

Bruxelles Environnement



Rapport du comité d'experts sur les radiations non ionisantes 2021

Président : Aerts, G.

Membres : Beauvois, V. – Cincera, M. – Erzeel, D. – Lagroye, I. – Pollin, S.
Rolain, Y. – Selmaoui, B. – Thielens, A.

Table des matières

1	Evaluation de l'application de l'ordonnance	4
1.1	Application générale des aspects techniques de l'ordonnance	4
1.1.1	Situation générale du protocole de mesure.....	4
1.1.2	Réalisation des mesures dans le protocole de mesure	5
1.1.3	Interprétation et traitement des résultats de mesure.....	5
1.1.4	Utilisation du simulateur pour la prédiction relative à l'enveloppe extérieure des bâtiments.....	5
1.1.5	Utilisation du simulateur pour la prédiction de mesures intérieures	5
1.1.6	Autres améliorations du simulateur.....	5
1.1.7	Détermination des marges d'erreur pour les mesures	6
1.1.8	Détermination des marges d'erreur pour les simulations	6
1.2	Efforts en vue de la dissémination de l'information pour le public.....	6
1.3	Avis général concernant le protocole de mesure.....	7
2	Technologie 5G et conséquences pour le rayonnement	8
2.1	Introduction.....	8
2.2	Types de 5G	8
2.2.1	Généralités	8
2.2.2	NSA vs SA.....	9
2.3	Bandes de fréquences	10
2.3.1	700 MHz.....	10
2.3.2	2100 MHz.....	11
2.3.3	3500 MHz.....	11
2.3.4	1400 MHz.....	11
2.4	Type de duplexage.....	11
2.4.1	FDD vs TDD	11
2.4.2	FDD en BE	11
2.4.3	TDD en BE.....	11
2.5	Antennes	12
2.6	Carrier Aggregation (CA)	12
2.7	Possibilités	12
2.7.1	IoT.....	12
2.7.2	4G ou 5G dans des bandes libres (sans licence).....	13
2.7.3	Services V2X.....	13

2.7.4	Services MC (Mission Critical)	13
2.7.5	Réseaux privés	14
2.8	Consommation d'énergie	14
2.9	Rayonnement mesuré (à l'étranger)	15
2.10	Conclusion	15
3	Conséquences pour la santé	17
3.1	Un aperçu des études sur l'exposition aux radiofréquences et la dosimétrie des invertébrés 17	
3.1.1	Exposition des invertébrés aux systèmes de communication sans fil.....	17
3.1.2	Dosimétrie CEM-RF des invertébrés.....	18
3.1.3	Conclusions.....	20
3.2	Un « update » sur les études scientifiques concernant les effets de la 5G sur la santé.	21
3.2.1	Les études scientifiques sur la 5G à partir de 2018.....	21
3.2.2	Conclusions.....	22
3.3	5G et Insectes	22
3.3.1	Les revues sur les insectes.....	22
3.3.2	Quelques études sur les insectes en laboratoire	23
3.3.3	Conclusion	24
3.4	Conclusion générale	24
3.5	Références.....	26
4	Aspects macroéconomiques du secteur des télécommunications	29
4.1	Introduction.....	29
4.2	L'état d'avancement du déploiement de la 5G dans le monde	33
4.3	Focus sur la Belgique	34
4.4	Conclusion	39
4.5	Bibliographie.....	39

1 Evaluation de l'application de l'ordonnance

1.1 Application générale des aspects techniques de l'ordonnance

L'ordonnance n'ayant pas changé depuis notre dernier rapport, certaines parties de ce rapport n'ont pas évolué.

Notre avis se base notamment sur le « Rapport 2021 concernant la mise en œuvre de l'ordonnance « GSM » par les départements « Technologies et rayonnements » et « Gestion des nuisances ».

Néanmoins, un avant-projet de la nouvelle ordonnance nous a été soumis fin 2021 (en validant le principe d'une hausse limitée de la norme d'immersion à 14,5 V/m et en y intégrant les rayonnements issus des Broadcast) et nous avons rédigé un avis sur le sujet.

Ceci nous a permis de conclure que la stratégie de l'administration est acceptable comme base pour la suite. Les coefficients utilisés sont basés sur un modèle théorique idéal. En cas d'urgence, ils peuvent être utilisés temporairement pour démarrer les mesures, mais ils doivent clairement être vérifiés et raffinés avant de figer un protocole de mesure opérationnel et fiable. L'administration suit l'évolution concernant le traitement de ces signaux, et ce aussi bien dans les autres régions qu'au niveau international, notamment en matière de facteurs d'atténuation (exemples : Flandre, Suisse). Il est à signaler qu'il n'y a pas encore eu de demande d'opérateur pour installer un site 5G.

1.1.1 Situation générale du protocole de mesure

Nous distinguons deux types de mesures dans ce contexte, les mesures de validation du logiciel et les mesures de contrôle. Ces deux types de mesures poursuivent des finalités différentes :

- Les mesures de validation du logiciel servent à valider les résultats du logiciel de simulation en les comparant aux simulations. Actuellement, les simulations surestiment globalement le niveau de radiation par rapport aux mesures, ce qui est cohérent avec la situation observée lors des délivrances de permis d'exploitation où les simulations surestiment également le niveau de radiation. Cette partie du protocole de mesure a été minutieusement élaborée et adaptée au cours des années écoulées. Il s'agit ici de comparer l'intensité de champ effectif et l'intensité de champ simulée. Cela s'effectue à l'intérieur et à l'extérieur des bâtiments.
- Les mesures de contrôle servent à vérifier le respect de la norme. Le protocole est adapté aux aspects 4G. Les mesures sont utilisées ici pour déterminer l'intensité maximale du champ à l'intérieur et à l'extérieur des bâtiments.

Le protocole de mesure utilisé pour l'inspection à l'intérieur des bâtiments a également été présenté au Comité. Le Comité approuve le protocole utilisé et décide que les procédures sont exécutées de manière précise et traçable.

1.1.2 Réalisation des mesures dans le protocole de mesure

1.1.2.1 Mesures à l'extérieur

Le Comité a accepté cette procédure dans les rapports précédents, et cet accord est maintenu.

1.1.2.2 Mesures à l'intérieur

Le Comité a accepté la procédure utilisée pour les mesures à l'intérieur dans le rapport précédent et cet accord est maintenu.

1.1.2.3 Décision

Le Comité continue à approuver les procédures de mesures (à l'intérieur et à l'extérieur).

1.1.3 Interprétation et traitement des résultats de mesure

Aucun changement important n'a été apporté au protocole. Le Comité approuve le protocole de mesure et le traitement des résultats des mesures.

1.1.4 Utilisation du simulateur pour la prédiction relative à l'enveloppe extérieure des bâtiments

L'administration a migré sur la nouvelle version du logiciel de simulation Mithra depuis janvier 2020.

1.1.5 Utilisation du simulateur pour la prédiction de mesures intérieures

Les simulations de terrain sont calculées par le simulateur jusqu'à l'enveloppe extérieure des bâtiments. Le simulateur ne permet pas d'étendre les résultats à la prédiction du rayonnement intérieur dans les bâtiments. Cette extension est actuellement obtenue par une procédure empirique.

Le logiciel a été modifié en v2 pour ne plus prendre en compte la composante extérieure issue d'une réflexion sur le mur lors du calcul de la valeur intérieure. Une correction sur les coordonnées géographiques a également été implémentée.

1.1.6 Autres améliorations du simulateur

La base de données des terrasses de Bruxelles Environnement a complètement été intégrée dans le logiciel.

Actuellement, le simulateur ne permet pas encore de prendre en compte les toits en pente. Néanmoins leur prise en compte reste incluse dans les objectifs de l'administration et est prévue au plus tard lors du changement de l'ordonnance.

Suggestion : il est suggéré à BE de valider ses nouveautés et de présenter les résultats pour le prochain rapport.

1.1.7 Détermination des marges d'erreur pour les mesures

Aucun changement significatif n'a été signalé en ce qui concerne la détermination des limites d'incertitude des mesures.

1.1.8 Détermination des marges d'erreur pour les simulations

Aucun changement significatif de la situation n'a été signalé en ce qui concerne la quantification des erreurs sur le logiciel lui-même.

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

Le comité constate que l'administration a réalisé un effort considérable afin d'améliorer la dissémination de l'information concernant les radiations non-ionisantes vers le plus large public, comme le Comité l'avait proposé dans les rapports antérieurs. L'administration a également expliqué le fonctionnement du Comité d'experts. Le Comité est convaincu que ces efforts sont très importants pour éviter la propagation d'informations incomplètes ou erronées vers le grand public. Le Comité encourage donc l'administration à continuer cet effort. Le Comité encourage l'administration à maintenir ces informations à jour, et à les étoffer si nécessaire en vue de la nouvelle version de l'ordonnance.

Le Comité constate avec plaisir et intérêt qu'un nombre de pages du site internet ont été revues en 2021, comme par exemple les pages concernant les effets sur l'environnement, le projet d'ordonnance en cours, la répartition des compétences et le projet de recherche STOEMP.

Depuis notre dernier rapport, la page sur les effets potentiels sur l'environnement a été revue, ce qui montre que ce site est suivi par l'administration.

Suggestion : nous confirmons que le comité est d'avis que l'importance de la mise à jour des informations concernant la 5G en particulier continuera à augmenter au cours des mois à venir. Le Comité encourage donc l'administration à étoffer l'information proposée, en mentionnant autant que faire se peut des sources vérifiables, tout en présentant le contenu d'une façon accessible au plus grand nombre. En particulier la page sur « une norme qui vous protège » devra être mise à jour dès la mise en œuvre de la nouvelle version de l'ordonnance, attendue pour début 2022.

1.3 Avis général concernant le protocole de mesure

Le Comité est d'avis que BE 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 BE 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.

2 Technologie 5G et conséquences pour le rayonnement

2.1 Introduction

Les rapports précédents se sont concentrés sur les aspects de la 5G liés au rayonnement, c'est-à-dire la connexion sans fil entre une station de base et l'appareil. Entre-temps, ces aspects ont été largement étudiés et ont fait l'objet de divers rapports et études.

Le présent rapport examine la 5G dans son ensemble, et pas seulement l'aspect sans fil. Il permet d'évaluer l'importance de cette 5^e génération, indépendamment du rayonnement et des normes en matière de rayonnement.

Ensuite, la consommation d'énergie ou l'empreinte CO2 des réseaux cellulaires est brièvement abordée.

Ce rapport se termine par des informations sur les champs effectivement mesurés à l'étranger.

2.2 Types de 5G

Ce chapitre « 5G » offre un bref aperçu de la nouvelle technologie 5G.

2.2.1 Généralités

Un réseau mobile est souvent divisé en deux parties : le Radio-Access-Network (RAN) et le Core Network (CN).

Le RAN est responsable de la communication avec les combinés via une liaison sans fil qui suit une certaine spécification, le CN est chargé de fournir les fonctions sous-jacentes (appel, envoi de SMS, accès à Internet, etc.). Les principaux composants du RAN sont les stations de base, qui se composent en fait principalement d'une ou de plusieurs antennes et d'unités de calcul. Ils sont souvent reliés au CN par fibre optique ou faisceau hertzien.

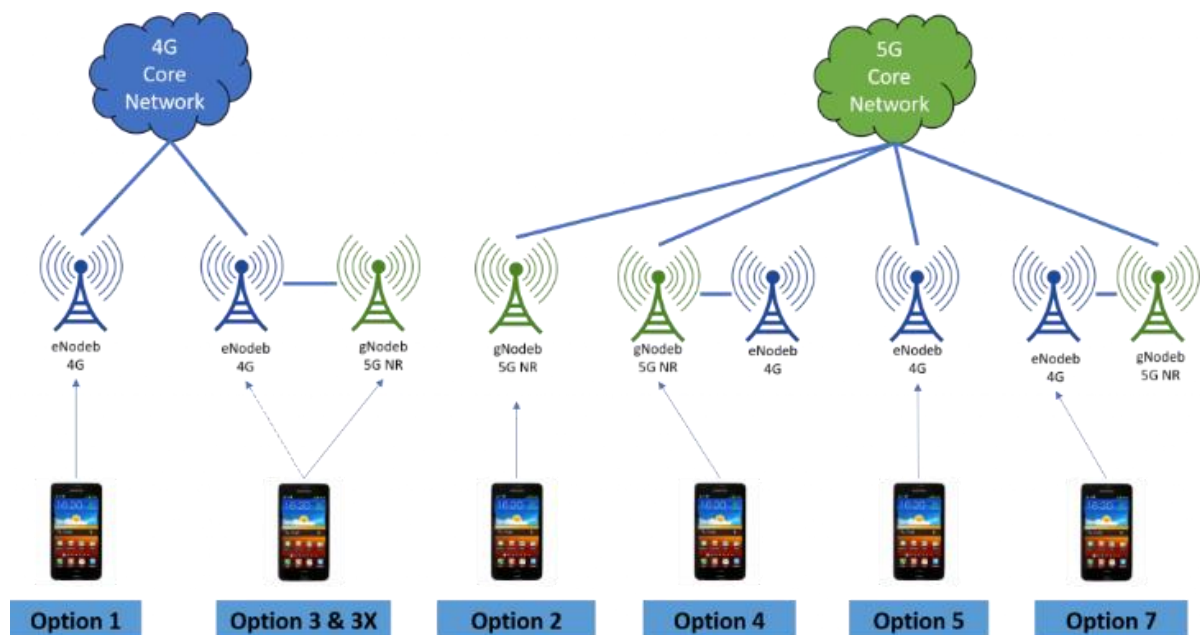
Le réseau 4G utilise généralement un RAN LTE (Long Term Evolution) et un CN EPC (Evolved Packet Core), tandis qu'un réseau 5G est conçu pour fonctionner avec un RAN NR (New Radio) et un CN 5GC (5G Core). La station de base 4G est appelée eNodeB, et une station de base 5G est appelée gNodeB.

Cependant, la 4G et la 5G sont conçues et capables de fonctionner avec le RAN et le CN de l'autre. Cela permet de créer des réseaux 4G/5G combinés. Les cellules NR 5G peuvent dès lors fonctionner avec ou sous la supervision d'un 4G EPC, ce qui offre certains avantages de la 5G aux combinés 5G sans avoir

à supporter le coût de la construction d'un tout nouveau back-end 5GC. Toutefois, les cellules 4G LTE pourront également fonctionner à l'avenir sur le nouveau 5GC. Ainsi, les nouveaux réseaux 5G peuvent également continuer à utiliser l'infrastructure RAN 4G. Cela n'est pas seulement pertinent pour continuer à servir les « anciens » combinés 4G qui ne disposent pas encore de la 5G, mais aussi pour continuer à utiliser le RAN 4G, encore très performant.

2.2.2 NSA vs SA

Cela permet de distinguer différentes formes de 5G : 5G NSA (Non-Stand Alone) et 5G SA (Stand Alone). Pour avoir une compréhension de base des différences entre NSA et SA, il est possible de consulter d'autres ouvrages, mais voici un court diagramme décrivant les différentes options de connexion.



- **Option 1.** Un 4G EPC avec un eNodeB 4G permet à un appareil 4G de se connecter à un réseau 4G pur.
- **Option 2.** Un 5G Core avec un gNodeB 5G permet de connecter un appareil 5G à un réseau 5G pur.
- **Option 3 et 3x.** Un appareil prenant en charge les spécifications 4G LTE et 5G NR RAN est connecté à un 4G EPC via un eNodeB 4G et un gNodeB 5G.
- **Option 4.** Un appareil qui prend en charge les spécifications 4G LTE et 5G NR RAN est connecté à un 5GC via un gNodeB 5G.
- **Option 5.** Un appareil 4G est connecté à un 5GC via un eNodeB 4G.
- **Option 7.** Un appareil qui prend en charge les spécifications 4G LTE et 5G NR RAN est connecté à un 5GC via un eNodeB 4G.

(Source : <https://5gsoc.org.uk/5g-options/>)

Dans le cas du 4G ou 5G SA, un combiné se connecte à sa « propre » cellule 4G (options 1 et 5), ou 5G (option 2), indépendamment du réseau central sous-jacent. Dans le cas du 4G SA, option 1, il y a une

connexion 4G pure. Cela ne nécessite aucune explication supplémentaire. L'option 1 existe bien sûr aujourd'hui, mais les options 2 et 5 où une cellule 4G ou 5G est connectée à un 5GC n'existent pas encore.

Dans le cas du 5G NSA, un combiné se connecte à une cellule 4G et à une cellule 5G. Actuellement, tant qu'il n'y a pas de nouveau 5GC, une cellule 5G fonctionnera sous la supervision d'une cellule 4G et avec un EPC 4G sous-jacent. Cette cellule 4G est appelée « cellule maître » ou également « cellule d'ancrage », et la cellule 5G est appelée « cellule secondaire ». Le combiné est connecté à la cellule 4G, et lorsqu'elle est disponible, la cellule 4G peut indiquer qu'une cellule 5G peut également être connectée sous sa supervision. Les options 3 et 3X sont des exemples de connexion 5G NSA qui existent déjà en Belgique. Le contrôle de base s'effectue via une cellule 4G et est géré par un 4G EPC sous-jacent. Cette configuration est également appelée « E-UTRA-NR Dual Connectivity (EN-DC) » et est donc actuellement proposée. Les canaux 5G supplémentaires sont reliés à une station de base ou gNodeB 5G. Cependant, toutes les fonctions de base (connexion au réseau, etc.) sont basées sur un réseau central 4G.

Cette solution permet d'offrir certains avantages de la 5G (par exemple le débit de données) sans avoir à entreprendre le développement complet d'un réseau 5G autonome avec un tout nouveau réseau de contrôle sous-jacent (réseau central 5GC). Par exemple, pour offrir une vitesse et une capacité supplémentaires, cette solution est suffisante et il est donc normal que les opérateurs commencent par cette solution.

Afin d'exploiter toutes les nouvelles possibilités de la 5G, telles que la faible latence ou l'offre de connexions à un grand nombre d'appareils IoT, un 5GC est nécessaire. À terme, les opérateurs évolueront probablement vers une solution 5G SA, ou vers des solutions 5G NSA telles que les options 4 ou 7.

2.3 Bandes de fréquences

Les bandes de fréquences utilisées par la 5G sont divisées en deux parties : FR1 (Frequency Range 1) et FR2. FR1 regroupe toutes les bandes qui utilisent les fréquences « basses » jusqu'à 6 GHz. FR2 utilise des fréquences de 24 GHz et plus. Jusqu'à présent, les opérateurs ont manifesté peu d'intérêt pour les bandes FR2.

Dans la FR1, il y a 3+1 (4) bandes qui doivent être suivies : la bande 700 MHz, la bande 2100 MHz et la bande 3500 MHz, et la bande 1400M Hz comme bande spéciale.

2.3.1 700 MHz

La mise aux enchères des licences dans cette bande est prévue pour 2022. Cette bande servira à assurer la couverture de la 5G, sans nécessairement offrir des débits très élevés.

2.3.2 2100 MHz

La bande de 2100 MHz est déjà utilisée en Belgique pour le 5G NSA.

2.3.3 3500 MHz

La bande 3500 MHz est déjà utilisée en Belgique sur la base de licences temporaires. Des réseaux privés peuvent également obtenir des fréquences (par exemple pour un réseau interne d'une entreprise), éventuellement juste en dehors de la bande publique. Des licences publiques définitives seront attribuées après la vente aux enchères prévue en 2022.

2.3.4 1400 MHz

La bande de 1400 MHz sera utilisée comme bande supplémentaire uniquement pour le téléchargement.

2.4 Type de duplexage

Deux types de duplexage sont utilisés : FDD et TDD.

2.4.1 FDD vs TDD

FDD est l'abréviation de Frequency Division Duplex, ce qui signifie que la communication entre la station de base et le combiné (la liaison descendante) a lieu sur une fréquence différente de celle de la communication entre le combiné et la station de base (la liaison montante).

TDD signifie Time Division Duplex. La communication entre la station de base et le combiné se fait sur la même fréquence que la communication entre le combiné et la station de base, mais des blocs de temps séparés sont prévus pour la liaison montante et la liaison descendante.

2.4.2 FDD en BE

Les bandes traditionnelles 800-900-1800 et 2100 MHz sont toutes utilisées en mode FDD. Les trois opérateurs classiques utilisent également tous le FDD dans la bande 2600 MHz. Cela vaut également pour la 5G dans les (futurs) bandes 700 MHz et 2100 MHz.

2.4.3 TDD en BE

Le TDD sera utilisé dans la nouvelle bande de 3500 MHz. Cela permettra d'utiliser des techniques d'antenne mMIMO spéciales qui seront examinées plus loin.

2.5 Antennes

On parle beaucoup des antennes pouvant être utilisées dans la 5G. Il est souvent fait référence à « l'effet directif » de ces antennes, c'est-à-dire qu'elles ne dirigent qu'un faisceau vers l'utilisateur et ne « rayonnent pas autour » (dans des secteurs d'environ 120°) comme les antennes plus traditionnelles des technologies précédentes (2G/3G/4G).

Il se trouve en effet que la 5G dans la bande 3500 (et la future FR2) pourra utiliser ces antennes mMIMO (massive MIMO) qui peuvent fonctionner avec des faisceaux plus étroits. Toutefois, il faut noter que dans les autres bandes (700 MHz, etc.), on utilise des antennes de type classique, qui ne font donc pas appel au mMIMO (tout au plus le MIMO simple). La cellule entière est exploitée avec le signal complet, qui dessert tous les utilisateurs.

2.6 Carrier Aggregation (CA)

La 5G, tout comme la 4G, fera appel à la Carrier Aggregation. Cela signifie qu'un combiné doté des capacités nécessaires peut recevoir et combiner plusieurs signaux en même temps. Cela permet, par exemple, de recevoir simultanément un signal 800 MHz-LTE et un signal 2100 MHz-NR, offrant ainsi une plus grande vitesse à l'utilisateur.

Dans la 5G, les possibilités d'agrégation des signaux sont plus étendues que dans la 4G, mais la 4G continue d'évoluer et, au fil des ans, les possibilités de la 4G-Advanced-Pro (comme s'appelle la dernière évolution de la 4G) ont également beaucoup progressé.

En Belgique, par exemple, la CA est déjà utilisée dans la 4G et la 5G lorsqu'elle est présente.

2.7 Possibilités

La 5G offre de nouvelles possibilités aux secteurs émergents.

2.7.1 IoT

La 4G et la 5G offrent toutes deux plusieurs nouvelles possibilités pour les applications IoT (Internet des objets). Il s'agit généralement d'applications de machine à machine, telles que les compteurs intelligents de gaz ou d'électricité, les capteurs de stationnement permettant de suivre l'occupation des places en ville ou dans les parkings souterrains, ou encore le suivi des biens, comme le suivi des

marchandises ou de véhicules volés. Des wearables tels que les smartwatches pourraient également être inclus.

Généralement, ces applications sont commandées par diverses technologies possibles, comme les RFID (comme dans les livres ou les vêtements dans les magasins pour éviter le vol), ou les réseaux LoRa ou SigFox (compteurs intelligents) ou Bluetooth (smartwatches).

La 4G offre déjà les technologies LTE-M et NB-IoT et la 5G mettra à disposition des principes supplémentaires de manière encore plus spécifique (par exemple, de très nombreux appareils dans une zone donnée). L'utilisation de réseaux 4G ou 5G offrira la possibilité d'une couverture nationale (ou internationale) et, grâce à la normalisation, pourra également entraîner une réduction des coûts.

2.7.2 4G ou 5G dans des bandes libres (sans licence)

La 4G et la 5G offrent la possibilité de fonctionner dans des bandes sans licence (comme les bandes libres de 2,4 GHz ou 5 GHz). Elles peuvent utiliser ce spectre libre avec, par exemple, la technologie Wi-Fi pour envoyer du trafic via des points d'accès Wi-Fi (approuvés et contrôlés par eux). Cela peut non seulement fournir une capacité supplémentaire, mais aussi aider à couvrir des endroits difficiles à atteindre pour une couverture extérieure traditionnelle. Cela signifie, par exemple, que le rayonnement des combinés peut également être réduit.

2.7.3 Services V2X

La 4G et la 5G offrent de nouvelles possibilités pour les services V2X (Vehicle-to-Everything) (parfois subdivisés en V2V, Vehicle-to-Vehicle, V2I, Vehicle-to-Infrastructure, V2P, Vehicle-to-Pedestrian et V2N, Vehicle-to-Network). La 4G est principalement destinée à la communication entre les voitures et avec leur environnement pour relayer des données (par exemple, un accident). La 5G va aller plus loin et est conçue en pensant aux voitures autonomes.

Des paramètres spéciaux QoS (Quality of Service) sont conçus pour ce groupe (comme pour l'IoT, etc.). Une attention particulière est accordée ici, par exemple, aux temps de réponse (latence).

2.7.4 Services MC (Mission Critical)

Les services MC sont au centre des préoccupations depuis la 4G-Advanced-Pro et visent à fournir des communications critiques, comme c'est le cas pour les talkies-walkies ou les réseaux d'urgence, par exemple. Ces services sont également appelés MCPTT (Mission Critical Push To Talk), mais MCVideo et MCData sont également fournis. Proposer ces services en 4G et 5G comme un service « géré » (proposé par l'opérateur avec des niveaux de qualité garantis) leur permettra d'être beaucoup plus fiables que lorsqu'ils sont proposés en OTT (Over The Top, par des parties externes qui n'ont aucune influence directe sur la qualité de l'accès radio).

2.7.5 Réseaux privés

De nombreux réseaux privés sont en service en Belgique. Il peut s'agir de petits réseaux (par exemple, des ouvriers du bâtiment équipés de talkies-walkies sur un chantier) ou de très grands sites, tels que des entreprises portuaires pétrochimiques avec des milliers de postes pour les halls de production.

La 5G offre la possibilité de proposer des « réseaux privés » aux entreprises, ou par exemple à un port entier, etc. Ces réseaux privés peuvent alors utiliser des combinés avec leurs propres cartes SIM et leur propre contrôle d'accès. Ils peuvent adapter les paramètres du réseau à leurs propres souhaits, par exemple pour se concentrer encore plus sur les temps de réponse courts ou sur d'autres paramètres.

Ces réseaux privés peuvent être créés soit avec leurs propres pylônes, soit en passant un contrat avec les opérateurs et en « louant » des éléments de réseau privé.

Certaines institutions pourraient par exemple l'utiliser pour des raisons de sécurité.

2.8 Consommation d'énergie

La consommation d'énergie des réseaux cellulaires est dominée par le RAN. Le réseau RAN 5G peut envoyer des bits plus efficacement en utilisant le Massive MIMO. En outre, les réseaux 5G sont conçus pour fermer dynamiquement certaines parties de l'infrastructure qui ne sont temporairement pas nécessaires. Il existe par exemple plusieurs options pour se connecter à un 5GC (souvent même via un RAN 4G), ce qui permet de désactiver des sections entières du RAN si nécessaire. Diverses études^{1, 2} montrent qu'il est possible de réduire jusqu'à 90 % l'énergie par bit transmis. Même en tenant compte du fait que des réseaux plus rapides encouragent une plus grande consommation de données, les études semblent montrer qu'il est possible de maintenir la consommation d'énergie des réseaux cellulaires constante.

Il est important de noter qu'il s'agit d'études et que l'utilisation des données dépend de notre comportement. En outre, certaines applications futures ne peuvent pas encore être correctement estimées. Il n'est donc pas entièrement possible de prévoir la consommation d'énergie de la 5G à l'heure actuelle.

¹ <https://www.nokia.com/about-us/news/releases/2020/12/02/nokia-confirms-5g-as-90-percent-more-energy-efficient/>

² <https://www.ericsson.com/en/about-us/sustainability-and-corporate-responsibility/environment/product-energy-performance>^[3] <https://www.imec.be/nl/articles/primeur-voor-vlaamse-wetenschappers-elektromagnetische-stralingswaarden-gemeten-op> [Article published October 7 2021, link accessed November 22 2021]

2.9 Rayonnement mesuré (à l'étranger)

Comme le déploiement de la 5G vient seulement de commencer dans de nombreux pays, l'impact des rayonnements de la 5G sur les valeurs de rayonnement électromagnétique est très limité. Un article récemment publié par l'Imec³, portant sur les mesures de la 5G, note que l'impact d'un réseau 5G à 3,5 GHz à Berne a un impact négligeable sur les valeurs de rayonnement total. Ce sont les réseaux sur 800, 900 et 1800 MHz qui ont de loin le plus grand impact. Sur une valeur cumulée totale mesurée de 1,26 V/m, la valeur de la cellule 5G n'était que de 0,04 V/m. Avec 0,93 V/m, la fréquence de 800 MHz a eu le plus grand impact. Cela s'explique évidemment par le fait qu'il n'y a pas ou peu de charge sur le réseau 5G, car il n'y a pas encore beaucoup d'utilisation de la 5G dans ces nouvelles bandes de fréquences, il est donc difficile d'en tirer des conclusions significatives.

Une deuxième série de mesures a examiné la valeur du rayonnement à charge maximale du réseau 5G. La valeur moyenne mesurée à charge élevée était de 0,4 V/m, et ce, pour une puissance moyenne de l'antenne (8 W). Cette valeur d'exposition pourrait atteindre un pic de 4,8 V/m à des puissances élevées de 200 W⁴. Même cette valeur de pointe élevée est conforme aux normes applicables à la distance mesurée ici, mais cela ne garantit pas que ce soit le cas à tous les emplacements possibles. Cette étude a également examiné les valeurs maximales et moyennes des champs, et les valeurs de pointe rapportées ne représentent jamais plus du double des valeurs moyennes des champs. Il est toutefois important de noter que les réseaux 5G mesurés n'utilisaient pas encore le Massive MIMO basé sur la réciprocité, mais uniquement le Massive MIMO basé sur le livre de code, de sorte que le calcul exact du rayonnement est limité par ce qui est prévu dans les livres de code.

Il est important d'assurer le suivi de telles études de terrain afin de comprendre l'impact effectif de la 5G sur les champs de rayonnement, ainsi que l'impact des différentes évolutions de la technologie 5G. Sur la base des mesures rapportées, il n'y a aucune raison de supposer que la technologie 5G se comporte différemment de ce qui était prévu. Il est important de ne pas considérer uniquement la 5G dans la bande de 3,5 GHz dans ces études de terrain, car il existe également de nombreux RAN 5G fonctionnant dans des bandes de fréquences inférieures. Dans ces fréquences plus basses, l'utilisation du Massive MIMO est également moins pertinente.

2.10 Conclusion

La technologie 5G est beaucoup plus large que le rayonnement. Le réseau 5GC est également un élément essentiel de cette révolution. Les premiers RAN 5G sont actuellement utilisés (dans les bandes de fréquences de 2100 MHz et autour de 3,5 GHz) et les premières mesures de ces RAN 5G ne font pas

[³] <https://www.imec.be/nl/articles/primeur-voor-vlaamse-wetenschappers-elektromagnetische-stralingswaarden-gemeten-op> [Article published October 7 2021, link accessed November 22 2021]

[⁴] S. Aerts, K. Deprez, M. Van den Bossche, D. Colombi, L. Verloock, L. Martens, C. Törnevik, W. Joseph, "In-Situ Assessment of 5G NR Massive MIMO Base Station Exposure in a Commercial Network in Bern, Switzerland", Applied Sciences, accepted 2021. (Impact Factor: 2.474, Q2, Rank: 88/177)

état de champs de rayonnement dépassant les normes. En raison de la faible pénétration, l'impact de la 5G sur le rayonnement cumulé mesuré est actuellement encore faible. Même dans les études où la charge des réseaux est maximale, aucune valeur excessivement élevée n'est mesurée. Avec les réseaux actuels, l'utilisation de FDD-Massive MIMO n'entraîne pas de grandes valeurs de pointe.

Il est important de ne pas assimiler la 5G par définition à un RAN 5G en 3,5 GHz utilisant le Massive MIMO. Le RAN 5G est également introduit dans d'autres bandes et les études de terrain ne doivent pas se limiter à la 5G la plus perturbatrice (c'est-à-dire les nouvelles bandes, les nouvelles techniques d'antenne).

3 Conséquences pour la santé

3.1 Un aperçu des études sur l'exposition aux radiofréquences et la dosimétrie des invertébrés

3.1.1 Exposition des invertébrés aux systèmes de communication sans fil

Les systèmes de télécommunications sans fil sont très répandus et, par conséquent, divers invertébrés sont exposés aux champs électromagnétiques (CEM) de radiofréquences (RF) utilisés par ces réseaux. Ces CEM-RF peuvent pénétrer partiellement les tissus biologiques et ces champs internes peuvent être absorbés par des organismes vivants (ICNIRP, 2020). Cette absorption est souvent quantifiée par le débit d'absorption spécifique (SAR ou « specific absorption ») en W/kg. Cet ordre de grandeur n'a de sens que lorsqu'il est ramené à une moyenne sur une certaine masse ou un certain volume. La puissance absorbée (en W) est parfois utilisée comme alternative. Idéalement, cette masse ou ce volume est défini pour correspondre à un effet biologique particulier, associé au SAR ou à la puissance absorbée dans ce volume ou cette masse. Le domaine scientifique qui se concentre sur la détermination des valeurs SAR est appelé dosimétrie CEM-RF. Il est souvent impossible de déterminer les champs internes d'un organisme (vivant). Par conséquent, l'exposition à des CEM-RF dans de tels cas est quantifiée par l'intensité du champ électrique incident (en V/m) ou la densité de puissance incidente (en W/m²). Dans l'espace libre et dans le champ lointain d'une antenne, il existe une relation fixe entre ces deux ordres de grandeur et le SAR évolue linéairement avec la densité de puissance incidente. Cependant, la relation exacte entre le SAR et les CEM-RF incidents dépend de la fréquence, du type d'organisme, de la morphologie de l'organisme, des propriétés diélectriques des matériaux dont l'organisme est composé, de la posture physique de l'organisme, etc. Plus près d'une source CEM-RF rayonnante, il n'existe souvent pas de relation fixe entre l'intensité du champ incident, la densité de puissance incidente et le SAR, et ces ordres de grandeur doivent être déterminés séparément. Par conséquent, la littérature sur cette exposition aux CEM-RF établit souvent une distinction entre des scénarios d'exposition où la source est située dans le champ proche, lointain ou intermédiaire (Liorni et al. 2020).

L'exposition des invertébrés est dominée par l'exposition en champ lointain, c'est-à-dire l'exposition causée par des réseaux de télécommunications. Ceci a été validé expérimentalement pour une série de ruchers dans (Thielens et al. 2020). Cette exposition devrait changer dans un avenir proche en raison d'une série de changements prévus dans les réseaux sans fil : (1) un déplacement des fréquences porteuses vers de nouvelles bandes de fréquences, dont certaines ont des longueurs d'onde plus petites, (2) l'introduction de transmissions adaptatives en liaison descendante (du réseau à l'utilisateur), et (3) des changements dans les méthodes d'accès au réseau. Il faudra donc surveiller davantage cette exposition dans un avenir proche.

Parallèlement, **une série de nouveaux développements technologiques crée une exposition supplémentaire aux CEM-RF pour les invertébrés**. Tout d'abord, il y a le **Radar entomologique**. Il s'agit d'une technologie de détection des insectes utilisant la diffusion du CEM-RF par les insectes. Dans cette

application radar, une impulsion de CEM-RF est envoyée par un radar à un insecte. Une partie de ces champs est ensuite réfléchi et reçue. Cette technologie est de plus en plus utilisée pour étudier le comportement et la répartition des insectes (Chapman, Drake, and Reynolds, 2011 ; Glover et al. 1966 ; Riley 1985). Deuxièmement, des **réseaux de capteurs sans fil** visant à observer les insectes pollinisateurs tels que les abeilles sont également développés et utilisés (Edwards-Murphy et al. 2016 ; Henry et al. 2019 ; Kridi, de Carvalho, and Gomes 2016). Troisièmement, il existe également de nouvelles applications de **téléométrie des insectes** (Daniel Kissling, Pattemore, and Hagen 2014). Cette technologie utilise des modules sans fil qui sont fixés à un insecte pour l'observation sans fil. Enfin, il est également fait appel aux CEM-RF dans l'agriculture et la chaîne alimentaire pour traiter certains produits afin de tuer les parasites invertébrés (Das, Kumar, and Shah 2013a), au moyen de l'ainsi nommé **traitement par micro-ondes**. L'utilisation de toutes ces technologies devrait augmenter à l'avenir.

3.1.2 Dosimétrie CEM-RF des invertébrés

Historiquement, la dosimétrie CEM-RF des invertébrés trouve son origine dans des études visant à développer le **traitement par micro-ondes des aliments, des objets en bois de valeur ou des plantes**. Dans cette technique, l'objectif est d'utiliser le chauffage diélectrique des invertébrés à la suite d'une exposition aux CEM-RF afin de tuer les parasites indésirables. Il existe plusieurs revues dans ce domaine (Das, Kumar, and Shah 2013b ; Diprose, Benson, and Willis 1984 ; Hou, Johnson, and Wang 2016 ; Johnson and Marcotte 1999 ; Wang and Tang 2001 ; Yadav et al. 2014). Pour savoir si ce type de traitement était possible, de nombreuses recherches ont également été menées dans ce domaine sur les propriétés diélectriques des insectes et sur la relation entre l'absorption des CEM-RF par les insectes, l'augmentation de la température de ces insectes et la mortalité éventuelle résultant de cette augmentation, voir (Thielens et al. 2018 ; Thielens 2021) pour un aperçu des études dans ce domaine. En résumé, ces études montrent que l'exposition d'invertébrés à des CEM-RF de haute intensité (très élevée par rapport aux expositions qui peuvent se produire dans l'environnement) dans la plage de fréquences 0,4-6 GHz peut provoquer un réchauffement de ces invertébrés et que ce réchauffement peut entraîner une mortalité élevée chez les invertébrés étudiés. Il existe également 3 études montrant les mêmes effets à des fréquences comprises entre 8 et 11 GHz (Halverson et al. 1996 ; Watters 1976 ; Estal et al. 1986), là encore à des niveaux d'exposition relativement élevés par rapport à l'exposition ambiante.

Outre les études dans le domaine du traitement des invertébrés par micro-ondes, il existe un nombre limité d'études **sur la dosimétrie CEM-RF des invertébrés**, qui sont présentées ci-dessous.

Dans (Liu, Rosenbaum, and Pickard 1976), l'exposition du ver de farine *Tenebrio molitor* a été étudiée en utilisant un modèle en couches, où l'insecte est représenté comme une couche entre deux autres couches (air et substrat par exemple), voir Fig. 1 (a). Dans cette représentation simplifiée de la réalité, il a été possible en 1967 de résoudre théoriquement les lois de Maxwell et donc de déterminer la distribution du CEM-RF dans ce modèle en fonction de la fréquence de 8-12 GHz. Le modèle prévoit une absorption accrue en fonction de la fréquence dans la bande de fréquences étudiée.

Dans (Fujiwara and Amemiya 1982), la puissance absorbée dans les pupes de *Tenebrio molitor* est théoriquement modélisée à 2450 MHz en utilisant des sphéroïdes, voir Fig. 1 (b). Cette géométrie simplifiée permet de résoudre théoriquement les lois de Maxwell pour quantifier la puissance absorbée à l'exposition en champ lointain de ces insectes. Ces calculs peuvent également être utilisés

pour calculer l'augmentation de la température chez ces insectes pour une densité de puissance incidente donnée. La même augmentation de température a ensuite été mesurée expérimentalement sur des pupes dans un guide d'onde. Un bon accord a été trouvé entre le modèle numérique et les températures mesurées. Cette étude a montré que des techniques numériques peuvent être utilisées pour déterminer avec précision la puissance EM-RF absorbée dans les modèles d'insectes.

Dans (S. Wang et al. 2003), on a eu recours à la dosimétrie expérimentale en mettant au point un fantôme constitué d'un gel ayant les mêmes propriétés diélectriques que les larves d'une pyrale. Des capteurs de température sont insérés dans ce fantôme de gel afin de quantifier l'augmentation de température due à l'exposition aux CEM-RF. Le modèle en gel a ensuite été inséré dans une noix pour mesurer la différence de température entre la noix et le modèle larvaire lorsqu'ils sont exposés à des CEM-RF à 27 et 915 MHz. Il a été démontré que le gel se réchauffe plus rapidement que la noix qui l'entoure à 27 MHz. Cet effet ne se produit pas à 915 MHz.

La puissance absorbée et la distribution du champ CEM-RF chez les insectes en tant que parasites à l'intérieur des graines de soja ont été déterminées à l'aide de simulations numériques à 27 MHz dans (Huang, Chen and Wang 2015). Les insectes ont été modélisés comme des cylindres (voir Fig. 1 (c)) placés entre deux électrodes entre lesquelles un CEM-RF de 27 MHz a été appliqué. Les puissances absorbées ont été utilisées pour simuler des augmentations de température, qui ont ensuite été mesurées expérimentalement en parallèle. Un bon accord a été trouvé entre le profil de température spatial et temporel simulé et celui mesuré entre les électrodes.

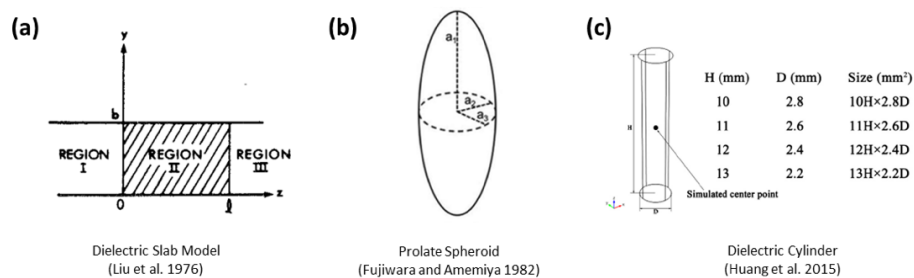


Figure 1 : Aperçu des modèles numériques électromagnétiques pour les insectes pour 2015. (a) Modèle en couches, (b) sphéroïde, et (c) modèle cylindrique.

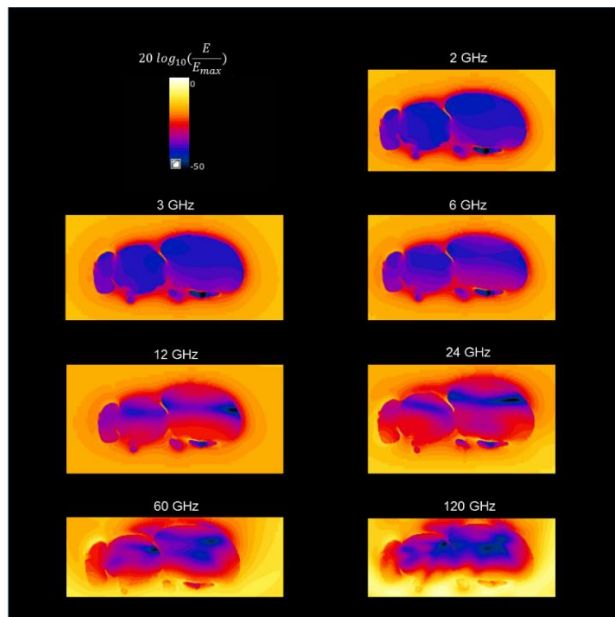


Figure 2 : Intensité normalisée du champ électrique dans et autour d'un modèle d'abeille domestique (Thielens et al., 2018).

Des études plus récentes (Thielens et al. 2018 ; 2020) ont utilisé des modèles 3D anatomiquement précis (voir Fig. 2) pour une série d'insectes. Ces modèles ont été créés par scans micro-CT et peuvent être utilisés dans des solveurs électromagnétiques. Dans (Thielens et al. 2018 ; 2020), ils ont été utilisés pour quantifier l'exposition des insectes en champ lointain en fonction de la fréquence. Il a été démontré que pour les mêmes densités de puissance incidente, il peut y avoir de grandes différences dans la puissance absorbée entre les différents insectes et que tous les insectes étudiés avaient une puissance absorbée plus élevée à des fréquences > 6 GHz qu'à des fréquences plus basses. Ceci s'explique par une pénétration plus efficace des insectes à ces fréquences, voir Fig. 2. Ceci est important car les nouvelles fréquences porteuses pour les réseaux de télécommunications sont en partie prévues à ces fréquences plus élevées. Ces résultats ont été confirmés dans (De Borre et al. 2021) pour une série de nouveaux modèles d'insectes pour les moustiques de la fièvre jaune (*Aedes aegyptius*). Les études indiquent que la puissance absorbée dans le champ lointain restera relativement faible. Enfin, un modèle d'abeille a été utilisé dans (Toribio, Joseph et Thielens 2021) pour étudier l'exposition dans le champ proche d'une antenne. Il est démontré que dans le champ proche, cette différence d'absorption entre les fréquences inférieures à 6 GHz et les fréquences supérieures à 6 GHz peut être encore plus importante que dans le champ lointain.

3.1.3 Conclusions

Les invertébrés sont exposés à des CEM-RF émis par les réseaux de télécommunications sans fil. Cette exposition devrait évoluer dans les réseaux futurs. En outre, il existe toute une série de nouvelles technologies qui entraîneront des changements dans cette exposition. Il convient donc de surveiller cette exposition de manière continue. Afin d'étudier les éventuels effets biologiques de ces expositions, il est nécessaire de quantifier la dose associée à ces expositions. Ce rapport présente un aperçu des études précédentes dans ce domaine. Celles-ci montrent qu'il existe des variations dans

l'absorption des champs électromagnétiques RF chez les invertébrés d'une espèce à l'autre, avec la fréquence, et entre les scénarios d'exposition.

3.2 Un « update » sur les études scientifiques concernant les effets de la 5G sur la santé.

Dans le dernier rapport de Bruxelles environnement, nous avons exposé, entre autres, un résumé sur la littérature concernant les effets de la 5G NR sur la santé. La revue de bibliographie s'est basée en partie sur le rapport préliminaire de l'ANSES (2019) et sur une revue publiée en 2019 (Simkó and Mattsson, 2019), qui a analysé les études (In vivo et In vitro) sur les signaux des communications de la nouvelle génération sans-fil (5G) à partir de 6 GHz, et leurs effets sur la santé (Pour plus d'information, voir rapport 2020 de BE). Depuis, nous avons fait une recherche bibliographique de 2018 à ce jour.

3.2.1 Les études scientifiques sur la 5G à partir de 2018

La recherche bibliographique de 2018 à 2021 sur Pubmed et ISI Web of science database montre que très peu d'études ont été effectuées sur les signaux des communications de la nouvelle génération sans fil (5G) à partir de 3 GHz (plus spécifiquement les fréquences aux alentours de 3,5 et la 26 GHz). Seulement 3 publications (In vivo et In vitro) ont été identifiées.

L'étude réalisée par Kim et al. (2020) avait pour but de déterminer les effets des ondes électromagnétiques avec les signaux LTE et 5G sur la pigmentation de la peau in vitro. Les auteurs ont utilisé des cellules de mélanome murines et humaines (MNT-1 and B16F10). L'exposition a été réalisée avec 1,762 GHz pour le LTE et 28 GHz pour la 5G. Selon les auteurs, les résultats montrent que ni l'exposition à la LTE ni celle à la 5G n'a induit d'effets significatifs sur la viabilité cellulaire ou la pigmentation. Les dendrites de MNT-1 n'étaient ni allongées ni régressées après exposition aux CEM. Les auteurs ont conclu que ces résultats impliquent que l'exposition aux CEM LTE et 5G ne peut pas affecter la synthèse de mélanine ou la pigmentation de la peau dans des conditions d'utilisation normales des smartphones. Cependant, cette étude ne fournit pas la puissance incidente du CEM utilisé ni une dosimétrie.

Dasgupta et ses collaborateurs (2020) ont recherché l'impact d'une exposition aux radiofréquences de téléphones cellulaires à 3,5 GHz sur le développement embryonnaire du poisson zèbre. La densité d'absorption spécifique (DAS) était de $\sim 8,27$ W/Kg et appliquée de 6 h après la fécondation (hpf) à 48 hpf. La mesure des paramètres morphologiques et comportementaux s'est effectuée à 120 hpf. Aucun impact significatif sur la mortalité, la morphologie ou la réponse photomotrice. Une inhibition modeste de la réponse de sursaut suggérant certains niveaux de perturbations sensorimotrices. Les auteurs ont conclu que les radiations des téléphones portables à des fréquences de faible niveau sont probablement bénignes, avec des effets sensorimoteurs subtils.

Wang et al. (2021) ont étudié les effets des signaux de la 5G (3,5 GHz) sur le sommeil de la Drosophile. Les intensités appliquées étaient de $0,1$ W/m², 1 W/m², et 10 W/m². L'exposition aux CEM-RF à court terme a augmenté le niveau d'activité et réduit la durée du sommeil, tandis que l'exposition aux CEM-RF à long terme a réduit le niveau d'activité et augmenté la durée du sommeil des mouches mâles F1. Sous champs RF à long terme, l'expression des gènes hsp22, hsp26 et hsp70 liés à la réponse au stress thermique a été augmentée, l'expression des gènes per, cyc, clk, cry et tim liés à l'horloge circadienne

a été modifiée, le contenu de GABA et le glutamate a été réduit et les niveaux d'expression des gènes de synthèse, de transport et de récepteurs ont été également modifiés. En conclusion de leur étude, les auteurs rapportent que l'exposition à long terme aux champs RF améliore la réponse au stress thermique de la progéniture des mouches et affecte l'expression des gènes de l'horloge circadienne et des neurotransmetteurs, ce qui entraîne une diminution de l'activité, une durée de sommeil prolongée et une meilleure qualité du sommeil.

3.2.2 Conclusions

Notre revue de littérature a identifié 3 récentes études expérimentales portant sur l'exposition aux CEM, qui utilisent des champs RF similaires à ceux du réseau 5 G. Ces études expérimentales n'ont montré aucun effet sur la santé, que ce soit sur la pigmentation de la peau (Kim et al., 2020) ou sur le développement embryonnaire du poisson zèbre (Dasgupta et al., 2020). La troisième étude a montré un effet bénéfique sur la qualité du sommeil chez la Drosophile (Wang et al., 2021).

Cependant, la prudence s'impose pour tirer des conclusions définitives en raison du nombre très limité des études. De futures études sont donc nécessaires pour confirmer cette tendance ou l'infirmier. De plus, pour préserver la crédibilité et qualité scientifique, les futures études expérimentales devraient améliorer la conception expérimentale en accordant une attention particulière au moins à la dosimétrie, au contrôle « Sham » et au contrôle de la température.

3.3 5G et Insectes

Il n'existe à ce jour aucune expertise collective portant spécifiquement sur les effets possibles des signaux 5G sur la faune et la flore, autres que les modèles expérimentaux.

3.3.1 Les revues sur les insectes

Concernant les insectes, Alain Thill a publié en 2020 l'article "*Effets biologiques des champs électromagnétiques sur les insectes*" qu'il présente comme une revue systématique. Sur les 190 articles issus de la recherche systématique, 83 articles ont été retenus pour une évaluation plus approfondie et 72 ont montré un effet des champs radiofréquences sur les insectes. Il en conclut que les champs électromagnétiques pourraient avoir un impact sérieux sur la vitalité des populations d'insectes.

Cet article a été commandité par l'Association pour la conservation de la nature (NABU, Allemagne), l'organisation de défense de l'environnement et des consommateurs (Diagnose Funk, Allemagne) et l'organisation environnementale AKUT (Luxembourg), intitulé, a été publié dans un « journal » émanant de différentes associations environnementales et médicales, lequel n'est pas une revue scientifique « classique », autrement dit pas un journal à comité de lecture.

Un avis sur cet article a été émis par le BFS allemand⁵ qui estime que "les déclarations faites [...] sur le niveau de connaissance des effets des communications mobiles sur les insectes ne sont pas correctes.

[...] Dans l'ensemble, les quelques études fiables disponibles ne plaident pas en faveur d'un effet néfaste des faibles champs haute fréquence tels que ceux trouvés à proximité des stations de base de téléphonie mobile. [...] Il y a trop peu d'études sur les effets possibles des champs basses et hautes fréquences sur le monde animal et végétal et encore moins de haute qualité. [...] À cet égard, le BFS se félicite toujours de la poursuite des recherches. ”

Plus récemment, une revue exhaustive rédigée par Arno Thielens de l'Université de Gand (Belgique), a été publiée par le Scientific Foresight Unit (STOA) européen (2021). Cette revue a considéré 3 groupes taxonomiques : les invertébrés, les vertébrés et les plantes et Champignons. Nous ne rapporterons ici que les résultats concernant les invertébrés, représentant 122 publications sur les expositions RF dans deux gammes de fréquences : une gamme de 0,45 à 6 GHz et une seconde gamme pour les fréquences supérieures à 6 GHz. Cette dernière gamme comprend les fréquences « hautes » de la 5^e génération de communication sans fil pour lesquelles, comme indiqué plus haut, pour tous les insectes étudiés, la puissance absorbée est plus élevée qu'à des fréquences plus basses.

Tandis qu'une majorité d'étude s'est intéressée à l'échauffement diélectrique des tissus biologiques dû à l'exposition aux RF dans le but de lutter contre des invertébrés nuisibles, relativement peu d'études se sont intéressées aux insectes en termes de biodiversité.

Comme l'indique l'auteur, dans la gamme inférieure des fréquences « un nombre très limité d'études environnementales se concentrent sur les invertébrés ». De plus, « les études in vivo sur les invertébrés sont confrontées à plusieurs problèmes expérimentaux et présentent des résultats peu concluants sur une série de paramètres étudiés. Des recherches supplémentaires sur des groupes témoins de meilleure qualité et exposés de manière fictive sont nécessaires. »

Dans la gamme de fréquences > 6 GHz, l'auteur indique que « des démonstrations in vitro de neurostimulation et des démonstrations in vivo d'effets développementaux et tératogènes sur des invertébrés à des densités de puissance relativement élevées [...] devraient être étudiés plus avant à des densités de puissance plus faibles. La littérature sur l'exposition des invertébrés aux RF dans cette gamme de fréquences est limitée et mérite des investigations plus approfondies. »

3.3.2 Quelques études sur les insectes en laboratoire

En laboratoire, le modèle d'insectes le plus utilisé est la drosophile, classiquement *Drosophila Melanogaster* (la mouche du vinaigre) mais d'autres souches comme *Drosophila Virilis* ont été utilisées. Nous décrivons ici quelques publications ayant utilisé des fréquences > 1 GHz.

Hamnerius et al., 1985 ont analysé le pouvoir mutagène de pulses à 3,1 GHz avec un DAS de 60 ou de 90 W/kg. Notamment, des embryons de drosophiles qui constituent un système sensible où le taux de mutations somatiques peut être évalué au niveau de la pigmentation des yeux ont été exposés. Les auteurs n'ont trouvé aucun effet mutagène significatif lié à l'exposition. Les auteurs n'ont pas mesuré l'augmentation de température induite par l'exposition dans les embryons mais il est évident qu'il s'agissait d'une exposition à un niveau thermique.

Weisbrot et al, 2003 ont exposé des drosophiles durant les 10 jours de leur développement à un signal GSM à 1,9 GHz (2h/j) à un niveau dit « non thermique » de 1,4 W/kg. Les auteurs montrent une augmentation du nombre de larves écloses dans le groupe exposé, ainsi qu'une augmentation de HSP70 et de marqueurs des voies transcriptionnelles (ELK-1 et binding de l'élément de réponse sérique). Les auteurs concluent que les effets « non-thermiques » observés devraient être pris en compte dans l'établissement des limites d'exposition. Cette conclusion est limitée par le manque de

précision dans la présentation de la dosimétrie et l'absence de suivi de la température dans les insectes qui permettrait effectivement de savoir si l'exposition est de niveau « non-thermique ».

Le groupe de Lukas Margaritis a publié une série d'articles sur les effets des signaux de téléphonie mobile sur les drosophiles, notamment le signal GSM à 1,8 GHz (Panagopoulos et al, 2007, 2010 ; Manta et al 2017). Toutes les études utilisent le système d'exposition présenté dans Margaritis et al. 2014 présenté ci-dessous, à savoir un téléphone portable commercial. Les auteurs estiment qu'il s'agit du « meilleur » système d'exposition pour l'étude des expositions environnementales. Pourtant, l'étude dosimétrique se résume ici au niveau de champ électrique (dans certaines publications, un DAS « calculé » est donné). Ce « système » d'exposition résulte en une exposition probablement très inhomogène du corps des drosophiles placées dans 4 tubes et certaines drosophiles ne sont probablement pas exposées.



In Margaritis et al, 2014

“Exposure setup for showing each EMF source and the vials with the flies to be exposed. (A) Mobile phone exposure in the presence of voice simulation through

3.3.3 Conclusion

Nous disposons encore moins d'informations sur les effets des RF sur les insectes que sur les mammifères (rongeurs, primates, humains). Les quelques études disponibles s'avèrent peu ou pas exploitables en termes d'évaluation des risques liés à l'exposition RF environnementale au-delà de 6 GHz, en raison des forts niveaux d'exposition utilisés et/ou de leur faible qualité du fait de l'absence de dosimétrie et/ou de contrôles adéquats. Les revues de la littérature qui ne tiennent pas compte de ces éléments aboutissent à des conclusions erronées concernant les signaux RF de la 5G.

3.4 Conclusion générale

Globalement, sur la base de notre précédent rapport et des nouvelles études disponibles, il n'y a actuellement aucune preuve que les RF environnementales > 3 GHz pourraient affecter la santé.

Concernant les invertébrés et plus particulièrement les insectes, les études sont trop peu nombreuses pour qu'une conclusion puisse être avancée.

Par conséquent, il existe un réel besoin d'études supplémentaires utilisant une dosimétrie de pointe et des conditions expérimentales contrôlées, en particulier le contrôle de la température et des contrôles biologiques appropriés (expositions fictives). Les niveaux d'exposition environnementale doivent être préférentiellement utilisés pour être informatifs sur la biodiversité.

Enfin, en plus des approches expérimentales, des études de terrain sur les insectes incluant les aspects de dosimétrie seront nécessaires pour combler le manque de connaissances sur les effets des RF sur la faune, y compris sur les pollinisateurs (abeilles, papillons, coléoptères, ... etc).

3.5 Références

- Borre, Eline De, Wout Joseph, Reza Aminzadeh, Pie Müller, Matthieu N. Boone, Iván Josipovic, Sina Hashemizadeh, Niels Kuster, Sven Kühn, and Arno Thielens. 2021. "Radio-Frequency Exposure of the Yellow Fever Mosquito (*A. Aegypti*) from 2 to 240 GHz." *PLOS Computational Biology* 17 (10): e1009460. <https://doi.org/10.1371/journal.pcbi.1009460>.
- Bundesamt für Strahlenschutz (BfS), 2020. "Insekten und Mobilfunk". <https://www.bfs.de/DE/bfs/wissenschaft-forschung/stellungnahmen/emf/insektensterben-5g.html>.
- Chapman, Jason W., V. Alistair Drake, and Don R. Reynolds. 2011. "Recent Insights from Radar Studies of Insect Flight." *Annual Review of Entomology* 56 (1): 337–56. <https://doi.org/10.1146/annurev-ento-120709-144820>.
- Daniel Kissling, W., David E. Pattemore, and Melanie Hagen. 2014. "Challenges and Prospects in the Telemetry of Insects: Insect Telemetry." *Biological Reviews* 89 (3): 511–30. <https://doi.org/10.1111/brv.12065>.
- Das, Ipsita, Girish Kumar, and Narendra G. Shah. 2013a. "Microwave Heating as an Alternative Quarantine Method for Disinfestation of Stored Food Grains." *International Journal of Food Science* 2013: 1–13. <https://doi.org/10.1155/2013/926468>.
- 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. doi: 10.1371/journal.pone.0235869. PMID: 32645106; PMCID: PMC7347199.
- Diprose, M. F., F. A. Benson, and A. J. Willis. 1984. "The Effect of Externally Applied Electrostatic Fields, Microwave Radiation and Electric Currents on Plants and Other Organisms, with Special Reference to Weed Control." *The Botanical Review* 50 (2): 171–223. <https://doi.org/10.1007/BF02861092>.
- Edwards-Murphy, Fiona, Michele Magno, Pádraig M. Whelan, John O'Halloran, and Emanuel M. Popovici. 2016. "B+WSN: Smart Beehive with Preliminary Decision Tree Analysis for Agriculture and Honey Bee Health Monitoring." *Computers and Electronics in Agriculture* 124 (June): 211–19. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2016.04.008>.
- Estal, P. Del, E. Viñuela, E. Page, and C. Camacho. 1986. "Lethal Effects of Microwaves on *Ceratitis Capitata* Wied. (Dipt., Trypetidae)." *Journal of Applied Entomology* 102 (1–5): 245–53. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0418.1986.tb00918.x>.
- Fujiwara, O., and Y. Amemiya. 1982. "Microwave Power Absorption in a Biological Specimen Inside a Standing-Wave Irradiation Waveguide." *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques* 30 (11): 2008–12. <https://doi.org/10.1109/TMTT.1982.1131360>.
- Glover, Kenneth M, Kenneth R Hardy, Thomas G Koiirad, and W N Sullivan. 1966. "Radar Observations of Insects in Free Flight." *Science* 154: 6.
- Halverson, Steven L., Wendell E. Burkholder, Timothy S. Bigelow, Erik V. Nordheim, and Mark E. Misenheimer. 1996. "High-Power Microwave Radiation as an Alternative Insect Control Method for Stored Products." *Journal of Economic Entomology* 89 (6): 1638–48. <https://doi.org/10.1093/jee/89.6.1638>.

Henry, Evan, Viacheslav Adamchuk, Trevor Stanhope, Christopher Buddle, and Nathaniel Rindlaub. 2019. "Precision Apiculture: Development of a Wireless Sensor Network for Honeybee Hives." *Computers and Electronics in Agriculture* 156 (January): 138–44. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.11.001>.

Hou, Lixia, Judy A. Johnson, and Shaojin Wang. 2016. "Radio Frequency Heating for Postharvest Control of Pests in Agricultural Products: A Review." *Postharvest Biology and Technology* 113 (March): 106–18. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2015.11.011>.

Huang, Zhi, Long Chen, and Shaojin Wang. 2015. "Computer Simulation of Radio Frequency Selective Heating of Insects in Soybeans." *International Journal of Heat and Mass Transfer* 90 (November): 406–17. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.06.071>.

International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP)1. 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>.

Johnson, J., and M. Marcotte. 1999. "Irradiation Control of Insect Pests of Dried Fruits and Walnuts." <https://pubag.nal.usda.gov/catalog/32597>.

Kim K, Lee YS, Kim N, Choi HD, Kang DJ, Kim HR, Lim KM. 2020. "Effects of Electromagnetic Waves with LTE and 5G Bandwidth on the Skin Pigmentation In Vitro". *Int J Mol Sci.* ;22(1):170. doi: 10.3390/ijms22010170. PMID: 33375304; PMCID: PMC7794711.

Kridi, Douglas S., Carlos Giovanni N. de Carvalho, and Danielo G. Gomes. 2016. "Application of Wireless Sensor Networks for Beehive Monitoring and In-Hive Thermal Patterns Detection." *Computers and Electronics in Agriculture* 127 (September): 221–35. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2016.05.013>.

Liorni, Ilaria, Myles Capstick, Luuk van Wel, Joe Wiart, Wout Joseph, Elisabeth Cardis, Mònica Guxens, Roel Vermeulen, and Arno Thielens. 2020. "Evaluation of specific absorption rate in the far-field, near-to-far field and near-field regions for integrative radiofrequency exposure assessment." *Radiation Protection Dosimetry* 190 (4): 459–72. <https://doi.org/10.1093/rpd/ncaa127>.

Liu, L.M., F.J. Rosenbaum, and W.F. Pickard. 1976. "Electric-Field Distribution Along Finite Length Lossy Dielectric Slabs in Waveguide." *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques* 24 (4): 216–19. <https://doi.org/10.1109/TMTT.1976.1128819>.

Manta AK; Papadopoulou D; Polyzos AP; Fragopoulou AF; Skouroliakou AS; Thanos D; Stravopodis DJ; Margaritis LH. 2017. "Mobile-phone radiation-induced perturbation of gene-expression profiling, redox equilibrium and sporadic-apoptosis control in the ovary of *Drosophila melanogaster*." *Fly (Austin).*; 11(2):75-95 (ISSN: 1933-6942)

Margaritis L.H., A.K. Manta, K.D. Kokkaliaris, D. Schiza, K. Alimisis, G. Barkas, E. Georgiou, O. G.I. Kollia, G. Kontogianni, A. Kourouzidou, A. Myari, F. Roumelioti, A. Skouroliakou, V. Sykioti, G. Varda, K. Xenos & K. Ziomas. 2014. "Drosophila oogenesis as a bio-marker responding to EMF sources". *Electromagnetic Biology and Medicine*, 33:3, 165-189, DOI: 10.3109/15368378.2013.800102

Panagopoulos DJ, Chavdoula ED, Nezis IP, Margaritis LH. 2007. "Cell death induced by GSM 900-MHz and DCS 1800-MHz mobile telephony radiation". *Mutat Res.* 626(1-2):69-78. doi: 10.1016/j.mrgentox.2006.08.008. PMID: 17045516.

Panagopoulos DJ, Margaritis LH. 2010. "The effect of exposure duration on the biological activity of mobile telephony radiation". *Mutat Res.s*: 699(1-2):17-22. doi: 10.1016/j.mrgentox.2010.04.010.

Rapport Bruxelles Environnement :

https://document.environnement.brussels/opac_css/electfile/RAP_COMEX_FR_FINAL_20190606.pdf

Riley, J.R. 1985. "Radar Cross Section of Insects." *Proceedings of the IEEE* 73 (2): 228–32. <https://doi.org/10.1109/PROC.1985.13135>.

Thielens, Arno. 2021. "Environmental Impacts of 5G." Panel for the Future of Science and Technology (STOA) | European Parliament. doi: 10.2861/318352. <https://doi.org/10.2861/318352>.

Simkó M, Mattsson MO. 2019. 5G "Wireless Communication and Health Effects-A Pragmatic Review Based on Available Studies Regarding 6 to 100 GHz". *Int J Environ Res Public Health* ;16(18):3406. doi: 10.3390/ijerph16183406. PMID: 31540320; PMCID: PMC6765906.

Thielens, Arno, Duncan Bell, David B. Mortimore, Mark K. Greco, Luc Martens, and Wout Joseph. 2018. "Exposure of Insects to Radio-Frequency Electromagnetic Fields from 2 to 120 GHz." *Scientific Reports* 8 (1): 3924. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-22271-3>.

Thielens, Arno, Mark K. Greco, Leen Verloock, Luc Martens, and Wout Joseph. 2020. "Radio-Frequency Electromagnetic Field Exposure of Western Honey Bees." *Scientific Reports* 10 (1): 461. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-56948-0>.

Thill A. 2020. "Biologische Wirkungen elektromagnetischer Felder auf Insekten". *Reviewumwelt · medizin · gesellschaft* | 33 | 3/2020

Toribio, David, Wout Joseph, and Arno Thielens. 2021. "Near Field Radio-Frequency Electromagnetic Field Exposure of a Western Honey Bee." *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1–1. <https://doi.org/10.1109/TAP.2021.3111286>.

Wang, S, and J Tang. 2001. "Radio frequency and microwave alternative treatments for insect control in nuts: a review." *Agricultural Engineering Journal*, 16.

Wang S., J. Tang, R. P. Cavalieri, and D. C. Davis. 2003. "Differential heating of insects in dried nuts and fruits associated with radio frequency and microwave treatments." *Transactions of the ASAE* 46 (4). <https://doi.org/10.13031/2013.13941>.

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

Watters, F.L. 1976. "Microwave Radiation for Control of *Tribolium Confusum* in Wheat and Flour." *Journal of Stored Products Research* 12 (1): 19–25. [https://doi.org/10.1016/0022-474X\(76\)90018-7](https://doi.org/10.1016/0022-474X(76)90018-7).

Weisbrot D., H. Lin, L. Ye, M. Blank, R. Goodman. 2003. "Effects of mobile phone radiation on reproduction and development in *Drosophila melanogaster*", *J. Cell Biochem*. 89 (1) () 48–55.

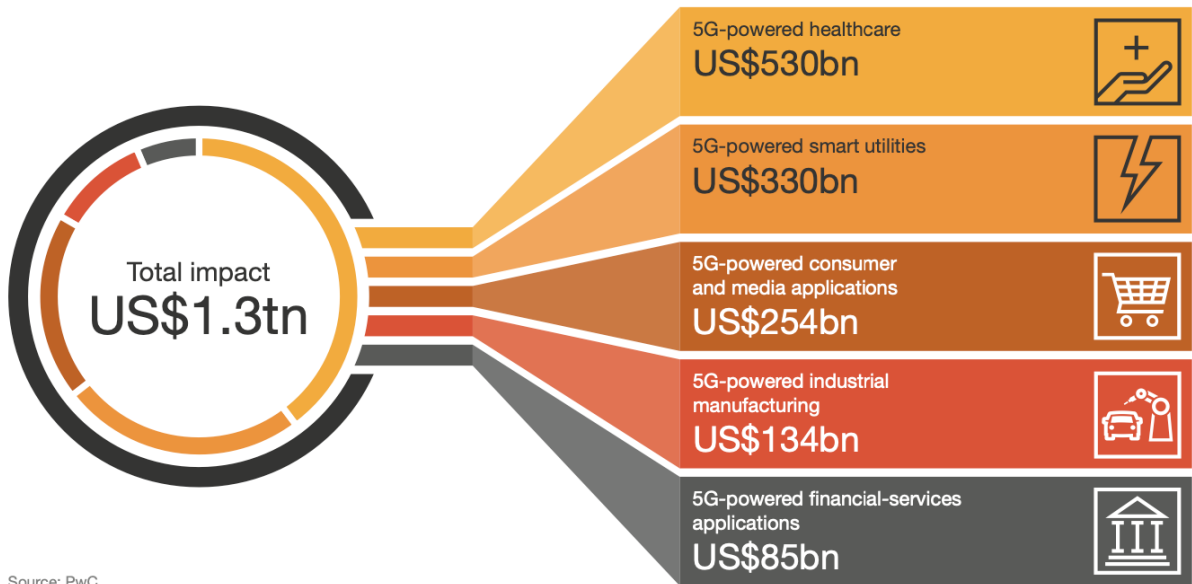
Yadav, Deep N., Tanupriya Anand, Monika Sharma, and R. K. Gupta. 2014. "Microwave Technology for Disinfestation of Cereals and Pulses: An Overview." *Journal of Food Science and Technology* 51 (12): 3568–76. <https://doi.org/10.1007/s13197-012-0912-8>.

4 Aspects macroéconomiques du secteur des télécommunications

4.1 Introduction

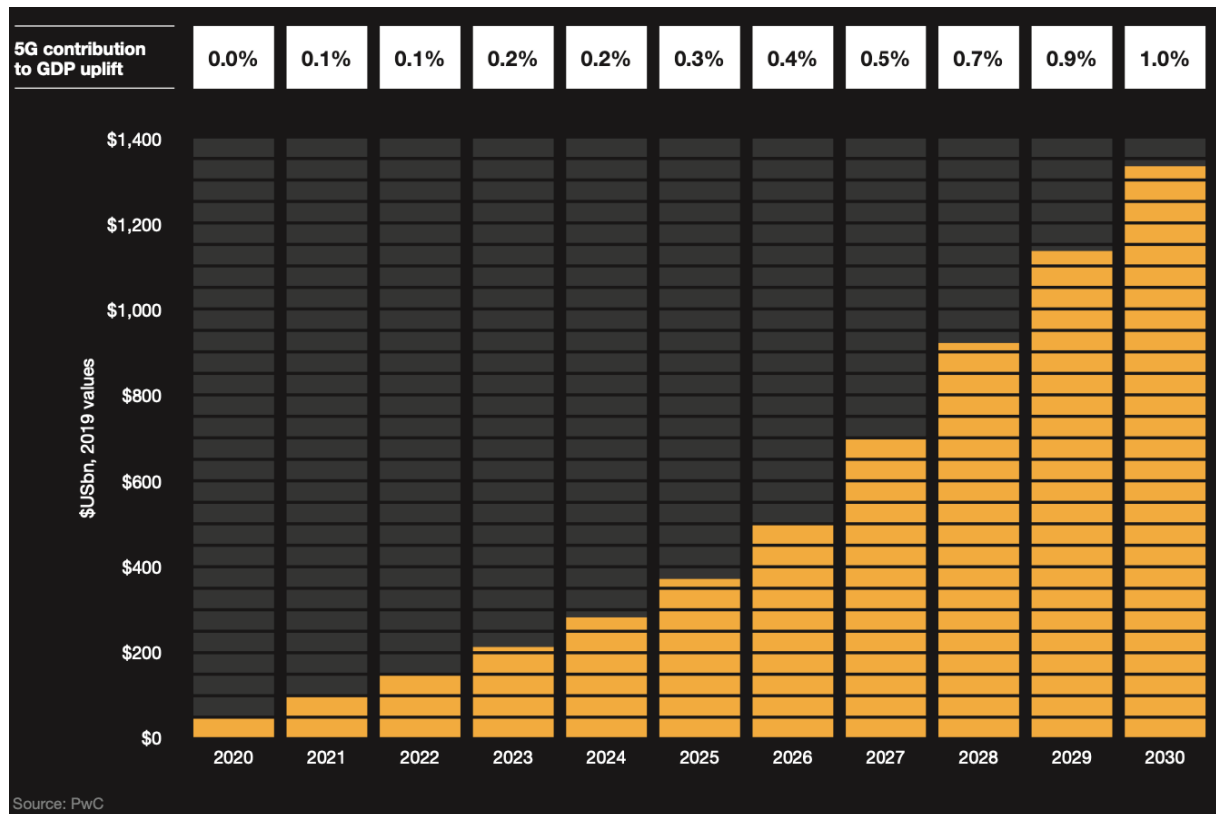
Alors que l'acceptation et le déploiement de la 5G s'accélèrent, diverses instances commencent à quantifier l'impact potentiel de cette technologie en termes économiques. PWC déclare dans un rapport de 2021 (Chow, 2021) que plus de 80 % du potentiel économique de la 5G semble résider dans les applications de soins de santé (qui devraient contribuer à hauteur de 530 milliards de dollars au PIB mondial), la gestion intelligente des équipements d'intérêt collectif (330 milliards de dollars de plus) et les applications grand public et médias (254 milliards de dollars de plus). L'augmentation totale estimée est de 1,3 trillion de dollars US.

Figure 1. Contribution estimée de la technologie 5G à l'économie mondiale par secteur



Source : PWC

Figure 2. Contributions estimées de la technologie 5G au PIB mondial pour la période 2020-2030.



Source : PWC

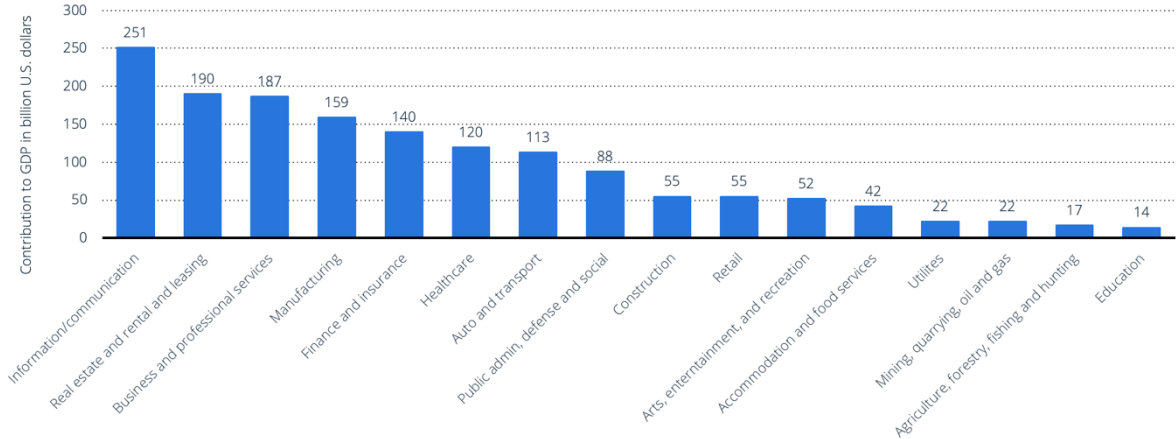
PWC appelle donc à comprendre où et comment la 5G peut créer un avantage concurrentiel, ainsi que les exigences de mise en œuvre et d'intégration à respecter pour générer efficacement cette valeur. D'autres sources telles que IHS Markit ont cité en 2020 que les avantages macroéconomiques de la 5G, en termes d'investissements liés à la 5G (à la fois CAPEX et R&D) de 2020 à 2035 par les entreprises qui font partie de la chaîne de valeur de la 5G dans seulement sept pays (Chine, États-Unis, Japon, Allemagne, Corée du Sud, France et Royaume-Uni), s'élèveront en moyenne à plus de 260 milliards de dollars par an (Aniruddha, Campbell, Flanagan, & O'Neil, 2020). IHS Markit estime en outre que la chaîne de valeur de la 5G générera 3,8 trillions de dollars de production brute et soutiendra 22,8 millions de nouveaux emplois d'ici 2035. En outre, sept pays représenteront près de 84 % de la contribution à la production brute mondiale liée à la 5G et plus de 88 % de la contribution aux nouveaux emplois.

Grâce à une augmentation significative des investissements liés à la 5G (CAPEX et R&D), la Chine devrait s'emparer d'une plus grande part de la chaîne de valeur de la 5G d'ici 2035 - environ 400 milliards de dollars (soit 36 %) de plus à 1,5 trillion de dollars par rapport au 1,1 trillion de dollars prévu en 2019. En revanche, la part du reste du monde devrait être inférieure d'environ 19 %. Le ralentissement de la croissance économique dans le monde post-COVID-19 pourrait se faire ressentir de manière disproportionnée dans les petits pays qui n'ont pas la résilience nécessaire pour rebondir

aussi rapidement que les grandes économies. Cela influencera leurs priorités d'investissement et exercera une pression à la baisse sur les dépenses liées à la 5G.

Des rapports, tels que celui d'Accenture en 2021, se concentrent plus spécifiquement sur les États-Unis et sur l'impact macroéconomique de la 5G dans ce pays (Wang, et al., 2021). Ils prévoient qu'entre 2021 et 2025, la technologie 5G aux États-Unis représentera 2,7 trillions de dollars de ventes et 1,5 trillion de dollars de PIB. En outre, selon Accenture, la 5G aux États-Unis a le potentiel de créer ou de transformer jusqu'à 16 millions d'emplois à temps plein, à temps partiel et temporaires pour répondre à la demande accrue, générant des revenus du travail qui circulent dans l'économie. Selon Accenture, cette croissance jouera un rôle clé dans le redressement des États-Unis après le COVID-19 et contribuera à renforcer la résilience pour l'avenir.

Figure 3. Contribution de la 5G au PIB américain par secteur d'ici 2025



Source : Accenture

Figure 4. Estimation de l'impact économique de la 5G par pays en dollars

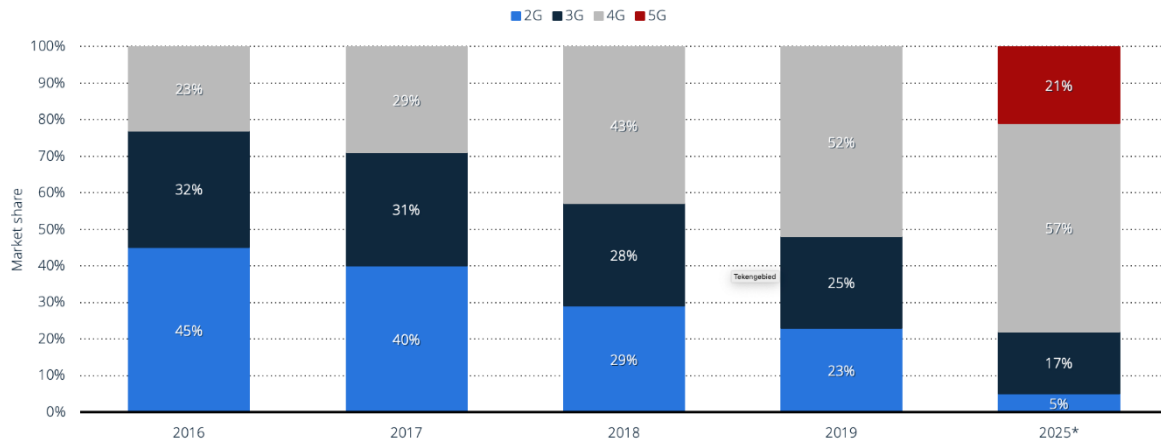


Source : PWC

Les chiffres ne sont donc pas les mêmes, mais une tendance s'en dégage. Les différents auteurs ont lié de grands espoirs au déploiement et à l'impact de la 5G sur l'économie mondiale. Ce dernier point se reflète également dans l'adoption prévue de la technologie mobile où, dans la figure ci-dessous, on remarque que le taux d'adoption de la 5G augmentera très fortement (estimation) à partir de 2025. Ce taux d'adoption permettrait d'obtenir jusqu'à 20 % du marché de la technologie des télécommunications mobiles à ce moment.

Figure 5. Part du marché mondial de la technologie des télécommunications mobiles par type de génération

Global market share of mobile telecom technology 2016-2025, by generation

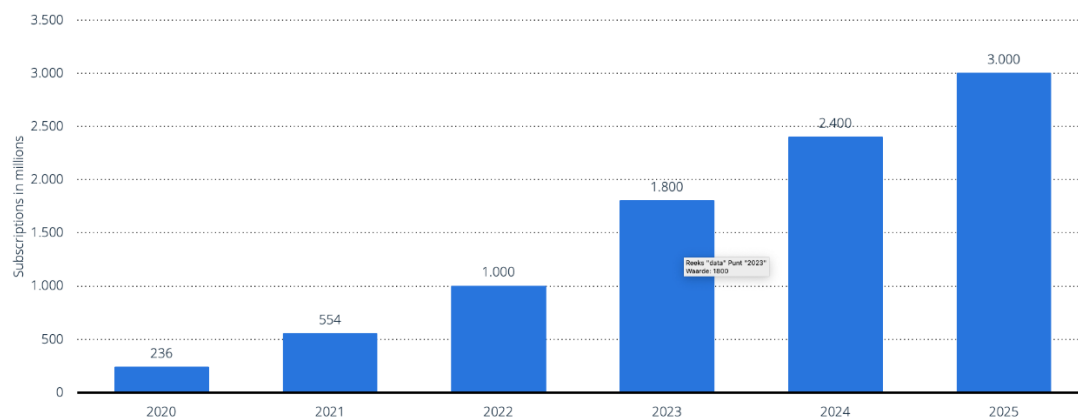


Source : GSMA Intelligence

4.2 L'état d'avancement du déploiement de la 5G dans le monde

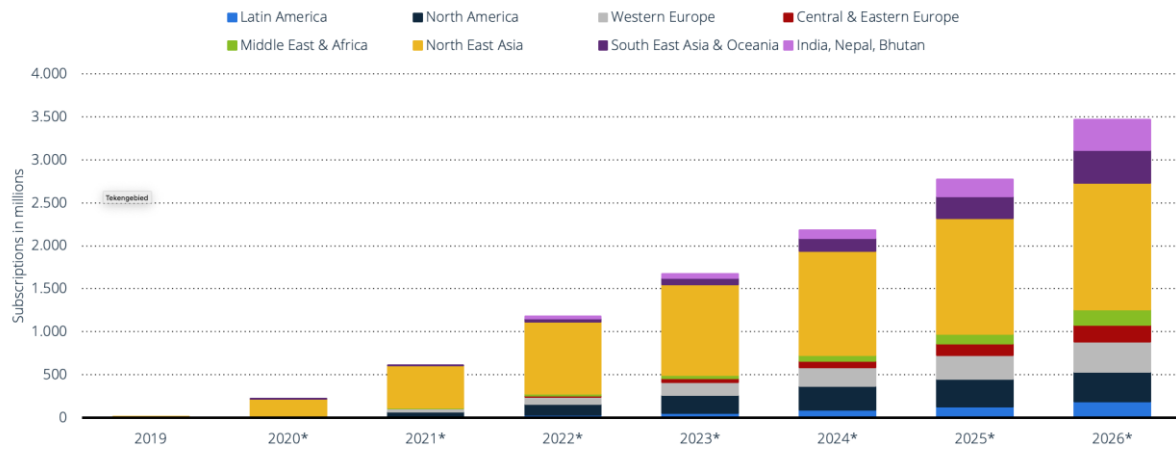
On s'attend donc généralement à ce que le taux d'adoption de la technologie suive le déploiement de la 5G. Toutefois, il faut être conscient des différentes vitesses auxquelles la technologie sera adoptée dans le monde. Il est déjà clair que ce taux d'adoption sera plus élevé dans la région de l'Asie du Sud-Est que dans le reste du monde.

Figure 6. Estimation du nombre d'abonnements 5G dans le monde d'ici 2025



Source : Ericsson

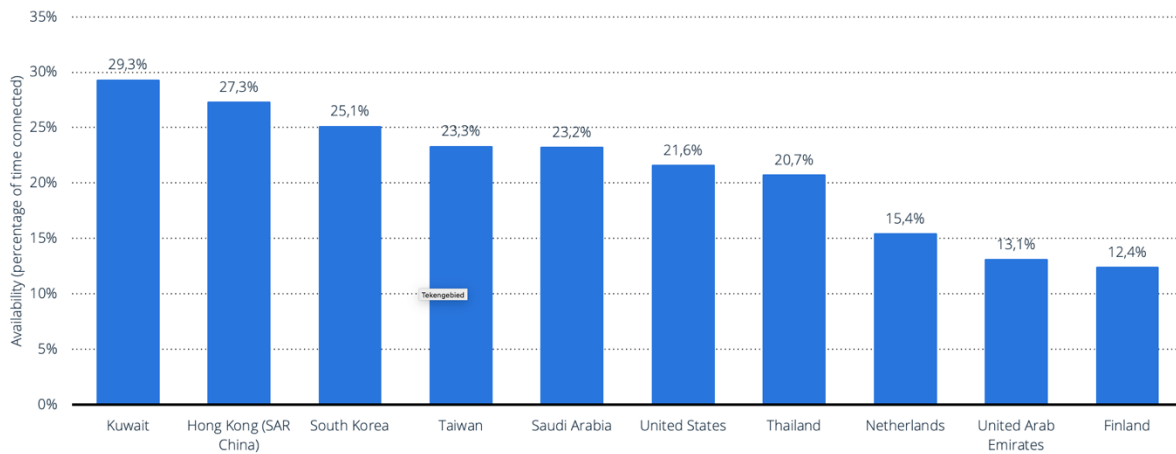
Figure 7. Estimation du nombre d'abonnements mobiles 5G dans le monde, d'ici 2025, par région



Source : Ericsson

Figure 8. Disponibilité de la 5G dans les principaux pays d'ici 2021

Availability of 5G in leading countries 2021

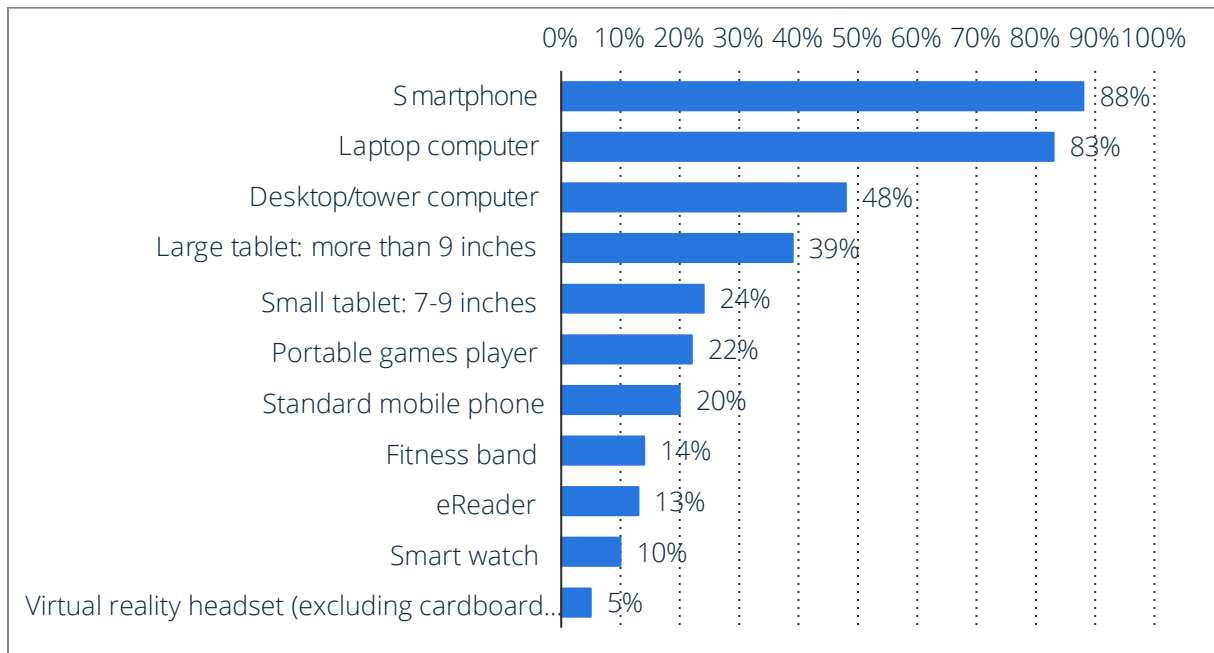


Source : Opensignal

4.3 Focus sur la Belgique

Une étude réalisée en 2019 par Deloitte auprès de 2002 personnes interrogées a révélé qu'en termes d'appareils mobiles ou dotés d'une technologie de communication mobile, le smartphone est de loin l'appareil le plus utilisé par la population belge (Fosty, Debusschere, & Pirard, 2019). Cependant, les ventes de téléphones portables ont fortement chuté pendant la pandémie de COVID-19 (GfK, 2020).

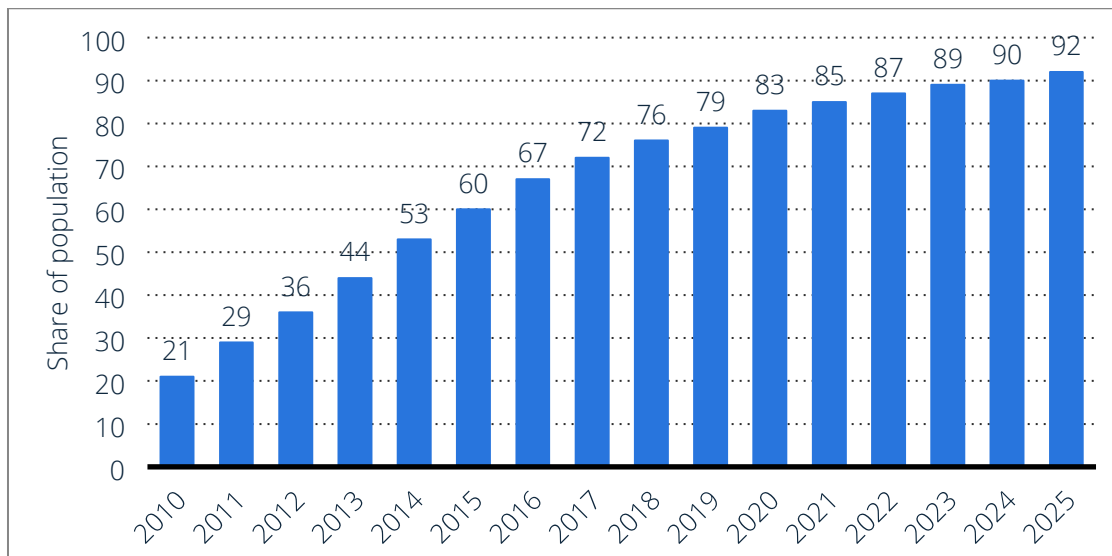
Figure 9. Taux d'adoption Appareils mobiles



Source : Deloitte

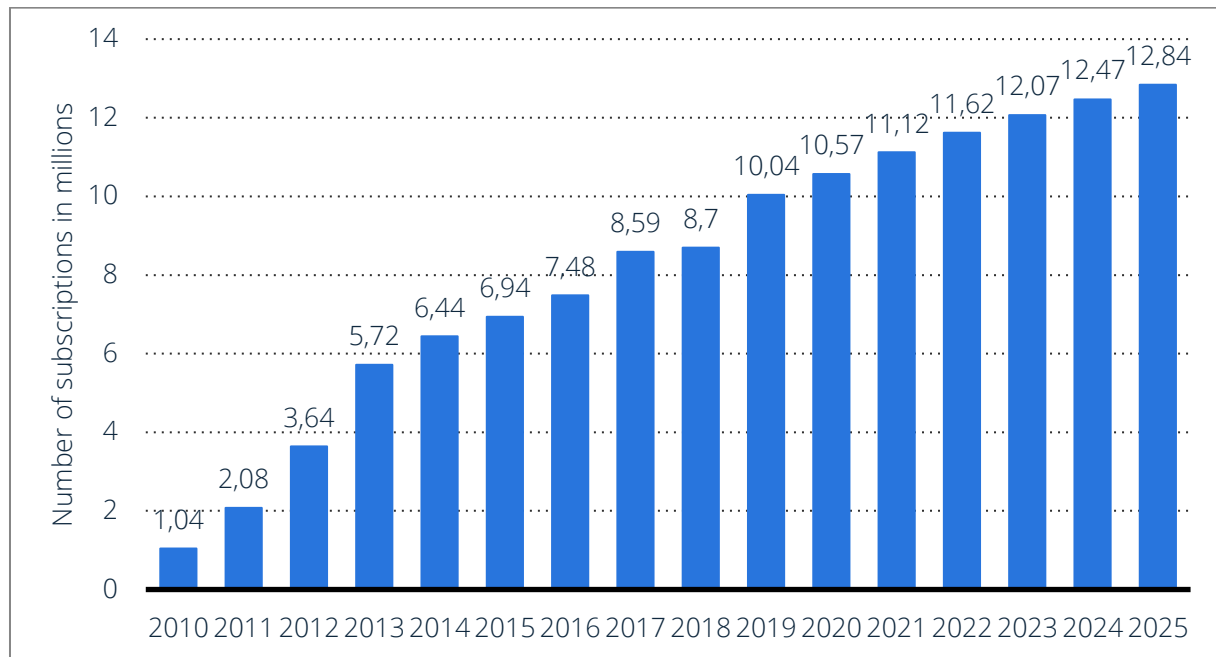
Le fait que le smartphone joue un rôle primordial dans les communications mobiles en Belgique se reflète également dans le taux d'adoption élevé de l'Internet mobile en Belgique, comme le montre la figure ci-dessous, ainsi que dans le nombre élevé d'abonnements au haut débit mobile utilisés en Belgique, comme le montre la figure 11.

Figure 10. Degré d'adoption de l'Internet mobile en Belgique



Source : Statista

Figure 11. Nombre d'abonnements au haut débit mobile en Belgique

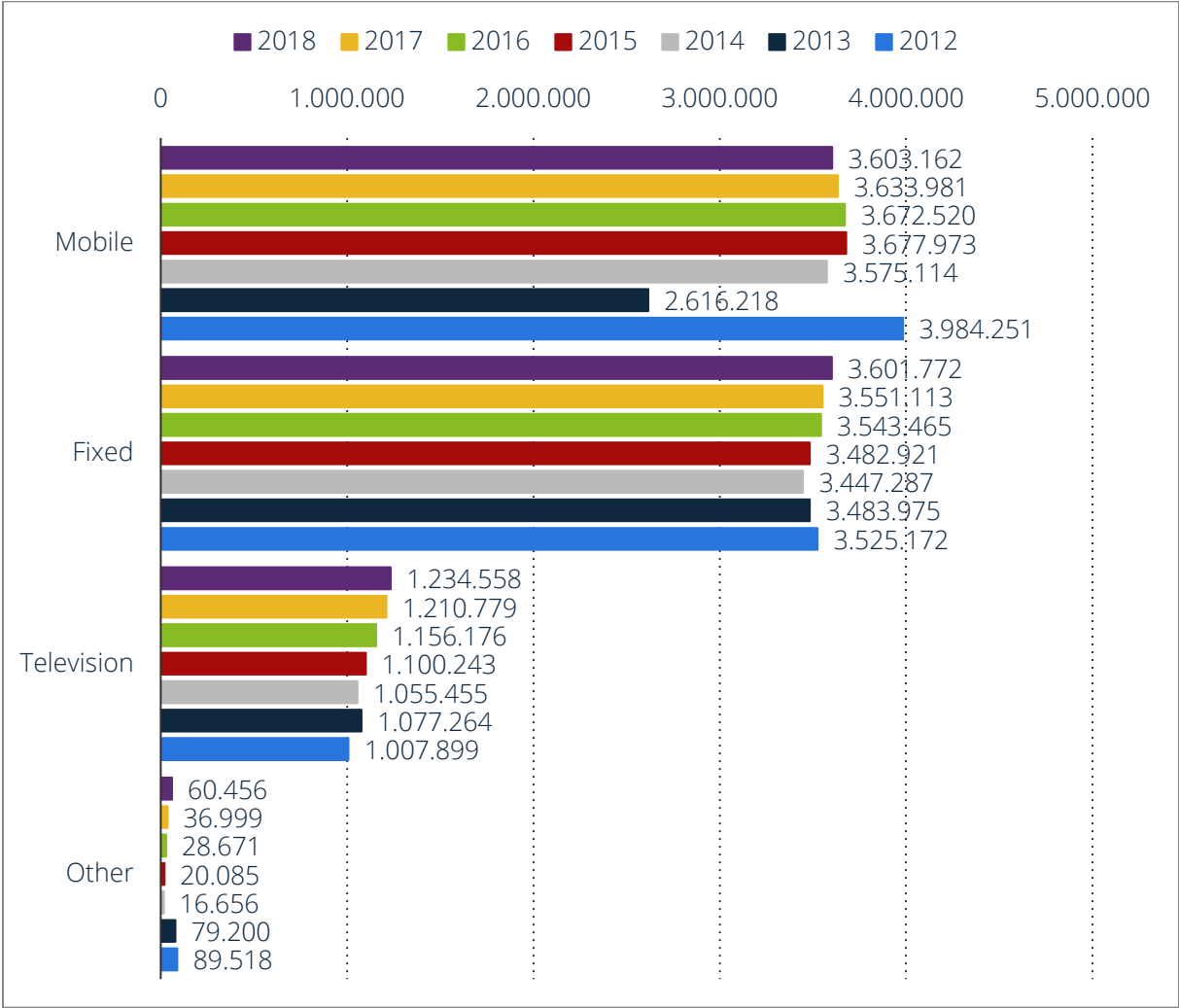


Source : Statista

L'Internet mobile et son taux d'adoption élevé en Belgique se traduisent par un rendement relativement élevé pour le marché des télécommunications dans notre pays. La figure ci-dessous montre que l'Internet mobile et l'Internet fixe sont les produits les plus importants dans le panier de produits offerts par les sociétés de télécommunications belges.

En outre, il est également clair que dans le cadre de l'utilisation des appareils mobiles et plus particulièrement des téléphones mobiles, le chiffre d'affaires généré par les opérateurs de télécommunications découle principalement des services de détail tels que les appels, les SMS et le trafic de données mobiles. Les autres services rapportent proportionnellement beaucoup moins, comme le montre également la figure 13.

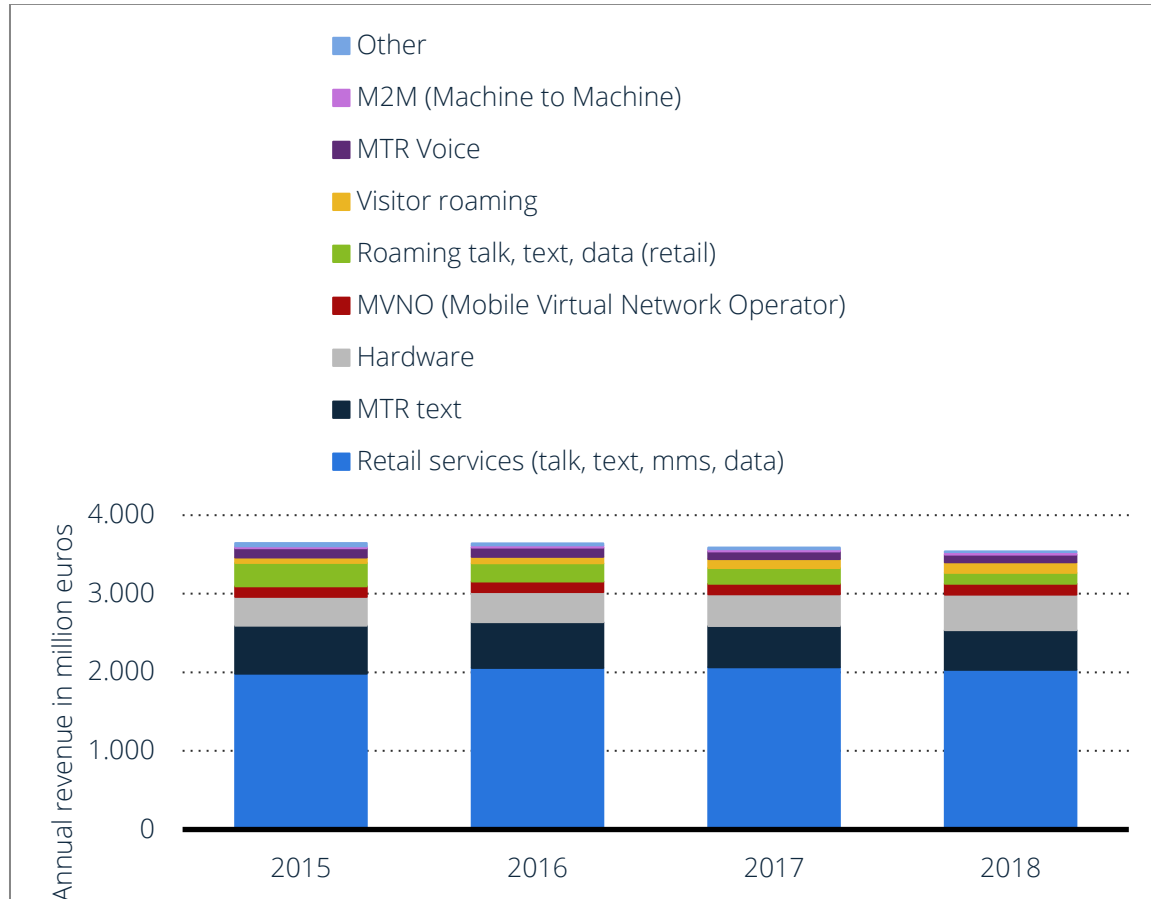
Figure 12. Chiffre d'affaires du secteur des télécommunications en Belgique par type de produit exprimé en milliers d'euros



Source : IBPT

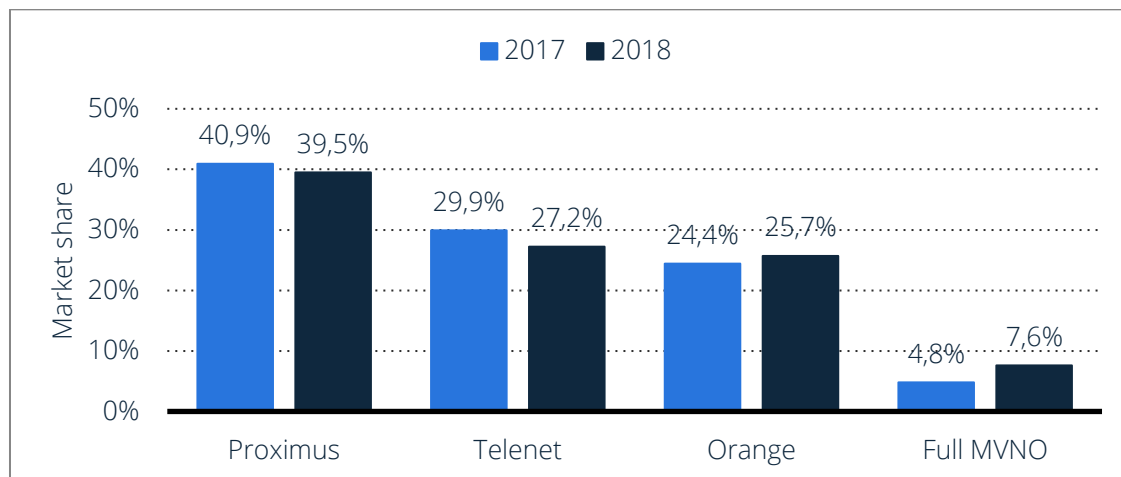
La part du lion du marché des fournisseurs d'Internet mobile est revenue à Proximus en 2018, suivi de Telenet, Orange et de quelques MVNO, comme le montre également la figure 14.

Figure 13. Chiffre d'affaires généré par l'utilisation des téléphones mobiles



Source : IBPT

Figure 14. Part de marché des opérateurs d'Internet mobile en Belgique



Source : IBPT

4.4 Conclusion

Les attentes concernant l'impact de la technologie 5G en termes macroéconomiques restent élevées. Les taux d'adoption sont élevés, notamment en Asie, et la valeur ajoutée économique potentielle semble également susceptible de se concrétiser. L'hypothèse est que les petits pays ou les petites économies luttent actuellement pour remonter la pente après la pandémie de COVID-19. Toutefois, les prévisions indiquent qu'ailleurs (hors Asie) dans le monde, principalement aux États-Unis, en France et en Allemagne, l'impact de la technologie 5G se fera sentir en termes de contribution à l'augmentation des ventes, du PIB et de l'emploi. La Belgique semble suivre cette tendance, étant donné que le taux d'adoption de l'Internet mobile ne cesse d'augmenter et que les opérateurs mobiles réalisent une grande partie de leur chiffre d'affaires grâce aux produits qu'ils commercialisent.

4.5 Bibliographie

- Aniruddha, B., Campbell, K. A., Flanagan, B., & O'Neil, B. (2020). *The 5G Economy in a Post- COVID-19 Era - The role of 5G in a post-pandemic world economy*. IHS Markit. IHS Markit.
- Chow, W. (2021). *The Global Economic impact of 5G*. PWC. PWC.
- Fosty, V., Debusschere, V., & Pirard, V. (2019). *Mobile Consumer Survey 2019 - Theme 2: Wearables on the rise*. Opgehaald van www.deloitte.com: <https://www2.deloitte.com/be/en/pages/technology-media-and-telecommunications/topics/mobile-consumer-survey-2019/wearables.html>
- GfK. (2020). *COVID-19 Impact on Non-Food Retail Belgium Week* . Opgehaald van insights.gfk.com: <https://insights.gfk.com/en/belgian-non-food-retail-behind-closed-doors>
- Wang, J., Roy, H., Alam, S., Rao, T., Ahshrup, S., & McCluskey, W. (2021). *The Impact of 5G on the United States Economy*. Accenture. Accenture.