

Bruxelles Environnement



Rapport du comité d'experts sur les radiations non ionisantes 2019-2020

Présidente : Beauvois, V.

Membres : Aerts, G. – Le Dréan, Y. – Erzeel, D.– Lagroye, I. – Pollin, S. – Rolain, Y.
– Selmaoui, B.

Le Comité tient à remercier notre collègue le Professeur Walter Hecq pour toutes ses contributions à nos réunions et nos publications. C'est avec une grande tristesse que nous avons appris son décès en septembre dernier. Nos pensées accompagnent sa famille et ses proches.

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 | 4 |
| 1.1.3 | Interprétation et traitement des résultats de mesure..... | 4 |
| 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 | Détermination des marges d'erreur pour les mesures | 6 |
| 1.1.7 | Détermination des marges d'erreur pour les simulations | 6 |
| 1.1.8 | Validation des simulations par des mesures | 7 |
| 1.2 | Efforts en vue de la dissémination de l'information pour le public | 7 |
| 1.3 | Défis pour la réalisation des mesures dans un contexte 5G | 7 |
| 1.3.1 | Influence de la diversité spatiale et temporelle en 5G | 7 |
| 1.4 | Avis général concernant le protocole de mesure..... | 10 |
| 2 | 5G technologie en gevolgen voor stralingTechnologie 5G et effets sur le rayonnement..... | 11 |
| 2.1 | Évolution de l'ordonnance concernant les normes de rayonnement pour la Région de Bruxelles-Capitale..... | 11 |
| 2.2 | Croissance de la capacité de données mobiles et influence sur les rayonnements et les normes..... | 12 |
| 2.2.1 | Croissance escomptée des données mobiles..... | 12 |
| 2.2.2 | Capacité d'un réseau | 14 |
| 2.2.3 | Augmentation de la capacité par le remplacement de la 2G et la 3G | 16 |
| 2.2.4 | 5G : capacité et rayonnement | 16 |
| 2.3 | Conclusion | 18 |
| 3 | Les effets sur la santé..... | 19 |
| 3.1 | Introduction..... | 19 |
| 3.2 | Etat de l'art..... | 21 |
| 3.2.1 | Fréquences autour de 3,5 GHz | 21 |
| 3.2.2 | Fréquences de 6 à 30 GHz | 22 |
| 3.2.3 | Fréquences millimétriques entre 30 GHz et 70 GHz | 23 |
| 3.3 | Conclusions..... | 25 |
| 3.4 | Références..... | 27 |
| 4 | Impacts spécifiques sur l'économie | 30 |

| | | |
|-------|--|----|
| 4.1 | Aspects Macro-économiques | 30 |
| 4.1.1 | Introduction..... | 30 |
| 4.1.2 | COVID-19 | 30 |
| 4.1.3 | Marchés mondial et européen du secteur de la téléphonie mobile 5G : nombre escompté d'abonnements mobiles et trafic mobile - Phases de test et de mise en œuvre..... | 31 |
| 4.1.4 | Moteur de croissance | 34 |
| 4.1.5 | Statut de la 5G | 37 |
| 4.1.6 | Emploi..... | 38 |
| 4.1.7 | Obstacles | 38 |
| 4.2 | Aspects microéconomiques | 42 |
| 4.2.1 | Situation du secteur des télécommunications mobiles en Belgique | 42 |
| 4.2.2 | Contribution directe et indirecte au développement économique du secteur numérique belge et contribution à l'emploi | 46 |
| 4.2.3 | Situation économique du secteur des télécommunications dans la Région de Bruxelles-Capitale | 49 |
| 4.3 | Bibliographie..... | 51 |
| 5 | Conclusion générale | 52 |
| 6 | Annexe : Rémunérations payées par membre en 2020..... | 55 |
| 7 | Rémunérations payées par membre en 2019 | 55 |

1 Evaluation de l'application de l'ordonnance

1.1 Application générale des aspects techniques de l'ordonnance

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. 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 note que BE a tenu compte de la suggestion formulée dans le rapport précédent.

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

Le fabricant du simulateur confirme que les calculs sur le terrain demeurent valides au-dessus du sol et que l'illumination de l'enveloppe extérieure des bâtiments est correctement simulée.

- DÉCISION : Le Comité estime que le logiciel peut être utilisé pour prédire l'illumination de l'enveloppe extérieure des bâtiments.

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, qui a été expliquée au Comité par BE.

Puisque le simulateur ne peut pas être utilisé pour obtenir des résultats à l'intérieur, une méthode différente est requise. Afin d'obtenir une prévision, un certain nombre de scénarios courants peuvent être utilisés comme il a été déjà indiqué dans les rapports précédents.

Moyennant une série de campagnes de mesures effectuées précédemment, BE a démontré qu'il existe une corrélation entre les résultats obtenus pour la simulation et les mesures de contrôle. Les résultats montrent qu'il existe une corrélation claire entre les mesures et les simulations obtenues par le logiciel Mithra-REM. L'analyse montre que le logiciel de simulation produit une légère surestimation de l'intensité du champ. Comme il s'agit là d'une estimation prudente, c'est certainement dans l'intérêt de la population.

Une atténuation moyenne de 5 dB a été obtenue pour les mesures intérieures. Cette valeur correspond au matériau de construction des fenêtres et constitue donc à nouveau un résultat positif¹. Il est prévu de poursuivre l'étude afin de rendre les résultats statistiquement significatifs et d'identifier tout problème restant. Les résultats de ces campagnes devraient permettre d'identifier les scénarios les plus courants et d'estimer le nombre de configurations nécessaires.

¹ Annexe du rapport précédent

- **DÉCISION** : le Comité approuve l'utilisation de la procédure actuelle pour étendre les simulations aux prévisions intérieures. Cette procédure a été affinée et les résultats actuels semblent montrer que l'utilisation d'une atténuation moyenne permet de prédire l'intensité du champ de manière appropriée. Il semble que la géométrie et la configuration spécifiques du site d'essai intérieur ne jouent qu'un rôle secondaire.
- **SUGGESTION** : Le Comité se félicite de la poursuite de la campagne de mesure en cours. Le résultat de cette étude supplémentaire permettra d'analyser la pertinence statistique de l'utilisation d'une atténuation moyenne. Si cette pertinence statistique est démontrée, le post-traitement actuel peut être obtenu dans la grande majorité des cas.

1.1.6 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. L'étalonnage sera encore étendu, ce qui améliorera encore la détermination des bandes d'erreur et de précision à l'avenir.

L'ordonnance ne prévoit pas l'utilisation des limites d'erreur à la suite du contrôle des installations. La méthodologie actuelle, qui offre des mesures moyennes comme résultat de mesure, est donc conforme à l'ordonnance.

1.1.7 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.

Cependant, l'étude de validation mentionnée précédemment pour l'illumination électromagnétique de l'enveloppe extérieure des bâtiments a permis de valider la simulation avec des mesures réelles. D'après les mesures actuellement disponibles, la simulation devrait être suffisamment précise. Ceci est confirmé par le rapport de BE, où l'origine de certaines valeurs aberrantes entre mesures et simulations a pu être identifiée et sera pris en compte pour améliorer les simulations.

DÉCISION : Le Comité est d'avis que l'approche proposée satisfait aux exigences en matière de mesures à l'extérieur des bâtiments et pour les mesures au niveau de l'enveloppe extérieure des bâtiments dans un environnement urbain, comme c'est le cas en région bruxelloise. Les mesures discutées précédemment pour la validation de la simulation montrent que les résultats des simulations correspondent aux mesures réalisées avec une marge d'erreur réaliste, ce qui implique une forte validation de la procédure.

BE devra adapter la méthodologie de la simulation pour éviter à l'avenir l'apparition de valeurs aberrantes dans certains rares cas de figure. L'adaptation de la méthodologie demandera un développement additionnel des outils et il faudra tenir compte que le temps de calcul doit rester réaliste et pratique. La méthode actuelle montre déjà de bonnes performances dans la très grande majorité des situations.

1.1.8 Validation des simulations par des mesures

BE a poursuivi le projet de validation des simulations sur la base de mesures d'essai. Les résultats de l'étude sont positifs : la correspondance entre les mesures et les simulations est très bonne, et les simulations peuvent être utilisées pour prédire les intensités des champs intérieurs. Tous les résultats sont statistiquement significatifs compte tenu de la grandeur de l'ensemble des données expérimentales. Des progrès significatifs ont donc été réalisés.

- **DÉCISION** : Le Comité félicite l'initiative de BE et de la bonne adéquation entre les simulations et les mesures. Cette étape importante permet d'objectiver l'étalonnage du simulateur avec des mesures réelles. Le Comité et l'administration conviennent que l'avantage de ce test est qu'il démontre la crédibilité de l'approche proposée. Ces mesures constituent une base saine pour obtenir facilement et de manière fiable des prévisions de rayonnement à l'intérieur des bâtiments.

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.

Suggestion : 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.

1.3 Défis pour la réalisation des mesures dans un contexte 5G

1.3.1 Influence de la diversité spatiale et temporelle en 5G

1.3.1.1 Diversité spatiale

Le protocole 5G prévoit l'utilisation d'un « MIMO massif », ce qui permet de former un faisceau adaptatif. Cela permet de concentrer la capacité du canal de données dans les zones qui nécessitent un apport de données important.

Cette particularité rend les mesures d'intensité de champ sensiblement plus difficiles. La demande d'un protocole permettant une mesure représentative existe et est actuellement à l'étude. Le Comité

d'experts est d'avis que cette procédure en est à un stade trop précoce pour permettre une mise en œuvre.

Suggestion: Il est proposé que BE suive de près l'évolution de ces nouvelles procédures de mesure, afin que la mise en œuvre initiale des essais puisse être effectuée en temps utile. Le Comité pense ici à des documents tels que la proposition de rapport technique IEC TR 62669:2019² du Comité technique IEC TC106.

Décision : Le Comité prend acte des efforts de BE afin de préparer les mesures nécessaires à la 5G. Le Comité prend acte de l'approche proposée par BE, qui consiste à déterminer de nouveaux coefficients d'atténuation spécifiques à la 5G.

Pour valider ces coefficients, une campagne de mesure a été effectuée par UGent (IMEC) en Septembre 2020, et, par BE et UGent en Octobre. Les résultats préliminaires tendent à prouver qu'il serait en effet possible d'obtenir de tels coefficients d'une manière statistiquement fiable. Le Comité encourage BE à poursuivre dans la direction choisie, afin d'être fin prêt pour le contrôle d'un éventuel réseau 5G.

Suggestion: La plus grande diversité spatiale et temporelle de la 5G par rapport à la 4G entraînera une forte augmentation de la dispersion (et donc aussi de l'incertitude) des mesures. Des mesures fiables exigent une faible dispersion, ce qui ne peut être obtenu que si des informations supplémentaires sont incorporées au processus de mesure pour rendre compte de cette diversité. Le moyen le plus évident d'obtenir ces informations est de coopérer avec les opérateurs eux-mêmes. Il semble donc opportun que le Comité convienne, en collaboration avec les opérateurs, des informations supplémentaires nécessaires sur le fonctionnement des composants du réseau qui peuvent être mises à disposition par ces opérateurs. Le Comité estime que la mise à disposition d'un ensemble de données minimal et bien défini est, d'une part, nécessaire pour effectuer les mesures de manière responsable et, d'autre part, potentiellement acceptable pour tous les opérateurs.³

Les mesures relevant de la diversité spatiale pourraient ne pas être réalisables avec une précision suffisante au moyen des instruments actuels de BE. Afin d'être sûr de pouvoir effectuer des mesures fiables et réalistes, le Comité estime qu'il sera probablement nécessaire d'élargir le parc d'instruments de BE. Bien que les spécifications finales de la 5G soient fixées, il n'est pas encore clair quels scénarios de déploiement seront réalisés en région Bruxelloise (p.ex. la taille d'une maille de réseau), or la stratégie de mesure optimale en dépend fortement. Toutefois, cet investissement sera certainement nécessaire dans un proche avenir.

Suggestion: Afin de ne pas retarder inutilement l'achat de nouveaux appareils, le Comité propose de constituer une provision pour cet investissement supplémentaire. Compte tenu de l'incertitude actuelle quant à la mise en œuvre pratique de la 5G, nous pouvons uniquement donner un ordre de

² IEC TR 62669 :2019 - Case studies supporting IEC 62232 - Determination of RF field strength, power density and SAR in the vicinity of radiocommunication base stations for the purpose of evaluating human exposure.

³<https://www.anfr.fr/controle-des-frequences/exposition-du-public-aux-ondes/actualites/actualite/actualites/premiers-pilotes-5g-lanfr-realise-des-mesures-exploratoires/>

grandeur du budget. Le Comité estime que le budget sera très élevé. Un investissement d'un ordre de grandeur de 500 KEUR pourrait être nécessaire.

1.3.1.2 Diversité temporelle et spectrale

Le protocole 5G a défini les modulations du signal. Les nouveaux signaux se diversifient également davantage dans le temps. Cela soulève deux problèmes :

- Les instruments devront être adaptés pour mesurer correctement les nouvelles formes de signaux.
- Les temps de mesure totaux (les temps d'intégration) devront très probablement être ajustés aussi pour tenir compte de cette incertitude supplémentaire.

Ces aspects sont développés dans le rapport technique mentionné ci-avant, IEC TR 62669:2018, mais nous encourageons BE à suivre la situation de près afin d'ancrer les connaissances nécessaires dans les protocoles de mesure.

Le Comité prend acte des efforts fournis par BE afin de participer aux activités 5G en général et aux activités concernant les mesures du niveau de rayonnement en particulier.

Suggestion: Le Comité encourage BE à continuer à participer aux activités (y compris les activités de normalisation) autour de la 5G, et à intégrer autant que possible les évolutions dans les procédures actuelles afin de rendre celles-ci aussi insensibles que possible à la 5G.

Suggestion: Le Comité est d'avis que, pour donner aux mesures de la 5G une fiabilité similaire à celle des mesures de la 4G, il faudra inévitablement augmenter les temps de mesure. Compte tenu de l'incertitude actuelle au sujet de la norme 5G, il est très difficile de faire une prévision précise concernant cette augmentation. Actuellement, nous pensons qu'il n'est pas impossible d'augmenter le temps de mesure à 30 minutes pour les mesures de « courte durée ». Ceci peut être problématique pour la réalisation des mesures de contrôle par BE.

Le Comité prend acte de l'effort fourni par BE afin d'obtenir des mesures qui soient statistiquement significatives en un temps de mesure aussi restreint que possible et encourage BE à continuer les efforts entrepris en ce sens.

Décision : Le Comité note que la 5G a maintenant atteint une étape charnière, où les standards techniques sont établis, mais où l'utilisation et les scénarios de déploiement du matériel 5G en Région Bruxelloise ne sont pas encore connus. Les organismes de contrôle doivent donc se préparer à cette nouvelle norme. La norme 5G présente une série de défis importants pour les mesures, et il semble opportun d'anticiper autant que possible les changements que ce nouveau protocole apportera pour la mesure des intensités de champ.

Le Comité encourage BE à poursuivre les efforts déjà entamés afin de pouvoir répondre aux demandes de contrôle éventuels dans le cadre d'un déploiement du réseau 5G, et ce selon les règlements qui seront décidés par le pouvoir législatif.

1.4 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 effets sur le rayonnement

Cette section résume les aspects techniques des futures technologies de communication sans fil. Elle se concentre sur la technologie 5G, qui a été normalisée récemment et mise en service dans bon nombre de pays en 2020. En Belgique également, nous voyons apparaître la première technologie 5G (utilisée dans le spectre 3G), quelques projets pilotes utilisant des licences de test de spectre 5G et le début d'un déploiement basé sur des licences provisoires (déjà concret en Flandre).

La structure de cette section est la suivante. Nous commençons par résumer la position adoptée par le Comité fin 2019 quant à l'évolution des normes en matière de rayonnement. Nous résumons et expliquons ensuite les principales conclusions de l'étude de l'IBPT de septembre 2018 sur la capacité du réseau nécessaire escomptée. Nous expliquons également comment les normes de rayonnement et la 5G influencent l'augmentation de cette capacité.

Cette section du rapport se concentre uniquement sur la capacité par rapport au rayonnement. Il convient de souligner que, outre la capacité, la 5G aura d'autres avantages technologiques (tels qu'une plus faible latence), mais nous supposons que l'influence de ces améliorations technologiques sur le rayonnement peut être négligée. À long terme, à capacité et à niveau de rayonnement similaires à ceux des réseaux actuels, la 5G aura donc certainement des avantages en matière d'innovation.

2.1 Évolution de l'ordonnance concernant les normes de rayonnement pour la Région de Bruxelles-Capitale.

Le Comité n'est pas en possession d'éléments justifiant le changement de sa position et souscrit toujours aux conclusions techniques de l'« Étude du 12 septembre 2018 concernant l'impact des normes de rayonnement bruxelloises sur le déploiement des réseaux mobiles » de l'IBPT [4] et souligne ceci :

- La norme 6 V/m ne permet pas de faire face à l'augmentation prévue du trafic de données mobiles, quelle que soit la technologie utilisée.
- Il est nécessaire de mettre en service de nouvelles bandes de fréquences pour absorber l'augmentation du trafic de données mobiles, et une augmentation des limites à 14,5 V/m est un minimum pour pouvoir déployer une nouvelle infrastructure d'antennes dans ces nouvelles bandes, laquelle générera un rayonnement supplémentaire.
- Toutefois, la limite proposée de 14,5 V/m est un minimum, seulement suffisant pour mettre en service les nouvelles fréquences, et ne permet qu'un démarrage de déploiement 5G

⁴ Étude du 12 septembre 2018 concernant l'impact des normes de rayonnement bruxelloises sur le déploiement des réseaux mobiles, <https://www.ibpt.be/operateurs/publication/etude-du-12-septembre-2018-concernant-limpact-des-normes-de-rayonnement-bruxelloises-sur-le-dploiement-des-reseaux-mobiles> - lien consulté le 8 mars 2019

minimum dans des conditions relativement similaires aux conditions de déploiement 4G qui se sont révélées insuffisantes ces dernières années.

- L'augmentation minimale proposée de la limite suppose également que les décrets d'application indiquant comment prendre en compte les spécifications de l'antenne soient modifiés afin qu'ils puissent prendre en compte les nouvelles antennes « MIMO massif » de la 5G.

D'un point de vue technique, il est judicieux de prendre en compte la norme au-dessus de 14,5 V/m et jusqu'à 41,5 V/m. Plus nous nous rapprochons de la norme européenne, plus cela garantira la capacité et la qualité des réseaux mobiles et donc aussi l'expérience utilisateur pour les clients finaux. Cela nous permettra de jouer un rôle au sein du groupe leader européen dans le déploiement des réseaux 5G.

2.2 Croissance de la capacité de données mobiles et influence sur les rayonnements et les normes

2.2.1 Croissance escomptée des données mobiles

Chaque décennie, une nouvelle génération de normes de télécommunications mobiles émerge. Le trafic de données mobiles a littéralement explosé en Belgique, passant de 3,86 milliards de mégaoctets en 2012 à 324 milliards de mégaoctets en 2019 (voir figure 1). La consommation de données mensuelle moyenne pour la Belgique reste néanmoins bien en deçà de la moyenne de l'OCDE.

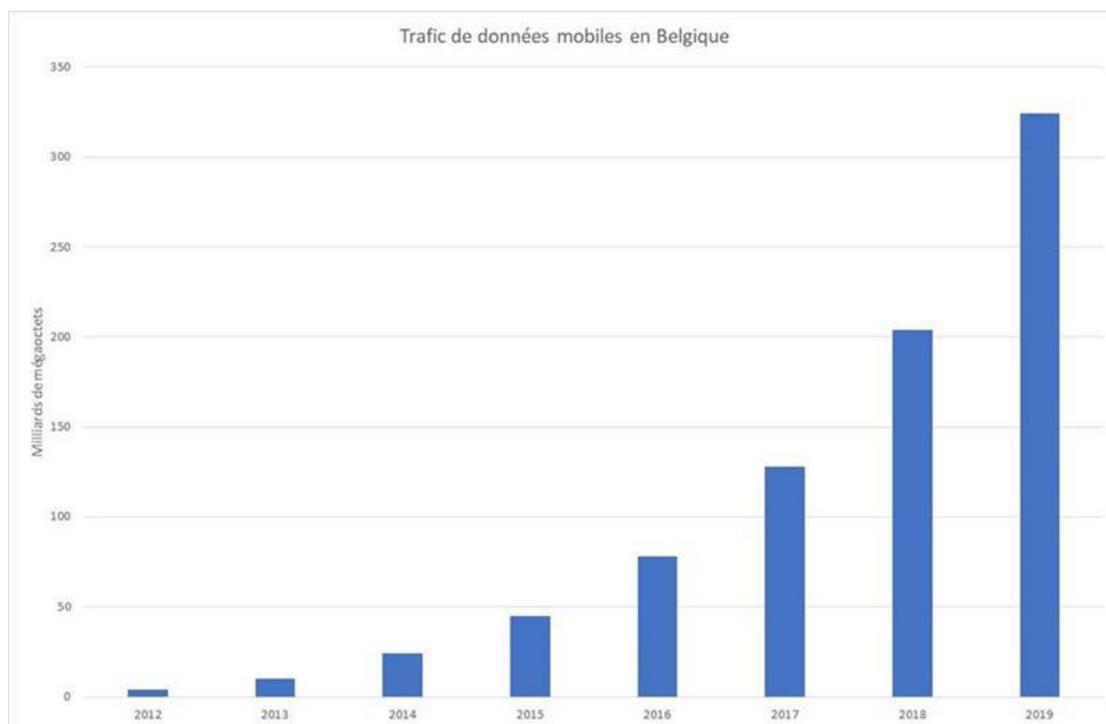


Figure 1 - Évolution du trafic de données mobiles en Belgique entre 2012 et 2017.

Cette tendance devrait se poursuivre dans les années à venir. Selon les estimations d'Ericsson, le trafic mondial de données mobiles passera à 226 exaoctets (10^{18} octets) par mois d'ici à 2026 (voir figure 2).

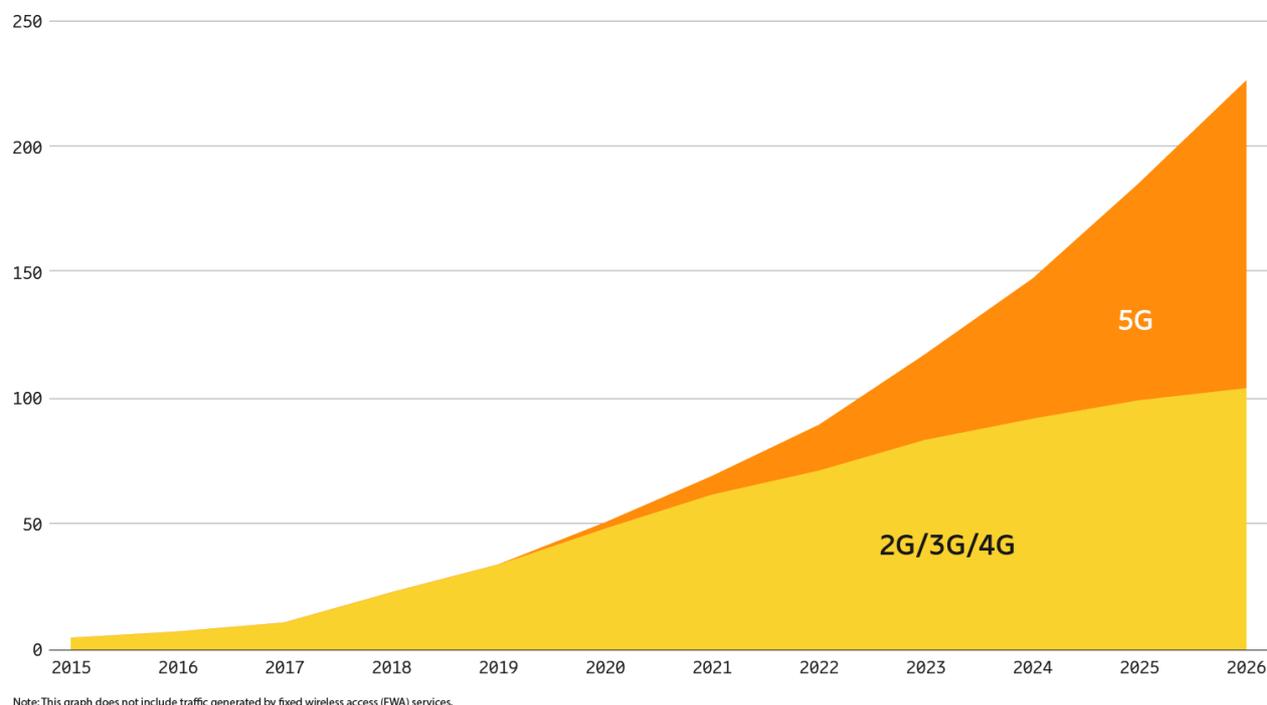


Figure 2 - Prévisions de l'évolution du trafic mondial mensuel de données mobiles en exaoctets jusqu'en 2026.

Le graphique suivant montre une estimation de l'évolution⁵ du volume total de données mobiles. La part « Individuals » comprend l'utilisation sur des appareils conventionnels (téléphone portable, smartphone, tablette...). La part « Objects » comprend les nouvelles formes de consommation (les « verticals » dans la terminologie 5G). Quelques exemples sont l'utilisation de la 5G dans les véhicules (car-to-car), les usines (processus d'automatisation), les villes intelligentes (smart cities), etc. Cette prévision couvrant une période plus longue que celle d'Ericsson, elle doit être interprétée de manière plus indicative (avec une plus grande marge d'erreur).

Toutefois, ces deux études indiquent que la tendance pour les prochaines années ou décennies sera certainement fortement à la hausse. D'une part, la 5G devrait entraîner une augmentation de la consommation de données par le public (intensification des activités en ligne, des appels vidéo, des réunions en ligne dans le cadre du télétravail, etc.). D'autre part, de nouvelles applications seront

⁵ Référence : IBPT / Capgemini

<https://www.ibpt.be/operateurs/publication/communication-du-conseil-de-libpt-du-14-avril-2020-concernant-le-rapport-de-capgemini-invent-de-mars-2020-concernant-levolution-des-donnees-mobiles-liees-au-spectre-sous-licence-en-belgique-et-limpact-sur-la-presence-des-medias>

développées, qui stimuleront davantage la croissance en raison de leur utilisation massive (par exemple, les villes intelligentes, avec le suivi automatique des places de stationnement individuelles, comme cela existe déjà dans certaines villes, la communication car-to-car, etc.).

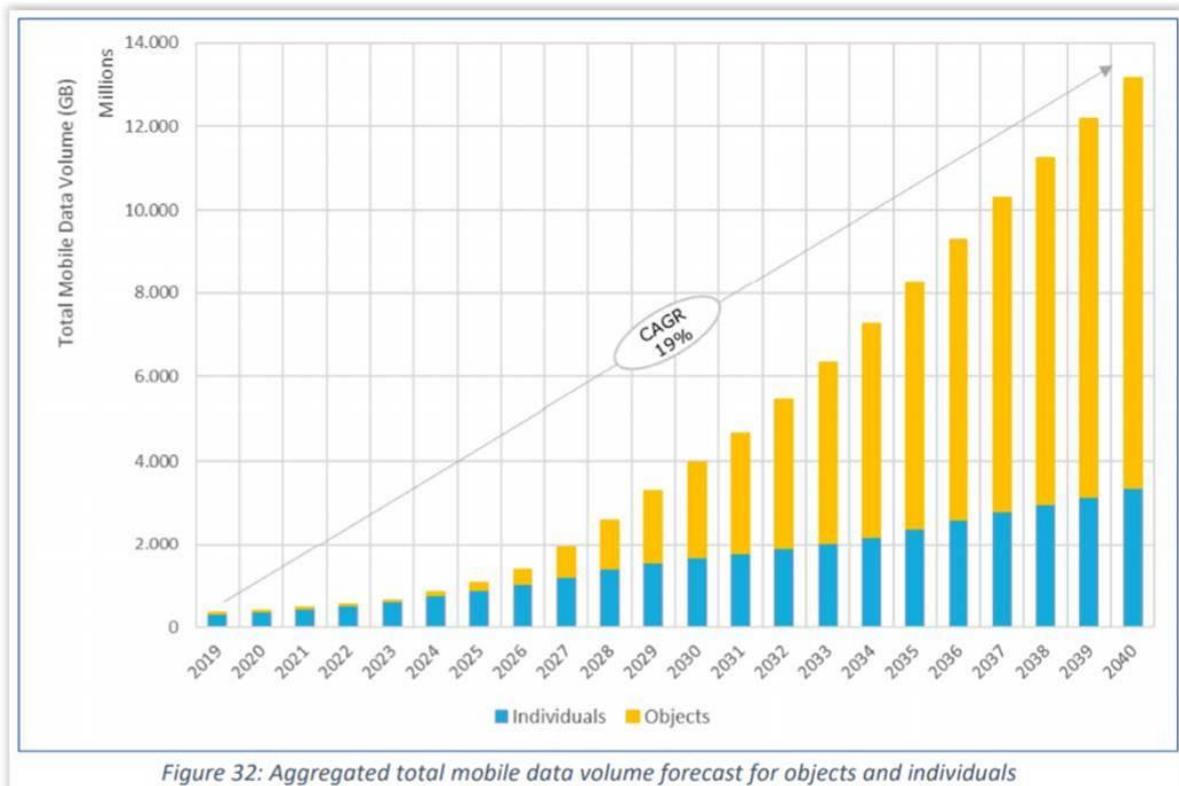


Figure 32: Aggregated total mobile data volume forecast for objects and individuals

Figure 3 : Prévision du trafic annuel total de données mobiles jusqu'en 2040.

2.2.2 Capacité d'un réseau

L'augmentation du trafic de données mobiles a inévitablement un impact sur les puissances de rayonnement des antennes des opérateurs. En effet, selon les limites de la physique fondamentale et de la théorie de communication, [6] un certain niveau d'énergie minimum est nécessaire pour transmettre un bit d'information (vocale ou données). À efficacité égale et à sites d'émission inchangés, le niveau de rayonnement des antennes est donc proportionnel au débit des données. En d'autres termes, le débit d'informations C à un endroit donné dépend directement de la puissance du rayonnement à cet endroit. Cette équation permet de calculer une estimation de la capacité d'un réseau de communication avec une puissance rayonnée P :

⁶ N. J.A. Sloane ; Aaron D. Wyner, « A Mathematical Theory of Communication », in *Claude E. Shannon: Collected Papers*, IEEE, 1993.

$$C \approx W \times n \times \log_2 \left(1 + \theta \frac{P}{WN_0} \right).$$

Il apparaît clairement qu'une augmentation de la capacité ne peut être obtenue que par une augmentation du spectre (W), du nombre d'antennes (n) ou d'une puissance rayonnée P accrue (qui peut être directement traduite en V/m à un endroit donné). θ est un facteur qui indique l'efficacité de la technologie, pour la dernière génération de 5G $\theta \approx 1$. La figure 3 montre comment cette capacité est influencée par la quantité de spectre W (figure au [5] pour les valeurs théoriques de la quantité de spectre et P). Lorsque la puissance rayonnée P est élevée, la puissance de bruit du récepteur (WNo) peut être négligée ; dès lors, la capacité est proportionnelle à la quantité de spectre W, comme représenté dans la partie gauche de la courbe de la figure 3. Lorsque la puissance rayonnée P est trop faible, le bruit (WNo) est dominant et il n'est plus possible d'augmenter la capacité simplement par l'augmentation de spectre, puisque cela générerait également plus de bruit. La courbe de croissance de la capacité s'aplatit à une valeur limite limitée par une P constante.

Cette loi fondamentale s'applique à toute technologie et l'examen théorique montre que, dans la limite, l'augmentation de la capacité doit finalement toujours être associée à une augmentation de la puissance autorisée au niveau du récepteur.

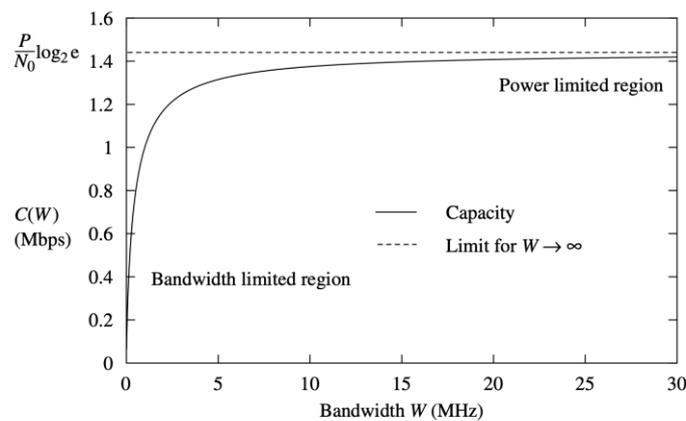


Figure 4 - Évolution de la capacité théorique en fonction de la largeur de bande W [voir D. Tse, Fundamentals of Wireless Communication, chapitre 5, Fig. 5.5.]. Lorsque la puissance est limitée (comme indiquée par la ligne en pointillés), l'augmentation de la capacité en fonction de la largeur de bande est limitée.

2.2.3 Augmentation de la capacité par le remplacement de la 2G et la 3G

Il est vrai que la disparition des technologies 2G et 3G permettra d'accroître l'efficacité spectrale pour l'utilisation d'une technologie plus efficace dans les bandes 900 MHz et 2000 Mhz (donc une technologie avec un facteur θ plus élevé). Cette augmentation de l'efficacité spectrale ne permettra cependant pas, à elle seule, de faire face à une hausse du trafic de données mobiles. D'une part, cette augmentation est limitée à deux bandes de fréquences. D'autre part, les technologies 2G et 3G ont constamment évolué et leur efficacité spectrale a déjà considérablement évolué par rapport aux déploiements initiaux. Le remplacement des technologies 2G et 3G par une technologie 5G avec le même quota de rayonnement ne suffira pas à répondre à la croissance escomptée des données.

De plus, la 3G ne pourra être abandonnée que lorsque le nombre de smartphones non compatibles avec la 4G sera devenu marginal. L'arrêt potentiel de la 2G créera encore plus de problèmes en raison du nombre élevé de clients M2M utilisant des modems 2G et du nombre important de téléphones mobiles 2G dans notre pays. En outre, les rayonnements produits par les réseaux 2G et 3G actuels devront, si ces derniers sont progressivement supprimés, être remplacés par des rayonnements produits par un autre réseau. Dans tous les cas, l'abandon combiné de la 2G et de la 3G avant le déploiement de la 5G n'est pas réaliste.

Sur le plan technique, nous pouvons avancer que, sans l'adaptation des normes de rayonnement bruxelloises qui pourrait être envisagée par le régulateur, le trafic de données mobiles ne pourra pas continuer à croître, peu importe la ou les technologie(s) déployée(s).

À plus long terme, il s'avère également que la 5G ($\theta \approx 1$) frôle le maximum théorique que l'on peut obtenir à partir d'une quantité de spectre et d'une puissance données.

2.2.4 5G : capacité et rayonnement

La technologie mobile de cinquième génération (5G), déjà partiellement utilisée, aura pour effet non seulement de porter les volumes et débits de données à 20 GBits/s comme capacité de pointe et 100 MBits/s pour chaque utilisateur, mais aussi de numériser et d'interconnecter des secteurs économiques et sociaux (jusqu'à 1.000.000 objets par kilomètre carré) [7]. Ces secteurs sont appelés « verticals » (verticaux) dans la terminologie 5G. Il s'agit notamment de l'industrie automobile, des services de sécurité, du secteur de l'énergie, du secteur de la santé et des médias. La 5G va donc plus loin en matière de rayonnement et de capacité, mais dans cette partie du rapport, nous abordons uniquement le rayonnement.

La 5G sera déployée en deux phases, la première se concentrant sur le spectre en dessous de 6 GHz. La seconde phase intégrera les bandes mmWave. Une consultation de l'IBPT a mis en lumière qu'il

⁷M.2083:IMT Vision - «Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond»

n'est actuellement pas question de spectre mmWave et de 5G en Belgique [8]. Sauf contre-indications, le déploiement ne se fera probablement qu'après 2025.

La première phase et la technologie nécessaire au déploiement de la 5G (voir demande de capacité section 2.1.2) utiliseront une multitude d'antennes qui concentreront davantage leur énergie qu'une antenne classique pour la 2G, la 3G ou la 4G. Il en résultera une plus grande exposition à la puissance. En effet, le système « MIMO massif » (Multiple Input Multiple Output), qui utilisent plusieurs antennes pour couvrir un même secteur d'antennes, permettra d'augmenter le débit par utilisateur et d'optimiser la qualité du signal aux endroits où la couverture est difficile. Avec ces deux technologies, la puissance sera plus focalisée, générant ainsi, outre des impulsions ou des pics de temps et de fréquence, des pics spatiaux contrôlés dans le diagramme de rayonnement.

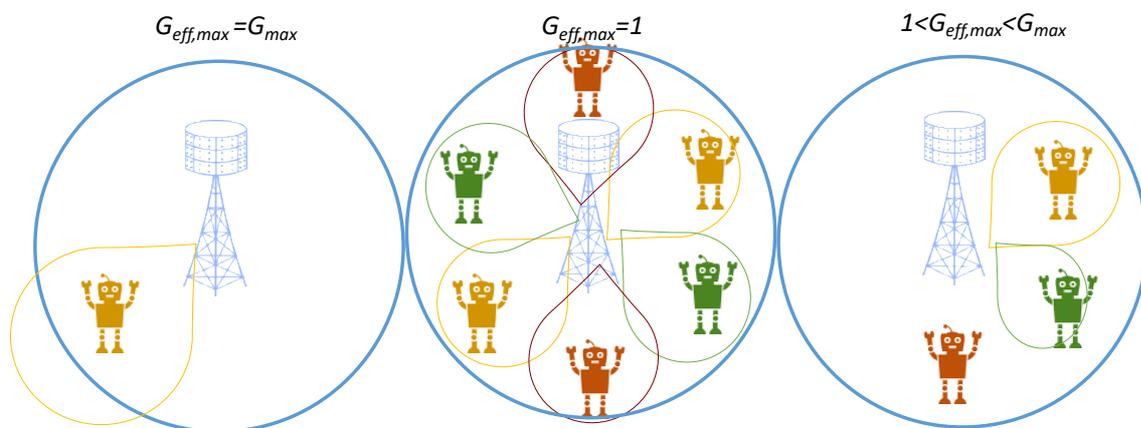


Figure 5 : Illustration de la focalisation de la puissance sur plusieurs utilisateurs dans le contexte du « MIMO massif ». Le schéma de gauche illustre le scénario le plus extrême, où le pire rayonnement effectif de l'antenne $G_{eff,max}$ est égal au G_{max} , parce que toutes les antennes se concentrent pour générer un « array gain » ou un gain de puissance pour 1 utilisateur. Il en résulte que la plupart des positions dans la cellule bénéficient d'un rayonnement plus faible (<). Le schéma central illustre le scénario où la puissance est répartie uniformément, l'objectif étant cette fois de générer différents signaux différents pour différents utilisateurs afin de mieux profiter de la capacité totale. Ici, $G_{eff,max} = 1 < G_{max}$, et il n'y a pas de différence de rayonnement entre une antenne isotrope et une cellule 5G. Ce scénario est toutefois irréaliste car tous les utilisateurs sont répartis uniformément dans la cellule. Dans un scénario type, on peut raisonnablement s'attendre à ce que certains utilisateurs reçoivent plus de puissance, avec une valeur $1 < G_{eff,max} < G_{max}$ à déterminer pour l'antenne active spécifique. Une nouvelle méthode de calcul est nécessaire pour correctement estimer $G_{eff,max}$.

Ce concept est illustré de façon très simplifiée à la figure 4. Ici, il est clair que la puissance d'une cellule n'est plus répartie sur tous les utilisateurs, mais qu'elle est dirigée vers l'utilisateur à qui les signaux sont effectivement destinés. En 5G, la capacité totale du réseau peut alors être augmentée en envoyant simultanément différents signaux à plusieurs utilisateurs. Cette technologie est un système MIMO massif multi-utilisateurs [9] et c'est cette variante du MIMO massif qui est nécessaire pour obtenir les effets de capacité souhaités. Dans la réalité, c'est donc un scénario proche de celui représenté dans le schéma central de la figure 4 qui est le plus probable, mais avec des utilisateurs répartis de façon moins uniforme. Le modèle de rayonnement effectif dépend de la répartition des utilisateurs dans l'espace, de leurs besoins en données, de l'environnement et de l'algorithme de la

⁸ <https://www.ibpt.be/operateurs/publication/consultation-concernant-lutilisation-de-la-bande-26-ghz-pour-la-5g>

⁹ X. Gao, O. Edfors, F. Rusek et F. Tufvesson, « Massive MIMO Performance Evaluation Based on Measured Propagation Data, » in *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 14, no. 7, pp. 3899-3911, juillet 2015.

station de base. Les mesures figurant dans [10] illustrent comment la position des utilisateurs influence le rayonnement, pour un scénario en intérieur. Il est clair qu'un scénario avec uniquement 1 utilisateur actif ou 2 utilisateurs actifs sur un même rayon par rapport à l'antenne entraîne la plus grande exposition. Lorsque plusieurs utilisateurs sont actifs autour de la station de base, les niveaux de rayonnement mesurés sont toujours inférieurs. Même lorsque seuls deux utilisateurs sont actifs sur un rayon différent, le rayonnement effectif sera largement inférieur au G_{max} .

Pour le déploiement de la 5G, il est impératif que la méthode de calcul, fixée dans les arrêtés d'exécution, soit adaptée afin de prendre en compte les antennes « MIMO massif ». Cette exigence vaut aussi bien pour la Région de Bruxelles-Capitale que pour les Régions flamande et wallonne.

2.3 Conclusion

La 5G est nécessaire pour répondre à la demande croissante de plus de capacité. La 5G apporte un certain nombre d'innovations techniques qui permettent de continuer à répondre à la demande de capacité. Cependant, il est pour cela essentiel de pouvoir augmenter la quantité de spectre (W), le nombre d'antennes (n) et, à terme, la puissance rayonnée (et donc le champ autorisé).

Afin d'exploiter au mieux l'augmentation de la quantité de spectre (W) et du nombre d'antennes (n), la 5G offre plusieurs nouvelles technologies :

- La technologie MIMO massif permet d'utiliser la grande quantité de spectre à plus hautes fréquences ($W= 100$ MHz pour les nouvelles licences), mais cela ne peut fonctionner de manière optimale que si la puissance rayonnée P peut également augmenter au moins proportionnellement, afin de maintenir un bon rapport P/WNo .
- La MIMO massif permet d'installer plusieurs antennes au même endroit (n), mais ces antennes actives nécessiteront une modification de la méthode de calcul qui ne suppose pas de G_{max} .

¹⁰ Loh, Tian Hong & Heliot, Fabien & Cheadle, David & Fielder, Tom. (2020). An Assessment of the Radio Frequency Electromagnetic Field Exposure from A Massive MIMO 5G Testbed.

3 Les effets sur la santé

3.1 Introduction

La 5G est la prochaine génération de réseaux mobiles introduite par l'industrie des communications électroniques, des équipements sans fil et les organismes de normalisation. Elle correspond aux exigences de l'Union internationale des télécommunications (UIT) appelée "IMT-2020", qui définit les principales catégories de performances que ces nouvelles technologies permettront d'atteindre. Cette nouvelle technologie mobile devrait permettre de fournir des services de haute qualité tels que des réseaux mobiles à haut débit, à faible latence, efficaces et fiables.

En 2016, la Commission européenne a lancé un plan d'action visant à définir un calendrier européen commun pour le lancement des premiers réseaux 5G. L'objectif est de libérer et d'attribuer des fréquences dites "pionnières" pour la 5G (700 MHz, 3,5 GHz et 26 GHz) afin de pouvoir lancer des services commerciaux 5G dans chaque pays de l'Union européenne avant la fin de cette année 2020.

L'effet sur la santé humaine des ondes dans la bande 3,5 GHz peut être similaire à celui de la 4G, la 5G pouvant alors utiliser les stations de base existantes. En revanche, dans la bande 26 GHz, l'interaction des ondes avec le corps humain est différente et les stations de base devront être installées plus près, en champ proche. Par conséquent, les usages et schémas d'exposition seront différents et les effets à long terme de la 5G sur la santé humaine ne sont pas établis car ils ont été peu étudiés.

Théoriquement, plus la fréquence d'une onde électromagnétique est élevée, plus sa longueur d'onde est courte et plus l'énergie est importante. Dans la gamme des champs électromagnétiques, incluant les fréquences de la 5G, cette énergie reste largement inférieure à celle susceptible de « casser » des liaisons chimiques ou d'ioniser la matière vivante. Ce sont donc des rayonnements non-ionisants.

En termes d'interaction avec le vivant, cette augmentation de l'énergie entraîne un échauffement des tissus à des niveaux d'exposition plus faibles que les fréquences des générations précédentes, mais toujours au-delà d'un certain niveau de champs en termes de puissance. Ce sont donc encore les effets thermiques qui sont à l'origine des effets sanitaires connus des fréquences jusqu'à 300 GHz. Les organismes de régulation ont fixé des normes et des limites qui permettent de protéger la population contre ces effets thermiques (ICNIRP, 2020). Ainsi, une exposition en dessous des valeurs réglementaires n'entraînerait pas d'échauffement des tissus et donc pas de danger pour la santé.

En termes d'absorption de la puissance des champs électromagnétiques aux fréquences « hautes » de la 5G, et selon l'ICNIRP à partir de 6 GHz, elle diffère de celle observée aux fréquences des générations précédentes car elle devient superficielle. En effet, plus la fréquence est élevée, plus la longueur d'onde est courte et plus la profondeur de pénétration est faible. Les interactions se produisent ainsi uniquement en surface (Voir figure 1).

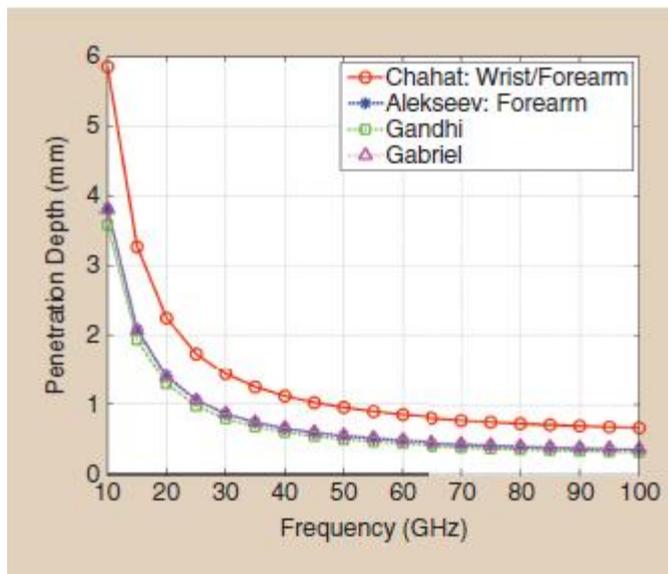


Figure 1 : Profondeur de pénétration dans la peau humaine, en fonction de la fréquence d'exposition (d'après Wu et al., 2015)

La notion de débit d'absorption spécifique qui représente l'absorption de la puissance radiofréquence en profondeur dans le corps (W/kg) n'est donc plus adaptée. Le paramètre d'intérêt biologique devient la densité de puissance absorbée sur la surface, exprimée en W/m^2 . Ainsi, la limite d'exposition pour le public est de $10 W/m^2$ ou $1 mW/cm^2$.

Malgré l'existence des limites d'exposition basées sur des données scientifiques et réputées protéger toute la population, la question des effets sanitaires à long terme (effets athermiques s'ils existent) de cette nouvelle technologie, et plus généralement des technologies de communication sans fil, alimente les inquiétudes et les interrogations du public. L'une des préoccupations concerne notamment les fréquences les plus élevées au-delà de 6 GHz.

3.2 Etat de l'art

Notre revue de bibliographie s'est basée en partie sur le rapport préliminaire de l'ANSES (2019) et sur une revue effectuée 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.

3.2.1 Fréquences autour de 3,5 GHz

Très peu d'équipes ont pour l'instant étudié l'effet des radiofréquences à cette fréquence précise.

Une première étude expérimentale a été réalisée par Hamnerius et al., (1985). Les auteurs ont analysé le pouvoir mutagène de pulses de 3,1 GHz (DAS de 60 ou de 90 W/kg). Deux modèles biologiques ont été utilisés : des bactéries Salmonelle pour effectuer un test d'Ames et 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. Dans aucun de ces modèles, les auteurs n'ont trouvé un effet mutagène significatif de l'exposition.

Une seconde étude a été réalisée par une équipe chinoise (Wu et al., 2012). Les auteurs ont exposé des cellules de Sertoli associées à des spermatogonies et des spermatoctes. Les cellules cultivées *in vitro* ont été exposées à des fréquences de la bande S (soit entre 2 et 4 GHz, sans plus de précision donnée) et à une densité de puissance de 100 mW/cm². L'effet thermique potentiellement induit par une telle puissance n'a pas été quantifié, ce qui limite la portée de cette étude. Les auteurs décrivent une augmentation de la production de cytokines par les cellules de Sertoli et une augmentation de la mort cellulaire des cellules germinales.

Une troisième étude a exploré les effets des micro-ondes pulsées de forte puissance sur le mélanome (G361 et SK-Mel-31) et des cellules normales de fibroblastes dermiques humains (NHDF) (Mumtaz et al., 2020). L'exposition se déroulait sous une fréquence dominante de 3,5 GHz. La viabilité des cellules, le taux de prolifération, l'apoptose, la mort des cellules, l'activité métabolique et l'absence d'oxygène ont été évaluées après l'exposition à des doses faibles et élevées. L'exposition aux micro-ondes a augmenté la viabilité et le taux de prolifération des deux lignées cellulaires de mélanome de manière dose-dépendante, alors qu'aucun effet significatif sur les cellules fibroblastes n'a été observé. Les auteurs parlent d'exposition à forte puissance, mais la dosimétrie dans cette étude n'a pas été réalisée. Ceci jette un discrédit sur la fiabilité de cette étude en termes d'analyse du risque.

Une autre étude présente un système d'exposition pour des embryons de poisson-zèbre ([Dasgupta et al., 2020](#)). Six heures après la fécondation, les embryons ont été exposés à 3,5 GHz, pendant 42 heures. Les auteurs ont utilisé un DAS élevé de 8,27 W/kg, mais aucune élévation de température n'a été mesurée dans l'eau où baignaient les embryons. Les résultats n'ont révélé aucun impact significatif sur la mortalité, la morphogénèse ou la réponse photomotrice. Par contre, les auteurs trouvent une très légère baisse de la réponse de sursaut à un signal sonore, ce qui, d'après eux, suggère une possible perturbation sensori-motrice.

3.2.2 Fréquences de 6 à 30 GHz

C'est dans cette gamme de fréquences que se trouvent les bandes autour de 26 GHz qui seront utilisées par la 5G dans un avenir proche. Trois études seulement ont investigué les fréquences de 6 à 30 GHz. Il faut noter que ces études utilisent des niveaux de puissance élevés, 5 à 10 000 fois supérieurs aux normes autorisées. On est donc loin de situations représentatives d'une exposition environnementale.

Dans la première étude ([Kojima et al., 2015](#)), les auteurs ont étudié les élévations de température oculaire dans les yeux de lapins exposés à différentes fréquences (18 à 40 GHz) et pour une densité de puissance de 200 mW/cm². L'élévation de température oculaire dépend de la fréquence (elle est plus forte à 40 GHz, plus faible à 18 GHz et intermédiaire à 22 et 26,5 GHz). A cette forte puissance, la chaleur induite par exposition est transmise non seulement à la cornée mais également au cristallin.

Dans la deuxième étude ([Nguyen et al., 2016](#)), les résultats ont démontré que l'exposition à un signal de 18 GHz induisait la perméabilité cellulaire dans les cellules procaryotes et des cellules de levure. Cette perméabilité se fait avec un taux d'absorption spécifique (DAS) de 3 kW/kg et 5 kW/kg par exposition, selon le type de cellule.

Pour la dernière étude ([Franchini et al., 2018](#)), l'objectif est d'évaluer les effets génotoxiques et cellulaires potentiels associés à l'exposition *in vitro* de fibroblastes fœtaux et adultes humains à des rayonnements micro-ondes à la fréquence de 25 GHz (DAS = 20 W/kg). À cette fin, plusieurs paramètres génétiques et biologiques ont été évalués. Les résultats obtenus par le test des comètes, la phosphorylation de l'histone H2AX et la fréquence des micronoyaux négatifs de l'anticorps antikinétochore (CREST) ont exclu les dommages directs à l'ADN dans des fibroblastes fœtaux et adultes humains exposés aux micro-ondes. Aucune induction de l'apoptose ni aucune modification des protéines de signalisation de la pro-survie n'ont été détectées. Par contre, l'analyse CREST a montré pour les deux lignées cellulaires une augmentation du nombre total de micronoyaux et de micronoyaux positifs au centromère dans les échantillons exposés, ce qui indique une induction de l'aneuploïdie due à la perte de chromosomes.

3.2.3 Fréquences millimétriques entre 30 GHz et 70 GHz

Cette gamme de fréquences fait partie de la famille des ondes millimétriques. Concernant ces fréquences, de nombreuses études ont été menées (environ 200). A cela 2 principales raisons : 1) l'effet thermique de certaines fréquences ont été analysées dans le cadre d'applications radars ; 2) les ondes millimétriques ont des applications thérapeutiques et des bandes autour de 35, 42, 51 et 60 GHz ont été explorées dans ce cadre.

Sans rentrer dans le détail de ces nombreuses études, il ressort que les ondes millimétriques, bien que peu pénétrantes dans l'organisme, sont capables à très fortes puissances (75 mW/cm² sur le corps entier par exemple) d'induire des hyperthermies pouvant aller jusqu'à la mort des animaux modèles.

Des applications thérapeutiques ont été développées dans les pays d'Europe de l'est (en ex-URSS) et en Chine. Les ondes millimétriques ont été utilisées seules ou en association avec d'autres traitements, et elles ont donné des résultats cliniques prometteurs dans la guérison de diverses maladies, telles que les ulcères, la douleur, les maladies cardiovasculaires, la cicatrisation des plaies, l'asthme bronchique, les troubles cutanés ou les cancers. Il est important de noter que dans ce cadre thérapeutique, les densités de puissance utilisées tournent autour de 10 à 15 mW/cm², ce qui génère une légère augmentation de la température (jusqu'à 1-2 °C) à l'endroit où la peau est exposée. Par conséquent, les effets décrits dans le cadre de ces études ne peuvent pas être classés comme purement non thermiques et ils ne peuvent pas être extrapolés pour analyser les effets potentiels de ces ondes dans un cadre environnemental concernant la 5G. D'un point de vue physiologie, ces études ont analysé les effets inflammatoires, les modifications dans la température de la peau, les rythmes cardiaques, la tension artérielle, les activités électriques des neurones et les analyses électroencéphalographiques. Au niveau cellulaire et moléculaire, l'expression des gènes, le stress oxydatif, et l'induction d'apoptose cellulaire ont été investigués. Les résultats, variés et parfois contradictoires, ont déjà été commentés dans le précédent rapport.

Il faut noter que peu d'études ont utilisé des densités de puissance représentatives de celles pouvant être utilisées en télécommunication. Pour exemple, si on regarde la cinquantaine d'articles publiés ces 5-6 dernières années, seules 8 études peuvent être retenues comme entrant dans le cadre d'une analyse des risques sanitaires chez l'Homme, car ayant utilisé des densités de puissance égales ou inférieures à la norme en vigueur (1 mW/cm²).

Deux articles issus de la même équipe ([Koyama et al., 2014](#) & [Koyama et al., 2016](#)), décrivent l'impact d'une exposition à 60 GHz et 1 mW/cm² sur des lignées épithéliales dérivées de l'œil humain. Après 24 h d'exposition, les auteurs n'ont pas mis en évidence de stress génotoxique (sur la base du test des comètes et du test des micronoyaux). De plus, aucune surexpression de protéines de stress (HSP27, HSP70 et HSP90) n'a été détectée.

[Le Quement et al., \(2014\)](#) ont étudié les effets des ondes millimétriques de 60,4 GHz sur le stress du réticulum endoplasmique. Des lignées cellulaires de peau humaine ont été exposées à des densités de puissance incidente croissantes, allant de 1 à 20 mW/cm². Les résultats ne montrent aucun effet de l'exposition aux plus faibles puissances (notamment à 1 mW/cm², qui correspond à la limite d'exposition maximale pour le grand public). Par contre, à 20 mW/cm², l'exposition inhibe la surexpression des protéines chaperon BIP et ORP150 induite par un stress cellulaire. Des contrôles ont montré que cette inhibition est liée à l'effet thermique résultant de l'exposition à ces fortes puissances.

Une équipe américaine a analysé les effets d'une irradiation de faible intensité (1, 2 ou 4 mW/cm²) à 60 GHz sur des neurones individuels de sangsue ([Romanenko et al., 2014](#)). L'activation du potentiel d'action des neurones est modeste à 1 et 2 mW/cm² et il est plus important à 4 mW/cm². Cette activation ne peut pas être complètement minée par le contrôle thermique effectué par les auteurs, ce qui laisse supposer un effet spécifique des ondes millimétriques.

Au Japon, des chercheurs ont examiné la longueur moyenne des neurites de cellules PC12VGn exposées à 60 GHz avec une densité de puissance moyenne de 1 mW/cm² ([Shiina et al., 2014](#)). Dans ces conditions, aucun effet significatif de l'exposition n'a été observé sur la croissance des neurites. Ces résultats ont été confirmés par une autre équipe ([Haas et al., 2016](#)), qui a utilisé des densités de puissance plus importantes (10 mW/cm², à 60,4 GHz).

[Volkova et al., \(2014\)](#) ont réalisé une étude *in vitro* (42,25 GHz et 0,03 mW/cm²) sur des spermatozoïdes humains ayant subi une cryopréservation. Les auteurs ont observé une augmentation de la motilité après 15 min d'exposition, sans modification de l'intégrité des membranes ou de l'état de la chromatine.

[Gapeyev et Lukyanova \(2015\)](#) ont regardé l'effet protecteur des ondes de 42,2 GHz (0,1 mW/cm²) vis-à-vis des dommages à l'ADN. Sur un modèle de leucocytes murins, les auteurs montrent qu'une pré-exposition aux ondes millimétriques protège les cellules d'une agression par un autre agent génotoxique (agent alkylant, H₂O₂ ou rayons X). Cet effet protecteur, appelé effet adaptatif, a également été montré dans le domaine des radiofréquences, mais les mécanismes restent à élucider.

[Chuyan et Tribat \(2016\)](#) ont regardé l'impact d'une exposition à 42,25 GHz sur la circulation sanguine périphérique chez l'Homme. Des mesures effectuées avec un débitmètre laser à effet Doppler ont permis de voir que des expositions multiples à une densité de puissance de 0,1 mW/cm² augmentait la microcirculation cutanée.

3.3 Conclusions

Les études ciblant précisément les 2 fréquences émergentes de la 5G (3,5 et 26 GHz) sont très peu nombreuses. De plus, celles qui ont été publiées ont utilisé des niveaux de champs très élevés comparés aux normes en vigueur dans le domaine des télécommunications. Ces études ne peuvent donc pas donner une image précise des effets potentiels d'une exposition à la 5G.

Avec la bande de fréquences autour de 26 GHz, beaucoup de personnes se sont appuyées sur les études réalisées en millimétriques pour demander un moratoire sur la 5G. Bien que proches, les ondes millimétriques sont de plus hautes fréquences que le 26 GHz. Pour les ondes millimétriques, la littérature est plus abondante, mais pas forcément centrée sur l'analyse du risque car la plupart de ces études porte sur la recherche de mécanismes pouvant expliquer les effets thérapeutiques de ces ondes. Ceci peut apporter de la confusion pour quiconque n'est pas familier avec le domaine. On a ainsi vu la publication de revues de synthèse, écrites par des personnes n'ayant jamais travaillé dans le domaine du bioélectromagnétisme, et qui amalgament tous les effets biologiques publiés, sans jamais les trier en fonction des niveaux d'exposition utilisés (Russel, 2018 ; Di Ciala, 2018 ; Kostoff et al., 2020). Ces publications portent un message alarmiste qui n'a sans doute pas lieu d'être car ces effets sont obtenus avec des densités de puissance 10 à 20 fois supérieures aux limites autorisées pour le grand public. A cette puissance, des effets thermiques sont envisageables, même si tous les auteurs n'ont pas fait les contrôles pour le vérifier. D'ailleurs, il est intéressant de noter que quelques études ont montré que les effets qu'ils observaient étaient purement thermiques et qu'ils pouvaient être mimés par un chauffage conventionnel (Bush et al., 1981 ; Sypniewska et al., 2010 ; Le Qument et al., 2014 ; Habauzit et al., 2014 ; Vlasova et al., 2018).

Du point de vue de l'analyse du risque sanitaire, on peut penser que les fréquences basses de la 5G (700 MHz et 3,5 GHz) ne changeront rien à la situation actuelle où prédominent la 3G et la 4G. Par contre, l'utilisation de fréquences autour de 26 GHz peut changer la donne, car l'énergie de ces ondes sera principalement absorbée par la peau, et ne pénétrera plus aussi profondément dans le corps (Wu et al., 2015). Ainsi, on peut espérer que cette faible pénétration va augmenter la sécurité. Pour l'instant, le seul doute persistant vis-à-vis des effets sanitaires éventuels concerne le sur-risque éventuel d'avoir un cancer du cerveau pour les gros utilisateurs de téléphonie mobile. Avec la diminution du pouvoir pénétrant des ondes, le cerveau ne sera plus une cible directe de ces ondes.

En termes de recherche expérimentale, il sera néanmoins intéressant de vérifier qu'un dépôt d'énergie plus important au niveau de la peau ne peut pas générer un « signal » cellulaire et entraîner une réponse au niveau de l'organisme. La peau n'est pas un organe isolé et il communique avec les autres tissus du corps, via la circulation sanguine et le système nerveux périphérique. La possibilité d'une réponse systémique a été avancée pour expliquer les effets hypoalgésiques des ondes millimétriques. Cette réponse semble nécessiter un effet thermique au niveau de la peau (Radziewsky et al., 2004), donc il y a peu de chance que cela

puisse aussi avoir lieu en condition athermique. Néanmoins, ce point n'a pas encore été sérieusement investigué et il faudra que les recherches futures s'intéressent à cette hypothèse.

Il nous faut ici rappeler que la recherche en bioélectromagnétisme est une recherche pluridisciplinaire exigeante qui nécessite d'une part, d'étroites relations entre physiciens et biologistes et d'autre part, d'inclure de nombreux contrôles dans les protocoles. Pour être éligible dans une analyse du risque collective, objective et rigoureuse, une étude expérimentale doit comporter *a minima* : une caractérisation de l'exposition des échantillons (dosimétrie), un contrôle d'exposition (exposition sham), un contrôle de température et une analyse des données en aveugle (sans connaissance du statut d'exposition de l'échantillon), ce qui prévient les principaux biais dans les résultats (Simkó et al. 2016).

En termes de recherche épidémiologique, la seule étude de cohorte *prospective* à grande échelle, dédiée aux expositions radiofréquences qui existe est l'étude européenne Cosmos (<http://www.thecosmosproject.org/>). Cosmos mobilise 6 pays européens et assure le suivi de près de 300 000 personnes pour des pathologies chroniques (cancer, cardio-vasculaires, neurologiques) et un panel de symptômes ressentis (céphalées, acouphènes, ...). Il apparaît important de soutenir financièrement cette étude internationale pour lui permettre d'être pérenne, avant d'envisager d'autres études. En effet, la 5 G va être incluse dans les sources d'exposition de Cosmos ; l'évaluation des expositions 5G pose des questions complexes et va nécessiter des ressources humaines supplémentaires.

Enfin, des mesures de l'exposition du public à la 5G seront nécessaires pour déterminer à quelle puissance le public sera exposé et dans quelle mesure la 5G va augmenter l'exposition moyenne du public. Une étude préliminaire a été réalisée récemment en Corée du sud (Rapport CETIM, décembre 2019). Le choix de la Corée du sud est dû au fait qu'il dispose de la plus grande maturité en termes d'utilisateurs et de couverture. Dans cette étude, des mesures expérimentales de l'exposition aux champs électromagnétiques ont été effectuées pour déterminer la contribution de la 5G par rapport à d'autres fréquences telles que la 2G, la 3G et la 4G. Les résultats de l'étude ont montré que l'émission de la 5G représente environ 15 % du niveau global. Le niveau le plus élevé a été observé à proximité de l'antenne et reste inférieur aux limites fixées par l'ICNIRP.

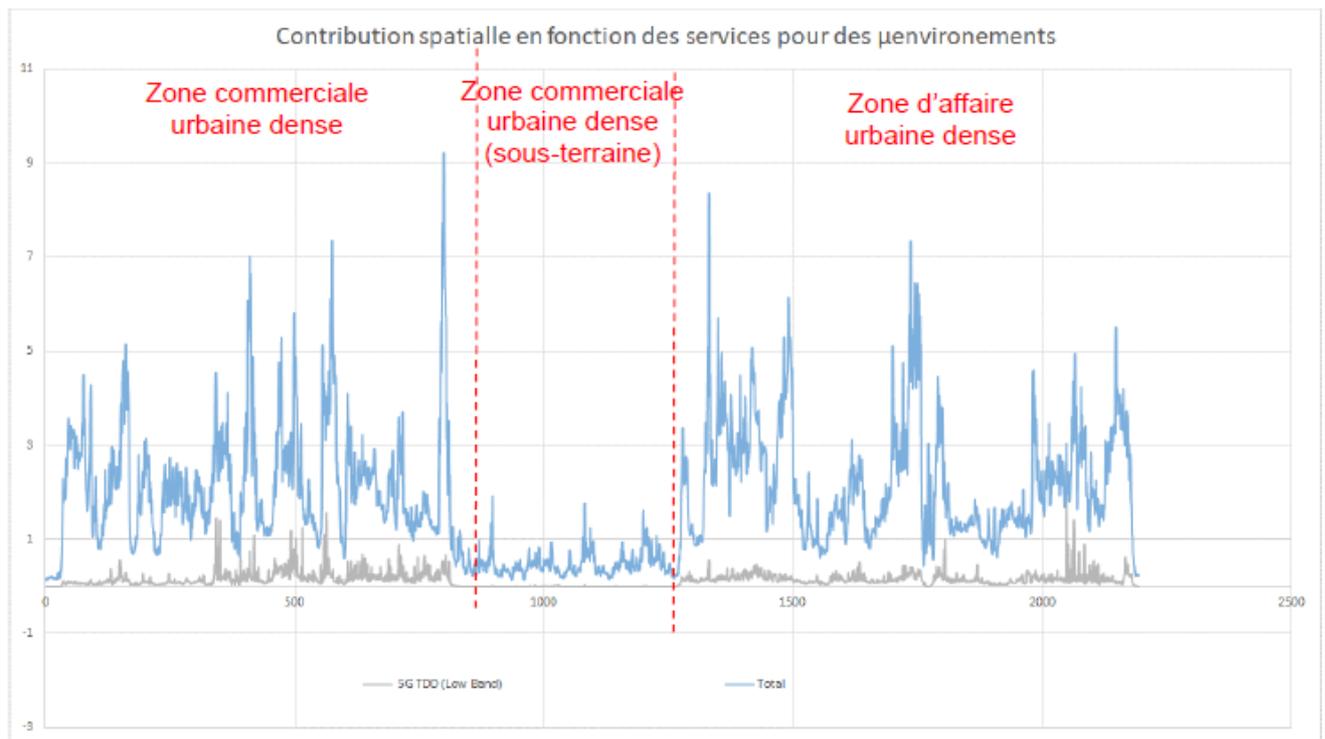


Figure 2 : Comparaison du champ électrique [V/m] de la 5G TDD (bande basse grise) par rapport au cumul des différents services aux différentes fréquences

3.4 Références

ANSES, 2019. Rapport préliminaire sur l'Exposition de la population aux champs électromagnétiques liée au déploiement de la technologie de communication « 5G » et effets sanitaires associés.

Bush, L.G.; Hill, D.W.; Riaz, A.; Stensaas, L.J.; Partlow, L.M.; Gandhi, O.P.,1981. Effects of millimeter-wave radiation on monolayer cell cultures. III. A search for frequency-specific athermal biological effects on protein synthesis. *Bioelectromagnetics*, 2, 151–159.

Chuyan, E. N., et N. S. Tribat. 2016. Changes in effector function of sensory peptidergic perversascular fibers after multiple exposures to low-intensity millimeter radiation. *Human Physiology* 42 (4):438-443.

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. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0235869>

Di Ciaula, A. 2018. Towards 5G communication systems: Are there health implications? *Int J Hyg Environ Health* 221 (3):367-375

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., Giovenale, E., Ravera, G., Bei, R., Benvenuto, M., Modesti, A., Masuelli, L. and Lista, F., 2018. Genotoxic Effects in Human Fibroblasts Exposed to Microwave Radiation. *Health Physics*, 115(1), pp.126-139.

- Gapeyev, A. B., et N. A. Lukyanova. 2015. Pulse-modulated extremely high-frequency electromagnetic radiation protects cellular DNA from the damaging effects of physical and chemical factors in vitro. *Biophysics* 60(5):732-738.
- Haas, A. J., Y. Le Page, M. Zhadobov, R. Sauleau, et Y. Le Drean. 2016. Effects of 60-GHz millimeter waves on neurite outgrowth in PC12 cells using high-content screening. *Neurosci Lett* 618:58-65.
- Habauzit, D., C. Le Quement, M. Zhadobov, C. Martin, M. Aubry, R. Sauleau, et Y. Le Drean. 2014. Transcriptome analysis reveals the contribution of thermal and the specific effects in cellular response to millimeter wave exposure. *PLoS ONE* 9 (10):e109435
- Hamnerius, Y., A. Rasmuson, et B. Rasmuson. 1985. "Biological effects of high-frequency electromagnetic fields on *Salmonella typhimurium* and *Drosophila melanogaster*." *Bioelectromagnetics* 6 (4):405-14.
- ICNIRP 2020. Guidelines for Limiting exposure to electromagnetic fields (100 kHz to 300 GHz). *Health Physics*. Vol 118(5), 483-524
- Kojima, M., Y. Suzuki, C. Y. Tsai, K. Sasaki, K. Wake, S. Watanabe, M. Taki, Y. Kamimura, A. Hirata, K. Sasaki, et H. Sasaki. 2015. "Characteristics of ocular temperature elevations after exposure to quasi- and millimeter waves (18-40 GHz)." *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves* 36 (4):390-399.
- Kostoff RN, Herouxb P, Aschnerc M, Tsatsakisd M. 2020. Adverse health effects of 5G mobile networking technology under real-life conditions. *Toxicology Letters* 323: 35–40
- Koyama, S., E. Narita, Y. Shimizu, Y. Suzuki, T. Shiina, M. Taki, N. Shinohara, J. Miyakoshi. 2016. Effects of long-term exposure to 60 GHz millimeter-wavelength radiation on the genotoxicity and heat shock protein (HSP) expression of cells derived from human eye. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 13 (8).
- Koyama, S., E. Narita, Y. Suzuki, T. Shiina, M. Taki, N. Shinohara, et J. Miyakoshi. 2014. Effects of long-term exposure to 60 GHz millimeter-wave on genotoxicities in cells derived from human eye. *IEEE*
- Le Quement, C., C. N. Nicolaz, D. Habauzit, M. Zhadobov, R. Sauleau, et Y. Le Drean. 2014. Impact of 60-GHz millimeter waves and corresponding heat effect on endoplasmic reticulum stress sensor gene expression. *Bioelectromagnetics* 35 (6):444-451.
- Mumtaz S, Bhartiya P, Kaushik N, Adhikari M, Lamichhane P, Lee SJ, Kumar Kaushik N, Choi EN. 2020. Pulsed high-power microwaves do not impair the functions of skin normal and cancer cells in vitro: A short-term biological evaluation. *Journal of Advanced Research* 22:47–55
- Myers P.C., Sadowsky N.L., Barrett A.H. Microwave thermography ; principles, methods and clinical applications. *J. Microwave Power*, 1979, 14, (2) 105-115.
- Nguyen, T., Pham, V., Nguyen, S., Baulin, V., Croft, R., Phillips, B., Crawford, R. and Ivanova, E., 2016. The Bioeffects Resulting from Prokaryotic Cells and Yeast Being Exposed to an 18 GHz Electromagnetic Field. *PLOS ONE*, 11(7), p.e0158135.
- Radzievsky A, Gordiienko O, Cowan A, Alekseev A, Ziskin M. 2004. Millimeter wave induced hypoalgesia in mice: Dependence on type of experimental pain. *IEEE Trans Plasma Sci* 32:1634–1643.
- Rapport d'expertise CETIM. 2019: Mesure de l'exposition au rayonnement radiofréquence de la téléphonie 5G-NR en Corée du sud N° CET0174794_PV_FINAL_01_a
- Romanenko, S., P. H. Siegel, D. A. Wagenaar, et V. Pikov. 2014. Effects of millimeter wave irradiation and equivalent thermal heating on the activity of individual neurons in the leech ganglion. *J Neurophysiol* 112 (10):2423-2431.

- Russell, C. L. 2018. 5 G wireless telecommunications expansion: Public health and environmental implications. *Environ Res* 165:484-495.
- Shiina, T., Y. Suzuki, Y. Kasai, Y. Inami, M. Taki, et K. Wake. 2014. Effect of two-times 24 hour exposures to 60 GHz millimeter-waves on neurite outgrowth in PC12VG cells in consideration of polarization. *International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Tokyo (EMCTokyo)*.
- Simkó, M. and Mattsson, M.O., 2019. 5G Wireless Communication and Health Effects—A Pragmatic Review Based on Available Studies Regarding 6 to 100 GHz. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(18), p.3406.
- Simkó, M., Remondini, D., Zeni, O., Scarfi, M. R. 2016. Quality Matters: Systematic Analysis of Endpoints Related to “Cellular Life” in Vitro Data of Radiofrequency Electromagnetic Field Exposure. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 2016, 13, 701
- Sypniewska, R., Millenbaugh, N., Kiel, J., Blystone, R., Ringham, H., Mason, P. and Witzmann, F., 2010. Protein changes in macrophages induced by plasma from rats exposed to 35 GHz millimeter waves. *Bioelectromagnetics*, 31(8), pp.656-663.
- Vlasova, I., Mikhalechik, E., Gusev, A., Balabushevich, N., Gusev, S. and Kazarinov, K., 2018. Extremely high-frequency electromagnetic radiation enhances neutrophil response to particulate agonists. *Bioelectromagnetics*, 39(2), pp.144-155.
- Volkova, N., Pavlovich, E., Gapon, A. and Nikolov, O., 2014. Effects of Millimeter-Wave Electromagnetic Exposure on the Morphology and Function of Human Cryopreserved Spermatozoa. *Bulletin of Experimental Biology and Medicine*, 157(5), pp.574-576.
- Wu H, Wang D, Shu Z, Zhou H, Zuo H, Wang S, Li Y, Xu X, Li N, Peng R. 2012. Cytokines produced by microwave-radiated Sertoli cells interfere with spermatogenesis in rat testis. *Andrologia*, 44, 590–599
- Wu, T., T. S. Rappaport, et C. M. Collins. 2015. Safe for generations to come: Considerations of safety for millimeter waves in wireless communications. *IEEE Microwave Magazine* 16 (2):65-84.

4 Impacts spécifiques sur l'économie

4.1 Aspects Macro-économiques

4.1.1 Introduction

Ce rapport traite des aspects plus médicaux, sanitaires et technologiques des radiations non ionisantes, ainsi que des aspects micro et macroéconomiques de ce maillon crucial dans la technologie de communication actuelle. Les informations exposées ci-dessous donnent un aperçu des facteurs macro et microéconomiques qui ont un impact sur la communication et la technologie mobiles. Ces informations ne portent pas de jugement de valeur et n'informent pas le lecteur des effets, prouvés ou non, de l'utilisation de cette technologie.

4.1.2 COVID-19

Beaucoup avaient prédit que 2020 serait l'année du déploiement de la technologie mobile de cinquième génération (5G) pour les utilisateurs finaux. Toutefois, la transition à la 5G ne se fera pas du jour au lendemain. Le déploiement devrait évoluer progressivement au cours des dix prochaines années. L'évolution de la 5G commence par le marché des consommateurs : les derniers smartphones Android sont équipés d'un modem 5G et Apple a lancé son premier smartphone 5G en automne. Aujourd'hui, de nombreux fournisseurs de services de communication (CSP) mondiaux offrent au moins une couverture 5G limitée ; 2020 devait être l'année de l'expansion de cette couverture et de l'accessibilité de la 5G à un public plus large (Morley, 2020).

Pourtant, personne n'avait prévu les profondes perturbations générées par la pandémie de COVID-19. Le 9 juin 2020, près de 7,2 millions de cas de COVID-19 étaient signalés à travers le monde, ainsi qu'au moins 407.000 décès. Une majorité de pays ont traversé au moins une période de confinement imposée par leur gouvernement, et la plupart des écoles sont actuellement fermées dans le monde entier. Si tous les secteurs ont été affectés dans une certaine mesure par ce bouleversement, certains secteurs tels que le tourisme et l'horeca ont été les plus durement touchés (Morley, 2020).

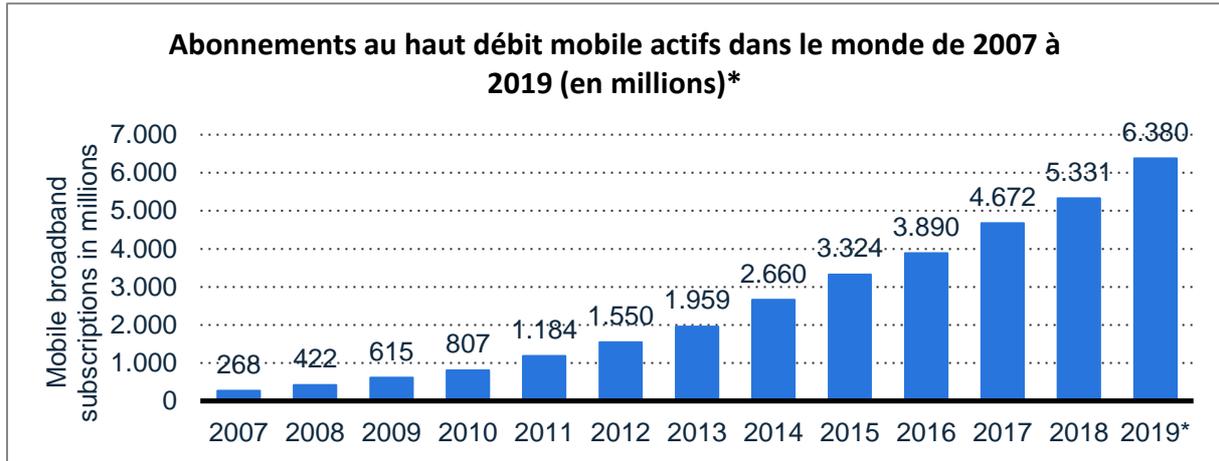
Le télétravail s'étant désormais généralisé, l'importance du secteur des télécommunications est devenue plus évidente. Tant les réseaux de communication physiques que sans fil ont observé des changements d'utilisation spectaculaires et ont plutôt bien résisté au choc de la croissance de leur utilisation. Le secteur a subi le revers financier de la pandémie, dans une mesure certes relativement inférieure par rapport à d'autres secteurs, et continuera à le ressentir jusqu'à ce qu'elle soit passée. En outre, cela soulève la question de l'impact du COVID-19 sur le déploiement planifié de la 5G sur la scène internationale (Morley, 2020).

C'est une question importante qui va au-delà de la santé financière du secteur des télécommunications. Le déploiement de la 5G doit se faire par étapes, après la publication des normes du secteur. La 5G n'en est qu'à la première étape : elle améliore la technologie sans fil de quatrième génération (4G), mais elle en a toujours besoin. Toutefois, la 5G ne respectera sa promesse que si les développements supplémentaires prévus dans les prochaines années peuvent également être réalisés. Dans ce contexte, seul l'avenir nous dira si les développements nécessaires seront également réalisés (Morley, 2020).

4.1.3 Marchés mondial et européen du secteur de la téléphonie mobile 5G : nombre escompté d'abonnements mobiles et trafic mobile - Phases de test et de mise en œuvre.

La figure 1 présente un aperçu du nombre d'abonnements au haut débit mobile actifs dans le monde. Ces chiffres correspondant à la période 2007-2019 reflètent une tendance à la hausse, avec un doublement évident du nombre d'abonnements sur la période 2015-2019. Le doublement du nombre d'abonnements ralentit mais une augmentation reste perceptible.

Figure 1. Abonnements au haut débit mobile actifs dans le monde. (ITU, 2019)



La figure 2 montre la part de marché des technologies de télécommunications mobiles utilisées dans le monde entier. Ces chiffres indiquent que la 5G pourrait représenter une part de marché de 20 % du marché des télécommunications mobiles à partir de 2025. On constate immédiatement que la technologie habilitante 4G aura encore un important rôle à jouer en 2025 pour soutenir la technologie 5G. Comme indiqué dans la figure 3, cette part de marché de 20 % représente environ 2 milliards d'abonnements 5G, selon les estimations pour l'année 2024-2025.

Figure 2. Part de marché des technologies de télécommunications mobiles dans le monde. (GSMA, 2020)

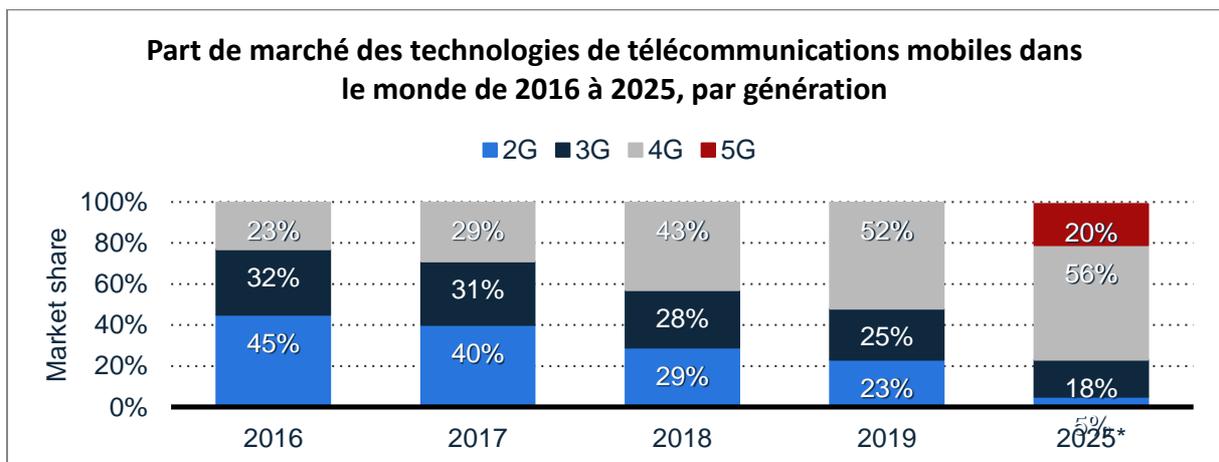
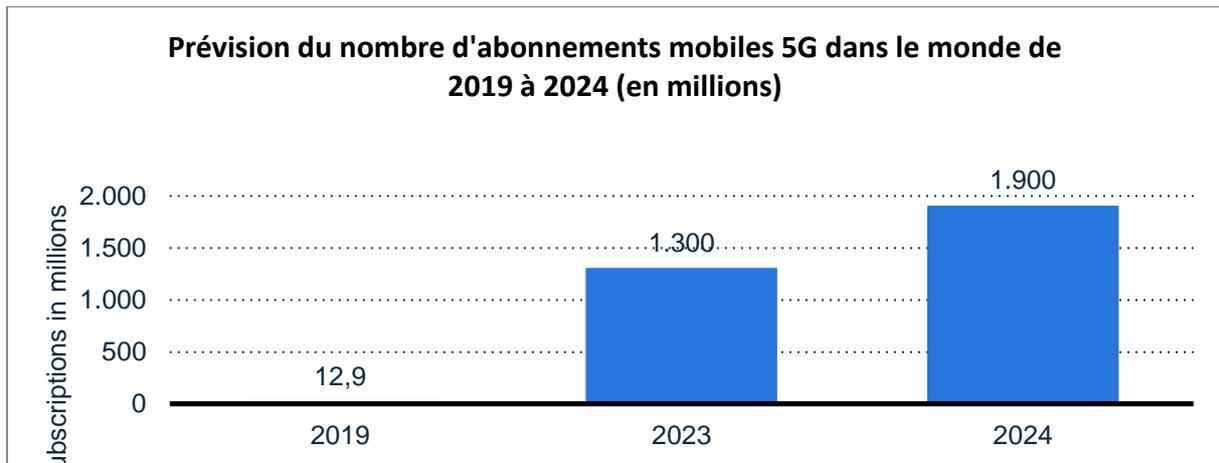


Figure 3. Prévision du nombre d'abonnements mobiles 5G dans le monde. (5G Americas, 2020)



Dans les estimations concernant le nombre d'abonnements mobiles 5G dans le monde, on constate également la nette domination de l'Asie du Nord-Est en matière de connectivité. On prévoit ainsi une rapide adoption de cette technologie dans des pays comme la Chine, la Corée du Sud et le Japon.

Figure 4. Prévision du nombre d'abonnements mobiles 5G dans le monde, par région. (Ericsson, 2020)

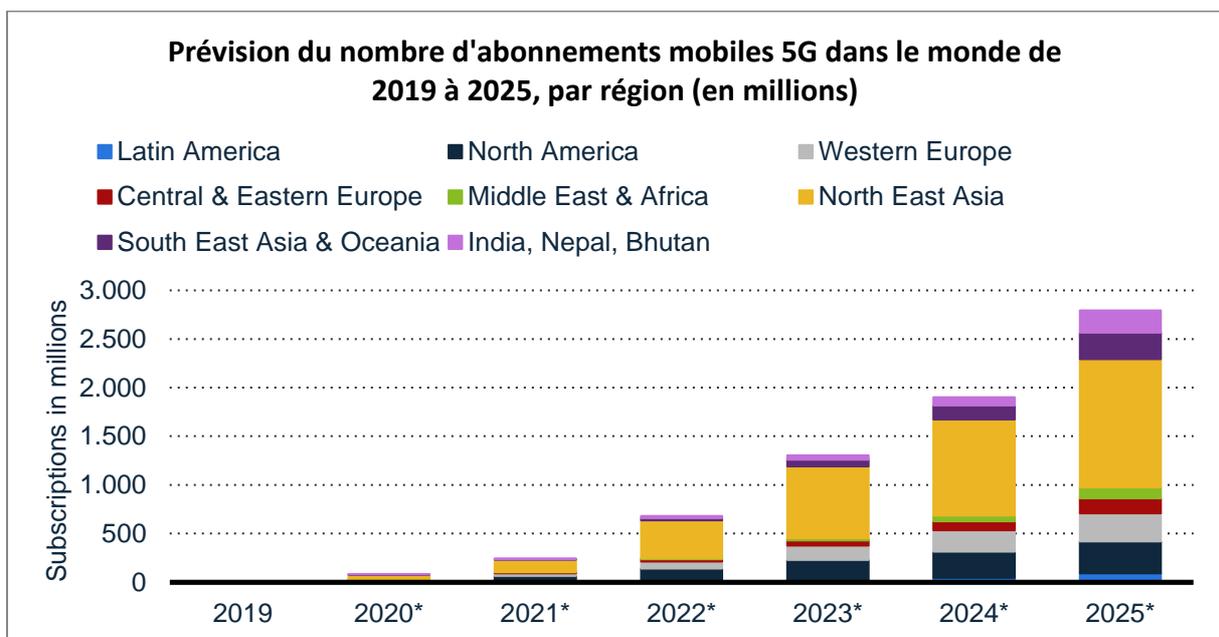
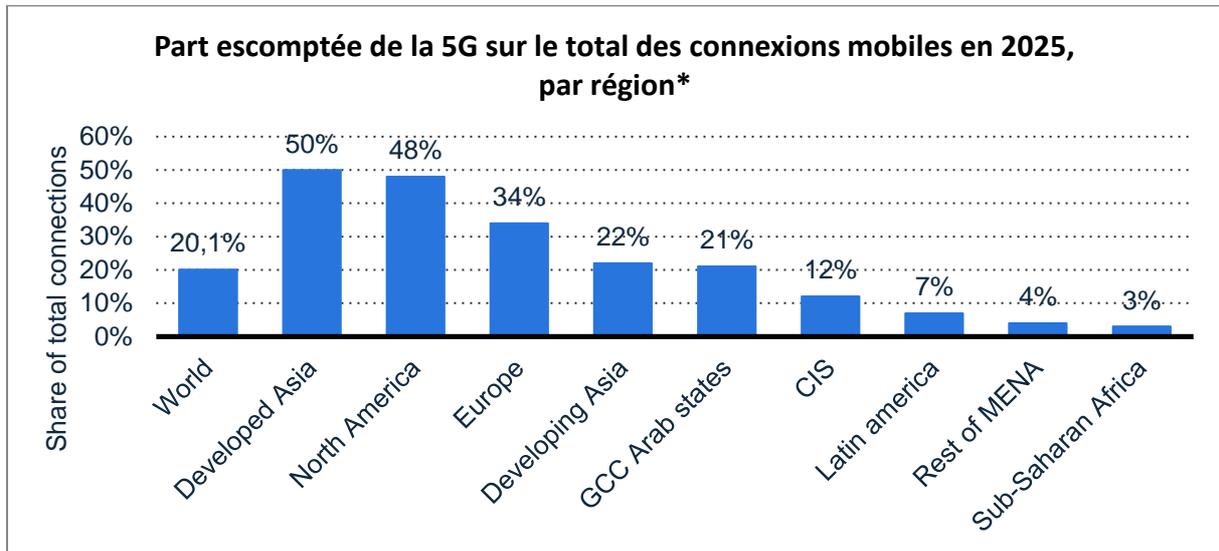


Figure 5. Part escomptée de la 5G sur le total des connexions mobiles en 2025, par région. (GSMA, 2020)



4.1.4 Moteur de croissance

La 5G est largement considérée comme une technologie habilitante qui aura un impact sur différents secteurs, industries et marchés. Les données ci-dessous portent sur plusieurs marchés sélectionnés, dont le futur développement devrait être largement lié à 5G.

Le premier marché étudié dans ce contexte est celui de l'IoT. Ce marché est en croissance constante, croissance qui devrait être davantage stimulée par le déploiement de la 5G.

Figure 6. Prévision des dépenses mondiales pour l'Internet des objets (IoT). (IDC, 2020)

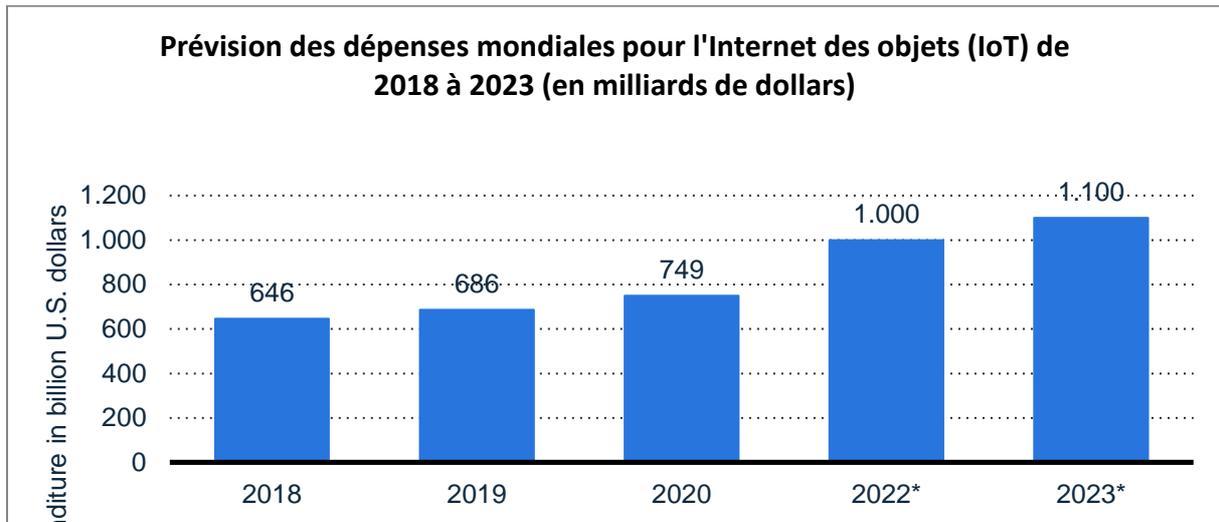


Figure 7. Marché des terminaux Internet des objets (IoT) pour les entreprises et le secteur automobile installés dans le monde entier de 2018 à 2020, par segment. (Gartner, 2019)

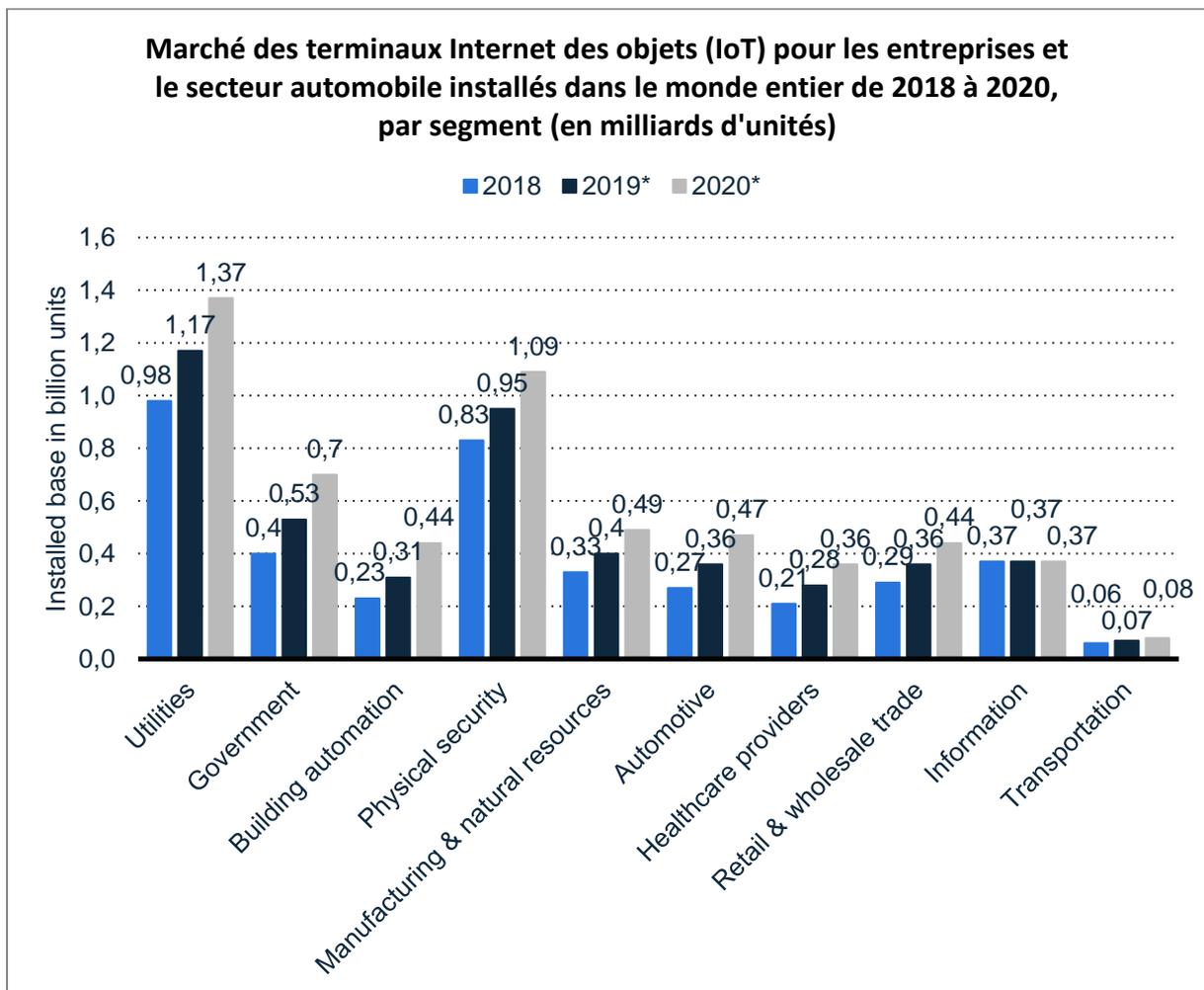
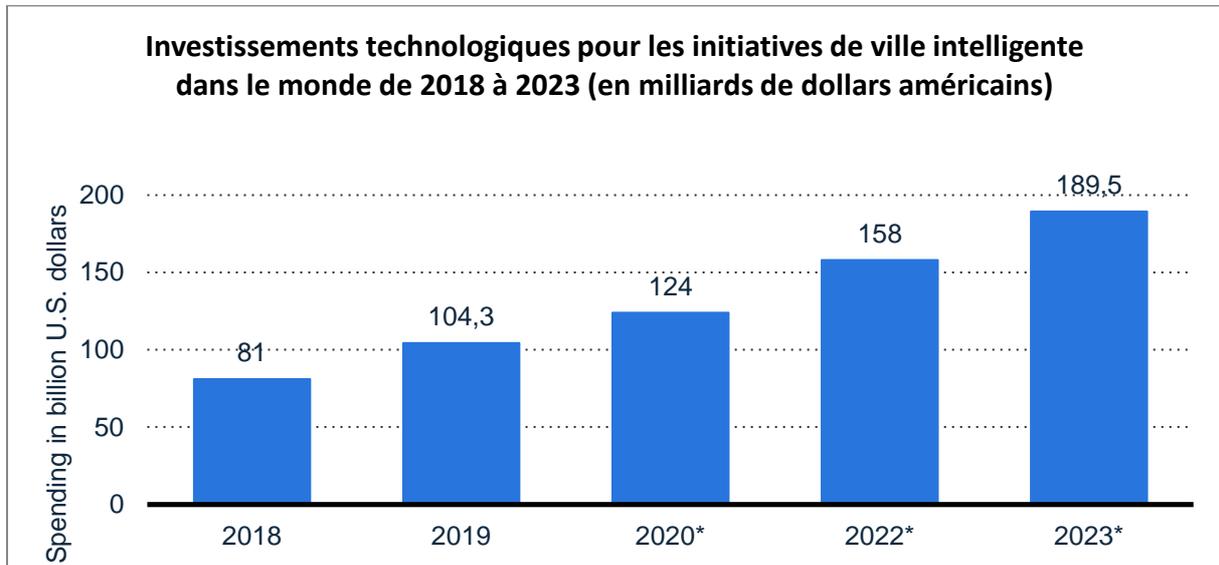


Figure 8. Investissements technologiques pour les initiatives de ville intelligente dans le monde de 2018 à 2023. (IDC, 2020)



Outre les dispositifs IoT et l'intégration, les produits proches de cette technologie ressentiront également l'impact du déploiement continu de la 5G. Ainsi, on estime que le développement d'applications de ville intelligente et l'utilisation de voitures connectées augmenteront sensiblement dès que la 5G facilitera ces applications en offrant la flexibilité nécessaire.

Figure 9. Prévisions de livraison de voitures connectées entre 2019 et 2023. (AP News, 2019)

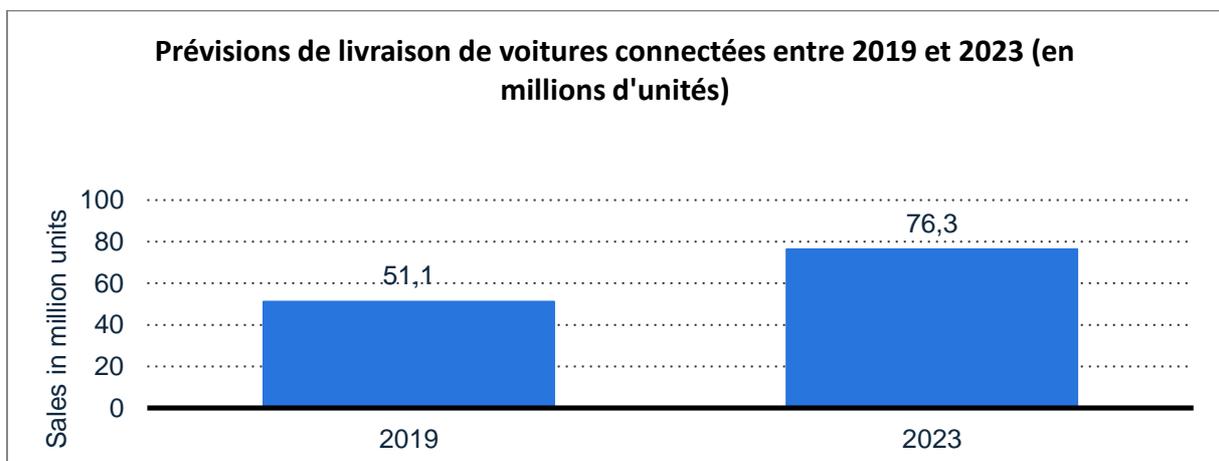
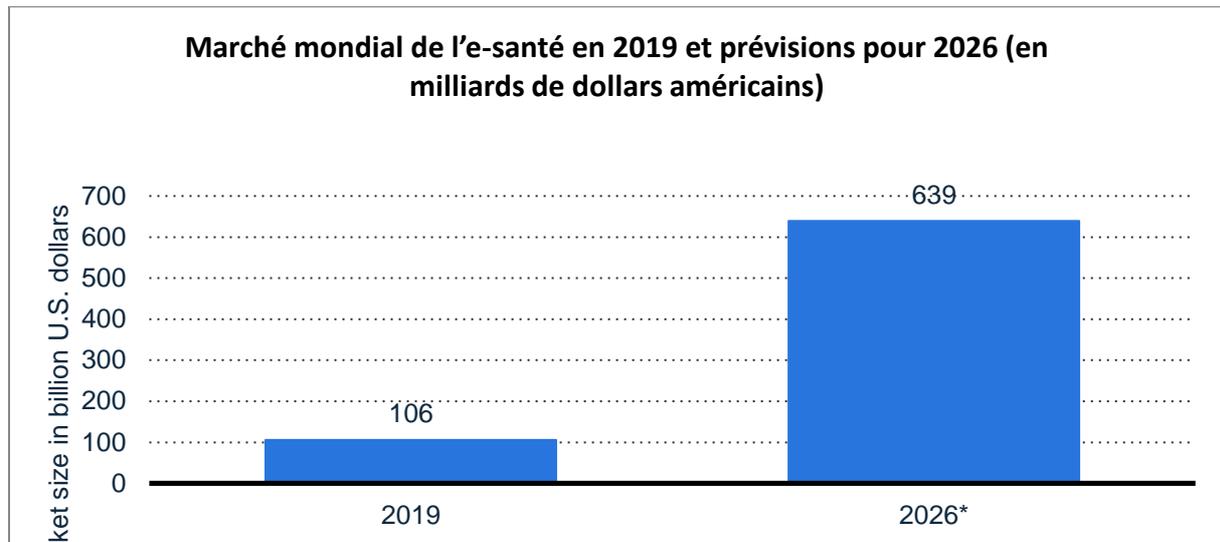


Figure 10. Marché mondial de l'e-santé en 2019 et prévisions pour 2026. (Global Market Insights, 2019)



4.1.5 Statut de la 5G

En 2020, le statut de la 5G varie beaucoup selon les pays, mais elle reste globalement immature. De manière générale, l'utilisation de la technologie 5G devrait stimuler les ventes de technologies associées, grâce à la promesse d'efficacité renforcée attirant des clients, existants et nouveaux, dans le segment des télécommunications mobiles. En outre, la 5G et son déploiement continu devraient avoir un impact économique sur presque tous les secteurs. Compte tenu des caractéristiques sectorielles spécifiques, l'adoption de la 5G ne se fera pas simultanément dans les différents secteurs et régions. En outre, la mise en œuvre de la 5G répondra à un processus de normalisation qui prend également du temps (Jones, 2020). IHS Markit (2017) estime toutefois que, indépendamment des diverses limitations et des différences sectorielles concernant la mise en œuvre et donc l'exploitation de cette nouvelle technologie, celle-ci permettra de faire grimper les ventes à hauteur de 12,3 billions de dollars dans différents secteurs d'ici à 2035 (Campbell, et al., 2017).

IHS Markit ajoute que c'est principalement l'industrie manufacturière qui bénéficiera de l'évolution du déploiement de la 5G, puisqu'environ 28 % des ventes supplémentaires stimulées par la 5G seront générées par ces activités industrielles. Le secteur des TIC devrait représenter 11 % de l'augmentation totale des ventes. Le déploiement de la 5G profitera également aux applications médicales

numériques, aux applications de ville intelligente, aux applications IoT et aux voitures connectées (Campbell, et al., 2017).

4.1.6 Emploi

Sur le plan de l'emploi, IHS Markit estime que le déploiement de la 5G et de la chaîne de valeur associée profitera à certaines entreprises technologiques, dont les opérateurs de réseaux, les fabricants de composants technologiques de base, les fabricants d'équipement d'origine des appareils de télécommunication, les fabricants d'infrastructures de télécommunication et les développeurs de contenu et d'applications. Ces entreprises devant consentir des investissements supplémentaires en R&D et en capital pour soutenir le déploiement continu de la 5G, le bureau d'études estime que, d'ici à 2035, la chaîne de valeur de la 5G génèrera un rendement économique de 3,5 billions de dollars et soutiendra 22 millions d'emplois. Selon IHS Markit, ces emplois seront principalement créés en Chine, aux États-Unis, au Japon et dans certains pays européens leaders (Campbell, et al., 2017).

4.1.7 Obstacles

Le déploiement de la 5G est en marche dans plusieurs pays, ce qui permet de multiplier les expériences pratiques. Les possibilités d'innovation liées à la 5G se poursuivront certainement jusqu'en 2023, le processus de conception de la Release 17 n'ayant commencé que fin 2019. De manière générale, la 5G pâtit encore de son immaturité, de l'emballage médiatique et des attentes irréalistes autour des fonctionnalités et de la disponibilité, principalement alimentées par les campagnes marketing des fournisseurs (Jones, 2020).

Les principaux obstacles actuels sont expliqués plus en détail ci-dessous, tels qu'ils ressortent dans (Jones, 2020):

- La R15 se concentre sur les données à haut débit : les mises en œuvre actuelles de la R15 sont principalement axées sur les données à haut débit (par exemple, pour les applications avec du

streaming vidéo ou la détection à haut débit). Ce volet ne représente pas un besoin majeur pour bon nombre d'entreprises et de consommateurs et offre donc peu d'avantages.

- La couverture initiale est très incomplète : il faut généralement entre cinq et sept ans pour qu'une nouvelle génération de téléphones portables soit déployée sur l'ensemble d'une zone géographique. La couverture 5G d'un seul opérateur est souvent limitée (à des villes ou des régions spécifiques, par exemple). Les ondes millimétriques de la 5G sont à courte portée, de sorte que la couverture ne s'étendra jamais au-delà de noyaux (par exemple dans les zones urbaines à forte densité de population). En 2020, un utilisateur de téléphone portable équipé d'un combiné 5G devrait pouvoir utiliser toutes les technologies simultanément, de la 3G à la 5G et la Long Term Evolution (LTE). Il est toutefois important de souligner que la couverture 5G ne sera pas omniprésente dans les années à venir.
- Les performances dans le monde réel seront variables. Cette complexité se traduit par d'énormes variations en matière de portée et de performance. Les bandes de hautes fréquences offrent la vitesse la plus élevée (supérieure à 1 Gbps) mais ont une portée limitée (quelques centaines de mètres ou moins). Les performances dans le monde réel peuvent considérablement varier, en fonction des bandes de fréquences exploitées par les opérateurs, de leur équipement réseau, du type de terminal, de la position des utilisateurs et de la vitesse à laquelle ils se déplacent. Actuellement, on ne dispose de pratiquement aucune expérience d'utilisation de bande haute dans les applications d'entreprise.
- Les stratégies multinationales peuvent représenter un défi : la 5G peut être déployée dans les bandes de fréquences basses et moyennes et dans quatre bandes de hautes fréquences. D'autres bandes de fréquences seront probablement prises en charge à l'avenir. Toutefois, il n'existe actuellement pas de terminaux prenant en charge l'ensemble des bandes possibles et peu (le cas échéant) le feront à l'avenir. Les équipements achetés dans un pays peuvent donc ne pas fonctionner dans un autre. Il est cependant possible de se rabattre sur la LTE avec des performances moindres. En outre, il y aura de nombreuses années de décalage entre les déploiements de la 5G chez les adeptes précoces et offensifs (les États-Unis, la Chine et la Corée du Sud, par exemple) et les suiveurs, tels que de nombreux pays d'Afrique.
- Les alliances entre les fournisseurs de services informatique dans le cloud hyperscale et les opérateurs de télécommunications laissent présager de la future évolution de l'informatique de pointe en 5G : la 5G peut fournir des connexions à bande haute et à faible latence (moins d'une milliseconde dans certaines conditions), offrant ainsi une solution adaptée aux applications en temps réel, telles que les jeux et le contrôle industriel. Informatique de pointe utilisant la faible latence et la haute bande passante. Certaines implémentations 5G edge utilisent un traitement

privé sur place, et dans certains cas l'opérateur de réseau peut devenir un fournisseur de services edge cloud (CSP). Les entreprises veulent que ces systèmes edge cloud s'adaptent aux environnements cloud qu'elles utilisent déjà, ce qui a conduit à des alliances précoces entre les opérateurs de réseau et les CSP (par exemple Amazon et Microsoft) pour offrir cette possibilité. À long terme, les alliances devraient devenir le modèle dominant pour l'informatique de pointe en 5G pour les entreprises.

- L'immaturation commerciale est un défi : de nombreux opérateurs de réseau travaillent encore sur le développement de leurs offres 5G et, en général, ils ne peuvent pas encore commercialiser certaines fonctionnalités, comme le découpage de réseau ou les réseaux 5G privés répondant aux attentes des entreprises. Les offres de service et les prix vont donc considérablement évoluer jusqu'en 2022.
- Les performances dans le monde réel sont prometteuses : les premiers tests indiquent que la 5G à bande moyenne et haute peut fournir des résultats impressionnants, plusieurs centaines de Mbps en zone urbaine et plus de 1 Gbps pour quelques exemples urbains à bande haute. Toutefois, les performances devraient encore évoluer à mesure que la couverture du réseau s'étend et que les réseaux 5G acquièrent des abonnés.
- Le marché des appareils a généré des défis jusqu'en 2020 : au début de l'année 2020, il y avait peu d'appareils 5G. Les téléphones portables sont des produits haut de gamme coûteux et les appareils professionnels (ordinateurs portables et tablettes, par exemple) avec 5G intégrée ne sont pas disponibles. Les téléphones portables 5G à prix moyen devraient faire leur apparition en 2021, en même temps que les appareils d'entreprise. Des appareils à usage spécifique, tels que les terminaux mobiles industriels 5G robustes, vont probablement émerger, mais ils restent rares en 2020. Certaines innovations pour les entreprises nécessitent des appareils R16 qui ne seront pas disponibles avant 2021, au plus tôt. Des appareils tels que des casques de réalité augmentée/réalité virtuelle (RA/RV) avec 5G intégrée ne sont pas encore disponibles, bien que le tethering puisse parfois offrir une solution temporaire.
- Les autorités de régulation autorisent les réseaux 5G privés : l'une des applications potentielles les plus intéressantes de la 5G pour les entreprises est une alternative au Wi-Fi pour la connectivité à haut débit dans les grands campus, les ports, les aéroports, les manufactures, les entrepôts et les usines, par exemple. Dans plusieurs pays (comme l'Allemagne, les États-Unis et le Royaume-Uni), les régulateurs mettent le spectre à la disposition des réseaux privés. De nombreuses innovations nécessitent la R16 : une grande partie du potentiel de la 5G pour les entreprises requiert des fonctionnalités qui ne seront disponibles qu'à partir de la R16, laquelle ne sera pas mise en service avant 2021 environ.

- En 2020, la 5G est généralement futile pour l'Internet des objets (IoT) : nous avons assisté à un grand battage médiatique autour de la 5G et de l'IoT. Toutefois, hormis quelques cas spécifiques, la 5G n'apporte pas de valeur ajoutée à l'IoT en 2020. Les applications mobiles de l'IoT à bande basse sont déjà bien prises en charge par les normes 4G NB-IoT et LTE-M largement disponibles. La 5G R16 absorbera ces normes et n'apportera donc aucune amélioration technique radicale hormis une densité accrue, qui n'est pas nécessaire puisque les réseaux NB-IoT et LTE-M existants ne manquent pas de capacité. L'IoT est également bien pris en charge par un large éventail de technologies concurrentes, notamment les réseaux urbains maillés, comme Wi-Sun, et les réseaux non cellulaires étendus à faible consommation (LPWA), comme LoRa.
- Enfin, la sécurité est également une source de préoccupation : la 5G est une norme complexe qui peut être mise en œuvre de nombreuses manières différentes. Les risques liés à la sécurité peuvent varier en fonction de la manière dont l'opérateur a configuré le réseau.

4.2 Aspects microéconomiques

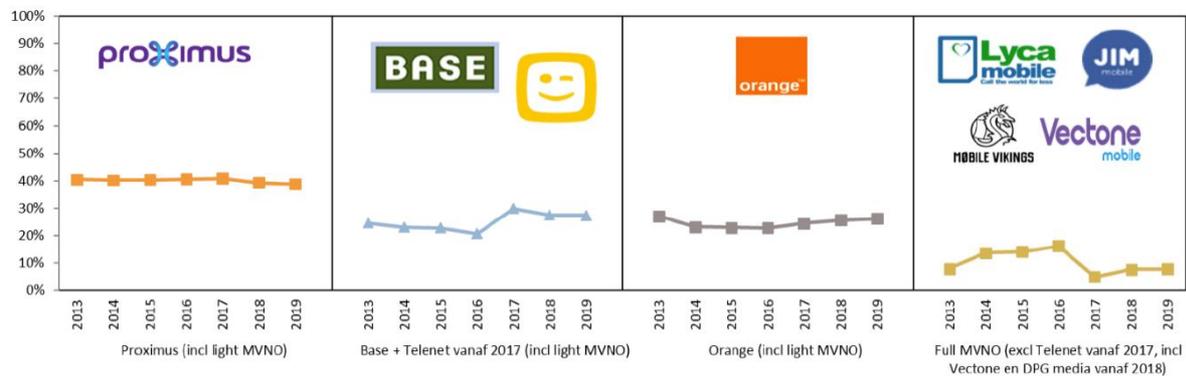
4.2.1 Situation du secteur des télécommunications mobiles en Belgique

4.2.1.1 *Le marché belge de la téléphonie mobile*

Dans son rapport statistique de 2020, l'IBPT indique que le marché de la téléphonie mobile, exprimé en nombre de cartes SIM actives, enregistre une croissance de 0,3 %. Il s'agit de la première reprise après trois années consécutives de déclin. Fin 2019, les fournisseurs de téléphonie mobile belges comptaient 11.954.842 cartes SIM actives. Le taux de pénétration de la téléphonie mobile a légèrement baissé, atteignant 104,2 %. Dans le segment des cartes SIM prépayées, le déclin se poursuit, avec un recul de 12,5 %. La croissance du segment du postpayé est liée à l'enregistrement obligatoire des cartes SIM prépayées depuis fin 2016 (Belgisch Instituut voor postdiensten en telecommunicatie, 2020).

Les opérateurs de réseaux mobiles (y compris les light MVNO) ont enregistré une faible croissance de 16.335 cartes SIM actives, atteignant un total de 11.027.306. Les full MVNO ont gagné 21.772 cartes SIM actives. Avec 928.000 cartes SIM actives, les full MVNO représentaient 7,8 % du nombre total de cartes SIM actives fin 2019. Orange est le principal moteur du marché. Avec un peu plus de 71.000 nouvelles cartes SIM actives par an, la part de marché d'Orange augmente de 0,5 % pour atteindre [20-30] %. Telenet et Proximus perdent tous deux des parts de marché (-0,1 % et -0,5 % respectivement). L'écart entre le leader du marché Proximus et Orange a diminué de près de 4 points de pourcentage depuis 2017, passant de 17 % à 13 % (Belgisch Instituut voor postdiensten en telecommunicatie, 2020).

Figure 11. Part de marché des opérateurs de téléphonie mobile en Belgique en 2019. (Belgisch Instituut voor postdiensten en telecommunicatie, 2020)



Les cartes SIM de données actives ont augmenté de 15 % en 2019 pour atteindre un total de 10,037 millions, ce qui s'explique en partie par l'augmentation du nombre de répondants fournissant des statistiques à l'IBPT. Cela a généré une pénétration du haut débit mobile de 87,5 %. Les cartes SIM de données associées aux smartphones représentent 96,1 % du nombre total de cartes SIM de données actives. Leur nombre a augmenté de 16,5 %, atteignant 9,644 millions. En revanche, les cartes SIM de données dans les PC/tablettes sont toujours en perte de vitesse : -6,6 %, atteignant 392.924 unités (Belgisch Instituut voor postdiensten en telecommunicatie, 2020).

Plus de 8.067.996 cartes SIM sont actives sur le réseau 4G, soit 80 % du nombre total de cartes SIM actives. Chez les opérateurs de réseaux mobiles (MNO), 82,1 % des cartes SIM actives génèrent du trafic 4G, soit une augmentation de 2,1 % par rapport à 2018. La convergence entre le fixe et le mobile se poursuit : le nombre de cartes SIM liées à un service fixe augmente de 20 % pour atteindre 3.056.240 unités. Par rapport au nombre total de cartes SIM postpayées, leur part est passée de 28,1 % à 32,3 % (Belgisch Instituut voor postdiensten en telecommunicatie, 2020).

Sur le marché de l'IoT, un nombre record de 637.106 cartes M2M supplémentaires ont été activées par les opérateurs de réseaux mobiles, portant ainsi le total à 3,104 millions fin 2019. La grande augmentation du M2M est principalement liée au projet de compteur intelligent de Proximus avec le

gestionnaire de réseau de distribution flamand Fluvius, outre une croissance constante des cartes M2M régulières. Comme annoncé le 8 mai 2018, Proximus a lancé son réseau NB-IoT pour le raccordement des compteurs numériques de Fluvius. À la demande d'IBM et de Sagemcom, Proximus connectera 1,3 million de compteurs numériques pour le gaz et l'électricité d'ici à la fin 2022. Les cartes SIM M2M soutenues par les technologies cellulaires traditionnelles comme la 2G, la 3G et la 4G, représentent la majorité des connexions M2M (96 %). Les liaisons LPWA²⁹ cellulaires qui fonctionnent dans un réseau de fréquences autorisé, comme le « narrowband Internet of Things » (NB-IoT) et le « Long Term Evolution Mobile » (LTE-M), restent limitées aux 4 % restants du nombre total de cartes SIM M2M. Les réseaux LPWA sans spectre autorisé, comme Sigfox et LoRa, visent également les applications IoT. En Belgique, un réseau Sigfox est exploité par Engie M2M, une filiale d'Engie. Ce réseau est notamment utilisé pour le traçage industriel de conteneurs mobiles. Via le réseau, des compteurs d'eau sont également connectés à Anvers et dans certaines communes de la Côte, notamment. Proximus offre l'IoT sur la base d'un réseau LoRa. La largeur de bande d'un réseau LoRa est plus petite qu'avec le NB-IoT et un réseau LoRa n'est pas lié à une carte SIM. Fin 2019, environ 121.00 objets étaient connectés via les réseaux LPWA sans spectre autorisé d'Engie et de Proximus (Belgisch Instituut voor postdiensten en telecommunicatie, 2020).

4.2.1.2 Trafic de téléphonie vocale mobile

Le volume de téléphonie vocale mobile a enregistré une augmentation continue ces dernières années : en moyenne, 3,4 % par an entre 2016 et 2018. La croissance a été stimulée par le remplacement des plans tarifaires avec paiement selon l'utilisation par des plans tarifaires avec appels illimités et par des plans tarifaires avec de plus gros volumes. La tendance à la hausse se poursuit également en 2019 : les minutes de téléphonie vocale mobile que les clients de détail des opérateurs mobiles belges génèrent (hors itinérance) augmentent de 2,9 % et le volume de voix en itinérance augmente même de 7,5 %. Le volume de presque tous les types d'appels augmente, à l'exception des appels mobiles internationaux qui diminuent de 8 %, de 0,7 milliard de minutes à 0,6 milliard de minutes. En 2019, le volume de téléphonie vocale mensuel moyen a augmenté de 4 minutes (+3,2 %), pour atteindre 128 minutes. Le volume mensuel moyen de téléphonie vocale des clients des MNO aux forfaits postpayés (168 minutes) est 8 fois plus élevé que celui des clients des MNO aux forfaits prépayés (21 minutes) (Belgisch Instituut voor postdiensten en telecommunicatie, 2020).

4.2.1.3 *Consommation de données mobiles*

En 2019, les abonnés à la téléphonie mobile ont consommé 5 % de données en plus qu'en 2018, pour un total de 324 pétaoctets. Sur le réseau national, la consommation augmente de 61 % pour atteindre 300 pétaoctets. Le volume d'itinérance sortante augmente de 46 %, de 17 à 24 pétaoctets. La consommation moyenne de données par carte SIM de données active atteint 2,9 gigaoctets par mois. L'augmentation de 1 gigaoctet par mois est la plus forte augmentation depuis 2016. Les cartes SIM de données 4G génèrent 91 % du volume de données des MNO. Une carte SIM de données 4G consomme en moyenne 3,2 gigaoctets par mois, contre 1,6 gigaoctet par mois pour une carte SIM de données 3G (Belgisch Instituut voor postdiensten en telecommunicatie, 2020).

4.2.1.4 *Chiffre d'affaires des opérateurs de télécommunications*

Le déclin du segment du prépayé au profit du postpayé et la tendance à la convergence fixe-mobile contribuent à la diminution du nombre de cartes SIM déconnectées du réseau mobile : -2,1 %, atteignant 2.160.649 d'unités. Par rapport au nombre moyen de cartes SIM actives sur une base annuelle, le taux d'attrition s'élève à 20,1 %, soit 0,5 points de pourcentage de moins que le taux de 20,6 % en 2018. Le recours à la portabilité des numéros de téléphone portable recule : moins 170.183 par rapport à 2018. Le rapport portages de numéros de téléphone portable/cartes SIM déconnectées passe de 63 % à 56 %, ce qui indique que les numéros mobiles sont moins souvent transférés lorsque la carte SIM est déconnectée du réseau (Belgisch Instituut voor postdiensten en telecommunicatie, 2020).

Le chiffre d'affaires mobile des opérateurs de réseau mobile a diminué jusqu'à 3,46 milliards d'euros (-2,2 %), principalement en raison du chiffre d'affaires de gros inférieur des opérateurs de réseau virtuels (-44 %) à la suite de la migration des clients MVNO de Telenet vers son réseau mobile propre. En outre, la diminution du chiffre d'affaires de l'interconnexion SMS joue aussi un rôle (-10 %). Le chiffre d'affaires des services de détail reste, avec 2,170 milliards d'euros, comparable à celui de 2018. La croissance des abonnements mobiles et de la consommation de données mobiles se traduit par une croissance du chiffre d'affaires de la téléphonie vocale, des SMS et des données (+0,8 %), mais cela est presque entièrement réduit à néant par le chiffre d'affaires inférieur de l'itinérance de détail (-12,8 %). Seul Orange a enregistré une croissance du chiffre d'affaires des services de détail en 2019 (hors

équipements et M2M). Le chiffre d'affaires de détail des services d'Orange a augmenté de 4,5 %. Proximus a vu son chiffre d'affaires de ventes au détail de services mobiles diminuer de 0,8 % et Telenet a perdu 3,6 % (Belgisch Instituut voor postdiensten en telecommunicatie, 2020). Les revenus mensuels moyens des services mobiles se sont stabilisés à 17,3 euros par carte SIM active.

4.2.2 Contribution directe et indirecte au développement économique du secteur numérique belge et contribution à l'emploi

4.2.2.1 Le secteur des TIC en Belgique : importance et contribution du secteur des télécommunications

Le Baromètre de la société de l'information 2020 publié par le SPF Économie, PME, Classes moyennes et Énergie donne la définition suivante des TIC en Belgique :

Tableau 1. Définition du secteur des TIC. (FOD Economie, K.M.O. Middenstand & Energie, 2020)

| | |
|------|---|
| 26.1 | Vervaardiging van elektronische onderdelen en printplaten |
| 26.2 | Vervaardiging van computers en randapparatuur |
| 26.3 | Vervaardiging van communicatieapparatuur |
| 26.4 | Vervaardiging van consumentenelektronica |
| 26.8 | Vervaardiging van magnetische en optische media |
| 46.5 | Groothandel in informatica- en communicatieapparatuur (46.51 - 46.52) |
| 58.2 | Uitgeverijen van software (58.21 - 58.29) |
| 61 | Telecommunicatie (61.1 - 61.2 - 61.3 - 61.9) |
| 62 | Ontwerpen en programmeren van computerprogramma's, computerconsultancy- en aanverwante activiteiten (62.01 - 62.02 - 62.03 - 62.09) |
| 63.1 | Gegevensverwerking, webhosting (63.11 - 63.12) |
| 95.1 | Reparatie van computers en communicatieapparatuur en aanverwante activiteiten; webportalen (95.11 - 95.12) |

(a) OECD Guide to measuring the information society, 2011, p 58-59, 149-159.

Cette définition inclut clairement le chapitre 61, à savoir les télécommunications, subdivisées en sections 61.1 - 61.2 - 61.3 - 61.9. En 2018, 43.170 entreprises étaient actives dans le secteur TIC en Belgique. Ce chiffre s'inscrit en hausse de 7 % par rapport à 2017. C'est la branche 62 qui a

principalement contribué à cette croissance puisque le nombre d'entreprises a connu une augmentation de plus de 6 % sur la période considérée. Près de 99 % des entreprises du secteur TIC relèvent des activités de services et du commerce. La branche 62 regroupe 73,4 % du total des entreprises du secteur TIC. Autre constat intéressant : plus de 85 % des entreprises du secteur TIC sont des micro-entreprises qui comptent entre 1 et 4 employés.

Le chiffre d'affaires du secteur TIC avoisinait les 40 milliards d'euros en 2018, en hausse de 13 % par rapport à 2017. Les branches 58.2 (+80 %) et 46.5 (+41 %) ont enregistré la plus forte croissance de leur chiffre d'affaires. On observe le plus fort repli du chiffre d'affaires dans les branches 95.1 (-9 %), 26.2 (-6 %) et 26.4 (-3 %). Plus de 93 % du chiffre d'affaires du secteur TIC est généré par les branches de services (commerce compris) et en particulier les branches 61 et 62. Les branches industrielles (principalement les branches 26.1 et 26.3) ne génèrent que près de 7 % du chiffre d'affaires du secteur. La valeur ajoutée nette du secteur TIC en Belgique a atteint 16,7 milliards d'euros en 2018, une augmentation de 9 % par rapport à 2017. La branche 58.2 (+52 %) apporte la majeure contribution à cette croissance. La branche 62 a enregistré une croissance de plus de 17 %. La valeur ajoutée dans toutes les branches industrielles a connu un repli sur la période 2017-2018 (FOD Economie, K.M.O. Middenstand & Energie, 2020).

Les branches relevant des activités de services constituent de très loin les principales contributrices au chiffre d'affaires et à la valeur ajoutée du secteur TIC en Belgique, avec respectivement 93,43 % et 92,77 %. Au sein de celles-ci, les branches 61 et 62 sont les forces motrices puisque chacune génère plus d'1/3 du chiffre d'affaires et de la valeur ajoutée du secteur. Les branches industrielles représentent moins de 10 % du chiffre d'affaires et de la valeur ajoutée ; la principale contributrice étant la branche 26.1 (FOD Economie, K.M.O. Middenstand & Energie, 2020).

4.2.2.2 Chiffre d'affaires et investissements du secteur des télécommunications en Belgique

Les chiffres du SPF Économie montrent en outre que le nombre d'entreprises actives dans le secteur des télécommunications en Belgique a diminué jusqu'en 2016, mais qu'il est en hausse depuis lors. En

2018, le nombre d'entreprises actives dans ce secteur était de 4351, soit une augmentation d'environ 4 % par rapport à l'année précédente.

Tableau 2. Démographie des entreprises dans le secteur TIC en Belgique (Télécommunications surlignées)

| NACE | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 |
|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| 26.1 | 148 | 156 | 162 | 133 | 173 | 178 |
| 26.2 | 191 | 178 | 177 | 175 | 127 | 126 |
| 26.3 | 100 | 94 | 95 | 86 | 72 | 64 |
| 26.4 | 84 | 85 | 86 | 86 | 78 | 75 |
| 26.8 | 9 | 7 | 6 | 7 | 6 | 6 |
| 46.5 | 1.764 | 1.748 | 1.746 | 1.741 | 1.780 | 1.771 |
| 58.2 | 553 | 558 | 573 | 596 | 655 | 714 |
| 61 | 6.232 | 4.830 | 3.979 | 3.769 | 4.181 | 4.351 |
| 62 | 23.495 | 24.220 | 25.478 | 27.106 | 29.251 | 31.692 |
| 63.1 | 2.599 | 2.681 | 2.821 | 2.958 | 3.101 | 3.253 |
| 95.1 | 931 | 934 | 933 | 910 | 925 | 940 |
| TOTAAL | 36.106 | 35.491 | 36.056 | 37.567 | 40.349 | 43.170 |

Bron: Btw-aangiften (2013-2018), FOD Economie - Algemene Directie Statistiek - Statistics Belgium.

Le chiffre d'affaires généré par le secteur des télécommunications en Belgique est relativement stable, comme le montrent les chiffres communiqués par le SPF Économie. Ce chiffre d'affaires d'environ 12 milliards d'euros est resté pratiquement inchangé depuis 2014.

Tableau 3. Chiffre d'affaires du secteur TIC (en milliers d'euros)

| | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 |
|---------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| 26.1 | 1.391.158 | 1.562.371 | 1.737.689 | 1.748.223 | 1.742.911 |
| 26.2 | 79.797 | 83.193 | 92.577 | 103.995 | 97.557 |
| 26.3 | 617.160 | 579.939 | 609.562 | 651.094 | 651.685 |
| 26.4 | 135.389 | 157.556 | 123.285 | 120.413 | 116.885 |
| 26.8 | | | | | |
| 46.5 | 3.437.817 | 3.689.292 | 4.221.687 | 5.569.429 | 7.831.402 |
| 58.2 | 99.505 | 104.372 | 116.933 | 149.386 | 268.274 |
| 61 | 11.621.355 | 11.935.497 | 11.946.863 | 11.870.692 | 11.773.193 |
| 62 | 8.840.786 | 10.203.702 | 11.368.960 | 12.352.671 | 14.238.056 |
| 63.1 | 2.406.985 | 2.476.190 | 2.515.880 | 2.582.432 | 2.943.047 |
| 95.1 | 64.496 | 83.973 | 53.003 | 55.720 | 50.661 |
| TOTAAL | 28.694.447 | 30.876.085 | 32.786.438 | 35.204.056 | 39.713.670 |

Bron: Bel-first (Bureau Van Dijk) - Eigen berekeningen.

La valeur ajoutée générée par le secteur des télécommunications en Belgique est également relativement stable, aux alentours de 5 à 6 milliards d'euros.

Tableau 4. Valeur ajoutée nette du secteur TIC en Belgique (en milliers d'euros)

| | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 |
|---------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| 26.1 | 541.650 | 677.487 | 691.898 | 694.207 | 625.666 |
| 26.2 | 39.956 | 43.646 | 52.169 | 59.429 | 43.174 |
| 26.3 | 417.547 | 400.742 | 435.012 | 488.567 | 483.704 |
| 26.4 | 51.473 | 52.449 | 56.872 | 57.766 | 56.380 |
| 26.8 | 2.303 | 1.771 | 1.852 | 1.678 | |
| 46.5 | 447.019 | 426.847 | 566.881 | 639.439 | 727.180 |
| 58.2 | 83.653 | 98.857 | 101.895 | 124.259 | 188.357 |
| 61 | 5.419.285 | 5.485.912 | 5.612.078 | 5.599.117 | 5.750.983 |
| 62 | 4.474.054 | 4.847.055 | 5.597.790 | 6.216.049 | 7.302.868 |
| 63.1 | 1.260.371 | 1.320.699 | 1.376.218 | 1.373.433 | 1.511.552 |
| 95.1 | 42.569 | 42.569 | 36.732 | 37.442 | 35.811 |
| TOTAAL | 12.779.882 | 13.398.034 | 14.529.398 | 15.291.386 | 16.725.674 |

Bron: Bel-first (Bureau Van Dijk) - Eigen berekeningen.

Cependant, l'emploi dans le secteur des télécommunications montre une tendance à la baisse en Belgique. Par exemple, quelque 2.000 emplois ont été perdus dans le secteur au cours de la période 2015-2018.

Tableau 5. Nombre de travailleurs occupés dans le secteur TIC en Belgique, 2015-2019

| | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 |
|---------------|---------------|---------------|----------------|----------------|----------------|
| 26.1 | 4.122 | 4.169 | 4.219 | 4.322 | 4.419 |
| 26.2 | 503 | 482 | 491 | 512 | 453 |
| 26.3 | 2.591 | 2.635 | 2.634 | 2.692 | 2.625 |
| 26.4 | 151 | 157 | 148 | 138 | 155 |
| 46.5 | 13.176 | 12.481 | 11.661 | 11.627 | 11.702 |
| 58.2 | 792 | 744 | 708 | 623 | 552 |
| 61 | 21.425 | 21.518 | 20.627 | 19.542 | 19.130 |
| 62 | 46.642 | 50.888 | 55.086 | 59.367 | 64.209 |
| 63.1 | 5.176 | 5.289 | 6.290 | 6.932 | 7.203 |
| 95.1 | 1.000 | 1.128 | 914 | 902 | 920 |
| TOTAAL | 95.578 | 99.491 | 102.778 | 106.657 | 111.368 |

Bron: RSZ.

4.2.3 Situation économique du secteur des télécommunications dans la Région de Bruxelles-Capitale

La base de données BEL FIRST du Bureau Van Dijk, qui contient tous les chiffres clés des entreprises belges, indique que 1.142 entreprises étaient actives dans le secteur des télécommunications dans la Région de Bruxelles-Capitale au moment de l'étude (décembre 2020). Sur ces 1.142 entreprises, le taux d'emploi est disponible pour 510 d'entre elles, tandis que le chiffre d'affaires est disponible pour

530 d'entre elles. La stratégie de recherche utilisée pour récolter ces données est présentée dans le tableau 6.

Le chiffre d'affaires total déclaré pour le secteur s'élève à 9.286.253.270 euros pour les dernières années disponibles. Cette part est relativement importante par rapport à l'ensemble de la Belgique, sachant que les principaux opérateurs de télécommunications sont installés à Bruxelles. En ce qui concerne l'emploi, ces entreprises déclarent un total de 16.637 ETP (équivalents temps plein) occupés et ce, pour les dernières années disponibles.

Figure 12. Les 20 plus gros chiffres d'affaires des entreprises de télécommunications dans la Région de Bruxelles-Capitale. (Source auteur)

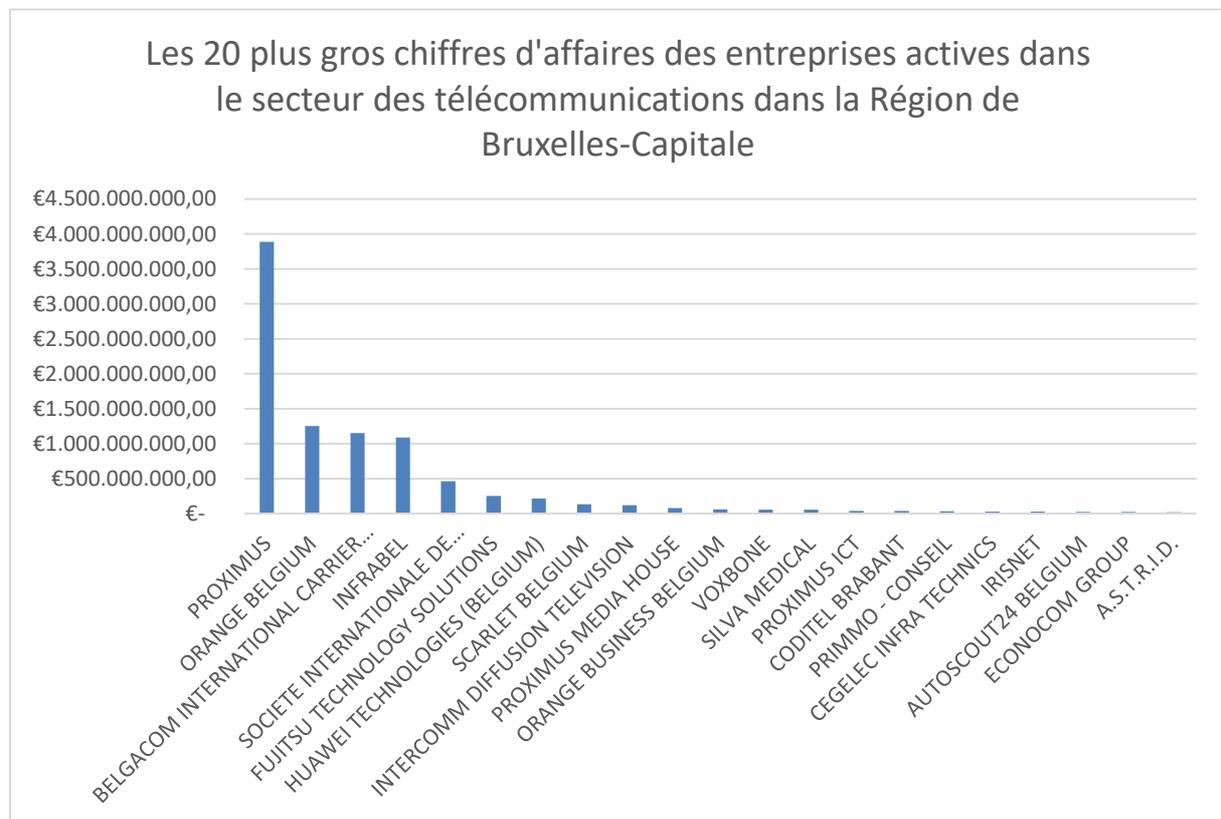


Tableau 6. Stratégie de recherche sur la situation économique du secteur des télécommunications dans la Région de Bruxelles-Capitale. (Source auteur)

| ZOEKSTRATEGIE | | Bewaren | Afdrukken | Verwijder alle zoekstappen |
|--|---|--------------|-----------|----------------------------|
| <input type="checkbox"/> | 1. BvD ID-nummer | | | 0 |
| <input checked="" type="checkbox"/> | 2. NACE-BEL 2008, Alle codes: 611 - Draadgebonden telecommunicatie, 612 - Draadloze telecommunicatie, 613 - Telecommunicatie via satelliet, 619 - Overige telecommunicatie | 3.134 | 3.134 | 0 |
| <input checked="" type="checkbox"/> | 3. Gewest, provincie, arrondissement & gemeente: Brussels hoofdstedelijk gewest | 172.638 | 1.142 | |
| <input checked="" type="checkbox"/> | 4. Omzet, gebruik makend van schattingen: Alle bedrijven met een bekende waarde, Laatste beschikbare jaar, Laatste jaar -1, Laatste jaar -2, Laatste jaar -3, Laatste jaar -4, Laatste jaar -5, Laatste jaar -6, Laatste jaar -7, Laatste jaar -8, Laatste jaar -9, voor tenminste één v/d geselecteerde periodes (unconso, accounts preferred, NRF are excluded) | 496.760 | 530 | |
| <input checked="" type="checkbox"/> | 5. Aantal werknemers, gebruik makend van schattingen: Alle bedrijven met een bekende waarde, Laatste beschikbare jaar, Laatste jaar -1, Laatste jaar -2, Laatste jaar -3, Laatste jaar -4, Laatste jaar -5, Laatste jaar -6, Laatste jaar -7, Laatste jaar -8, Laatste jaar -9, voor tenminste één v/d geselecteerde periodes (unconso, accounts preferred, NRF are excluded) | 506.676 | 510 | |
| Booleaanse selectie 2 En 3 En 4 En 5 | | TOTAAL : 510 | | |

4.3 Bibliographie

- 5G Americas. (2020). *Forecast number of mobile 5G subscriptions worldwide from 2019 to 2024*. Consulté le 2020, sur 5G Americas:
<https://i1.wp.com/www.5gamericas.org/wp-content/uploads/2019/12/5G-growth-1.png?ssl=1>
- AP News. (2019). *Worldwide Connected Vehicle Shipments Forecast to Reach 76 Million Units by 2023, According to IDC*. Consulté le 2020, sur apnews.com:
<https://apnews.com/press-release/pr-businesswire/d72b6ba2039540aabccce8f1e96721edc>
- Belgisch Instituut voor postdiensten en telecommunicatie. (2020). *Mededeling van de Raad van het BIPT van 30 juni 2020 betreffende de status van de elektronische communicatie- en televisiemarkt in 2019*. BIPT.
- Campbell, K., Diffey, J., Flanagan, B., Morelli, B., O'Neil, B., & Sideco, F. (2017). *The 5G economy: How 5G technology will contribute to the global economy*. IHS Economics & IHS Technology. IHS Markit.
- Ericsson. (2020). *Ericsson Mobility Visualizer*. Consulté le 2020, sur Mobility report:
<https://www.ericsson.com/en/mobility-report/mobility-visualizer?f=1&ft=1&r=4,3,5,6,2,7,8,9&t=1&s=4&u=1&y=2011,2025&c=1>
- FOD Economie, K.M.O. Middenstand & Energie. (2020). *Barometer van de informatiemaatschappij 2020*. FOD Economie, K.M.O., Middenstand & Energie.
- Gartner. (2019). *Gartner Newsroom*. Consulté le 2020, sur Gartner Says 5.8 Billion Enterprise and Automotive IoT Endpoints Will Be in Use in 2020:
<https://www.gartner.com/en/newsroom/press-releases/2019-08-29-gartner-says-5-8-billion-enterprise-and-automotive-iot>
- Global Market Insights. (2019). *Digital Health Market Size By Technology*. Consulté le 2020, sur gminsights.com: <https://www.gminsights.com/industry-analysis/digital-health-market>
- GSMA. (2020). *The Mobile Economy*. Récupéré sur The Mobile Economy 2020:
https://www.gsma.com/mobileeconomy/#key_stats
- GSMA. (2020). *The Mobile Economy 2020*. GSMA intelligence.
- IDC. (2020). *New IDC Spending Guide Forecasts \$124 Billion Will Be Spent on Smart Cities Initiatives in 2020*. Consulté le 2020, sur idc.com:
<https://www.idc.com/getdoc.jsp?containerId=prUS46016320>
- IDC. (2020). *Worldwide Spending on the Internet of Things Will Slow in 2020 Then Return to Double-Digit Growth, According to a New IDC Spending Guide*. Consulté le 2020, sur idc.com: <https://www.idc.com/getdoc.jsp?containerId=prUS46609320>
- ITU. (2019). *Number of active mobile broadband subscriptions worldwide from 2007 to 2019*. ITU. ITU.nt.
- Jones, N. (2020). *Innovation Opportunities Will Be Enabled as 5G Evolves Through 2025*. Gartner.
- Morley, T. (2020). *COVID 19 Impacts on telecom & 5G - Growth opportunities with the next generation of mobile technology*. Frost & Sullivan.

5 Conclusion générale

En ce qui concerne l'application de l'ordonnance, 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 et il voit d'un œil favorable les efforts déployés pour encore améliorer 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 sur la 5G exécutés par BE, le comité a confiance en l'expertise de BE pour relever ce défi.

En ce qui concerne le côté technique, la 5G est nécessaire pour répondre à la demande croissante de plus de capacité. La 5G apporte un certain nombre d'innovations techniques qui permettent de continuer à répondre à la demande de capacité. Cependant, il est pour cela essentiel de pouvoir augmenter la quantité de spectre (W), le nombre d'antennes (n) et, à terme, la puissance rayonnée (et donc le champ autorisé).

Afin d'exploiter au mieux l'augmentation de la quantité de spectre (W) et du nombre d'antennes (n), la 5G offre plusieurs nouvelles technologies :

- La technologie MIMO massif permet d'utiliser la grande quantité de spectre à plus hautes fréquences ($W= 100$ MHz pour les nouvelles licences), mais cela ne peut fonctionner de manière optimale que si la puissance rayonnée P peut également augmenter au moins proportionnellement, afin de maintenir un bon rapport P/WNo .
- La MIMO massif permet d'installer plusieurs antennes au même endroit (n), mais ces antennes actives nécessiteront une modification de la méthode de calcul qui ne suppose pas de G_{max} .

Concernant les effets potentiels sur la santé, les études ciblant précisément les 2 fréquences émergentes de la 5G (3,5 et 26 GHz) sont très peu nombreuses. De plus, celles qui ont été publiées ont utilisé des niveaux de champs très élevés comparés aux normes en vigueur dans le domaine des télécommunications. Ces études ne peuvent donc pas donner une image précise des effets potentiels d'une exposition à la 5G.

Avec la bande de fréquences autour de 26 GHz, beaucoup de personnes se sont appuyées sur les études réalisées en millimétriques pour demander un moratoire sur la 5G. Bien que proches, les ondes millimétriques sont de plus hautes fréquences que le 26 GHz. Pour les ondes millimétriques, la littérature est plus abondante, mais pas forcément centrée sur l'analyse du risque car la plupart de ces études porte sur la recherche de mécanismes pouvant expliquer les effets thérapeutiques de ces ondes. Ceci peut apporter de la confusion pour quiconque n'est pas familier avec le domaine.

Du point de vue de l'analyse du risque sanitaire, on peut penser que les fréquences basses de la 5G (700 MHz et 3,5 GHz) ne changeront rien à la situation actuelle où prédominent la 3G et la 4G. Par contre, l'utilisation de fréquences autour de 26 GHz peut changer la donne, car l'énergie de ces ondes sera principalement absorbée par la peau, et ne pénétrera plus aussi profondément dans le corps (Wu et al., 2015). Ainsi, on peut espérer que cette faible pénétration va augmenter la sécurité. Pour l'instant, le seul doute persistant vis-à-vis des effets sanitaires éventuels concerne le sur-risque éventuel d'avoir un cancer du cerveau pour les gros utilisateurs de téléphonie mobile. Avec la diminution du pouvoir pénétrant des ondes, le cerveau ne sera plus une cible directe de ces ondes.

En termes de recherche expérimentale, il sera néanmoins intéressant de vérifier qu'un dépôt d'énergie plus important au niveau de la peau ne peut pas générer un « signal » cellulaire et entraîner une réponse au niveau de l'organisme.

Il nous faut ici rappeler que la recherche en bioélectromagnétisme est une recherche pluridisciplinaire exigeante qui nécessite d'une part, d'étroites relations entre physiciens et biologistes et d'autre part, d'inclure de nombreux contrôles dans les protocoles. Pour être éligible dans une analyse du risque collective, objective et rigoureuse, une étude expérimentale doit comporter a minima : une caractérisation de l'exposition des échantillons (dosimétrie), un contrôle d'exposition (exposition sham), un contrôle de température et une analyse des données en aveugle (sans connaissance du statut d'exposition de l'échantillon), ce qui prévient les principaux biais dans les résultats (Simkó et al. 2016).

En termes de recherche épidémiologique, la seule étude de cohorte prospective à grande échelle, dédiée aux expositions radiofréquences qui existe est l'étude européenne Cosmos (<http://www.thecosmosproject.org/>). Cosmos mobilise 6 pays européens et assure le suivi de près de 300 000 personnes pour des pathologies chroniques (cancer, cardio-vasculaires, neurologiques) et un panel de symptômes ressentis (céphalées, acouphènes, ...). Il apparaît important de soutenir financièrement cette étude internationale pour lui permettre d'être pérenne, avant d'envisager d'autres études. En effet, la 5 G va être incluse dans les sources d'exposition de Cosmos ; l'évaluation des expositions 5G pose des questions complexes et va nécessiter des ressources humaines supplémentaires.

Enfin, des mesures de l'exposition du public à la 5G seront nécessaires pour déterminer à quelle puissance le public sera exposé et dans quelle mesure la 5G va augmenter l'exposition moyenne du public.

En termes d'impact micro-économique, on peut conclure qu'une augmentation du trafic mobile de données finira par entraîner des lacunes structurelles dans le réseau télécom actuel et que des efforts supplémentaires sont donc indispensables dans ce contexte. Sur la base des prévisions disponibles, cet effort semble également conduire à une augmentation des investissements et du chiffre. Toutefois, une valeur ajoutée effective ne sera possible que lorsque l'agenda concernant les licences 5G sera définitif et justifie des efforts supplémentaires et s'il existe également un cadre politique dans lequel où de tels investissements peuvent apporter une valeur ajoutée. Par conséquent, ni les opérateurs de téléphonie ni les fournisseurs ne semblent disposés à faire des efforts supplémentaires à ce stade. En outre, on peut examiner si, pour le panier d'activités économiques exercées sur le territoire bruxellois, outre le secteur des TIC, d'autres secteurs peuvent réaliser des bénéfices et/ou un chiffre d'affaires considérables grâce à l'application de cette technologie. Ce dernier point n'est pas clair à l'heure actuelle et crée une situation dans laquelle la consultation entre le gouvernement, l'industrie et les représentants des intérêts locaux est souhaitable, afin de mieux cerner les applications potentielles de cette technologie, ainsi que les besoins actuels de la région en la matière, et d'harmoniser les efforts dans ce domaine avec les priorités stratégiques de la politique régionale.

En tout état de cause, il est prévu que les réseaux mobiles devront tenir compte d'une forte augmentation de la demande de capacité dans les années à venir. La 5G est nécessaire pour répondre à cette demande croissante de capacité accrue et cette technologie apporte un certain nombre d'innovations techniques qui permettent de continuer à répondre à la demande de capacité. Cependant, il doit être possible d'augmenter la quantité de spectre (nouvelles licences), le nombre d'antennes (plus de petites cellules et mMIMO) ainsi que la puissance produite.

6 Annexe : Rémunérations payées par membre en 2020

| Nom | Prénom | Montant total (€) |
|-----------|-----------|-------------------|
| BEAUVOIS | Véronique | 300 |
| Aerts | Geoffrey | 100 |
| Le Dréans | Yves | 100 |
| Hecq | Walter | 0 |
| Rolain | Yves | 200 |
| Erzeel | David | 200 |
| Selmaoui | Brahim | 100 |
| Pollin | Sofie | 200 |
| Lagroye | Isabelle | 0 |

7 Rémunérations payées par membre en 2019

| Nom | Prénom | Montant total (€) |
|-----------|-----------|-------------------|
| BEAUVOIS | Véronique | 150 |
| Aerts | Geoffrey | 0 |
| Le Dréans | Yves | 0 |
| Hecq | Walter | 100 |
| Rolain | Yves | 100 |
| Erzeel | David | 100 |
| Selmaoui | Brahim | 0 |
| Pollin | Sofie | 0 |
| Lagroye | Isabelle | 0 |