overproduction of free radical species in embryonal cells exposed to low intensity radiofrequency radiation. *Exp. Oncol.* (2013) 35:219–25.

Colombi, D., Thors, B., & Törnevik, C. (2015). Implications of EMF exposure limits on output power levels for 5G devices above 6 GHz. *IEEE Antennas and Wire-less Propagation Letters*, 14, 1247–1249. Doi: 10.1109/LAWP.2015.2400331.

Cucurachi S, Tamis WL, Vijver MG, Peijnenburg WJ, Bolte JF, de Snoo GR. 2013. A review of the ecological effects of radiofrequency electromagnetic fields (RF-EMF). *Environ Int.* 51, 116-40. Doi: 10.1016/j.envint.2012.10.009.

Danho, S., Huertas, J. F. E., Schoellhorn, W. I., & Schoellhorn, W. (2025). A Systematic Review of the Impact of Electromagnetic Waves on Living Beings. *Cureus*, 17(8).

De Borre E, Joseph W, Aminzadeh R, Müller P, Boone MN, Josipovic I, Hashemizadeh S, Kuster N, Kühn S, Thielens (2021). A. Radio-frequency exposure of the yellow fever mosquito (*A. aegypti*) from 2 to 240 GHz. *PLoS Comput. Biol.* 17:e1009460.

Di Ciaula, A. (2018). Towards 5G communication systems: Are there health implications? *Int. J. Hyg. Environ. Health* **221**, 367-375. Doi: 10.1016/j.ijheh.2018.01.011.

Durusoy, R., Onmus, O., Hassoy, H., & Sürücü, B. (2016). Electromagnetic field exposure of White stork nests and possible impacts on their breeding success and development. In *ISEE Conference Abstracts* 28 , P1-327.

EPRS, European Parliamentary Research Service, Scientific Foresight Unit (2021). Environmental impacts of 5G: A literature review of effects of radio-frequency electromagnetic field exposure of non-human vertebrates, invertebrates and plants. PE 690.021.

Froidevaux, J. S., Recuero Virto, L., Czerwiński, M., Thielens, A., & Park, K. J. (2023). Addressing wildlife exposure to radiofrequency electromagnetic fields: time for action. *Environmental Science & Technology Letters*, 11(1), 3-4.

Halgamuge, M. N. (2017). Review: Weak radiofrequency radiation exposure from mobile phone radiation on plants. *Electromagnetic Biology and Medicine*, 36(2), 213–235. Doi: 10.1080/15368378.2016.1220389

Herssens, N., Thielens, A., Tanghe, E., Martens, L., & Joseph, W. (2022). Modelling of the absorption of radiofrequency electromagnetic fields in insects up to 300 GHz. *Scientific Reports*, 12(1), 327. Doi: 10.1038/s41598-021-04202-5

Hore, P. J., & Mouritsen, H. (2016). The radical-pair mechanism of magnetoreception. *Annual review of biophysics*, 45(1), 299-344.

ICNIRP (2020). Guidelines for limiting exposure to electromagnetic fields (100 kHz to 300 GHz). *Health Phys.* 118(5):483-524.

Jeladze, V., Nozadze, T., Partsvania, B., Thielens, A., Shoshiashvili, L., & Gogoladze, T. (2025). Numerical dosimetry of specific absorption rate of insects exposed to far-field radiofrequency electromagnetic fields. *International Journal of Radiation Biology*, 101, 327–340, doi: 10.1080/09553002.2024.2442693.

Karipidis, K., Brzozek, C., Mate, R. *et al.* (2023). What evidence exists on the impact of anthropogenic radiofrequency electromagnetic fields on animals and plants in the environment: a systematic map. *Environ Evid* 12, 9, doi:10.1186/s13750-023-00304-3.

A. Lázaro, A. Chroni, T. Tscheulin, J. Devalez, C. Matsoukas, T. Petanidou. Electromagnetic radiation of mobile telecommunication antennas affects the abundance and composition of wild pollinators. *J. Insect Conserv.*, 20 (2016), 315-324.

Leberecht, B., Wong, S. Y., Satish, B., Döge, S., Hindman, J., Venkatraman, L., ... & Hore, P. J. (2023). Upper bound for broadband radiofrequency field disruption of magnetic compass orientation in night-migratory songbirds. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 120(28), e2301153120.

Mevissen, M., Ducray, A., Ward, J. M., Kopp-Schneider, A., McNamee, J. P., Wood, A. W., ... & Straif, K. (2025). Effects of radiofrequency electromagnetic field exposure on cancer in laboratory animal studies, a systematic review. *Environment International*, 109482.

Pophof, B., Henschenmacher, B., Kattinig, D. R., Kuhne, J., Vian, A., & Ziegelberger, G. (2023). Biological effects of radiofrequency electromagnetic fields above 100 MHz on fauna and flora: workshop report. *Health Physics*, **124**, 31-38.

Pophof, B., Henschenmacher, B., Kattinig, D. R., Kuhne, J., Vian, A., & Ziegelberger, G. (2023). Biological Effects of Electric, Magnetic, and Electromagnetic Fields from 0 to 100 MHz on Fauna and Flora: Workshop Report. *Health Physics*, **124**, 39-52.

Simko, M., & Mattsson, M.-O. (2019). 5G wireless communication and health effects—A pragmatic review based on available studies regarding 6 to 100 GHz. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, **16**(18), 3406. Doi: 10.3390/ijerph16183406.

Shaw, J., Boyd, A., House, M., Woodward, R., Mathes, F., Cowin, G., Saunders, M. Baer B. (2015). Magnetic particle-mediated magnetoreception. *J. R. Soc. Interface*. **12**20150499.

Singh, H., Singh, R., Assaf, M., & Kumar, S. (2025). Signal analysis techniques to minimize electromagnetic radiation in 5G mobile networks. *Cureus Journal of Engineering*, **2**, es44388-025-06744-6.

Spotlight (2024). Spotlight on “Biological effects of electromagnetic fields on insects: a systematic review and meta-analysis” by Thill et al. in *Reviews on Environmental Health* (2023).

Thielens, A., Bell, D., Mortimore, D. B., Greco, M. K., Martens, L., & Joseph, W. (2018). Exposure of insects to radio-frequency electromagnetic fields from 2 to 120 GHz. *Scientific reports*, **8**(1), 3924.

Thielens, A., Greco, M. K., Verloock, L., Martens, L., & Joseph, W. (2020). Radio-frequency electromagnetic field exposure of western honey bees. *Scientific reports*, **10**(1), 461.

Thielens A. (2021). Environmental impacts of 5G. A literature review of effects of radio-frequency electromagnetic field exposure of non-human vertebrates, invertebrates and plants. STOA, European Parliament.

Thill, A., Cammaerts, M. C., & Balmori, A. (2024). Biological effects of electromagnetic fields on insects: a systematic review and meta-analysis. *Reviews on Environmental Health*, **39**(4), 853-869.

Thoradit T, Thongyoo K, Kamoltheptawin K, Tunprasert L, El-Esawi MA, Aguida B, Jourdan N, Buddhachat K and Pooam M (2023) Cryptochrome and quantum biology: unraveling the mysteries of plant magnetoreception. *Front. Plant Sci.* **14**:1266357. Doi: 10.3389/fpls.2023.1266357.

Treder, M., Müller, M., Fellner, L., Traynor, K., & Rosenkranz, P. (2023). Defined exposure of honey bee colonies to simulated radiofrequency electromagnetic fields (RF-EMF): Negative effects on the homing ability, but not on brood development or longevity. *Science of The Total Environment*, **896**, 165211.

Treder, M., Glück, M., England, S. J., & Traynor, K. S. (2025). Radiofrequency electromagnetic fields reduce bumble bee visitation to flowers. *Environmental Pollution*, 126836.

Tsybulin O, Sidorik E, Brieieva O, Buchynska L, Kyrylenko S, Henshel D, et al. (2013). GSM 900 MHz cellular phone radiation can either stimulate or depress early embryogenesis in Japanese quails depending on the duration of exposure. *Int. J. Radiat. Biol.* 89:756–63. Doi: 10.3109/09553002.2013.791408.

Vian, A., Davies, E., Gendraud, M., & Bonnet, P. (2016). Plant responses to high frequency electromagnetic fields. *BioMed Research International*, 1830262. Doi: 10.1155/2016/1830262.

Vilić, M., Žura Žaja, I., Tkalec, M., Tucak, P., Malarić, K., Popara, N., ... & Gajger, I. T. (2024). Oxidative Stress Response of Honey Bee Colonies (*Apis mellifera* L.) during Long-Term Exposure at a Frequency of 900 MHz under Field Conditions. *Insects*, 15(5), 372.

Waldmann-Selsam, C., Balmori-de la Puente, A., Breunig, H., & Balmori, A. (2016). Radiofrequency radiation injures trees around mobile phone base stations. *Science of the Total Environment*, 572, 554–569. Doi: 10.1016/j.scitotenv.2016.08.045.

Weller SG, McCredden JE, Leach V, Chu C and Lam AK (2025) A scoping review and evidence map of radiofrequency field exposure and genotoxicity: assessing *in vivo*, *in vitro*, and epidemiological data. *Front. Public Health* 13:1613353. Doi: 10.3389/fpubh.2025.1613353.

Zadeh-Haghighi, H., & Simon, C. (2022). Magnetic field effects in biology from the perspective of the radical pair mechanism. *Journal of the Royal Society Interface*, 19(193), 20220325.

Zhong, Z., Wang, X., Yin, X., Tian, J., & Komatsu, S. (2021). Morphophysiological and proteomic responses on plants of irradiation with electromagnetic waves. *International Journal of Molecular Sciences*, 22(22), 12239.