

Bruxelles Environnement



Rapport du comité d'experts sur les radiations non ionisantes 2024

Président : Prof. Isabelle Lagroye

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

Table des matières

1.	Evaluation de l'application de l'ordonnance.....	5
1.1.	Application générale des aspects techniques de l'ordonnance	5
1.1.1.	Situation générale du protocole de mesure.....	5
1.1.2.	Améliorations du simulateur	8
1.2.	Efforts en vue de la dissémination de l'information pour le public	9
1.3.	Efforts en vue du contrôle du respect des permis délivrés.....	9
1.4.	Avis général concernant le protocole de mesure.....	10
2.	Technologie des réseaux mobiles publics	11
2.1.	Vue d'ensemble des bandes/technologies/opérateurs	11
2.1.1.	Bande 700 MHz	12
2.1.2.	Bande 800 MHz	12
2.1.3.	Bande 900 MHz	13
2.1.4.	Bande 1400 MHz	13
2.1.5.	Bande 1800 MHz	13
2.1.6.	Bande 2100 MHz	13
2.1.7.	Bande 2600 MHz	13
2.1.8.	Bande 3500 MHz	13
2.2.	Réseaux mobiles publics de nouvelle génération	14
3.	Déploiement rapide des communications sans fil 5G et évaluation des risques pour la santé humaine : où en sommes-nous ?	16
3.1.	Exposition aux signaux 5G et évaluation des risques pour la santé.....	16
3.2.	Recherches en cours et Nouvelles.....	18
3.3.	Conclusion	19
	Bibliographie.....	19
4.	L'état actuel de la 5G et ses implications macroéconomiques : Une perspective mondiale, européenne et belge	22
4.1.	Introduction.....	22
4.2.	Aperçu mondial du déploiement de la 5G et implications.....	22
4.3.	Le paysage européen de la 5G, les progrès de la Belgique en matière de 5G et l'analyse économique.....	23
4.3.1.	Le paysage européen de la 5G.....	23
4.3.2.	Progrès de la 5G en Belgique et analyse économique	24
4.3.2.1.	Implications économiques.....	24
4.4.	Implications économiques et recommandations stratégiques	24
4.4.1.	Implications économiques de la 5G pour l'Europe et la Belgique.....	24

4.4.2.	Recommandations stratégiques pour l'Europe et la Belgique	25
4.5.	Conclusion	26
	Bibliographie.....	26
5.	Le déploiement du réseau de la 5G et la dimension détritique	28
5.1.	Envoi et réception des données (utilisation).....	28
5.2.	Circulation des données (réseaux)	29
5.3.	Le stockage des données (Centres informatiques)	30
5.4.	Conclusion	30
	Bibliographie.....	31
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.	Trafic des données et choix de déploiement	39
6.3.4.	Effets de rebond	39
6.3.5.	Modes d'économie d'énergie.....	40
6.4.	Conclusions.....	41
	Bibliographie.....	41
7.	Effets sur l'environnement des rayonnements électro-magnétiques de radiofréquence associés à la technologie de cinquième génération.....	43
7.1.	Lignes directrices de l'ICNIRP en matière d'exposition et critique face aux effets non thermiques supposés	43
7.2.	Risques spécifiques pour les animaux, les plantes et les écosystèmes.....	44
7.2.1.	Sur la modification des schémas d'exposition	44
7.2.2.	Sur la possibilité d'interférences avec les systèmes sensoriels des animaux	45
7.2.3.	Sur les effets non sensoriels des champs électromagnétiques de radio-fréquence.....	45
7.3.	Effets du rayonnement de la 5G à 3,5 GHz	46
7.4.	Une vue d'ensemble des effets de l'exposition aux champs électromagnétiques de radiofréquence sur la flore et la faune.....	47
7.5.	Impact écologique des CEM-RF.....	48
7.5.1.	Résultats récents concernant les insectes.....	48
7.5.2.	Découvertes récentes concernant les plantes	49
7.5.3.	Résultats pertinents concernant les oiseaux.....	50
7.6.	Résumé et conclusions	50
	Bibliographie.....	52

1. Evaluation de l'application de l'ordonnance

1.1. Application générale des aspects techniques de l'ordonnance

L'ordonnance relative à la protection de l'environnement contre les éventuels effets nocifs et nuisances provoqués par les radiations non ionisantes de 2007 a été modifiée en 2023 pour tenir compte de la 5ème génération de téléphonie mobile (5G).

Les modifications principales portent sur l'adaptation à la hausse des normes d'exposition et la prise en compte des émissions générées par les antennes radio et TV. Il en résulte une norme intérieure plus stricte de 9,19 V/m équivalent 900 MHz (indoor) et une norme extérieure de 14,57 V/m (outdoor).

Le comité s'est interrogé sur les bandes de fréquences pour la partie "broadcast" car ceci n'était pas explicite dans le rapport annuel. Bruxelles Environnement a précisé avoir sélectionné :

FM : de 87 à 108 MHz
DAB : de 174 à 230 MHz
DVB-T : de 470 à 694 MHz.

Cette réponse est acceptée par le comité.

Après la modification de l'ordonnance, a suivi l'arrêté de classement afin de transposer la nouvelle ordonnance et de cadrer l'arrivée d'un 4ème opérateur. Les quotas par opérateur y ont été définis.

La nouvelle ordonnance est associée à une charte dont le texte ci-dessous est extrait :

« Cette charte prévoit également, une campagne de mesure 5G mMIMO, financée par les opérateurs. Cette campagne, débutée fin 2023, vise d'une part, à définir le contrôle de la méthode et le protocole de mesures et de contrôle de l'installation du Power Control, en faisant des mesures sur les sites 5G bruxellois ; et d'autre part, à s'assurer que les antennes actives sont correctement prises en compte lors de la délivrance des permis d'environnement. »

Nous n'avons pas trouvé la trace de ses mesures dans le nouveau rapport. Nous supposons donc qu'aucune de ces mesures n'a été réalisée. Nous encourageons pourtant de poursuivre les efforts en ce sens.

1.1.1. Situation générale du protocole de mesure

Le Comité a évalué la méthode de mesure des rayonnements non-ionisants sur base de "Rap_2024_EN.docx" (fourni par le département "Technologies et rayonnements" et le service "Rayonnements électromagnétiques et trafic aérien"). Comme le montre la répartition des émetteurs par technologie, actuellement les principales technologies sont les 4G, 3G et 2G. La 5G n'en est encore qu'à des débuts de déploiement et ceci dans les bandes 700 MHz et 3600 MHz.

Le rapport indique que la suggestion du comité visant à limiter la durée du contrôle, tout en maintenant le temps de mesure intact, semble avoir été appliquée. À la page 7, il est mentionné une

mesure couvrant l'ensemble de la bande passante en une seule fois, sur une durée de 6 minutes. Cette méthode permet d'obtenir une meilleure diversité temporelle tout en prenant en compte toutes les bandes de fréquence.

Cependant, à la page 25, une durée de 2 minutes est évoquée. Face à cette divergence, le comité a demandé des éclaircissements supplémentaires. La réponse apportée est :

« La durée de mesure de 6 minutes mentionnée à la page 7 fait référence à une méthodologie spécifiquement conçue l'année dernière pour mesurer l'effet de la fonction PowerLock et est indépendante du type de mesure que Bruxelles-Environnement effectue pour s'assurer de la conformité avec les réglementations environnementales. Les 2 minutes par opérateur sont conformes à l'article 2.b du décret pertinent qui stipule que les signaux EM sont mesurés pendant 2 minutes par technologie et par opérateur (à l'exception de la 5G). A titre d'exemple, si nous considérons 3 opérateurs de téléphonie mobile émettant en 2G, 3G et 4G, la durée totale sera de $2\text{min} \times 3\text{tech} \times 3\text{op} = 18\text{min}$. Pour la 5G (massive mimo), le protocole de mesure est différent dans le sens où, tout d'abord, l'antenne est activée par un appel (téléchargement d'un fichier lourd - voir art.2.b), puis l'inspecteur commence à mesurer le faisceau créé par l'antenne. Un tel appel devrait durer au moins 2 minutes par opérateur. Par exemple, pour trois opérateurs 5G, la durée totale théorique de la mesure 5G est de $2\text{min} \times 3\text{op} = 6\text{min}$. Ce protocole 5G est basé sur les campagnes de test menées à Haasrode en 2019-2020. Le décret a été modifié en 2021 en conséquence. En résumé, la durée totale de toutes les technologies est de $18+6=24\text{min}$ (théoriquement), en pratique il faut s'attendre à plus de temps (surtout pour la 5G NR). Il est intéressant de mentionner que l'Inspection est sur le point de modifier - une fois de plus - ce décret pour remplacer "2min par technologie et par opérateur" par "6min par opérateur" sans tenir compte de la technologie ou de la bande. A priori, cette modification ne concerne pas la 5G. »

Cette réponse clarifie en effet la procédure utilisée et le comité accepte cette procédure.

Au §2.2.2.4, il est mentionné que Bruxelles Environnement effectue des mesures afin de calibrer les paramètres du logiciel de simulation. Le comité a demandé des précisions concernant le protocole utilisé ainsi que la fréquence de ces campagnes de mesure.

Bruxelles Environnement a répondu :

« Le test de conduite, qui vise à mesurer l'intensité du champ électromagnétique au niveau de la chaussée et à confirmer la validité des simulations, est un exercice réalisé une fois par an, comme le précise l'annexe concernée. Des mesures sur site (à côté des antennes) sont effectuées sur la base des plaintes des citoyens, et de plus amples informations sur le nombre et la fréquence de ces plaintes sont disponibles à la section 3, mais ces mesures ne sont pas systématiquement utilisées pour l'étalonnage du simulateur. La méthode de simulation elle-même a été validée par le Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB). La notice technique du logiciel de simulation est jointe en annexe. Bruxelles-Environnement maintient une collaboration étroite avec Geomod, les développeurs de Mithra-REM pour le développement continu de la méthode de simulation, et nous envoyons régulièrement des données expérimentales pour aider à calibrer les simulations. »

Bruxelles Environnement a également fourni au comité un rapport sur le "Drive-test". Celui-ci a amené le comité à se poser les questions suivantes :

- Dans la conclusion, il est fait état d'une amplification du signal due à la présence d'une voiture. Peut-on l'expliquer plus en détail ?

La réponse à cette question est la suivante : « *Nous convenons que le terme "amplification" n'était pas le meilleur choix de mots. Nous avons émis l'hypothèse que ces champs plus élevés dans les mesures effectuées sur les voitures s'expliquent par des réflexions supplémentaires sur le toit et la structure métallique de la voiture. La formulation sera modifiée dans les prochaines versions du rapport. Le processus n'a évidemment rien à voir avec l'amplification active dans les dispositifs laser/maser.* »

Le comité est d'accord avec la réponse fournie.

- Dans le tableau 1, l'incertitude de mesure est indiquée jusqu'à 3 GHz, alors que les mesures sont effectuées à 3,6 GHz. Pourriez-vous indiquer l'incertitude pour la dernière bande de mesure ?

La réponse est oui : "Merci de m'avoir signalé ce point. Le tableau complet est présenté ci-dessous."

MEASUREMENT UNCERTAINTY			
Expanded measurement uncertainty ^{b)} (in conjunction with SRM basic unit and 1.5 m RF cable)	Frequency range	Single-axis measurement with isotropic antenna	Isotropic measurement
	27 – 85 MHz	+2.4 / -3.3 dB	+ 3.2 / -4.7 dB
	> 85–900 MHz	+2.4 / -3.4 dB	+2.5 / -3.6 dB
	> 900-1400 MHz	+2.3 / -3.1 dB	+2.5 / -3.4 dB
	> 1400-1600 MHz	+2.3 / -3.1 dB	+2.6 / -3.8 dB
	> 1600-1800 MHz	+1.8 / -2.3 dB	+2.2 / -3.0 dB
	> 1800-2200 MHz	+1.8 / -2.3 dB	+2.4 / -3.3 dB
	> 2200-2700 MHz	+1.9 / -2.4 dB	+2.7 / -3.8 dB
	> 2700-3000 MHz	+1.9 / -2.4 dB	+3.3 / -5.3 dB

Le comité est d'accord avec la réponse fournie.

- Les graphiques doivent être interprétés et discutés en général. Les principales questions auxquelles il faut répondre sont les suivantes :

- Sur la figure 4 : les points sont-ils seulement des valeurs aberrantes ? Si ce n'est pas le cas, nous ne comprenons pas d'où vient la valeur de la moyenne.

Réponse : « *Les points sont en effet des valeurs aberrantes.* »

- Comment l'écart-type a-t-il été calculé ? Inclut-il uniquement l'erreur de répétabilité ? Ou inclut-il également la précision de la mesure ?

Réponse : « *L'écart-type est calculé à partir des données de mesure uniquement.* »

- Sur la figure 5 : les zones chaudes correspondent-elles à celles des simulations ? Si ce n'est pas le cas, pourquoi ? Dans l'affirmative, veuillez souligner qu'il s'agit d'une validation solide de la simulation.

Réponse : « *Les mesures sur le terrain dans les zones à fortes émissions correspondent aux résultats des simulations. Le rapport 2024 mettra davantage l'accent sur ce fait.* »

- Tableau 3 : la plupart des mesures sont plus petites avec le vélo qu'avec la voiture. Il y a une exception qui domine toute la liaison descendante, dans la bande B900. De quoi s'agit-il ? D'où vient-elle ? Est-elle reproductible ?

Réponse : « *La valeur anormale mesurée en 2021 a été examinée après le test de conduite et n'a pas été reproduite.* »

- Dans le tableau 3, la moyenne indiquée est-elle calculée sur le temps et/ou la distance, sachant qu'une mesure est prise tous les 2,5 mètres ?
Réponse : « La moyenne est calculée sur l'ensemble des données. »

Le comité est d'accord avec les réponses fournies.

1.1.2. Améliorations du simulateur

Le simulateur Mithra-REM a été mis à jour. Les opérateurs peuvent introduire leurs demandes directement dans le logiciel ce qui accélère les demandes de permis. D'un point de vue technique, le logiciel permet désormais la prise en compte des toits en pente, ainsi que la prise en compte du broadcast (avec méthode des ellipsoïdes de Fresnel en lieu et place de la méthode des lancers de rayons).

Le comité a émis la question suivante : "Pour la simulation, la situation des toits n'est pas claire. D'une part, à la page 10, on affirme que les dépassements sont plus susceptibles de se produire à cet endroit. Les simulations sont censées résoudre le problème en amont. Si les simulations peuvent prouver le dépassement dans ce cas, pourquoi ne sont-elles pas utilisées dans le cas général ? Les campagnes de mesure sont mentionnées à la page 11, mais comment s'intègrent-elles dans ce tableau ?

La réponse de Bruxelles-Environnement est :

« La même méthode de simulation est utilisée pour vérifier les dépassements pour chaque type de surface : espaces extérieurs tels que les rues, routes et balcons ; façades et toits extérieurs ; et façades et toits intérieurs, ce qui correspond au champ extérieur multiplié par un facteur d'atténuation qui dépend du matériau de cette surface (béton, béton armé, etc.). Étant donné que les mêmes hypothèses sont utilisées pour simuler les intensités de champ électrique au niveau du toit et au niveau de la chaussée, il n'y a aucune raison de s'attendre, ceteris paribus, à ce qu'une campagne de validation basée sur des mesures du champ au niveau de la chaussée soit insuffisante pour valider également les résultats de la simulation au niveau du toit. »

Le comité convient que l'argumentation est valable et estime donc que la formulation du rapport original devrait être modifiée.

A la page 11 du rapport, quelle nouvelle méthode de calcul le fournisseur a-t-il développée ? Est-elle applicable à toutes les fréquences pour fournir une carte globale complète de la région de Bruxelles ?

Réponse : « Le fournisseur de logiciels de simulation a développé une nouvelle méthode de calcul des grandes distances pour le territoire français, qui permettra à terme de fournir plus rapidement et à moindre coût une carte globale pour la région bruxelloise. La nouvelle méthode est basée sur un maillage adaptatif : plus on s'éloigne des antennes, moins il y a de points de calcul. »

La réponse est acceptée par le comité.

À la page 10 du rapport, la méthode utilisée pour la diffusion est celle de l'ellipsoïde de Fresnel. Le comité ne pense pas que cette méthode soit largement connue et/ou définie de manière unique. Pourriez-vous fournir une référence vers la documentation utilisée pour cette méthode ?

Réponse : « *Les détails de la méthode de simulation se trouvent dans le document technique du simulateur aux pages 56 et 76 (Mithra-REM CSTB 2024-10-18_fr). Nous fournirons plus de détails sur la méthode de simulation dans le rapport 2024.* »

La réponse est acceptée par le comité, car il existe des preuves de l'utilisation de cette méthode en espace libre et en environnement urbain.

1.2. Efforts en vue de la dissémination de l'information pour le public

Le comité constate que l'administration poursuit son effort afin d'améliorer la dissémination de l'information concernant les radiations non-ionisantes vers le plus large public, comme suggéré par le comité, y compris sur le fonctionnement du comité d'experts.

Voir : <https://environnement.brussels/citoyen/reglementation/textes-de-loi/quelles-sont-les-normes-legales-dexposition-aux-ondes-electromagnetiques>

Le Comité voit que l'administration maintient ces informations à jour, notamment avec les modifications de l'ordonnance. Le positionnement de l'ordonnance bruxelloise face aux autres législations (belges, européennes, internationales) est également une information importante, présente sur le site internet mentionné ci-dessus.

Le contenu internet sur la façon dont les normes d'exposition sont contrôlées, est également important pour les citoyens. Cette information comprend les simulations, les contrôles sur le terrain y compris le "Drive Test". L'accès aux données des simulations a été amélioré en centralisant ses informations sur un nouveau "viewer".

Voir : <https://antennes3d.environnement.brussels/tw3d.php?id=001894860&lang=fr>

Les pages pour les professionnels ont également été revues, afin d'expliquer les obligations en matière d'ondes électromagnétiques.

1.3. Efforts en vue du contrôle du respect des permis délivrés

Le comité constate que l'administration poursuit son effort afin d'améliorer la conformité entre les permis d'environnement délivrés et les installations d'antennes. Pour ce faire, l'administration se fixe pour objectif de comparer, 2 fois par mois, les extraits des " Operations and Maintenance Center (OMC) " des opérateurs aux permis d'environnement. De plus, un certificat de conformité des installations est désormais nécessaire lors de la modification d'une installation.

1.4. Avis général concernant le protocole de mesure

Le comité est d'avis que Bruxelles Environnement effectue les mesures de contrôle et les simulations correctement, avec précision et judicieusement. Le comité note que l'évolution positive des procédures se poursuit. Le comité voit d'un œil favorable les efforts déployés pour améliorer encore les mesures.

Le comité tient à souligner que le nouveau standard 5G apportera des changements déterminants aux méthodes de mesures des niveaux de rayonnement. Le comité encourage Bruxelles Environnement à continuer les efforts d'anticipation nécessaires pour inclure ces changements autant que possible pour éviter un écart entre la norme 5G et les mesures sur le terrain. Au vu de l'expertise construite autour de la caractérisation du rayonnement issu de la 4G, et des travaux préliminaires exécutés par BE, le comité a confiance en l'expertise de BE pour relever ce défi.

Le comité a néanmoins constaté que l'approche avec les nouvelles mesures 5G n'est pas claire. Il aimerait que le protocole utilisé soit clairement défini, et en quoi il est différent de celui de la 4G ? Le comité considère qu'il est important de mentionner les arguments en faveur de ce protocole. La question a été posée à BE et la réponse suivante a été donnée :

« Outre la réponse donnée précédemment au point 1.1.2, le protocole pour la 5G NR est motivé par la nature du fonctionnement des antennes actives, pour lesquelles un protocole de mesure classique (comme pour la 4G) n'est plus adapté. En effet, une antenne active n'émet un "faisceau" qu'en présence d'un utilisateur vers ce dernier. En l'absence d'utilisateur, l'antenne émet un signal faible (+/-60mV) pour détecter un éventuel utilisateur à proximité. Ainsi, pour mesurer le signal le plus défavorable, il faut activer l'antenne par le biais d'un téléchargement, par exemple. C'est la raison pour laquelle le service d'inspection a adapté son protocole à la 5G NR. »

Le comité convient qu'un "call of the beam" est nécessaire, mais il serait utile d'étayer la procédure proposée soit par une justification, soit par une référence scientifique, soit par des preuves de mesure.

2. Technologie des réseaux mobiles publics

Plusieurs opérateurs sont actuellement présents à Bruxelles et proposent des services mobiles publics (appels vocaux et services de données mobiles) au public.

Depuis l'apparition des téléphones mobiles dans les années 1990, les technologies utilisées pour fournir ces services ont évolué. Tous les dix ans environ, de nouvelles normes sont entrées en vigueur :

- Années 1990 : 2G - "GSM" ;
- Années 2000 : 3G - "UMTS" ;
- Années 2010 : 4G - "LTE" ;
- Années 2020 : 5G - "NR".

Au fil des ans, de plus en plus de bandes de fréquences ont été utilisées :

- La 2G a démarré avec un spectre de 900 MHz et de 1800 MHz ;
- La 3G pourrait en outre utiliser le spectre de 2100 MHz ;
- La 4G et la 5G ont reçu des bandes supplémentaires dans les bandes 700 MHz, 800 MHz, 1400 MHz, 2600 MHz et 3500 MHz (sans ordre chronologique).

Actuellement, les licences de spectre délivrées par l'IBPT (Institut belge des services postaux et des télécommunications) sont neutres sur le plan technologique, les opérateurs pouvant choisir la technologie qu'ils souhaitent offrir dans les bandes respectives.

Le nombre d'opérateurs (parties offrant des services) a également évolué au fil des ans, et ils ont également changé de nom (parfois plusieurs fois). Actuellement (par ordre alphabétique), DIGI Communications Belgium¹, Orange Belgium², Proximus² et Telenet offrent des services à Bruxelles.

2.1. Vue d'ensemble des bandes/technologies/opérateurs

Ci-dessous est présenté un aperçu des bandes, des technologies et des opérateurs impliqués. Cet aperçu ne donne pas une image complète de la situation sur l'ensemble du territoire, il s'agit d'un exemple d'instantané à un endroit et à un moment donnés. Il sert d'exemple pour passer en revue les différentes combinaisons de bandes, de technologies et d'opérateurs, sans prétendre à l'exhaustivité.

Les noms des opérateurs figurant sur la figure ne sont pas non plus les noms officiels sous lesquels ces opérateurs sont actuellement connus : Citymesh Connect fait référence à DIGI Communications Belgium, Base à Telenet, MwingZ, Orange Belgium à Orange Belgium et Proximus, MWingz à Proximus).

¹ Orange Belgium et Proximus utilisent en partie le réseau de MWingZ pour la partie RAN (Radio Access Network).

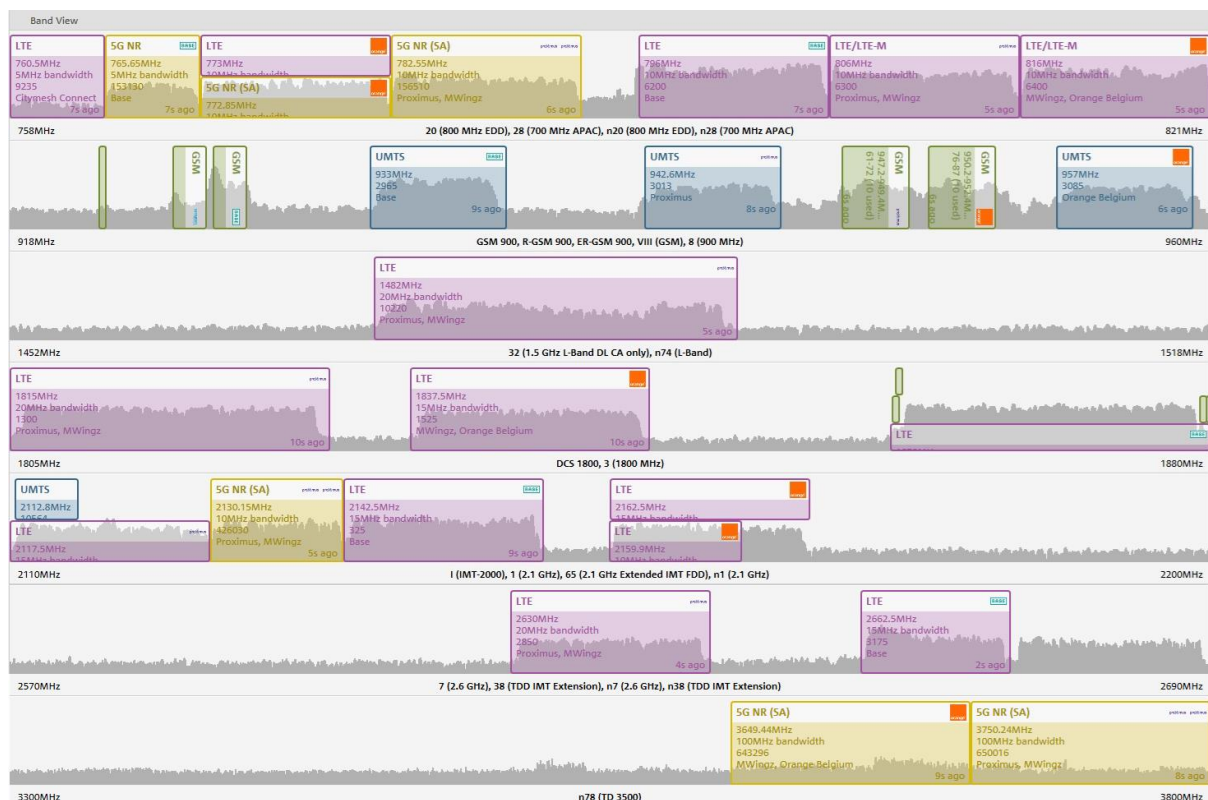


Figure 2.1 : Aperçu des bandes, des technologies et des opérateurs
2G-vert / 3G-bleu / 4G-violet / 5G-jaune

2.1.1. Bande 700 MHz

Dans la bande des 700 MHz, nous constatons la présence de technologies 4G LTE et 5G NR exploitées par DIGI Communications Belgium, Orange Belgium, Proximus et Telenet.

La 4G LTE et la 5G NR peuvent être utilisées dans le même spectre sur le même mât. Dans ce cas, on parle de DSS (Dynamic Spectrum Sharing) : la 4G et la 5G peuvent être utilisées côte à côte en fonction des besoins du moment. Des algorithmes intelligents de gestion des ressources permettent la division en fonction des besoins.

2.1.2. Bande 800 MHz

Dans la bande des 800 MHz, nous constatons que les opérateurs présents à cet endroit utilisent tous la 4G - LTE. Certains proposent le LTE-M : cela signifie que dans le spectre LTE, une petite partie est réservée au LTE Cat-M. Il s'agit d'une technologie qui peut être utilisée pour les communications de machine à machine, comme dans les communications IoT (Internet des objets). Les compteurs intelligents, par exemple, peuvent l'utiliser.

2.1.3. Bande 900 MHz

Dans la bande "classique" des 900 MHz, on trouve encore des signaux 2G - GSM. Mais nous constatons également qu'en raison de la neutralité technologique, les opérateurs y placent également des signaux UMTS 3G. Cette technologie 3G UMTS est progressivement abandonnée. Tous les opérateurs belges utilisant cette technologie ont annoncé qu'ils l'abandonneraient progressivement en 2024 ou 2025, voire plus tard.

Ce spectre peut alors être utilisé pour une technologie plus moderne, la 4G ou la 5G. Ces nouvelles technologies sont plus économes en énergie et en spectre.

Aucun plan d'abandon définitif n'a encore été établi pour la 2G. De nombreux appareils machine-to-machine utilisent encore la 2G sans pouvoir supporter la 4G ou la 5G (Cat-M ou NB-IOT).

2.1.4. Bande 1400 MHz

La bande des 1400 MHz est un peu spéciale : c'est ce qu'on appelle une bande SDL (Supplementary downlink). Cette bande ne peut pas être utilisée isolément pour offrir des services. En d'autres termes, un appareil mobile doit se connecter au réseau via une autre bande/technologie. Mais à partir de cette autre bande/technologie, l'appareil peut être autorisé à utiliser cette bande SDL pour obtenir une capacité supplémentaire afin d'atteindre, par exemple, des vitesses de téléchargement plus élevées.

2.1.5. Bande 1800 MHz

La bande de 1800 MHz est l'autre bande "classique" (outre la 900) dans laquelle le 2G-GSM était proposé. Telenet exploite encore quelques canaux 2G-GSM, mais la technologie 4G-LTE est principalement utilisée ces jours-ci. Cela s'explique par le fait qu'il y a de moins en moins de trafic sur la 2G.

2.1.6. Bande 2100 MHz

À l'origine, la bande 2100 MHz était utilisée comme spectre 3G-UMTS, mais nous constatons qu'actuellement les 3 technologies 3G-4G-5G sont exploitées dans cette bande. Toutefois, à assez court terme, la 3G disparaîtra comme expliqué plus haut (voir la bande des 900 MHz).

2.1.7. Bande 2600 MHz

Le spectre de 2600 MHz a été mis aux enchères dans le cadre des nouvelles licences 4G. Actuellement, seule la 4G-LTE est présente dans cette bande à l'endroit où la mesure a été effectuée.

2.1.8. Bande 3500 MHz

La dernière partie du spectre utilisée pour ces services mobiles publics est le spectre de 3,5 GHz. Nous n'y avons détecté que de la 5G dans cet enregistrement. La technologie 5G utilisée dans cette bande diffère quelque peu des autres technologies utilisées dans les bandes précédentes.

Dans toutes les bandes précédentes, les technologies présentes utilisaient le FDD - Frequency Division Duplex. Dans ce cas, la connexion entre le réseau ("le mâle") et l'appareil mobile ("le téléphone mobile

ou le smartphone") s'effectue sur une fréquence différente de la connexion inverse entre l'appareil et le réseau. Les transmissions du réseau vers l'appareil sont appelées "liaison descendante", et la connexion entre l'appareil et le mât est appelée "liaison montante".

Ainsi, pour la liaison descendante et la liaison montante, toutes les bandes de 700 à 2600 MHz utilisent des fréquences différentes. La figure 1 montre, pour ces bandes, les fréquences de la liaison descendante, telles qu'elles sont utilisées par le réseau. Les fréquences correspondantes de la liaison montante n'ont pas été indiquées.

La situation est toutefois différente pour la 5G dans la bande des 3500 MHz. Ici, c'est le principe TDD (Time Division Duplex) qui est utilisé. La liaison descendante et la liaison montante utilisent les mêmes fréquences. Toutefois, afin de ne pas se perturber mutuellement, les réseaux divisent leurs blocs de transmission dans le domaine temporel : le réseau utilise une partie du temps pour assurer la liaison descendante avec des transmissions, et les appareils se voient attribuer un bloc de temps pendant lequel le réseau n'émet pas, mais écoute la liaison montante des appareils.

2.2. Réseaux mobiles publics de nouvelle génération

L'Union internationale des télécommunications (UIT) a déjà entamé des études qui définissent les tendances, la vision et les spécifications de la prochaine génération de réseaux mobiles. En figure 1 donne un aperçu des normes les plus récentes élaborées conformément aux recommandations de l'UIT. Il en ressort clairement que les travaux en vue de ce que l'on appelle la 6G, ou IMT-2030, ont déjà commencé entre-temps et ont été documentés dans plusieurs rapports.

		IMT-2000 (3G)	IMT-Advanced (4G)	IMT-2020 (5G)	IMT-2030 (6G)
Report (FTT)	Future Tech Trends (FTT)	-	-	Rep. ITU-R M.2320	Rep. ITU-R M.2516
		-	-	Nov 2014	Nov 2022
Recommendation (Vision/Framework)	Vision	Rec. ITU-R M.687 & M.816	Rec. ITU-R M.1645	Rec. ITU-R M.2083	Rec. ITU-R M.2160
		Feb/Mar 1992 → 1997	June 2003	September 2015	November 2023
Reports (Requirements, evaluation methodology and submission template)	Technical Performance Requirements	Rec. ITU-R M.1034	Rep. ITU-R M.2134	Rep. ITU-R M.2410	Future work
		Feb 1997	2008	2017	
	Submission Template	8/LCCE/47 + Add	Rep. ITU-R M.2133	Rep. ITU-R M.2411	
		1998	2008	2017	
Recommendation (Radio Interface Tech.)	Evaluation Methodology	Rec. ITU-R M.1225	Rep. ITU-R M.2135-1	Rep. ITU-R M.2412	
		Feb 1997	2009	2017	
Recommendation (Radio Interface Tech.)	RIT Specifications (1 st release)	Rec. ITU-R M.1457	Rec. ITU-R M.2012	Rec. ITU-R M.2150	
		May 2000	Jan 2012	Feb 2021	

Figure 2.2: Familles IMT pour les réseaux mobiles publics - source ["ITU-R Framework for IMT-2030" (updated October 2024)]²

² ITU-R Framework for IMT-2030" (updated October 2024) - https://www.itu.int/en/ITU-R/study-groups/rsg5/rwp5d/imt-2030/Documents/2024-October_Common%20slide%20deck%20%28IMT-2030%20Framework%29.pdf - consulté le 16 novembre 2024.

La 6G n'en est encore qu'à ses débuts, mais il est déjà clair qu'elle sera développée dans une optique de durabilité, de connectivité omniprésente (y compris dans les zones reculées) et d'inclusivité (pour permettre à chacun d'accéder à la connectivité à large bande). La sécurité des infrastructures de réseau est également une préoccupation majeure, de même qu'une meilleure interopérabilité entre les différents types de réseaux.

En ce qui concerne le spectre, l'accent est mis sur les fréquences comprises entre 7 et 20 GHz environ. Les bandes de fréquences basses restent essentielles pour permettre une couverture nationale, en particulier pour réduire et élargir la fracture numérique. L'harmonisation du spectre pour les IMT permettrait un meilleur partage des équipements et est souhaitable pour réaliser des économies d'échelle et rendre les équipements plus abordables, ce qui pourrait faciliter l'inclusion numérique. Quoi qu'il en soit, la prochaine génération (ou 6G) n'en est qu'à ses débuts.

3. Déploiement rapide des communications sans fil 5G et évaluation des risques pour la santé humaine : où en sommes-nous ?

L'introduction généralisée de la communication sans fil 5G joue un rôle crucial dans le développement d'infrastructures numériques avancées et favorise l'innovation dans divers secteurs. Cependant, son déploiement étendu a suscité des inquiétudes quant aux impacts potentiels sur la santé, suscitant des débats publics et scientifiques en cours. Les recherches actuelles sur ces ondes millimétriques n'ont pas encore abouti à des conclusions définitives à ce sujet. En réponse, l'Union européenne a financé quatre projets en cours par le biais d'un appel à propositions, visant à répondre à ces préoccupations et à combler les lacunes concernant les effets de la technologie 5G sur la santé.

3.1. Exposition aux signaux 5G et évaluation des risques pour la santé

Les réseaux 5G sont rapidement déployés dans les zones urbaines et rurales du monde entier, avec des investissements importants de la part des entreprises de télécommunication et des gouvernements. Cela implique l'installation de millions de nouvelles antennes à « petites cellules », souvent plus proches du niveau du sol et dans des zones plus peuplées que les technologies précédentes comme la 4G. Comme la 5G fonctionne notamment dans la gamme 24-100 GHz des ondes millimétriques, la transmission de données est plus rapide, mais nécessite un réseau d'antennes plus dense (les longueurs d'onde sont plus courtes). Ce réseau est conçu pour prendre en charge l'Internet des objets (IoT) à grande échelle, permettant des villes intelligentes, des véhicules autonomes et une automatisation industrielle avancée. La technologie prend en charge le streaming vidéo ultra-haute définition, les applications de réalité virtuelle et augmentée et d'autres activités gourmandes en données. Les applications critiques telles que la chirurgie à distance, les jeux en temps réel et la robotique avancée s'appuient sur les capacités de faible latence de la 5G.

Le déploiement d'un réseau de petites antennes cellulaires 5G signifie que les personnes sont susceptibles d'être exposées plus fréquemment aux CEM de la 5G. Ces CEM sont des champs radiofréquence (RF) et les signaux 5G vont, in fine, utiliser les fréquences existantes pour la 4G, ainsi que trois fréquences porteuses spécifiques : 0,7 ; 3,5 et 26 GHz. A 26 GHz, les CEM sont appelés « ondes millimétriques » du fait de leur longueur d'onde de l'ordre du millimètre. Bien que ces ondes millimétriques utilisées dans la 5G ne pénètrent pas profondément dans la peau, la densité plus élevée des antennes a soulevé des inquiétudes quant à la possibilité d'une exposition cumulative.

En 2012, l'agence française ANSES a réalisé une évaluation des risques sanitaires liés à l'utilisation des scanners corporels utilisant les ondes millimétriques aux alentours de 24 GHz (ANSES 2012). Ce rapport souligne que la majorité des effets biologiques ont été observés avec des niveaux d'exposition bien supérieurs aux limites d'exposition européennes. À ces niveaux de puissance, l'exposition provoque un échauffement local et il est difficile de distinguer les effets électromagnétiques purs, des effets thermiques.

Une revue publiée en 2019 a abordé les recherches disponibles sur les effets biologiques et physiologiques des CEM dans la gamme de fréquences comprises entre 6 et 100 GHz, incluant la fréquence de 26 GHz de la 5G. Sur les 94 publications identifiées, 80% des études in vivo ont montré des réponses à l'exposition, tandis que 58% des recherches in vitro ont démontré des effets,

notamment des changements physiologiques, neurologiques, histologiques ou des mutations dans l'expression des gènes ou des protéines, des effets cytotoxiques, des altérations génotoxiques, majoritairement liés à l'échauffement (Simkó et Mattsson, 2019). De plus, les auteurs n'ont identifié que deux publications traitant des fréquences entre 6 et 30 GHz. Une étude *in vitro* a été réalisée sur des fibroblastes, avec des effets génotoxiques observés à un niveau de DAS de 20 W/kg (Franchini et al., 2018). L'autre étude, menée sur des bactéries et des champignons, a montré une croissance cellulaire accrue suite à une exposition à des fréquences de 18 GHz (Nguyen et al., 2016).

Par la suite, d'autres revues et méta-analyses (Karipidis et al., 2021 ; Wood et al., 2021), ainsi qu'un rapport ANSES (2022) ont été publiés sur les études disponibles sur les effets biologiques des CEM dans les fréquences spécifiques de la 5G. Il semble que la plupart des effets biologiques signalés n'aient pas été reproduits indépendamment et de nombreuses études ont utilisé des méthodes de faible qualité pour l'évaluation et le contrôle de l'exposition. Dans de nombreux cas, la possibilité d'effets causés par l'échauffement dû à un dépôt d'énergie RF élevé, donc à un échauffement des échantillons exposés, ne peut être exclue. Dans l'ensemble, ces études n'appuient pas un lien confirmé entre les ondes millimétriques de faible intensité et les effets biologiques. Une revue supplémentaire examinant l'association entre l'exposition aux CEM des téléphones portables et la régulation du rythme circadien chez les animaux et les humains montre que les résultats des études sont contradictoires, avec des données non concluantes. Cela implique la nécessité de recherches supplémentaires avec des protocoles contrôlés pour mieux déterminer si l'effet d'une exposition chronique aux RF sur le fonctionnement biologique et la santé des utilisateurs existe réellement (Selmaoui & Touitou, 2020). La pénétration des ondes 5G étant superficielle compte-tenu de l'utilisation de la fréquence 26 GHz, les effets attendus sont davantage focalisés sur la peau. Par exemple, les seuils de sensation de chaleur cutanée ont été mesurés sur la peau au milieu du dos de 15 hommes adultes, suite à une exposition à diverses fréquences micro-ondes (2,45, 7,5, 10, 35 et 94 GHz) et à celles de l'infrarouge (IR). Il a été constaté que la sensibilité augmente sur toute la gamme de fréquences micro-ondes testée. Le seuil à 2,45 GHz ($63,1 \pm 6,7$ mW/cm²) était inférieur à celui à 94 GHz ($4,5 \pm 0,6$ mW/cm²), lui-même comparable au seuil IR ($5,34 \pm 1,07$ mW/cm²) (Blick et coll., 1997). Cela montre bien que les ondes millimétriques sont absorbées par la peau. Dans une autre étude (Alekseev et al., 2012), l'échauffement cutané et le DAS augmentaient avec les fréquences utilisées dans cette recherche. C'est sur ces données que reposent les limites d'exposition proposées par l'ICNIRP (ICRNIP, 2020) et le comité de l'Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE Bushberg et al., 2020). D'autres effets cutanés ont été observés, tels que la pigmentation de la peau exposée, lors d'une étude *in vitro* dans laquelle les signaux utilisés étaient de 1,762 GHz et 28 GHz. Par ailleurs, il a été constaté que les RF des téléphones portables ne peuvent pas affecter la synthèse de mélanine ou la pigmentation de la peau dans des conditions normales de l'utilisation mobile (Kim et al., 2021).

Plus récemment, plusieurs recherches ont été publiées sur les effets des signaux 5G à 3,5 GHz. Ainsi, Jamal et al. (2023, 2024) ont montré qu'un signal 5G à 3,5 GHz, utilisé pendant 1/2 heure dans les limites réglementaires d'exposition, n'a pas affecté l'activité cérébrale, la température cutanée et l'activité électrodermale chez 34 adultes volontaires sains (17 hommes et 17 femmes).

Canovi et al (2023) n'ont montré aucun impact d'une exposition de 15 minutes à un signal à 3,5 GHz (continu ou modulé 5G) sur l'activité neuronale *in vitro* avec des niveaux de DAS de 1 et 3 W/Kg. En revanche, au niveau de DAS le plus élevé testé de 28 W/kg, on observe une diminution significative des paramètres d'activité électrique des neurones.

Patrignoni et al (2023) ont montré une réduction significative de la concentration mitochondriale de ROS dans des fibroblastes de peau exposés à un signal modulé 5G à 3,5 GHz à un seul niveau de DAS (1 W/kg) sur les 3 niveaux testés. En revanche, l'exposition a légèrement mais statistiquement augmenté la concentration mitochondriale de ROS induite par un rayonnement UV-B dans des kératinocytes à 0,25 et 1 W/kg mais pas à 4 W/kg. Cependant, aucun effet n'a été observé sur la viabilité des cellules, quelles que soient les conditions d'exposition.

Joushomme et al. (2023) ont également testé les effets d'un signal modulé 5G à 3,5 GHz (en continu ou en mode ON/OFF) sur des fibroblastes de peau et des kératinocytes sur l'activité de différentes protéines impliquées dans la réponse cellulaire au stress (HSF, ERK, RAS, PML). Les résultats obtenus par la technique de transfert d'énergie par résonance de bioluminescence (BRET) indiquent des effets tels qu'une légère mais significative diminution de l'efficacité maximale pour déclencher la SUMOylation de la PML dans les fibroblastes continuellement exposés au signal 5G (24 h à 4 W/kg), mais pas chez les kératinocytes.

Pecoraro et al (2023) se sont intéressés au développement embryonnaire du poisson zèbre (*Danio rerio*) exposé à des ondes millimétriques de 27 GHz. Les résultats indiquent une augmentation transitoire de la fréquence cardiaque des embryons exposés pendant 48 heures (à partir de 6 heures post fécondation), avec néanmoins un développement normal des embryons exposés jusqu'à 96 heures.

Dasgupta et al (2020, 2022) s'étaient intéressés au même modèle avec une exposition à un signal de fréquence 3,5 GHz (pas de modulation 5G) et un DAS de 8,27 W/Kg. L'exposition pendant 48 heures à partir de 6 h après la fécondation, n'a eu aucun impact significatif sur la mortalité ou la morphologie mais une modeste inhibition de la réponse de sursaut a été notée. Une modeste perturbation transcriptomique est observée, avec 28 gènes exprimés différemment et majoritairement liés au métabolisme. Enfin, des tests de comportements à l'âge adulte suggèrent un effet sur le comportement social et le comportement lié à l'anxiété suite à l'exposition aux RF pendant la période embryonnaire.

Nous avons donc à présent quelques informations sur les effets de RF de la 5G sur les systèmes vivants. On note une grande hétérogénéité des modèles utilisés et des paramètres biologiques étudiés, avec globalement peu d'effets ou de faible amplitude, même pour des expositions jusqu'à 8 W/Kg. De plus, certaines études suggèrent des différences de sensibilité en fonction du type cellulaire (cellules de la peau).

Par conséquent, compte-tenu du peu de publications concernant les effets des fréquences mises en œuvre pour la 5G (3,5 - 26 GHz) pour le grand public, aucune conclusion ne peut encore être proposée en termes de risque pour les personnes. Des études supplémentaires de qualité sont donc nécessaires pour une évaluation pertinente des risques liés à la génération 5G nouvellement mise en œuvre ; des protocoles bien définis sont indispensables, l'exposition doit être caractérisée en termes d'exposition et de dosimétrie et de contrôles de température, comme le recommandent Mattsson et al (2021).

3.2. Recherches en cours et Nouvelles

Étant donné que la 5G est une technologie relativement nouvelle, des études à court et à long terme sont toujours en cours pour évaluer de manière exhaustive ses implications pour la santé. À cette fin,

la commission de l'Union européenne via ses institutions a lancé un appel à propositions sur le thème de la santé environnementale (HORIZON-HL-TH-2021-ENVHLTH-02). Ce programme a été mis en œuvre pour répondre aux préoccupations du public concernant les effets sur la santé de l'exposition à la 5G. Le montant total du financement était de 30 millions d'euros d'Horizon Europe 2021-2027. Les résultats devraient combler les lacunes actuelles en matière de connaissances sur les effets des technologies sans fil sur la santé et l'environnement. Quatre projets financés par Horizon Europe ont été réunis dans le cadre du réseau CLUE-H, impliquant plus de 60 organismes de recherche européens répartis dans quatre consortiums de recherche : ETAIN, GOLIAT, NextGEM et SEAWave. De plus, des scientifiques extérieurs à l'Europe, y compris les États-Unis, la Corée et le Japon, collaborent également à ces projets.

3.3. Conclusion

Le déploiement rapide de la 5G offre des opportunités sans précédent d'innovation technologique, mais nécessite également une évaluation approfondie et continue des risques concernant ses impacts potentiels sur la santé. Alors que le consensus scientifique actuel soutient généralement la sécurité de la 5G selon les directives existantes, la nature évolutive de la technologie, associée à l'incertitude à long terme, souligne l'importance de la poursuite de la recherche, d'une communication transparente et de cadres réglementaires adaptatifs. Alors que la 5G devient de plus en plus omniprésente, il sera crucial d'équilibrer ses avantages avec des mesures de précaution en matière de santé pour garantir la confiance et la sécurité du public.

Bibliographie

- Alekseev, S. I., Ziskin, M. S., & Fesenko, E. E. (2012). [Frequency dependence of heating of human skin exposed to millimeter waves]. *Biofizika*, 57(1), 110–114.
- ANSES, juillet (2012). Avis de l'Anses. Rapport d'expertise collective. Évaluation des risques sanitaires liés à l'utilisation du scanner corporel à ondes « millimétriques » Ego.
- ANSES, février (2022). Avis actualisé de l'Anses Rapport d'expertise collective : exposition aux champs électromagnétiques liée au déploiement de la technologie « 5G »
- Blick, D. W., Adair, E. R., Hurt, W. D., Sherry, C. J., Walters, T. J., & Merritt, J. H. (1997). Thresholds of microwave-evoked warmth sensations in human skin. *Bioelectromagnetics*, 18(6), 403–409.
- Bushberg, J. T., Chou, C. K., Foster, K. R., Kavet, R., Maxson, D. P., Tell, R. A., & Ziskin, M. C. (2020). IEEE Committee on Man and Radiation—COMAR Technical Information Statement: Health and Safety Issues Concerning Exposure of the General Public to Electromagnetic Energy from 5G Wireless Communications Networks. *Health Physics*, 119(2), 236–246. <https://doi.org/10.1097/HP.0000000000001301>
- Canovi A, Orlacchio R, Poullietier de Gannes F, Lévêque P, Arnaud-Cormos D, Lagroye I, Garenne A, Percherancier Y, Lewis N (2023). [In vitro exposure of neuronal networks to the 5G-3.5 GHz signal](#). *Front Public Health* 11: 1231360
- Dasgupta S, Leong C, Simonich MT, Truong L, Liu H, Tanguay RL. (2022). [Transcriptomic and Long-Term Behavioral Deficits Associated with Developmental 3.5 GHz Radiofrequency Radiation Exposures in Zebrafish](#). *Environ Sci Technol Lett*, 9 (4): 327-332

- Dasgupta S, Wang G, Simonich MT, Zhang T, Truong L, Liu H, Tanguay RL. (2020). [Impacts of high dose 3.5 GHz cellphone radiofrequency on zebrafish embryonic development](#). *PLoS One*, 15 (7): e0235869
- Franchini, V., Regalbuto, E., De Amicis, A., De Sanctis, S., Di Cristofaro, S., Coluzzi, E., Marinaccio, J., Sgura, A., Ceccuzzi, S., Doria, A., Gallerano, G. P., Giovenale, E., Ravera, G. L., Bei, R., Benvenuto, M., Modesti, A., Masuelli, L., & Lista, F. (2018). Genotoxic Effects in Human Fibroblasts Exposed to Microwave Radiation. *Health Physics*, 115(1), 126–139. <https://doi.org/10.1097/HP.0000000000000871>
- ICNIRP. (2020). Guidelines for Limiting Exposure to Electromagnetic Fields (100 kHz to 300 GHz). *Health Physics*, 118(5), 483–524. <https://doi.org/10.1097/HP.0000000000001210>
- Jamal L, Yahia-Cherif L, Hugueville L, Mazet P, Lévêque P, Selmaoui B. (2023). [Assessment of Electrical Brain Activity of Healthy Volunteers Exposed to 3.5 GHz of 5G Signals within Environmental Levels: A Controlled-Randomised Study](#). *Int J Environ Res Public Health* 20 (18): 6793
- Jamal L, Michelant L, Delanaud S, Hugueville L, Mazet P, Lévêque P, Baz T, Bach V, Selmaoui B (2024). [Autonomous nervous system responses to environmental-level exposure to 5G's first deployed band \(3.5 GHz\) in healthy human volunteers](#). *Exp Physiol* [in press]
- Joushomme A, Orlacchio R, Patrignoni L, Canovi A, Chappe YL, Poullétier de Gannes F, Hurtier A, Garenne A, Lagroye I, Moisan F, Cario M, Lévêque P, Arnaud-Cormos D, Percherancier Y. (2023). [Effects of 5G-modulated 3.5 GHz radiofrequency field exposures on HSF1, RAS, ERK, and PML activation in live fibroblasts and keratinocytes cells](#). *Sci Rep* 13: 8305
- Karipidis, K., Mate, R., Urban, D. *et al.* (2021). 5G mobile networks and health—a state-of-the-science review of the research into low-level RF fields above 6 GHz. *J Expo Sci Environ Epidemiol* 31, 585–605. <https://doi.org/10.1038/s41370-021-00297-6>
- Kim, K., Lee, Y. S., Kim, N., Choi, H.-D., Kang, D.-J., Kim, H. R., & Lim, K.-M. (2021). Effects of Electromagnetic Waves with LTE and 5G Bandwidth on the Skin Pigmentation In Vitro. *International Journal of Molecular Sciences*, 22(1), 170. <https://doi.org/10.3390/ijms22010170>
- Mattsson M-O Simkó M and Foster KR (2021) 5G New Radio Requires the Best Possible Risk Assessment Studies: Perspective and Recommended Guidelines. *Front. Comms. Net* 2:724772. doi: 10.3389/frcmn.2021.724772
- Nguyen, T. H. P., Pham, V. T. H., Nguyen, S. H., Baulin, V., Croft, R. J., Phillips, B., Crawford, R. J., & Ivanova, E. P. (2016). The Bioeffects Resulting from Prokaryotic Cells and Yeast Being Exposed to an 18 GHz Electromagnetic Field. *PLOS ONE*, 11(7), e0158135. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0158135>
- Patrignoni L, Hurtier A, Orlacchio R, Joushomme A, Poullétier de Gannes F, Lévêque P, Arnaud-Cormos D, Revzani HR, Mahfouf W, Garenne A, Percherancier Y, Lagroye I. (2024). [Evaluation of mitochondrial stress following ultraviolet radiation and 5G radiofrequency field exposure in human skin cells](#). *Bioelectromagnetics* 45 (3): 110-129

- Pecoraro, R.; Pavone, S.C.; Scalisi, E.M.; Ignoto, S.; Sica, C.; Indelicato, S.; Capparucci, F.; Iaria, C.; Salvaggio, A.; Sorbello, G.; et al. **(2023)**. Multimarker Approach to Evaluate the Exposure to Electromagnetic Fields at 27 GHz on *Danio rerio* Larvae. *J. Mar. Sci. Eng.*, *11*, 693. <https://doi.org/10.3390/jmse11040693>
- Selmaoui, B., & Tuitou, Y. **(2020)**. Association Between Mobile Phone Radiation Exposure and the Secretion of Melatonin and Cortisol, Two Markers of the Circadian System: A Review. *Bioelectromagnetics*, bem.22310. <https://doi.org/10.1002/bem.22310>
- Simkó, & Mattsson. **(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. <https://doi.org/10.3390/ijerph16183406>
- Wood, A., Mate, R. & Karipidis, K. Meta-analysis of in vitro and in vivo studies of the biological effects of low-level millimetre waves. **(2021)**. *J Expo Sci Environ Epidemiol* **31**, 606–613 <https://doi.org/10.1038/s41370-021-00307-7>

4. L'état actuel de la 5G et ses implications macroéconomiques : Une perspective mondiale, européenne et belge

Le réseau mobile de cinquième génération (5G) marque une avancée transformatrice dans les télécommunications, promettant des vitesses de données accrues, une connectivité plus large et une croissance économique significative. Ce rapport examine l'état actuel du déploiement de la 5G et ses implications macroéconomiques à l'échelle mondiale, en Europe et plus particulièrement en Belgique. Au niveau mondial, l'adoption de la 5G devrait entraîner des gains de productivité substantiels, la création d'emplois et l'innovation technologique. L'Europe est confrontée à ses propres défis, avec des complexités réglementaires et un déploiement inégal entre les États membres. La Belgique affiche des progrès notables en matière de partenariats stratégiques et de développement d'infrastructures, mais se heurte à des obstacles réglementaires et de déploiement. Le rapport examine également comment la 5G influence le marché de l'emploi en façonnant les demandes de compétences et en transformant les industries clés.

4.1. Introduction

Le passage des réseaux de quatrième génération (4G) à ceux de cinquième génération (5G) représente une étape importante dans l'évolution des technologies de télécommunications. Contrairement aux générations précédentes, la 5G permet des débits de données accrus, une latence ultra-faible et une connectivité massive des appareils, jetant ainsi les bases des progrès de l'automatisation, de l'intelligence artificielle et de l'internet des objets (IdO). L'impact macroéconomique potentiel de la 5G est considérable, les pays à la pointe du déploiement étant en passe de bénéficier d'avantages concurrentiels notables grâce à une productivité accrue et à l'expansion économique. Toutefois, 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 ; rapport de l'Observatoire de la 5G, 2024).

Ce rapport synthétise des analyses et des résultats récents provenant de diverses sources primaires afin de fournir un aperçu complet de l'état actuel de la 5G et de ses effets économiques à l'échelle mondiale, en Europe et plus particulièrement en Belgique.

4.2. Aperçu mondial du déploiement de la 5G et implications

Le déploiement mondial de la 5G a commencé sérieusement à la fin des années 2010, sous l'impulsion d'un besoin croissant de débits de données mobiles plus rapides, d'une latence réduite et de la capacité de connecter de vastes réseaux d'appareils IoT. En 2024, des pays comme la Corée du Sud, la Chine et les États-Unis auront pris la tête du déploiement de la 5G, récoltant des avantages économiques précoces. Les investissements dans les infrastructures et les technologies se sont déjà traduits par 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 Study estime que d'ici 2035, la 5G apportera plus de 13 000 milliards de dollars à l'économie mondiale. Cette croissance économique est attribuée aux nouvelles capacités permises

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 soutenu par la 5G est crucial pour les secteurs qui dépendent de la précision et de la vitesse, qui étaient auparavant limités par les réseaux 4G.

Néanmoins, le déploiement mondial de la 5G s'accompagne de défis considérables. Les coûts élevés du déploiement initial, les différends concernant l'attribution des fréquences et les disparités dans la couverture urbaine et rurale restent des obstacles importants. En outre, les tensions géopolitiques, notamment liées au leadership technologique et aux droits de propriété intellectuelle, continuent d'affecter les partenariats et le rythme d'adoption de la 5G (Rapport de l'Observatoire de la 5G, 2024 ; Market Guide for 5G New Radio, 2024).

4.3. Le paysage européen de la 5G, les progrès de la Belgique en matière de 5G et l'analyse économique

4.3.1. Le paysage européen de la 5G

L'Europe a fait des progrès considérables dans le déploiement de la 5G, avec des taux d'adoption et des stratégies très divers selon les États membres. En 2024, des pays comme l'Allemagne, le Royaume-Uni et la France seront à la pointe du déploiement des infrastructures et de l'intégration technologique. La stratégie numérique de la Commission européenne a fixé des objectifs ambitieux pour assurer une couverture complète de la 5G dans les zones urbaines et les principaux axes de transport d'ici à 2025. Toutefois, des disparités persistent dans le déploiement en raison des variations de la capacité économique, des environnements réglementaires et des niveaux d'investissement entre les États membres (Commission européenne, 2024 ; Market Guide for 5G New Radio, 2024).

L'un des principaux défis du déploiement de la 5G en Europe est le cadre réglementaire complexe qui varie considérablement d'un pays à l'autre. Le "Rapport de l'Observatoire de la 5G" (2024) souligne que le coût élevé des licences d'utilisation du spectre et les obstacles bureaucratiques associés aux projets d'infrastructure transfrontaliers ralentissent le processus de déploiement dans certaines régions. Cette fragmentation affecte la compétitivité de l'Europe par rapport aux leaders mondiaux tels que les États-Unis et la Chine (Rapport de l'Observatoire de la 5G, 2024 ; Rapport de l'Observatoire de la 5G BR-20, 2024).

L'impact macroéconomique de la 5G sur l'Union européenne (UE) comprend une croissance potentielle du PIB, une augmentation de la productivité et un renforcement des capacités technologiques. L'étude IHS-Markit (2020) prévoit que l'économie de l'UE pourrait connaître un essor de 2 000 milliards de dollars d'ici à 2035, grâce aux technologies 5G telles que la logistique intelligente, les réseaux énergétiques et les services publics (IHS-Markit, 2020). L'accent mis par le continent sur la croissance durable et verte s'aligne également sur la capacité de la 5G à optimiser l'utilisation des ressources et à réduire les incidences sur l'environnement.

4.3.2. Progrès de la 5G en Belgique et analyse économique

4.3.2.1. Implications économiques

Les avantages économiques de la 5G pour la Belgique sont considérables, avec le potentiel de contribuer de manière significative à la croissance du PIB et à la création d'emplois. Les industries les plus susceptibles d'en bénéficier sont l'industrie manufacturière, la logistique et les soins de santé. L'amélioration de la connectivité permet un suivi en temps réel et une prise de décision fondée sur les données, ce qui est particulièrement précieux dans les secteurs de haute précision. Le rapport "Consumer Electronics and Technology in Belgium" (2024) souligne l'effet transformateur de la 5G sur la technologie grand public, notamment les avancées en matière de réalité augmentée (AR) et d'appareils domestiques intelligents qui stimulent les dépenses de consommation (Consumer Electronics and Technology in Belgium, 2024).

Le marché du travail belge est également influencé par le besoin croissant de compétences numériques. La demande de professionnels compétents en matière de gestion de réseau, de cybersécurité et d'analyse de données augmente à mesure que les technologies 5G sont intégrées dans les opérations commerciales. Les rapports indiquent une forte corrélation entre le déploiement de la 5G et l'amélioration des compétences de la main-d'œuvre, comme l'indique le rapport "Telecommunication Industry in Belgium" (2024) (Industrie des télécommunications en Belgique, 2024).

4.4. Implications économiques et recommandations stratégiques

4.4.1. Implications économiques de la 5G pour l'Europe et la Belgique

Les implications macroéconomiques de la 5G en Europe, y compris en Belgique, sont profondes, influençant la croissance dans tous les secteurs par l'amélioration de la productivité, l'innovation et la création d'emplois. Le déploiement de la 5G facilite le développement de villes intelligentes, d'industries connectées et de solutions de soins de santé avancées. Selon le rapport IHS-Markit (2020), la 5G pourrait apporter une contribution estimée à 2 000 milliards de dollars à l'économie européenne d'ici à 2035, entraînant une vague d'activités économiques qui mettent l'accent sur la transformation numérique, la durabilité et la compétitivité (IHS-Markit, 2020).

La Belgique, qui fait partie de cette vague européenne, devrait récolter des avantages considérables en tirant parti de la 5G pour la croissance économique et la modernisation. Le rapport "Consumer Electronics and Technology in Belgium" (2024) souligne que des secteurs comme la logistique, la vente au détail et l'électronique grand public ont déjà commencé à connaître des améliorations grâce à l'intégration de la technologie 5G. Par exemple, les entreprises de logistique bénéficient d'une meilleure optimisation des itinéraires et du suivi des actifs, tandis que le secteur de l'électronique grand public connaît une croissance grâce à l'adoption accrue d'appareils compatibles avec l'IoT (Consumer Electronics and Technology in Belgium, 2024).

Le marché de l'emploi en Belgique reflète cette évolution technologique, avec une augmentation notable de la demande de travailleurs qualifiés dans des domaines tels que la gestion des réseaux, la cybersécurité et la science des données. Le rapport "Telecommunication Industry in Belgium" (2024) souligne que si de nouvelles fonctions sont créées, il est nécessaire de mettre fortement l'accent sur

le perfectionnement de la main-d'œuvre existante pour assurer une croissance durable (Telecommunication Industry in Belgium, 2024).

4.4.2. Recommandations stratégiques pour l'Europe et la Belgique

Pour maximiser les avantages macroéconomiques de la 5G, l'Europe et la Belgique devraient se concentrer sur plusieurs domaines stratégiques :

1. **Accélérer le déploiement des infrastructures :**
 - La rationalisation des réglementations afin de réduire le coût et la complexité du déploiement des réseaux 5G dans les États membres contribuera à combler le fossé entre les régions en pointe et celles qui sont à la traîne.
2. **Les partenariats public-privé (PPP) :**
 - La mise en place de PPP peut favoriser le développement de solutions innovantes qui tirent parti des capacités de la 5G, comme le montrent divers projets européens de villes intelligentes. L'expérience de la Belgique en matière de promotion des partenariats intersectoriels s'est révélée prometteuse, notamment dans les projets de logistique et d'énergie intelligente (Innovation Insight for 5G, 2024).
3. **Investir dans le développement de la main-d'œuvre :**
 - Il est essentiel de s'assurer que la main-d'œuvre possède les compétences numériques nécessaires pour soutenir la technologie 5G.
 - La Belgique et l'Europe devraient donner la priorité aux programmes éducatifs et à la formation professionnelle pour combler le déficit de compétences mis en évidence dans le rapport "Telecommunication Industry in Belgium" (2024).
 - Les initiatives visant à la requalification des travailleurs et à la promotion de l'enseignement des STIM peuvent préparer le marché du travail aux défis et aux opportunités d'une économie basée sur la 5G.
4. **Se concentrer sur la croissance durable :**
 - Les avantages économiques de la 5G devraient s'aligner sur les objectifs de l'Europe en matière de développement durable.
 - Exploiter le potentiel de la 5G pour optimiser la consommation d'énergie dans les industries et les villes intelligentes peut contribuer aux objectifs du Green Deal de l'UE.
 - L'intégration de la 5G avec des technologies telles que l'IA et l'IdO peut permettre une utilisation plus efficace des ressources, réduire les déchets et soutenir des pratiques commerciales durables (Rapport de l'Observatoire 5G BR-20, 2024).
5. **Implications microéconomiques de la 5G : impacts au niveau des entreprises et des consommateurs**
 - Le déploiement de la technologie 5G a de profonds effets microéconomiques, influençant l'efficacité opérationnelle, la demande des consommateurs et la dynamique concurrentielle dans tous les secteurs.
 - Impact au niveau de l'entreprise : Efficacité opérationnelle et innovation
La 5G stimule l'efficacité opérationnelle et favorise l'innovation, en particulier dans les secteurs qui dépendent d'une transmission de données élevée et d'une faible latence. Par exemple, l'industrie manufacturière peut tirer parti de l'IdO compatible avec la 5G pour la surveillance en temps réel et la maintenance prédictive, ce qui permet de réduire les coûts et les temps d'arrêt. La logistique bénéficie d'une planification optimisée des itinéraires et d'un suivi en temps réel. Les petites entreprises, y compris les startups et les PME, peuvent accéder à une infrastructure 5G avancée, ce qui leur permet de développer des applications de réalité augmentée (AR), de réalité virtuelle (VR) et d'intelligence artificielle (AI), stimulant ainsi la concurrence et l'innovation spécifique à l'industrie.

- Comportement des consommateurs et demande du marché
Du côté des consommateurs, la 5G transforme à la fois les attentes et la demande. Avec des vitesses plus rapides et une latence réduite, les applications gourmandes en données telles que le streaming, les jeux et les services interactifs deviennent plus transparentes, ce qui suscite l'intérêt pour les appareils et les services compatibles avec la 5G. En Belgique, où 95 % des ménages disposent d'une couverture 5G extérieure et 76 % d'une couverture intérieure à compter de juin 2024 (IBPT, 2024), les consommateurs intègrent de plus en plus les appareils IoT, tels que les thermostats intelligents et les systèmes de sécurité à domicile, ce qui favorise la croissance de l'électronique grand public et des services d'assistance IoT.
- Implications sectorielles : Soins de santé, commerce de détail et finance
Les capacités de la 5G ont un potentiel de transformation dans des secteurs clés :
 - Soins de santé : La télémédecine permet désormais des consultations et des diagnostics en temps réel, améliorant ainsi l'accès aux soins dans les zones reculées (IBPT, 2024).
 - Commerce de détail : Les solutions de "vente au détail intelligente" permettent aux entreprises de personnaliser l'expérience des clients et de gérer dynamiquement les stocks grâce à l'analyse des données en temps réel.
 - Finance : Des transactions numériques plus rapides et plus sûres soutiennent le commerce en temps réel et les services bancaires mobiles, élargissant la portée des services financiers et améliorant l'expérience des clients (The Brussels Times, 2023).
- Dynamique concurrentielle et structure du marché
Le déploiement de la 5G affecte également la structure du marché. Les entreprises de télécommunications qui étendent leur infrastructure 5G acquièrent des avantages concurrentiels, ce qui pourrait conduire à une consolidation du marché. En Belgique, les initiatives du gouvernement, y compris un financement fédéral de 20 millions d'euros pour des projets pilotes 5G en 2023, soutiennent l'innovation intersectorielle et consolident la position de la Belgique en tant que leader de l'économie numérique en Europe (The Brussels Times, 2023).

4.5. Conclusion

Le déploiement de la 5G représente une force de transformation pour les économies mondiale, européenne et belge. En relevant les défis liés à l'infrastructure, à la réglementation et au développement de la main-d'œuvre, l'Europe et la Belgique peuvent exploiter tout le potentiel de la 5G, garantissant ainsi la croissance économique, l'innovation et la durabilité. La voie à suivre implique une collaboration entre les gouvernements, les industries et les établissements d'enseignement pour construire un avenir qui tire parti de la 5G pour un progrès inclusif et durable.

Bibliographie

Institut belge des services postaux et des télécommunications (IBPT). (2023). *Rapport annuel sur le déploiement de la 5G et les télécommunications en Belgique*. Bruxelles : IBPT.

Institut belge des services postaux et des télécommunications (IBPT) (2024). "Le déploiement de la 5G atteint 95% des ménages belges". Consulté sur bpt.be

Commission européenne. (2023). *Indice de l'économie et de la société numériques (DESI)*. Union européenne.

Commission européenne, Direction générale des réseaux de communication, du contenu et de la technologie. (2024). *Rapport semestriel de l'Observatoire de la 5G : Juin 2024 (situation au 31 mars 2024)*. EY, PolicyTracker, et LS telcom. Récupéré de /mnt/data/BR-20_5G-Observatory-Report-June-2024-2.pdf

IHS Markit. (2020). *The 5G economy : How 5G technology will contribute to the global economy (L'économie de la 5G : comment la technologie de la 5G contribuera à l'économie mondiale)*. Londres : IHS Markit.

Statista. (Différentes années). *Rapports sur l'infrastructure numérique et la technologie en Belgique*. Département de recherche de Statista.

Brussels Times. (2023). "20 millions d'euros de fonds fédéraux pour soutenir les projets de développement de la 5G. Tiré de brusselstimes.com

5. Le déploiement du réseau de la 5G et la dimension détritique

Si le déploiement de la 5G suscite un intérêt scientifique lié aux effets écologiques et sanitaires des rayonnements électromagnétiques et à la hausse de consommation énergétique qu'il renforcerait ou économiserait (Lopez, 2022), la dimension détritique découlant de ce déploiement est encore peu abordée. La production de déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE) fait l'objet d'une littérature scientifique pluridisciplinaire importante. En effet, elle constitue un enjeu écologique réel lié à la déperdition des métaux rares et critiques qu'ils contiennent et au traitement non conforme et polluant d'une partie importante des flux de DEEE. Ainsi, une partie importante des flux de DEEE échappent à la traçabilité (Baldé et al., 2024) et sont mis en décharge dans des pays où les législations et les contrôles sont moins importants. Ensuite, elle engendre de nouvelles filières de traitement dans le cadre de l'économie circulaire. Enfin, elle fait l'objet d'une action publique importante. Toutefois, la production de DEEE spécifiquement liée au déploiement n'est pas analysée dans la littérature scientifique. S'il y a un intérêt des pouvoirs publics grandissant pour la réduction de la croissance du volume des DEEE (Green New Deal, économie circulaire, ...), une production de données publiques sur la 5G (nombre d'antennes, caractéristiques techniques des antennes, ...) et des recherches scientifiques sur les DEEE, les programmes de recherche spécifiquement centrés sur les filières spécifiques de déchets engendrés par la 5G sont encore peu nombreux. Pourtant, le déploiement de la 5G repose sur une série d'équipements matériels : les smart phones et les objets connectés pour l'envoi et la réception des données ; les antennes pour la circulation des données et les data centers pour le stockage des données. Ces équipements matériels constituent l'infrastructure nécessaire au déploiement de la 5G.

La présente section se divise en trois parties (usagers ; réseaux ; stockage des données) qui permettent d'aborder schématiquement les différentes dimensions de la matérialité du déploiement de la 5G.

5.1. Envoi et réception des données (utilisation)

Dans sa dimension détritique, le déploiement de la 5G a surtout attiré l'attention sur l'effet rebond (Dubey et Gras, 2021) qu'il allait susciter en termes de consommation en favorisant le renouvellement des appareils électriques et électroniques. Afin de bénéficier d'une vitesse accrue de téléchargement, de qualité des images afférant à la 5G ou encore d'une consommation de ressources mieux régulées par l'internet des objets, il est nécessaire de disposer d'appareil adaptés à la réception et à l'envoi de données. C'est pourquoi le déploiement de la 5G devrait s'accompagner d'un renouvellement massif des smartphones et d'autres objets connectés, participant ainsi à l'obsolescence accélérée des smartphones en service pour des raisons technologiques. En outre, la 5G ne ciblant pas que les appareils de téléphonie mobile et d'informatique portable (PC portables, tablettes, ...), elle vise à développer l'internet des objets, donc à accroître le nombre d'appareils électriques et électroniques pouvant envoyer des données, notamment pour développer les usages de la domotique. Ces appareils feraient donc l'objet d'un renouvellement en prévision ou à mesure que la 5G sera effectivement déployée. Si les données publiques attestent de la croissance exponentielle des volumes de DEEE, il est difficile d'identifier précisément l'impact du déploiement de la 5G car les études scientifiques manquent pour documenter et analyser ce lien. Mais il semble qu'en matière d'innovation technologique, l'offre précède et stimule les besoins et les nouveaux usages. Vu le nombre d'appareils concernés, ce sont les usages auxquels vont donner lieu la croissance des données transférables qui vont générer des volumes croissants et proportionnellement plus importants de déchets électroniques (Aiouch et al., 2022).

Sur le plan du réemploi et du recyclage des ordinateurs et des smartphones, les études documentent depuis longtemps leur teneur en métaux rares, précieux et/ou critiques des DEEE, ainsi que les formes et taux de réemploi et de recyclage. Parmi l'e-waste, les smartphones (Bastin, 2018) et les ordinateurs (Gonda et Degrez, 2018) ont fait l'objet de plusieurs recherches approfondies, notamment par études de cas (modèles spécifiques, année de fabrication), en termes de traçabilité des flux, de cycle de vie et de filières de traitement. Si les objets connectés représentent encore des flux qui sont encore limités, ils ont un potentiel de développement commercial important (Aiouch et al, 2022).

Analysés à l'aide d'étude de cas sur des filières et flux bien circonscrits, les taux de réemploi et de recyclage des DEEE sont très variables. Premièrement, cela dépend des flux considérés. Pour le réemploi, il y a le prix de revente. En effet, ce prix de revente est largement déterminé par le coût de la main d'œuvre. Mais le marché est également conditionné par l'existence d'une demande pour le prix proposé. Le choix entre le neuf et l'occasion dépend des types de bien, mais il semble surtout dépendre de la différence de prix entre le neuf et l'occasion, mais aussi de la catégorie de prix dans laquelle se situe le neuf. L'allongement de la durée de vie de ces appareils par la réparation et le réemploi est une piste hautement recommandée par de multiples études pour diminuer l'empreinte environnementale des e-déchets (Bridgens et al., 2019) car c'est au niveau de la production que l'empreinte est concentrée (entre 30 et 76%). Quant au recyclage, de nombreuses études ont montré que le recyclage n'est que partiel. D'une part, il n'y a qu'un faible pourcentage de DEEE qui sont collectés adéquatement pour entrer dans les filières de recyclage (Baldé et al., 2024). D'autre part, le recyclage ne concerne que quelques composants (Horta Arduin et al., 2020), souvent les plus rentables. En outre, le recyclage n'est pas neutre en termes de propriétés des matières premières, il peut avoir pour effet de réduire la pureté des matières. Enfin, il y a un pourcentage non négligeable de matières qui ne sont pas recyclées soit parce qu'il n'existe pas de procédé de recyclage, soit parce que ceux-ci coûtent trop chers comparativement à une mise en décharge, soit parce que la filière du recyclage dépend fortement de la collecte et que celle-ci ne couvre pas la majorité des appareils mis sur le marché.

Des projets de recherche interdisciplinaires tels que Clever (Closed Loop Emotionally Valuable E-waste Recovery) et WEEESOC (ULB) ont travaillé sur les possibilités d'améliorer les taux de collecte, de réemploi et de recyclage des DEEE. Mais ces projets sont loin de couvrir la diversité des flux.

5.2. Circulation des données (réseaux)

« La 5G, qui cohabitera avec les générations précédentes de téléphonie mobile, en particulier la 4G, utilisera dans un premier temps des bandes de fréquences déjà exploitées par celles-ci ainsi que la bande de fréquences située autour de 3,5GHz. Dans un second temps, la 5G sera également déployée sur la bande située autour de 26 GHz, caractérisée par une portée réduite et une faible pénétration dans les immeubles et les tissus humains. » (Aballéa et al, 2020, p. 5).

Comme l'indique cet extrait, le réseau de la 5G s'appuie donc largement sur l'optimisation de l'usage des antennes de téléphonie mobile déjà installées. En ce sens, il n'y a pas d'élimination des antennes de génération plus ancienne, mais leur mise à contribution grâce à une adjonction technologique. A l'échelle d'un territoire tel que la RBC, ce système de la 5G s'accompagne du déploiement d'un nouveau type d'antennes (actives) qui contiennent elles-aussi des alliages de métaux rares et critiques, de l'augmentation du nombre de data centers et de l'augmentation de la production d'appareils compatibles avec la 5G (smart phones et les autres objets connectés). A l'échelle mondiale,

la 5G accroît la nécessité de câbles permettant l'accélération et l'augmentation de la circulation des données entre les continents. Le déploiement de la 5G repose donc sur une infrastructure matérielle dont la durée de vie est limitée dans le temps. Si la phase de production des antennes est analysée (Guérid et al., 2022) ; les sites internet des opérateurs télécoms assurent que les antennes sont recyclées. Cependant, on ne trouve aucune étude précise sur le réemploi ou le recyclage de ces antennes.

Le déploiement de la 5G s'appuie également sur des satellites (notamment starlink :1400 aujourd'hui et à terme 42 000), ce qui engendrerait des déchets électroniques dans l'espace (Dubey et Gras, 2021). Toutefois, aucune étude sur ce sujet spécifique n'a été identifiée pour la rédaction du présent rapport, mais ce qui ne signifie pas qu'ils n'en produisent pas. Il convient de mentionner qu'il existe la règle des 25 ans sur la désagrégation des objets spatiaux (ESA, 2024). Cette règle a engendré des méthodologies pour prédire la fin de vie des objets spatiaux (Lemmens et al. 2016) sur lesquelles repose le logiciel Drama. Drama est « utilisé pour évaluer les statistiques d'évitement des collisions, estimer la durée de vie orbitale restante et évaluer le risque au sol pour les rentrées contrôlées et non contrôlées » (Braun et al. 2019).

5.3. Le stockage des données (Centres informatiques)

Le stockage des données se fait sur des serveurs localisés dans des centres informatiques. Ces serveurs contiennent également des cartes imprimées contenant des métaux critiques et rares, ainsi que des plastiques. Les centres informatiques sont également équipés de caméras de sécurité, de systèmes de ventilation pour diminuer la chaleur produite par les serveurs, ainsi que des générateurs électriques de secours pour parer aux problèmes d'approvisionnement électrique (Lopez, 2022).

Le projet CeDaci (Kerwin, 2022) analyse les possibilités de création d'une filière d'économie circulaire qui analyse autant les possibilités d'éco-design que de réemploi des composants avant l'étape du recyclage et de la mise en décharge. Ce projet s'appuie autant sur l'économie sociale que sur des entreprises classiques. Il identifie les principaux territoires de développement des data centers en Grande-Bretagne, Allemagne, Pays Bas et France.

5.4. Conclusion

Des recherches par flux spécifiques sur des territoires donnés manquent pour déterminer de façon précise le volume de DEEE lié spécifiquement au déploiement de la 5G, ainsi que les possibilités de réemploi des composants et de recyclage des matériaux critiques contenus dans les déchets électroniques. La complexité de l'évaluation quantitative liée à la difficile traçabilité des flux de déchets électroniques demeure un obstacle important pour la production de données chiffrées sur la production de déchets. C'est pourquoi la production de ces données relève nécessairement d'un travail scientifique approfondi, pluridisciplinaire et systémique, d'autant que le déploiement de la 5G est également associé à des impacts écologiques positifs (réduction de consommation énergétique, ...). L'impact détritique du déploiement de cette nouvelle technologie de transmission des données n'a donc pas été anticipé. Concernant spécifiquement la RBC, la partie importante du volume détritique de la 5G de son territoire sera traitée en dehors de celui-ci. Etant donné la structure de son tissu industriel, les DEEE traités selon la filière conforme seront traités dans des espaces industriels situés en dehors du territoire régional.

Bibliographie

Aiouch, Yasmine (Deloitte), Augustin Chanoine (Deloitte), Léo Corbet (Deloitte), Pierrick Drapeau (Deloitte), Louis Ollion (Deloitte), Valentine Vigneron (Deloitte), avec les contributions de Caroline Vateau (APL-datacenter), Etienne Lees Perasso (Bureau Veritas), Julie Orgelet (DDemain), Frédéric Bordage (GreenIT.fr) et Prune Esquerre (IDATE). 2022. Evaluation de l'impact environnemental du numérique en France et analyse prospective, Etat des lieux et pistes d'actions, Etude Ademe-Arcep, 179 p.

Aballéa, F-M. Robineau, L-C. Viossat (Igas), P. Follenfan, J-M. Nataf (CGEDD), P. Distler, B. Legait (CGE), H. Havard et V. Menuet (IGF), avec la participation de C-A. Calvet, 2020, Déploiement de la 5G en France et dans le monde : aspects techniques et sanitaires, Mission conjointe.

Baldé, Cornelis P., Ruediger Kuehr, Tales Yamamoto, Rosie McDonald, Elena D'Angelo, Shahana Althaf, Garam Bel, Otmar Deubzer, Elena Fernandez-Cubillo, Vanessa Forti, Vanessa Gray, Sunil Herat, Shunichi Honda, Giulia Iattoni, Deepali S. Khetriwal, Vittoria Luda di Cortemiglia, Yuliya Lobuntsova, Innocent Nnorom, Noémie Pralat, Michelle Wagner, 2024. Global E-waste Monitor, Geneva/Bonn, International Telecommunication Union (ITU) and United Nations Institute for Training and Research (UNITAR).

Bastin, F., Gonda, L., Delplancke, M.-P., & D'Ans, P. (2018). « Cartographie des éléments stratégiques dans un smartphone et identification des pièces critiques pour le recyclage ». In Livre des abstracts: Communication orale Fédération Française des Matériaux.

Braun, Vitali ; Horstmann, André ; Reihs, Benedikt ; Lemmens, Stijn ; Merz, Klaus ; Krag, Holger, 2019, « Exploiting Orbital Data and Observation Campaigns to Improve Space Debris Models », The Journal of the astronautical sciences, 66, no 2, pp. 192 209.

Bridgens, B., Hobson, K., Lilley, D., Lee, J., Scott, J. and Wilson, G. 2019. "Closing the loop on e-waste: a multidisciplinary perspective ». Journal of Industrial Ecology 23(1), pp. 169-181.

Dubey, Gérard ; Gras, Alain, 2021, « Transition numérique : pour continuer comme avant », La Servitude électrique Du rêve de liberté à la prison numérique. Paris, Le Seuil, Anthropocène, p.215-228.

ESA Debris Office, 2024, ESA'S Annual Space Report, Darmstadt.

Gonda, Louise ; Degrez, Marc, 2018, « End-of-life management of computers in Brussels: environmental comparison of two treatment chains », 25th CIRP Life Cycle Engineering (LCE) Conference, 30 April-2 May 2018, Copenhagen, Denmark, pp. 968-973.

Guérid, Josua ; Jean-Baptiste Doré, Jacques Reverdy, Bruno Reig, Antonio Clemente, et al.. 2022, « Toward Eco-Design of a 5G mmWave Transmitarray Antenna Based on Life Cycle Assessment." 2022 Joint Eu- ropean Conference on Networks and Communications & 6G Summit (EuCNC/6G Summit), Jun 2022, Grenoble, France. pp. 440-445.

Horta Arduin, Rachel, et al., 2020, “Novel Indicators to Better Monitor the Collection and Recovery of (Critical) Raw Materials in WEEE: Focus on Screens.” *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 157, pp. 104772–104772,

Kerwin, Kristina ; Andrews, Deborah ; Adibi, Naeem ; Withehead, Beth ; Szableski, Carolina , Chenadec, Julie, 2022, “Developping a circular economy for the data center industry – how the Cedaci project contributes to sustainable decision making”, *E3S Web of conferences*.

Lemmens, Stijn; Bastida Virgili, Benjamin; Braun, Vitali ; Flohrer, Tim; Funke, Quirin.; Krag, Holger ; Mclean, F., Merz. Klaus, 2016, “From End-of-Life to Impact on Ground: An Overview of ESA’s Tools and Techniques to Predict Re-entries from the Operational Orbit to the Earth’s Surface”, 6th International Conference on Astrodynamics Tools and Techniques, *Proceedings of the conference*.

Lopez, Fanny, 2022, *Au bout de flux*, Editions Divergences.

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.

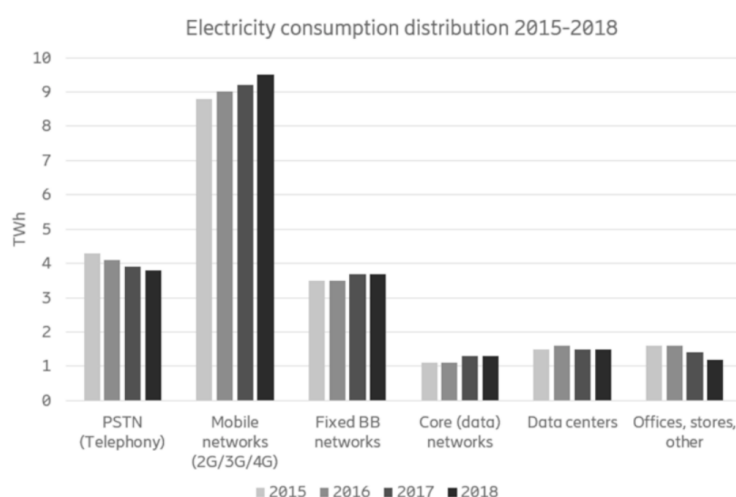


Figure 6.1 : Consommation totale d'électricité agrégée des opérateurs par type de réseau (Lundén, 2022), à l'exclusion des équipements à l'abonné (CPE).

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 de télécommunications 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/ab pour

le réseau mobile, et 50 kWh/ab 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 consommation d'énergie de tous les équipements (voir figure 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.

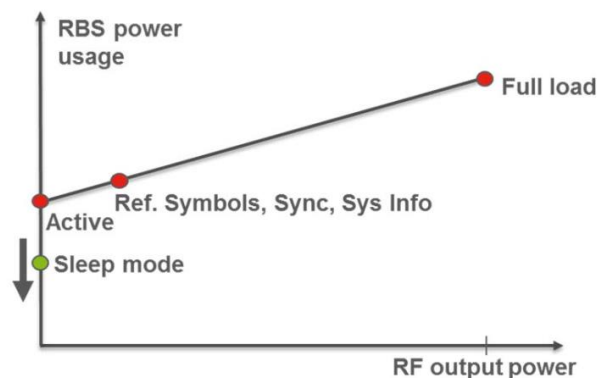


Figure 6.2 : Profil de consommation d'énergie d'une station de base typique en fonction de la charge. D'après (Frenger, 2019)

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 à haute capacité, qui est initialement sous-utilisée, commence avec 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 entre eux. 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.

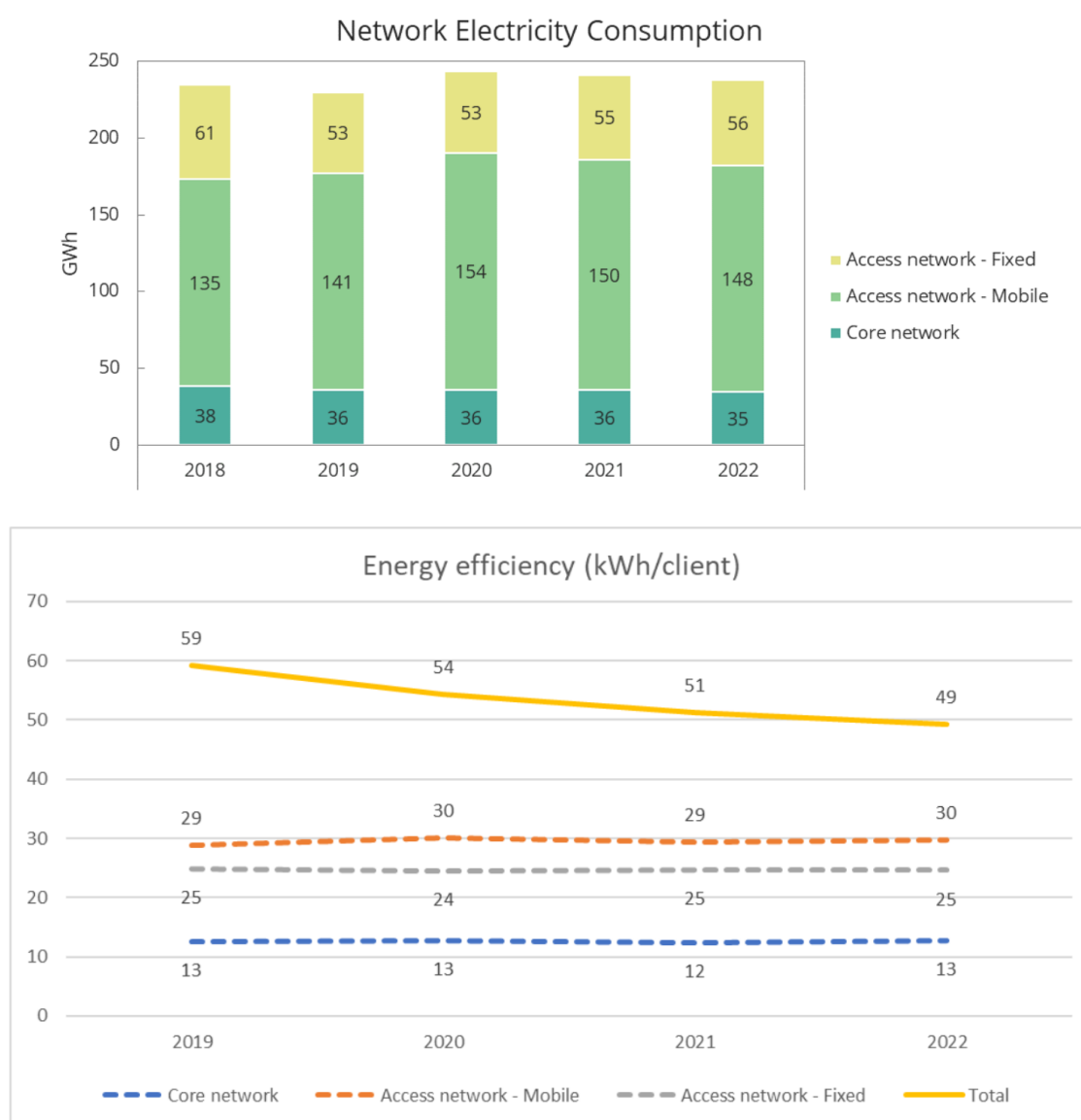


Figure 6.3 : Consommation d'électricité des différents réseaux de communication et leur consommation normalisée par abonné, agrégée sur l'ensemble des opérateurs en Belgique. D'après (IBPT, 2023).

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.

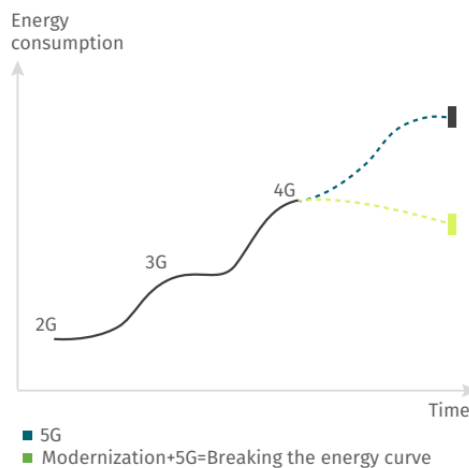


Figure 6.4 : Tendance générale de la consommation d’infrastructures de réseaux mobiles dans le monde au fil du temps. D’après (UIT, 2024).

Tous ces résultats sont basés sur des mesures effectuées sur des systèmes réels. Il s’agit maintenant de savoir 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.

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 (Koziol, 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). D’autre part, 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).

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 ci-dessous.

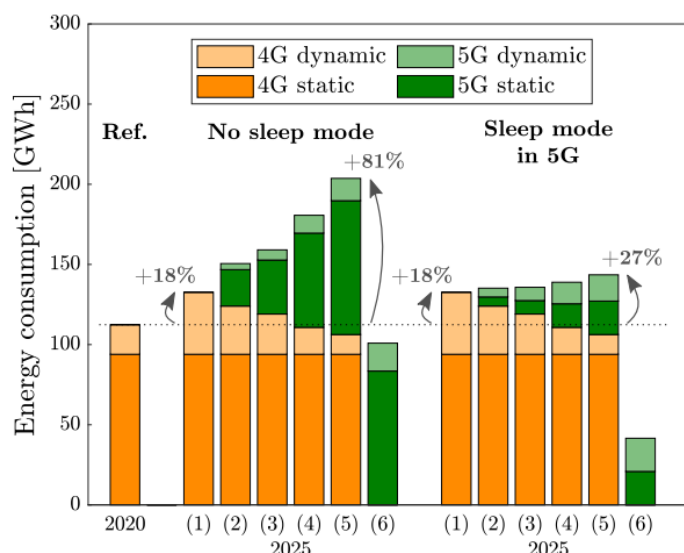


Figure 6.5 : Consommation totale d'électricité avec et sans mode de veille pour différents scénarios de déploiement. Le scénario (1) correspond à l'absence de 5G, le scénario (6) correspond au déclassement de la 4G. Les scénarios intermédiaires correspondent à des déploiements progressifs de la 5G. D'après (Golard, 2022).

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.

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 7 et plus de détails à ce sujet ci-dessous).

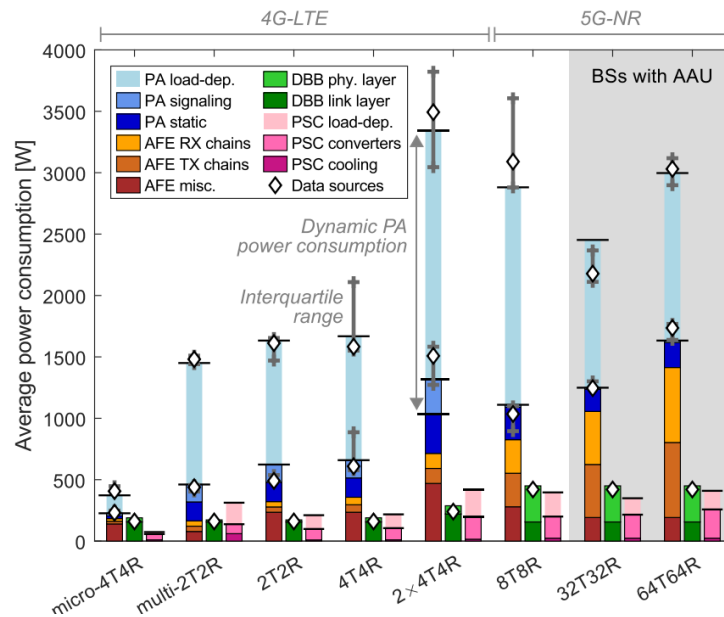


Figure 6.6 : Ventilation de la consommation d'énergie de plusieurs configurations de stations de base en mode actif. D'après (Golard, 2024).

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 de télécommunications comme dans la figure 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. Trafic des 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 2 et 7 ci-dessus). 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).

6.3.4. Effets de 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.

6.3.5. Modes 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. 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). 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. Elle a commencé à être implémentée dans du matériel récent. Il existe actuellement très peu de rapports sur la manière dont ces modes de veille sont réellement optimisés, ce qui rend les prévisions en matière de consommation d'énergie encore plus difficiles. 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).

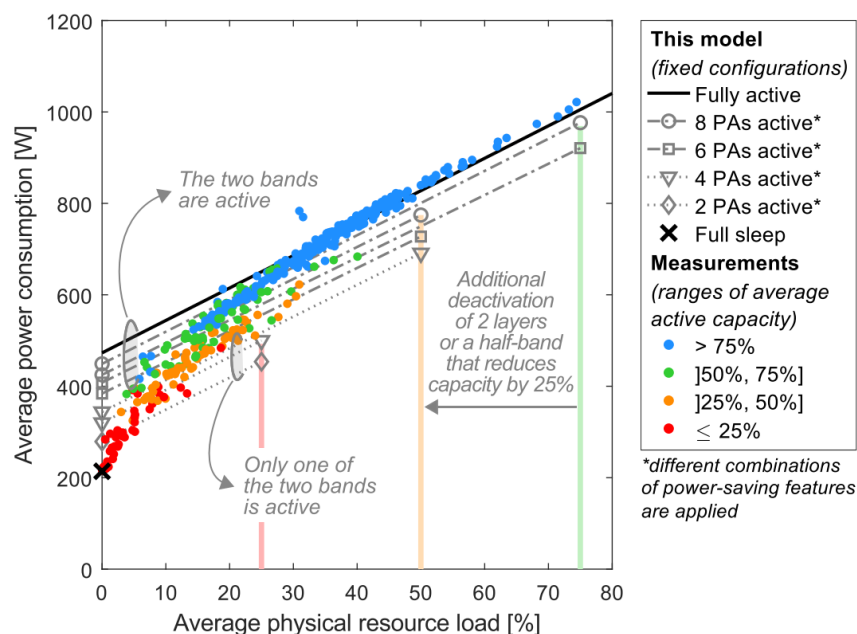


Figure 7 : Puissance moyenne en fonction de la charge lors de l'utilisation des fonctions d'économie d'énergie pour un exemple de RRU (Remote Radio Unit). D'après (Golard, 2024).

6.4. 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 devraient être encouragés à poursuivre l'augmentation exponentielle de la capacité en autorisant des applications de plus en plus exigeantes en matière de transfert de données (et en créant ainsi un effet rebond), ou s'il conviendrait de mettre une réglementation en place pour réduire la consommation d'énergie globale.

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.

7. Effets sur l'environnement des rayonnements électromagnétiques de radiofréquence associés à la technologie de cinquième génération

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 ré-affirmées récemment (ICNIRP, 2020). Il n'existe pas de normes d'exposition comparables pour les espèces non humaines. Bien que l'on considère généralement que les animaux, les plantes et les écosystèmes sont protégés si les humains le sont (ICNIRP, 2020), des conditions d'exposition et des mécanismes d'interaction uniques pourraient donner lieu à des effets spécifiques sur la flore et la faune. En général, notre compréhension de ces facteurs particuliers et des risques d'exposition qui en découlent reste limitée, et les données actuelles n'ont encore permis d'atteindre aucun consensus.

Avant d'examiner les effets des rayonnements des CEM-RF sur les plantes, les insectes et certains groupes d'animaux, nous commentons les lignes directrices de l'ICNIRP car dans ce contexte, des mécanismes d'interaction trop spécifiques ont récemment fait l'objet d'une controverse.

7.1. Lignes directrices de l'ICNIRP en matière d'exposition et critique face aux effets non thermiques supposés

Les lignes directrices de l'ICNIRP, qui constituent la base de la politique de nombreux pays, reposent sur deux hypothèses majeures : tout effet biologique est dû à l'échauffement des tissus induit par les CEM³ et aucun effet ne se produit en dessous du seuil supposé du débit d'absorption d'énergie spécifique (DAS). En particulier, l'ICNIRP affirme qu'il n'existe aucune preuve étayée de mécanismes d'interaction « non thermiques » qui permettraient de prédire les effets néfastes d'une exposition aux CEM-RF inférieure aux niveaux de restriction de base.

Ce point de vue a récemment été contesté (ICBE-EMF, 2022 ; Ishai et al. 2024, Levitt et al. 2021, 2022a, 2022b), en partie de manière accusatrice en suggérant que « la commodité de l'industrie est privilégiée et soumet ainsi le public à des risques évitables », et en partie en mettant l'accent sur la flore et la faune ainsi que sur le déclin continu de la biodiversité. Par exemple, la Commission internationale sur les effets biologiques des champs électromagnétiques (ICBE-EMF) a fait valoir que des preuves scientifiques récentes invalident les hypothèses sanitaires qui sous-tendent les lignes directrices de l'ICNIRP (et de la FCC) en matière d'exposition aux rayonnements de radiofréquence. La critique porte essentiellement sur le rejet par l'ICNIRP des effets néfastes à des expositions inférieures aux seuils DAS adoptés, malgré les preuves du contraire (pas nécessairement étayées). Ces effets néfastes incluraient l'induction non thermique d'espèces réactives de l'oxygène (reactive oxygen species, ROS), des dommages à l'ADN, la cardiomyopathie, la cancérogénicité, une dégradation du sperme et des effets neurologiques, y compris l'hypersensibilité électromagnétique, comme l'a

³ L'ICNIRP reconnaît la stimulation directe des nerfs en dessous de 10 MHz et la rupture diélectrique des membranes biologiques comme des mécanismes d'interaction. Toutefois, elles ne sont pas décisives dans les bandes de fréquences pertinentes pour les télécommunications.

examiné l'ICBE-EMF et d'autres organismes (ICBE-EMF, 2022 ; Ishai et al. 2024, Levitt et al. 2021, 2022a, 2022b). Une caractéristique commune de l'exposition aux CEM-RF de faible intensité semble être la production accrue de ROS. Cette augmentation de la production de ROS dans les cellules vivantes a parfois été attribuée à des champs magnétiques faibles qui modifient les taux de recombinaison des paires de radicaux à courte durée de vie générées par des processus métaboliques normaux, entraînant des changements dans les concentrations de radicaux libres ; à des altérations des canaux ioniques à tension dans les membranes cellulaires, entraînant des changements dans le flux de cations à travers les membranes ; ou à l'augmentation de l'activité de la NADH oxydase.

Parmi les mécanismes cités, le **mécanisme des paires radicales (Radical Pair Mechanism, RPM)** bénéficie en effet d'un soutien théorique et expérimental solide, tant pour les réactions chimiques simples que pour les systèmes biologiques complexes. En fait, le RPM est supposé sous-tendre un grand nombre de caractéristiques magnétoréceptives en biologie (Zadeh-Haghighi et al., 2022). Par exemple, les oiseaux chanteurs migrateurs nocturnes ont un sens de la boussole magnétique lumino-dépendant, dont le mécanisme dépendrait de la formation photochimique de paires de radicaux dans les protéines cryptochromes (Cry) situées dans la rétine (Hore & Mouritsen, 2016). Il convient de noter qu'un nombre croissant d'études et d'articles suggèrent que le RPM pourrait être à l'origine des effets des CEM-RF dans les bandes de fréquences utilisées pour les télécommunications. Cette idée est cependant erronée (*voir infra*).

Dans ce contexte, il convient de souligner que l'ICNIRP n'examine que les preuves des effets néfastes des CEM-RF sur la santé qui sont « scientifiquement étayées ». Cela signifie que les effets doivent généralement être vérifiés de manière indépendante, être de haute qualité scientifique et correspondre aux connaissances scientifiques actuelles, afin d'être considérés comme des « preuves » et d'être utilisés pour fixer des restrictions d'exposition. Si de nombreuses études font état des effets des CEM-RF, la grande majorité d'entre elles sont de qualité médiocre, manquent de dosimétrie ou de protocoles expérimentaux à l'aveugle, n'ont pas été reproduites et portent sur un éventail très diversifié de paramètres et de systèmes biologiques. À ce titre, elles ne fournissent pas d'informations adéquates pour définir des évaluations de sécurité significatives ou pour répondre sans équivoque aux questions concernant les effets non 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.

7.2. Risques spécifiques pour les animaux, les plantes et les écosystèmes

7.2.1. Sur la modification des schémas d'exposition

Animals are likely to be exposed to RF EMF radiation at levels differing from the general public. Flying species such as birds and insects may, for example, approach exclusion zones surrounding RF transmitters, resulting in exposures at intensity levels exceeding the accepted limits. Furthermore, due to resonance effects, smaller body dimensions and different dielectric properties, the power absorption efficiency in the GHz range is higher for small animals like insects compared to humans. This is a particular concern in relation to the anticipated shift to higher frequencies for 5G (Thielens et al., 2018; Thielens et al., 2020; De Borre et al. 2021). In honeybees, a relatively small 10% shift in incident power density from frequencies below 3 GHz to higher frequencies can lead to a relative

increase in absorbed power by a factor larger than three. Such a shift in frequencies is expected in future telecommunication networks, which implies that exposure to RF-EMFs will significantly increase for insects (Thielens et al., 2020).

7.2.2. Sur la possibilité d'interférences avec les systèmes sensoriels des animaux

Une multitude d'animaux sont dotés d'une magnétosensation et d'une électrosensation, ce qui suggère une sensibilité intrinsèquement accrue à l'exposition aux CEM ou une interférence possible avec les fonctions vitales.

De nombreuses espèces animales utilisent le champ géomagnétique pour s'orienter et naviguer, dans le cadre d'activités telles que la migration saisonnière, la recherche de nourriture, l'accouplement et la construction de nids et de tanières (Pophof et al., 2023b). Les comportements magnétosensibles sont bien documentés chez les oiseaux migrateurs, les abeilles, les drosophiles, les chauves-souris, les poissons et de nombreuses autres espèces. La magnétoréception fait appel à des récepteurs sensoriels spécialisés qui permettent de percevoir un champ très sensible. Les mécanismes de perception probablement impliqués dans la magnétoréception comprennent l'induction magnétique de signaux électriques dans des récepteurs sensoriels spécialisés, des interactions magnéto-mécaniques avec des minéraux magnétiques biogénétiques tels que la magnétite, et/ou la dynamique des paires de radicaux dans les photorécepteurs cryptochromes (RPM ; voir ci-dessus ; Hore & Mouritsen, 2016).

De faibles champs électromagnétiques de radiofréquence (RF) peuvent interférer avec les capteurs basés sur les RPM et ainsi empêcher, par exemple, les oiseaux de s'orienter dans le champ magnétique terrestre. Cependant, alors que les CEM des bandes MF à VHF perturbent efficacement la magnétoréception (par exemple la radiodiffusion et la télévision ou la radio CB), même à de très faibles densités de puissance, les réseaux de communications mobiles n'altèrent pas le sens magnétique des oiseaux : une étude récente a montré que la sensibilité des oiseaux à la désorientation RF est limitée aux fréquences inférieures à 116 MHz, ce qui est conforme aux modèles théoriques (Leberecht et al., 2023). Le mécanisme à base de magnétite n'est sensible qu'aux champs magnétiques statiques et VLF, ce qui exclut également les interférences avec les ELF utilisés dans les communications mobiles (Pophof et al., 2023b). Le mécanisme basé sur l'induction est une spécialité uniquement documentée pour la sous-famille des poissons elasmobranchii, et ne concerne donc pas les expositions liées aux télécommunications. Ainsi, bien que les effets des champs magnétiques à très basse fréquence et la perturbation RF du RPM aient été largement étudiés et soient conceptuellement bien compris, ils ne suggèrent pas une sensibilité accrue aux CEM-RF aux fréquences pertinentes pour les télécommunications, comme on l'a prétendu à tort (voir par exemple la revue ICBE-EMF, 2022).

7.2.3. Sur les effets non sensoriels des champs électromagnétiques de radio-fréquence

Le rapport de Bruxelles Environnement de 2021 résume les effets des CEM sur l'environnement, en particulier sur les insectes. Les articles de synthèse de Thill et al. et de Thielens tentent de donner un aperçu représentatif de ce domaine (Thill et al., 2023 ; Thielens 2021). L'image globale qui s'en dégage est la suivante : Alors que Thill et al. suggèrent que les effets biologiques des CEM non thermiques sur les insectes ont été démontrés en laboratoire et pourraient avoir un sérieux impact sur la viabilité des

populations d'insectes, les études sur le terrain sont rares et les implications écologiques plus larges sont donc encore inconnues. Le Bundesamt für Strahlenschutz (Office fédéral de protection contre les radiations, Allemagne ; BfS) a commenté la revue de Thill et al. dans un récent Spotlight (Spotlight, mai/2024 n° 2), critiquant une série de problèmes méthodologiques (absence d'enregistrement PRISMA ; utilisation du rapport des moyennes comme estimateur de l'ampleur de l'effet ; absence d'évaluation du risque de biais et d'inclusion ; absence d'évaluation de la qualité de l'étude ; mise en commun de divers paramètres et espèces ; absence d'évaluation critique des biais de publication évidents ; etc.) Compte tenu de ces lacunes, le BfS a conclu que l'étude n'apportait aucune contribution substantielle à l'évaluation des effets potentiellement néfastes des CEM sur les insectes. De même, et contrairement à Thill et al, Thielens constate que de nombreuses études ne sont pas concluantes ou sont de piètre qualité, et que les études fiables ne plaident pas en faveur d'un effet nocif des champs de haute fréquence faibles tels que ceux que l'on trouve à proximité des stations de base de téléphonie mobile (Thielens, 2021). Dans la gamme de fréquences supérieure à 6 GHz, les démonstrations *in vitro* de neurostimulation et les démonstrations *in vivo* d'effets sur le développement et d'effets tératogènes sur les invertébrés observés à des densités de puissance comparativement élevées justifient des études plus approfondies, en particulier à des densités de puissance plus faibles. Un rapport récent de l'Office fédéral de l'environnement (Suisse) résume l'état des connaissances concernant les effets des CEM sur les arthropodes. Alors que le rapport énumère de nombreux effets, essentiellement négatifs, la qualité des études est à nouveau jugée insuffisante, mettant en évidence des déficiences techniques et des plans et protocoles expérimentaux biaisés (Mulot et al., 2022).

7.3. Effets du rayonnement de la 5G à 3,5 GHz

Nous résumons les effets constatés dans des études récentes sur les effets du rayonnement de la 5G à 3,5 GHz qui, s'ils sont essentiels pour l'adoption actuelle de la 5G, n'ont jusqu'à présent fait l'objet que de quelques publications.

L'exposition d'embryons de poisson-zèbre à des DAS de 8,27 W/kg a entraîné une dépression de la fonction sensorimotrice, des réponses comportementales anormales et des variations dans l'expression des gènes liés à la fonction métabolique chez le poisson-zèbre adulte (Dasgupta et al., 2020, 2022).

Chez *Drosophila melanogaster*, l'exposition à 3,5 GHz a augmenté l'expression des gènes du choc thermique, du stress oxydatif et de l'immunité humorale, favorisant le développement des mouches (Wang et al., 2022 ; 0,1W/m², 1W/m² et 10W/m² correspondant à des DAS de 0,0026 W/kg, 0,026 W/kg et 0,26 W/kg, c'est-à-dire en partie « non thermiques » ; toutes les expositions ont induit des effets significatifs ; aucune relation dose-réponse monotone n'a été constatée). En outre, la diversité et l'abondance des espèces du microbiome ont diminué de manière significative.

L'exposition à long terme à un rayonnement RF de 3,5 GHz a induit une réaction de stress thermique, modifiant l'expression des gènes de l'horloge circadienne et des neurotransmetteurs, améliorant ainsi la durée et la qualité du sommeil (Wang et al., 2021 ; 0,1W/m², 1W/m² et 10W/m², comme ci-dessus) ; l'exposition à court terme à un rayonnement RF-EMR a augmenté le niveau d'activité et a réduit la durée du sommeil.

L'exposition à long terme de rats diabétiques et sains a révélé des changements dans les concentrations de neuropeptides et le stress oxydatif dans le cerveau, ainsi qu'une augmentation de l'appétit et du métabolisme énergétique (Bektas et al., 2022 ; 28,1 V/m ou 1,6W/m², ce qui donne un DAS de 0,2 W/kg en moyenne sur 10 g de matière grise). Plus récemment, des altérations similaires des hormones régulant le métabolisme énergétique et le statut antioxydant ont également été détectées dans le sang et les tissus adipeux de rats exposés de manière similaire (Bektas et al., 2024 ; taux d'absorption spécifique du corps entier : 37 mW/kg). Bien que des changements dans les niveaux d'hormones aient eu lieu dans le groupe exposé, les valeurs sont toujours restées dans la fourchette normale.

Enfin, aucun effet sur le comportement anxieux n'a été détecté, mais une augmentation des niveaux de malondialdéhyde (MDA), une réduction de l'activité des enzymes antioxydantes, des dommages ultrastructuraux et une augmentation de l'apoptose cellulaire ont été constatés dans le cortex auditif du cobaye de manière dépendante du DAS (Yang et al., 2022 ; 2 à 10 W/kg pendant 72 h).

Quelques études plus anciennes se sont concentrées sur le rayonnement des téléphones cellulaires à modulation GSM (900 MHz) et ont constaté une réduction de la ponte des reines d'abeilles, un appauvrissement de la ruche en pollen et en miel (Sharma et Kumar, 2010 ; 85mW/m², utilisation de 2 téléphones cellulaires, 2 x 15 min. par jour), une réduction de l'éclosion et une altération du développement nymphal des larves de reines d'abeilles (Odemer & Odemer, 2019 ; utilisation d'un téléphone portable avec un DAS de tête de 0,59 W/kg fournissant jusqu'à 3,8 V/m sur 2 semaines). Dans une autre étude, le rayonnement RF 900 MHz modulé par le GSM a fait perdre aux fourmis leur mémoire visuelle et olfactive pour trouver de la nourriture (Cammaerts et al., 2012 ; environ 0,77 V/m, 7,95 × 10⁻⁴ W/m²).

Ainsi, bien que plusieurs études aient fait état d'effets de l'exposition aux CEM-RF à des fréquences pertinentes pour les télécommunications, la grande diversité des systèmes étudiés et des paramètres biologiques, ainsi que le manque de réplication, ne permettent pas à l'heure actuelle une évaluation concluante des risques à des niveaux d'exposition non thermiques. En outre, il n'est pas certain que les effets observés constituent réellement un risque dans le cadre de l'écosystème.

7.4. Une vue d'ensemble des effets de l'exposition aux champs électromagnétiques de radiofréquence sur la flore et la faune

Plusieurs études ont été publiées sur l'exposition de diverses plantes et animaux aux CEM-RF d'origine anthropique. Toutefois, ces analyses ne sont généralement pas systématiques et semblent en partie déséquilibrées tout en affirmant une vision du monde particulière (à savoir que les CEM anthropiques sont un problème pour la biodiversité) sans preuves solides à l'appui. Plus 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 100 kHz à 300 GHz (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 de l'effet 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 sur les plantes et les 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 plantes). D'autres études d'observation sont également nécessaires pour étudier l'impact écologique des CEM-RF anthropiques.

7.5. Impact écologique des CEM-RF

La plupart des études sur les effets possibles à long terme de l'exposition aux CEM-RF ont été réalisées en laboratoire sur des modèles animaux bien établis, sans tenir compte de la faune et des écosystèmes. Les études portant sur les effets environnementaux, c'est-à-dire les effets sur des populations entières dans leurs écosystèmes d'origine, sont rares. Une étude systématique menée par Cucurachi et al. examine les effets de l'exposition aux radiofréquences entre 10 MHz et 3,6 GHz sur des paramètres écologiques pertinents, tels que la croissance, le développement et la fertilité (Cucurachi et al., 2013). Si, dans la plupart des études identifiées, des effets écologiques possibles ont été observés, l'absence de relation dose-réponse et de normalisation, ainsi que le faible nombre d'études sur le terrain, limitent actuellement la possibilité de tirer des conclusions au niveau de l'écosystème. Outre les rayonnements anthropogéniques associés aux infrastructures de télécommunication, deux études récentes ont mis en lumière les effets néfastes des dispositifs de radiotélémetrie et de suivi sur la faune sauvage (Manville et al., 2024 ; Balmori, 2024). Si les analyses sont alarmistes, les mêmes commentaires généraux sur la mauvaise qualité de la recherche et le manque de preuves s'appliquent.

7.5.1. Résultats récents concernant les insectes

Les études sur les effets des CEM-RF dans les environnements naturels sont rares en ce qui concerne les insectes. 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 a diminué pour les coléoptères, les guêpes et les syrphes et a augmenté pour les abeilles sauvages et les syrphes qui nichent sous terre ; Lázaro et al., 2016). La richesse des espèces de syrphes a eu tendance à diminuer avec l'intensité du champ, mais seulement sur une île ; la richesse des espèces d'abeilles sauvages n'était pas significativement liée aux CEM-RF. L'approche corrélative de l'étude ne permet pas de contrôler d'autres variables confusionnelles qui auraient pu affecter l'abondance. 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.

Une étude de terrain examinant l'impact sur la capacité de reproduction de quatre espèces d'invertébrés différentes (la punaise prédatrice *Orius laevigatus*, le collembole *Folsomia candida*, la

guêpe parasitoïde *Asobara japonica* et la drosophile *Drosophila melanogaster*) de l'exposition aux champs des stations de base de téléphonie mobile (GSM 900 MHz ; 48 h ; 0,1 à 4,3 mWm⁻² entre 16 m et 151 m ; exposition fictive par l'intermédiaire d'une cage de Faraday) n'ont en revanche révélé aucun effet significatif (Vijver et al, 2014).

Les preuves scientifiques que les RF-CEM anthropiques pourraient avoir un impact sur l'abondance ou la diversité des pollinisateurs se limitent à l'unique étude décrite ci-dessus (Lázaro et al., 2016). Par conséquent, il reste à déterminer si les CEM-RF anthropiques constituent une menace importante pour les insectes pollinisateurs et les avantages qu'ils procurent aux écosystèmes et à l'humanité (Vanbergen et al., 2019) ; compte tenu du déclin général de la diversité et de l'abondance des insectes, il est urgent de mener d'autres études. Une fois de plus, le manque d'études scientifiques de qualité signifie que les connaissances sur le risque que représentent les EMR anthropiques pour les pollinisateurs ne sont pas concluantes, ne sont pas résolues ou ne sont que partiellement établies.

7.5.2. Découvertes récentes concernant les plantes

Les recherches existantes sur les plantes ont démontré que les rayonnements CEM-RF peuvent, en principe, affecter leur croissance et leur développement, l'expression des gènes et diverses activités métaboliques (Kaur et al., 2021 ; Pophof et al., 2023). Il a été suggéré que le principal point d'entrée des effets biologiques des CEM correspond à une augmentation du métabolisme des ROS et du calcium cytosolique qui entraîne diverses réponses cellulaires (Kaur et al., 2021). Toutefois, ces résultats ont été obtenus en grande partie à partir d'une exposition de courte durée de plantes cultivées dans des conditions de laboratoire.

Dans une étude récente, Czerwiński et al. ont évalué les effets d'une exposition à long terme aux CEM-RF dans la bande de fréquences 866-868 MHz sur des plantes sauvages dans des conditions expérimentales contrôlées sur le terrain (Czerwiński et al., 2023). Il s'agit de la première étude réalisée dans un environnement naturel ouvert. Au cours de la période d'étude de quatre mois, de la germination des graines à la maturation, 9 des 10 plantes herbacées communes étudiées n'ont montré aucune réaction significative aux CEM-RF. L'exception notable était l'espèce *Trifolium arvense*, qui présentait une croissance accrue et une orientation modifiée des feuilles, mais aussi une sénescence plus précoce. Les résultats suggèrent que *Trifolium arvense* peut servir d'indicateur de l'exposition aux CEM-RF dans l'environnement et soulignent la nécessité de mener d'autres études sur d'autres espèces apparentées dans les prairies européennes.

L'absence prédominante d'effets est conforme à une étude de terrain plus ancienne portant sur les effets des CEM-RF (Schmutz et al. 1996 ; 2 450 MHz, 0,007-300 Wm⁻²) sur de jeunes épicéas et hêtres. Malgré des augmentations de température induites allant jusqu'à 4°C lors de l'exposition la plus forte, aucun symptôme visuel de dommage observable, par exemple une réduction de la transparence de la couronne, n'est apparu. Les concentrations florales de certains nutriments ont été réduites mais sont restées dans la fourchette de suffisance.

Une étude plus récente fait état d'un ralentissement de la croissance de l'arachide à proximité (à la limite d'exposition de l'ICNIRP) d'une station de base GSM (900 MHz et 1800 MHz) par rapport à un groupe témoin plus éloigné (Amuda et al., 2024). Cependant, des faiblesses évidentes dans la conception de l'étude remettent son importance en question.

7.5.3. Résultats pertinents concernant les oiseaux

La revue de Cucurachi et al. répertorie 26 études écologiquement pertinentes sur les oiseaux, dont 70 % font état d'un effet des CEM-RF (Cucurachi et al. 2013). La majorité des études ont été réalisées en laboratoire et se sont concentrées sur les effets sur le développement et la fertilité des poulets. Bien que les résultats soient globalement hétérogènes, les auteurs de l'étude de synthèse ont conclu que le rayonnement des téléphones mobiles, en particulier le GSM 900 MHz, pourrait être un facteur affectant l'écologie des oiseaux (Cucurachi et al. 2013).

Seules quelques études d'observation sur les effets des CEM-RF des communications mobiles sur les populations d'oiseaux ont été publiées. Dans une étude de terrain, l'abondance des moineaux domestiques (*Passer domesticus*) a été estimée dans la ville de Valladolid, en Espagne, de 2002 à 2006 (Balmori et Hallberg, 2007). L'abondance des moineaux présente une corrélation négative avec l'intensité du champ (plage de 1 MHz à 3 GHz, intensité maximale du champ de 4 Vm^{-1}), c'est-à-dire qu'un plus grand nombre de moineaux ont été observés dans les endroits où l'intensité du champ était plus faible. Une corrélation similaire a été trouvée entre les densités de moineaux et les intensités de champ électrique à 900/1 800 MHz dans six quartiers résidentiels en Belgique (Everaert et Bauwens 2007). Les auteurs ont constaté que la variation spatiale du nombre de moineaux domestiques mâles était liée de manière négative et très significative à l'intensité des champs électriques provenant des bandes de fréquences descendantes de 900 et 1 800 MHz. Une étude algérienne récente suggère que la fertilité des cigognes blanches (*Ciconia ciconia ciconia*) augmente avec la distance d'une antenne relais GSM (900 et 1 800 MHz ; pas de dosimétrie ; Sakraoui et al., 2023). Tous ces résultats font état de corrélations qui n'impliquent pas nécessairement une relation de cause à effet entre le rayonnement des téléphones mobiles et l'abondance des oiseaux, car des facteurs covariants ne peuvent être exclus et sont même probables, comme le montrent les études établissant un lien entre l'abondance des moineaux et la présence de végétation arbustive et de structures de bâtiments anciens (Patel et al., 2024). Ces résultats ne peuvent pas non plus s'expliquer par la perturbation de la magnétoréception des oiseaux par de faibles champs magnétiques de radiofréquence à large bande, car cet effet est important dans la région des faibles MHz (Engels et al., 2014), mais n'est pas attendu aux fréquences typiques de la communication mobile. Plus précisément, les fréquences supérieures à 100 MHz n'interfèrent pas avec le mécanisme de paires de radicaux qui sous-tend probablement l'orientation magnétique des oiseaux migrateurs nocturnes (Leberecht et al., 2023).

7.6. Résumé et conclusions

Lignes directrices et critiques de l'ICNIRP. La Commission internationale de protection contre les rayonnements non ionisants (International Commission on Non-Ionising Radiation Protection, ICNIRP) a établi des directives d'exposition aux radiofréquences basées principalement sur la protection de la santé humaine, mais il n'est pas certain que ces directives couvrent de manière adéquate les espèces non humaines, en particulier compte tenu de leurs modes d'exposition distincts et de leurs interactions biologiques avec les CEM-RF.

Les lignes directrices reposent sur l'hypothèse que les effets des CEM-RF sont principalement thermiques et qu'aucun effet néfaste ne se produit en dessous de certains taux d'absorption spécifiques (TAS). Certaines études suggèrent des effets non thermiques (par exemple, production d'espèces réactives de l'oxygène, dommages à l'ADN) à des niveaux subthermiques, mais elles ne sont étayées par aucun mécanisme d'interaction physiquement plausible et sont souvent d'une qualité

scientifique douteuse, ce qui ne permet pas de conclure l'évaluation. Le mécanisme le plus plausible des effets non thermiques, le mécanisme des paires radicales (Radical Pair Mechanism, RPM), soutient la magnétoréception animale chez des espèces telles que les oiseaux migrateurs, mais ne justifie pas la sensibilité aux champs électromagnétiques de radiofréquence des technologies de cinquième génération.

Risques spécifiques pour les animaux et les écosystèmes. Les animaux, en particulier les espèces volantes comme les oiseaux et les insectes, peuvent subir une exposition accrue aux CEM-RF en raison de la proximité des émetteurs et de l'efficacité accrue de l'absorption à des fréquences plus élevées. Les études ne montrent pas de preuves évidentes de la perturbation des systèmes sensoriels des animaux par les technologies 5G. Des interférences ont été constatées dans la magnétoréception pour des fréquences inférieures à 116 MHz, c'est-à-dire dans des bandes de fréquences bien inférieures à celles de la 5G.

Insectes et déclin des pollinisateurs. Des études portant sur les insectes révèlent que l'exposition aux hautes fréquences peut augmenter la puissance absorbée, ce qui peut affecter les populations d'insectes. Toutefois, la plupart des recherches sont menées en laboratoire, sans études sur le terrain ni perspectives écologiques, et souffrent d'une qualité méthodologique médiocre, ce qui nécessite des recherches supplémentaires pour évaluer les effets à long terme.

Effets sur la flore. Les recherches relatives à l'impact des CEM-RF sur la croissance des plantes et le métabolisme cellulaire suggèrent des impacts potentiels par le biais du métabolisme des ROS et des voies du calcium. Une étude récente sur les plantes herbacées dans des conditions naturelles a révélé des effets limités, *Trifolium arvense* présentant des altérations mineures de la croissance. Les preuves restent peu concluantes et justifient des études plus approfondies dans divers contextes écologiques.

Lacunes dans la recherche sur la 5G. Il existe peu d'études sur les effets spécifiques de la 5G à 3,5 GHz. Les premiers résultats obtenus chez les animaux, notamment le poisson-zèbre et la drosophile, indiquent certaines réponses biologiques à des niveaux non thermiques, telles que des changements dans l'expression des gènes et des modifications du comportement. Toutefois, la variabilité des paramètres biologiques d'une espèce à l'autre et le manque de réplication limitent la pertinence écologique de ces résultats.

Populations d'oiseaux et observations écologiques. Des études d'observation font état de corrélations entre l'exposition aux CEM-RF et les populations d'oiseaux, notamment les moineaux domestiques et les cigognes blanches. Toutefois, ces études ne parviennent pas à établir de lien de causalité en raison de facteurs confondants. Il est peu probable que la sensibilité du RPM soit affectée par les fréquences de la 5G, les interférences se limitant principalement aux bandes de fréquences inférieures.

Conclusion. Si les CEM-RF de la technologie 5G peuvent influencer certains processus biologiques chez les espèces non humaines, les preuves restent incohérentes et sont souvent de faible qualité. Des recherches de qualité sur le terrain sont essentielles pour déterminer si des niveaux d'exposition aux CEM-RF inférieurs aux seuils de l'ICNIRP pourraient affecter de manière significative la biodiversité, en particulier les populations d'insectes et d'oiseaux vulnérables. Il est nécessaire de poursuivre

l'exploration des mécanismes non thermiques et de leur pertinence pour la santé écologique afin d'éclairer toute adaptation nécessaire des lignes directrices relatives à l'exposition aux CEM-FR.

Bibliographie

Amuda, D. B., James, V., Oni, F. G. O., Oni, O. M., & Olawoore, I. T. Effects Of Radio Frequency Radiation On Growth Of Groundnut Around Mobile Base Transmitter Stations.

Balmori, A., & Hallberg, Ö. (2007). The urban decline of the house sparrow (*Passer domesticus*): a possible link with electromagnetic radiation. *Electromagnetic biology and medicine*, 26(2), 141-151.

Balmori, A. (2024). Radio-tracking systems emit pulsed waves that could affect the health and alter the orientation of animals. *Journal for Nature Conservation*, 77, 126520.

Bektas, H., Algul, S., Altindag, F., Yegin, K., Akdag, M.Z., Dasdag, S.: Effects of 3.5 GHz radiofrequency radiation on Ghrelin, Nesfatin-1, and Irisin level in diabetic and healthy brains. *J. Chem. Neuroanat.* **126**, 102168 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.jchemneu.2022.1021>

Bektas, H., Dasdag, S., Altindag, F., Akdag, M.Z., Yegin, K., Algul, S.: Effects of 3.5-GHz radiofrequency radiation on energy-regulatory hormone levels in the blood and adipose tissue. *Bioelectromagnetics* **45**, 209–217 (2024). <https://doi.org/10.1002/bem.22498>

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.

Cammaerts MC, De Doncker P, Patris X, Bellens F, Rachidi Z, Cammaerts D. GSM 900 MHz radiation inhibits ants' association between food sites and encountered cues. *Electromagn Biol Med.* 2012;31:151–65.

Cucurachi, S., Tamis, W. L., Vijver, M. G., Peijnenburg, W. J., Bolte, J. F., & de Snoo, G. R. (2013). A review of the ecological effects of radiofrequency electromagnetic fields (RF-EMF). *Environment international*, 51, 116-140.

Czerwiński, M., Vian, A., Woodcock, B. A., Goliński, P., Virto, L. R., & Januszkiewicz, Ł. (2023). Do electromagnetic fields used in telecommunications affect wild plant species? A control impact study conducted in the field. *Ecological Indicators*, 150, 110267.

Dasgupta, S., Wang, G., Simonich, M.T., Zhang, T., Truong, L., Liu, H., Tanguay, R.L.: Impacts of high dose 3.5 GHz cellphone radiofrequency on Zebrafish embryonic development. *PLoS. ONE.* **15**, e0235869 (2020). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0235869>

Dasgupta, S., Leong, C., Simonich, M.T., Truong, L., Liu, H., Tanguay, R.L.: Transcriptomic and long-term behavioral deficits associated with developmental 3.5 GHz radiofrequency radiation exposures

in Zebrafish. *Environ. Sci. Technol. Lett.* **9**, 327–332 (2022). <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.2c00037>

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

Engels, S., Schneider, N. L., Lefeldt, N., Hein, C. M., Zapka, M., Michalik, A., ... & Mouritsen, H. (2014). Anthropogenic electromagnetic noise disrupts magnetic compass orientation in a migratory bird. *Nature*, 509(7500), 353-356.

Everaert, J., & Bauwens, D. (2007). A possible effect of electromagnetic radiation from mobile phone base stations on the number of breeding house sparrows (*Passer domesticus*). *Electromagnetic biology and medicine*, 26(1), 63-72.

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

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

Ishai, P. B., Davis, D., Taylor, H., & Birnbaum, L. (2024). Problems in evaluating the health impacts of radio frequency radiation. *Environmental research*, 243, 115038.

International Commission on the Biological Effects of Electromagnetic Fields (ICBE-EMF). Scientific evidence invalidates health assumptions underlying the FCC and ICNIRP exposure limit determinations for radiofrequency radiation: implications for 5G. *Environ Health* **21**, 92 (2022). <https://doi.org/10.1186/s12940-022-00900-9>

Kaur, S., Vian, A., Chandel, S., Singh, H. P., Batish, D. R., & Kohli, R. K. (2021). Sensitivity of plants to high frequency electromagnetic radiation: Cellular mechanisms and morphological changes. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 20(1), 55-74.

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), pp. 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.

Levitt, BB , Lai, HC , and Manville, AM . Effects of non-ionizing electromagnetic fields on flora and fauna, part 3. Exposure standards, public policy, laws, and future directions. *Rev Environ Health*. (2021) 37:531–58. doi: 10.1515/reveh-2021-0083.

Levitt, B. B., Lai, H. C., & Manville, A. M. (2022). Effects of non-ionizing electromagnetic fields on flora and fauna, part 1. Rising ambient EMF levels in the environment. *Reviews on Environmental Health*, 37(1), 81-122.

Levitt, BB , Lai, HC , and Manville, AM . Effects of non-ionizing electromagnetic fields on flora and fauna, part 2 impacts: how species interact with natural and man-made EMF. *Rev Environ Health*. (2022) 37:327–406. doi: 10.1515/reveh-2021-0050

Manville, A. M., Levitt, B. B., & Lai, H. C. (2024). Health and environmental effects to wildlife from radio telemetry and tracking devices—state of the science and best management practices. *Frontiers in Veterinary Science*, 11, 1283709.

Mulot M., Kroeber T., Gossner M., Fröhlich J. Wirkung von nichtionisierender Strahlung (NIS) auf Arthropoden, Bericht im Auftrag des Bundesamts für Umwelt (BAFU), Neuenburg, Juli 2022.

Odemer R, Odemer F. Effects of radiofrequency electromagnetic radiation (RF-EMF) on honey bee queen development and mating success. *Sci Total Environ*. 2019;661:553–62.

Patel, F. P., Dodia, P. P., & Mehta, D. M. (2024). Factors influencing the occurrence of the House Sparrow *Passer domesticus* (Linnaeus, 1758)(Aves: Passeriformes: Passeridae) in Bhavnagar, Gujarat, India. *Journal of Threatened Taxa*, 16(6), 25360-25372.

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(1), 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(1), 39-52.

Sakraoui, D., Ziane, N., Ghalem, R., Boukheroufa, M., & Habbachi, W. (2023). Is there an effect of electromagnetic waves from base stations on the breeding success of *Ciconia ciconia ciconia* in Algeria?. *Biosystems Diversity*, 31(4), 493-499.

Schmutz, P., Siegenthaler, J., Stäger, C., Tarjan, D., & Bucher, J. B. (1996). Long-term exposure of young spruce and beech trees to 2450-MHz microwave radiation. *Science of the total environment*, 180(1), 43-48.

Sharma VP, Kumar NR. Changes in honeybee behaviour and biology under the influence of cellphone radiations. *Curr Sci*. 2010;98:1376–8.

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).

https://doris.bfs.de/jspui/bitstream/urn:nbn:de:0221-2024051343843/4/SL_Thill_2023_BiologicalEffectsOf_Deu.pdf

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. 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 2021.

Thill, A., Cammaerts, M. C., & Balmori, A. (2023). Biological effects of electromagnetic fields on insects: a systematic review and meta-analysis. *Reviews on environmental health*.

Vanbergen AJ, Potts SG, Vian A, Malkemper EP, Young J, Tscheulin T. Risk to pollinators from anthropogenic electro-magnetic radiation (EMR): evidence and knowledge gaps. *Sci Total Environ* 695:133833; 2019.

Vijver, M. G., Bolte, J. F., Evans, T. R., Tamis, W. L., Peijnenburg, W. J., Musters, C. J. M., & de Snoo, G. R. (2014). Investigating short-term exposure to electromagnetic fields on reproductive capacity of invertebrates in the field situation. *Electromagnetic biology and medicine*, 33(1), 21-28.

Wang, Y., Zhang, H., Zhang, Z., Sun, B., Tang, C., Zhang, L., Jiang, Z., Ding, B., Liao, Y., Cai, P.: Simulated mobile communication frequencies (3.5 GHz) emitted by a signal generator affects the sleep of *Drosophila melanogaster*. *Environ. Pollut.* **283**, 117087 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.117087>

Wang, Y., Jiang, Z., Zhang, L., Zhang, Z., Liao, Y., Cai, P.: 3.5-GHz radiofrequency electromagnetic radiation promotes the development of *Drosophila melanogaster*. *Environ. Pollut.* **294**, 118646 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.118646>

Yang, H., Zhang, Y., Wu, X., Gan, P., Luo, X., Zhong, S., Zuo, W.: Effects of acute exposure to 3500 MHz (5G) radiofrequency electromagnetic radiation on anxiety-like behavior and the auditory cortex in guinea pigs. *Bioelectromagnetics* **43**, 106–118 (2022). <https://doi.org/10.1002/bem.22388>

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.

