

# Bruxelles-Environnement



## Rapport du comité d'experts sur les radiations non ionisantes 2018-2019

Présidente : Beauvois, V.

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

# 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	Défis pour la réalisation des mesures dans un contexte 5G.....	7
1.2.1	Influence de la diversité spatiale et temporelle en 5G .....	7
1.3	Avis général concernant le protocole de mesure .....	9
2	Technologie 5G et conséquences pour le rayonnement.....	10
2.1	Évolution de l'ordonnance sur les normes en matière de rayonnement pour la Région de Bruxelles-Capitale. ....	10
2.2	Croissance de la capacité de transmission de données mobiles et impact sur le rayonnement et les normes .....	11
2.3	Défis et opportunités de la 5G .....	14
2.3.1	Approche statistique du calcul du rayonnement .....	16
2.3.2	Amélioration du bilan de liaison par « <i>channel hardening</i> » (durcissement du canal) .....	21
2.3.3	Exposition aux ondes millimétriques.....	23
2.4	Avis .....	24
3	Effets sur la santé.....	25
3.1	Les études scientifiques.....	25
3.2	Ce que la 5G va changer sur les interactions ondes-organismes.....	29
3.3	L'étude NTP (National Toxicological Programme).....	30
3.4	Effet des radiofréquences sur l'EEG .....	34
3.4.1	<i>Effets des RF sur l'EEG en éveil</i> .....	34

3.4.2	<i>Effets des RF sur l'EEG du sommeil</i> .....	35
3.4.3	<i>Conclusions</i> .....	35
3.5	Effet des RF sur les enfants .....	35
3.6	L'hypersensibilité électromagnétique .....	37
3.7	Conclusion .....	38
3.8	Bibliographie .....	39
4	Impacts spécifiques sur l'économie .....	44
4.1	Aspects macro-économiques .....	44
4.1.1	Avant- propos .....	44
4.1.2	Marchés mondial et européen du secteur mobile 5G : le nombre de souscriptions mobiles attendues et le trafic mobile – Les phases de tests et de déploiement.....	45
4.1.3	Moteur de croissance .....	46
4.1.4	Contribution directe et indirecte à l'activité économique.....	47
4.1.5	Emploi .....	47
4.1.6	Infrastructures (antennes et relais) .....	48
4.1.7	Financement public – Recettes d'attribution de spectres .....	49
4.1.8	Services rendus.....	50
4.1.9	Barrières.....	50
4.2	Aspects micro-économiques.....	53
4.2.1	Situation du secteur des télécommunications mobiles en Belgique.....	53
4.2.2	Contribution directe et indirecte au développement économique du secteur numérique belge et bruxellois et contribution à l'emploi.....	59
4.2.3	Politiques de soutien à l'économie numérique.....	71
4.2.4	Importance des réseaux pour l'économie numérique et introduction de nouvelles technologies à Bruxelles.....	73
5	Suggestions.....	80
6	Conclusion générale.....	80

# 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 de l'année écoulée. 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 a été 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 le rapport précédent, et cet accord est maintenu.

#### 1.1.2.2 Mesures à l'intérieur

Le Comité est d'accord avec la procédure utilisée pour les mesures à l'intérieur.

#### 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.

Le simulateur ne peut pas être utilisé pour obtenir des résultats à l'intérieur. Afin d'obtenir une prévision, un certain nombre de scénarios courants peuvent être utilisés comme il a été déjà indiqué dans le rapport précédent.

Moyennant une série de nouvelles campagnes de mesures en 2018, BE a encore 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 positif<sup>1</sup>. 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.

---

<sup>1</sup> Annexe 1 du présent rapport

- **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 pourra être validé 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'éclairage 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 le paquet satisfait aux exigences en matière de mesures à l'extérieur des bâtiments et sur 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'origine des valeurs aberrantes. L'adaptation de la méthodologie demandera un développement des outils et le temps de calcul doit rester réaliste et pratique. La méthode actuelle montre déjà de bonnes performances.

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

### 1.2.1 Influence de la diversité spatiale et temporelle en 5G

#### 1.2.1.1 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 62669:2018 du Comité technique IEC TC106 (106/473/DTR). Selon le site web de l'IEC, ce document a été approuvé (106/482/RCDTR). Avant que le document ne soit rendu public, nous prévoyons que le texte actuel sera traduit et que la publication sera alors possible.

**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.<sup>2</sup>

Les mesures relevant de la diversité spatiale ne sont pas réalisables avec précision au moyen des instruments actuels de BE. Afin de pouvoir effectuer des mesures fiables et réalistes, le Comité estime qu'il sera 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 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.

#### *1.2.1.2 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.

Pour l'instant, il n'existe pas de procédure adaptée dans la littérature. Il y a toutefois un projet initial en cours qui tente d'inclure ces aspects [IEC TR 62669:2018]. Là encore, BE devra continuer à suivre la situation de près afin d'ancrer les connaissances nécessaires dans les protocoles de mesure.

**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

---

<sup>2</sup>

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



augmentation. Actuellement, nous pensons qu'il n'est pas impossible d'augmenter le temps de mesure à 30 minutes. Ceci est problématique pour la réalisation des mesures de contrôle par BE.

**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.

### 1.3 Avis général concernant le protocole de mesure

Le Comité est d'avis que l'IBGE 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 et qu'il est nécessaire d'anticiper 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, le comité a confiance en l'expertise de BE pour relever ce défi.

## 2 Technologie 5G et conséquences pour le rayonnement

Cette section résume les aspects techniques des futures technologies de communication sans fil. L'accent est mis sur la technologie 5G, qui a récemment été standardisée et qui sera mise en service dans un proche avenir.

La structure de cette section est la suivante. Nous commençons par résumer la position que le Comité a adoptée fin 2018 dans le cadre de l'évolution des normes en matière de rayonnement. Nous résumons et expliquons ensuite les principaux résultats de l'étude de l'IBPT de septembre 2018 concernant l'impact des normes bruxelloises en matière de rayonnement sur le déploiement de la 5G. Nous concluons en évoquant un certain nombre d'aspects de la technologie 5G qui doivent être étudiés plus avant. Pour chacun de ces aspects, nous expliquons à la fois les défis et les opportunités.

### 2.1 Évolution de l'ordonnance sur les normes en matière de rayonnement pour la Région de Bruxelles-Capitale.

Le Comité souscrit aux conclusions techniques de l'IBPT « Étude du 12 septembre 2018 concernant l'impact des normes de rayonnement bruxelloises sur le déploiement des réseaux mobiles » et souligne ce qui suit<sup>[3]</sup> :

- 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 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.

---

<sup>3</sup> Étude du 12 septembre 2018 concernant l'impact des normes de rayonnement bruxelloises sur le déploiement des réseaux mobiles] <https://www.ibpt.be/fr/operateurs/radio/antennes-utilisation-partagee-des-antennes/etude-du-12-septembre-2018-concernant-limpact-des-normes-de-rayonnement-bruxelloises-sur-le-deploiement-des-reseaux-mobiles>, lien consulté le 8 mars 2019.

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 transmission de données mobiles et impact sur le rayonnement et les normes

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 127,84 milliards de mégaoctets en 2017 (voir figure 1). Toutefois, la consommation mensuelle moyenne de données pour la Belgique reste nettement inférieure à la moyenne de l'OCDE.

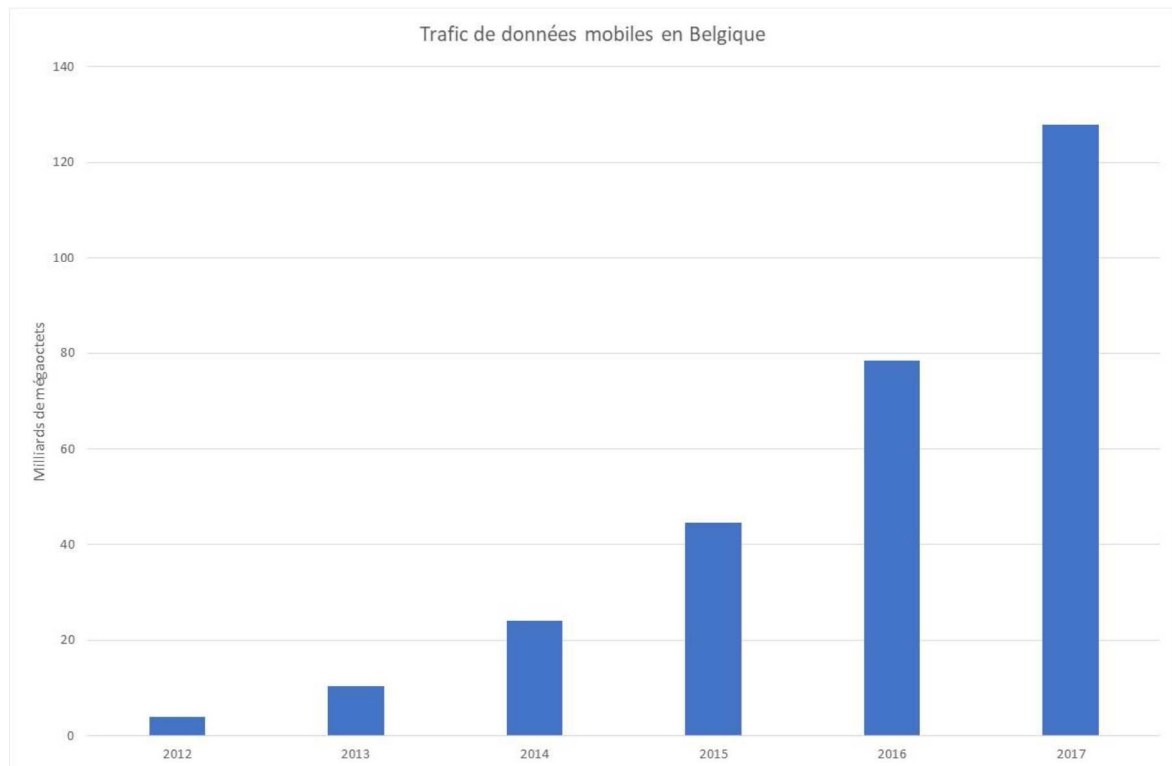


Figure 1 - Évolution du trafic de données mobiles en Belgique entre 2012 et 2017.

Cette tendance devrait se poursuivre dans les années à venir. Selon les estimations d'Ericsson, le trafic de données mobiles pour l'ensemble de l'Europe occidentale devrait être multiplié par sept entre 2017 et 2023, passant de 1800 milliards de mégaoctets par mois à 12.000 milliards de mégaoctets par mois (voir Figure 2).

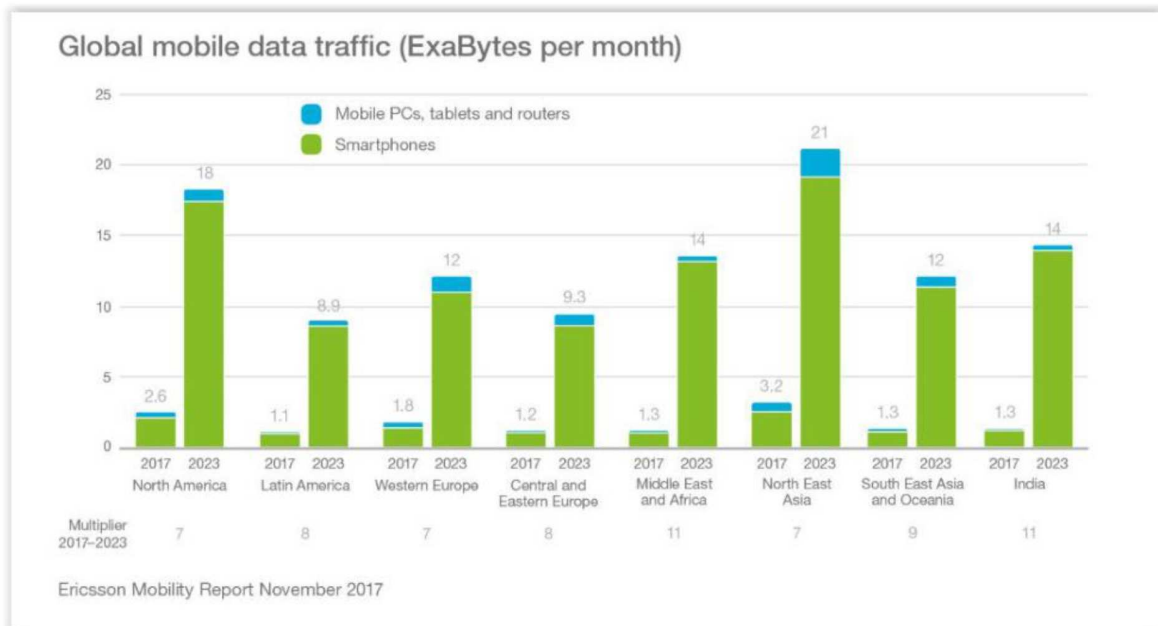


Figure 2 - Prévisions de l'évolution du trafic mensuel de données mobiles en Europe occidentale.

L'augmentation du trafic de données mobiles a inévitablement un impact sur les puissances émises par les antennes des opérateurs. Selon les limites de la physique fondamentale et de la théorie de la communication<sup>[4]</sup>, un certain niveau minimum d'énergie 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. La figure 3 fournit une approximation de la capacité d'un réseau de communications, d'où il ressort clairement que la croissance de la capacité ne peut être obtenue que par une augmentation du spectre (B), du nombre d'antennes (n) ou de la puissance transmise (rapport signal/bruit [SNR pour « signal to noise ratio »] supérieur).

<sup>4</sup> N. J.A. Sloane ; Aaron D. Wyner, « A Mathematical Theory of Communication », dans *Claude E. Shannon: Collected Papers*, IEEE, 1993.

$$C \approx B \cdot n \cdot \log_2(1 + SNR)$$

Capacity    Spectrum    Antennas

Link Quality



<p><b>More spectrum</b></p> <p>Higher frequencies /broadband receivers</p> <p>200kHz@900 MHz 20 MHz @ 2.6 GHz 100 MHz @ 3.5 GHz 400 MHz @ 26 GHz</p>	<p><b>More antennas</b></p> <p>Smaller cells and multiple antennas per cell</p> 	<p><b>More power</b></p> <p>better algorithms and hardware</p> 
--	---	---

Figure 3 - La capacité ou le débit de données dépend du spectre disponible (B), du nombre d'antennes (n) et de la qualité de la liaison (le SNR, qui est fonction de la puissance émise).

La disparition de la technologie 2G et 3G permettra toutefois d'accroître l'efficacité spectrale pour l'utilisation d'une technologie plus efficace dans les bandes 900 MHz et 2000 MHz. Toutefois, cette augmentation de l'efficacité spectrale ne permettra pas à elle seule d'absorber un trafic de données mobiles sept fois plus important. 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 augmenté considérablement par rapport au déploiement initial. Le remplacement de la technologie 2G et 3G par la 5G avec une norme équivalente ne sera pas suffisante pour contenir la demande croissante en données.

De plus, la 3G ne pourra s'éteindre que lorsque le nombre de smartphones non compatibles 4G sera devenu marginal. Aujourd'hui, environ 23% des cartes SIM ne sont pas compatibles 4G. L'arrêt éventuel de la 2G créera encore plus de problèmes en raison du grand nombre de clients M2M utilisant des modems 2G et du nombre élevé de téléphones mobiles de 2e génération 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 générés 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.

La cinquième génération mobile (5G), prévue à partir de 2020, 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 les secteurs économiques et sociaux (jusqu'à 1.000.000 objets par kilomètre carré). Ces secteurs sont appelés « *verticals* » (verticaux) dans le cadre de la 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 technologie nécessaire au déploiement de la 5G utilisera une multiplicité d'antennes qui concentreront leur énergie en faisceaux dans une plus grande mesure qu'une antenne classique pour la 2G, la 3G ou la 4G. Il en résultera une plus grande exposition à la puissance. En effet, un système « *MIMO massif* » (*Multiple Input Multiple Output*) sera utilisé, dans lequel plusieurs antennes couvriront un même secteur d'antenne, ce qui permettra d'augmenter le débit par utilisateur et d'optimiser la qualité du signal dans les endroits difficiles à couvrir.

Sans adaptation des normes bruxelloises de rayonnement, l'augmentation prévue du trafic de données par un facteur sept à l'horizon 2023 ne sera pas possible, quelle(s) que soi(en)t la ou les technologies utilisées.

Pour le déploiement de la 5G, il est absolument nécessaire d'adapter la méthode de calcul prévue dans les arrêtés d'exécution pour tenir compte des antennes « MIMO massif ». Cette exigence s'applique non seulement à la Région de Bruxelles-Capitale, mais aussi aux Régions flamande et wallonne. Nous donnons ci-dessous un aperçu des propriétés spécifiques de la technologie 5G et de l'impact sur la méthode de calcul des normes.

## 2.3 Défis et opportunités de la 5G

Avec la 5G, la communication permettra non seulement aux futurs réseaux cellulaires de fournir une énorme capacité de données (en augmentant les valeurs B, n et SNR de la Figure 3), mais garantira aussi de manière générale une qualité de communication élevée pour les applications qui nécessitent non seulement de la capacité, mais aussi une temporisation ou de la fiabilité, un faible coût ou une longue durée de vie de la batterie (en soutien des demandes pour les secteurs dits « *verticals* ») . On trouvera un aperçu des spécifications de la 5G dans le [rapport Vision de l'UIT \[5\]](#).

Pour rendre possible cette palette d'exigences, un large éventail de technologies possibles est prévu. Les changements les plus perturbateurs que la technologie 5G apportera dans le domaine du rayonnement se situent dans l'utilisation du « MIMO massif » [6] ainsi que des ondes millimétriques (*mmWave*) [7]. Avec ces deux technologies, la puissance sera plus concentrée, de sorte que nous aurons désormais, outre les impulsions ou les pics dans le temps, des **pics spatiaux contrôlés** dans le diagramme de rayonnement.

---

<sup>5</sup> M.2083 : Vision IMT -« Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond »

<sup>6</sup> E. G. Larsson, O. Edfors, F. Tufvesson et T. L. Marzetta, « Massive MIMO for next generation wireless systems », dans *IEEE Communications Magazine*, vol. 52, no. 2, pp. 186-195, février 2014.

<sup>7</sup> M. Giordani, M. Polese, A. Roy, D. Castor et M. Zorzi, « A Tutorial on Beam Management for 3GPP NR at mmWave Frequencies, » dans *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 21, no. 1, pp. 173-196, premier trimestre 2019.

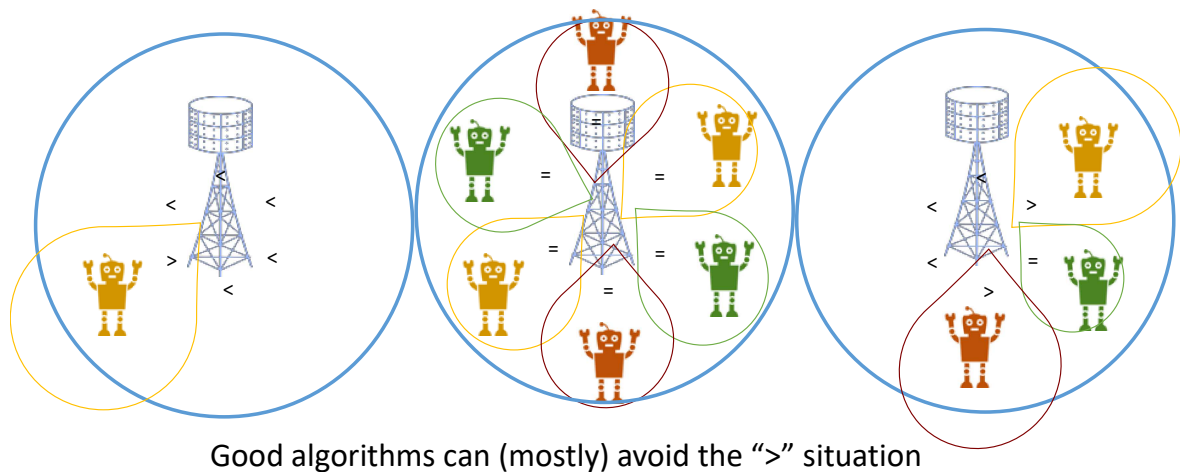


Figure 4 - Illustration de la puissance de focalisation sur plusieurs utilisateurs dans le contexte du « MIMO massif ». À gauche, on voit le scénario le plus extrême, où toutes les antennes s'allient pour obtenir un « array gain » ou gain de puissance/d'antenne pour un utilisateur unique. Il en résulte que la plupart des endroits de la cellule subissent un rayonnement plus faible (<). Au milieu se trouve un scénario où la puissance est répartie uniformément, mais la concentration est maintenant appliquée à la création de signaux différents pour différents utilisateurs afin d'optimiser la capacité. Dans ce cas, il n'y a pas de différence de rayonnement entre les cellules 4G et 5G. Dans un scénario typique, il est réaliste de s'attendre à ce qu'une série d'utilisateurs reçoivent plus de puissance. Une nouvelle méthodologie de calcul de la norme permettra d'estimer comment ces pics contrôlés seront distribués en moyenne dans l'espace.

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 différents signaux à plusieurs utilisateurs en même temps. Cette technologie est appelée « *multi-user massive MIMO* » [8]. Il y a plusieurs conséquences positives possibles pour l'utilisateur qui sont souvent mentionnées dans la littérature. En voici un aperçu :

1. moins de rayonnement si l'utilisateur n'est pas actif ;
2. un meilleur canal (« *channel hardening* » [9]) pour l'utilisateur actif qui peut alors émettre une puissance inférieure et ainsi minimiser l'exposition effective via le téléphone (appelé User Equipment (UE) ;
3. L'utilisation des ondes millimétriques a pour effet de réduire la pénétration dans le corps humain.

<sup>8</sup> X. Gao, O. Edfors, F. Rusek et F. Tufvesson, « Massive MIMO Performance Evaluation Based on Measured Propagation Data, » dans *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 14, no. 7, pp. 3899-3911, juillet 2015.

<sup>9</sup> À. O. Martínez, E. De Carvalho et J. Ø. Nielsen, « Massive MIMO properties based on measured channels : Channel hardening, user decorrelation and channel sparsity », *2016 50th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers*, Pacific Grove, CA, 2016, pp. 1804-1808.

Nous donnons ci-dessous un aperçu des résultats de la littérature et énumérons les conclusions que nous pouvons tirer, sur la base de l'état actuel des choses, en ce qui concerne les conséquences de la focalisation plus spatiale du rayonnement et de l'utilisation de fréquences plus élevées.

### 2.3.1 Approche statistique du calcul du rayonnement

Comme l'illustre la figure 4, une station de base « MIMO massif » régule la direction ou l'emplacement où la puissance reçue est à son maximum. L'analyse de l'exposition doit tenir compte de cette variation spatiale de l'exposition.

Dans les systèmes de communication cellulaires traditionnels, avec des diagrammes de rayonnement statiques, chaque emplacement subira un rayonnement fixe, du moins si nous supposons que pour la mesure des variations du rayonnement, nous moyennons suffisamment les variations incontrôlées des canaux. Avec le « *MIMO massif* » ou la « *3D beamforming* » (formation de faisceaux 3D), le diagramme de rayonnement d'une antenne devient dynamique, ce qui nous oblige à faire la moyenne des pics de rayonnement dans le temps. Si nous pouvons supposer une distribution uniforme des utilisateurs dans la cellule, le rayonnement sera réparti uniformément dans cette cellule. En conséquence tous les sites actuels ont, en moyenne, une puissance équivalente. Dans les systèmes traditionnels, ce sont surtout les utilisateurs proches du mât qui voient une puissance élevée pour tous les signaux vers tous les utilisateurs, et la densité de puissance n'est pas répartie uniformément ou équitablement dans la cellule. Avec le « MIMO massif », il est possible de diriger la puissance de manière optimale vers le récepteur. Si les récepteurs sont répartis uniformément sur une cellule, l'exposition au rayonnement sera aussi répartie uniformément, donc équitablement, sur une cellule.



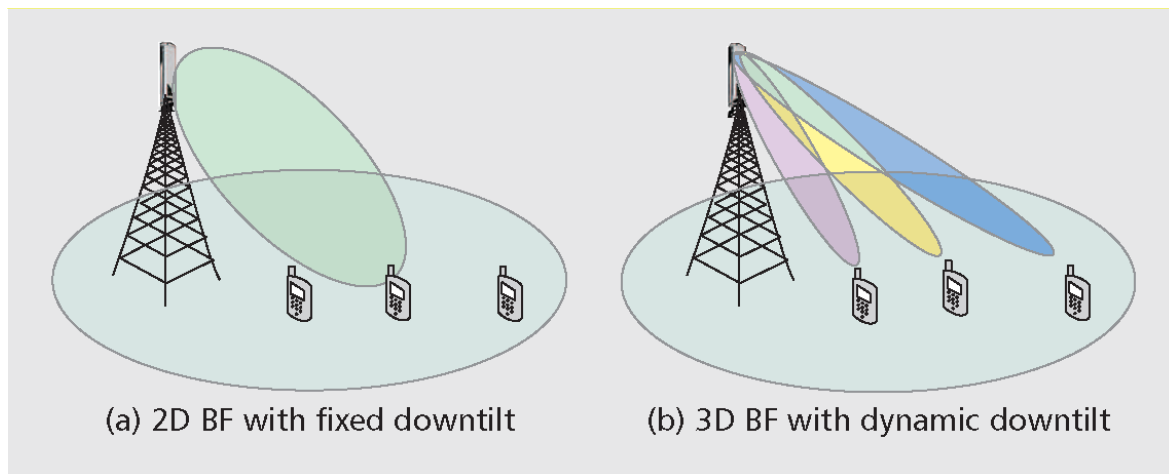


Figure 5 - Illustration de la formation de faisceaux 3D (« 3D beamforming ») et son influence sur l'inclinaison de l'antenne. Repris de [ 10].

Dans l'état de l'art actuel, des méthodes ont été proposées sur l'approche la plus pertinente pour calculer le rayonnement dans des scénarios réalistes où les emplacements des récepteurs ne sont pas totalement aléatoires et où tous les récepteurs ne reçoivent pas la même quantité de données. Une raison importante est le fait qu'il faut faire la moyenne de la puissance sur un intervalle de 6 minutes, ce qui est relativement long. Un utilisateur ne sera jamais effectivement actif pendant 6 minutes, car la plupart des modèles de données supposent que les utilisateurs utilisent le support sans fil brièvement et sporadiquement. Il s'ensuit que le pic fort que le « *MIMO massif* » peut créer vers un seul utilisateur au cours de ces 6 minutes doit être calculé en moyenne sur plusieurs utilisateurs ou pics. Pour mesurer l'exposition, il faut donc tenir compte non seulement des caractéristiques de propagation et d'antenne, mais aussi des modèles de données. Les utilisateurs étant en principe difficilement prévisibles, il n'est donc pas facile de proposer des modèles pertinents pour des schémas typiques de la position des utilisateurs et de l'intensité de leur utilisation des données.

Dans [11], un « *averaged array gain* » ou gain d'antenne moyenné typique est calculé pour différents scénarios, qui sont résumés ci-dessous.

<sup>10</sup> X. Cheng *et al*, « Communiquer dans le monde réel : 3D MIMO », dans *IEEE Wireless Communications*, vol. 21, no. 4, pp. 136-144, août 2014.

<sup>11</sup> P. Baracca *et coll.* « A Statistical Approach for RF Exposure Compliance Boundary Assessment in Massive MIMO systems », <https://arxiv.org/pdf/1801.08351.pdf>

Dans le premier scénario, il n'y a pas de probabilité temporelle, et on suppose que toutes les antennes de la station de base « *MIMO massif* » sont utilisées pour desservir un seul utilisateur qui est actif pendant une période complète de 6 minutes. Dans ce cas, le diagramme de rayonnement de la station de base est illustré à la figure 6. Cependant, ce diagramme de rayonnement n'est pas réaliste, car il est basé sur l'hypothèse irréaliste qu'un seul utilisateur domine la cellule et qu'il utilise l'ensemble de la bande passante de la cellule.

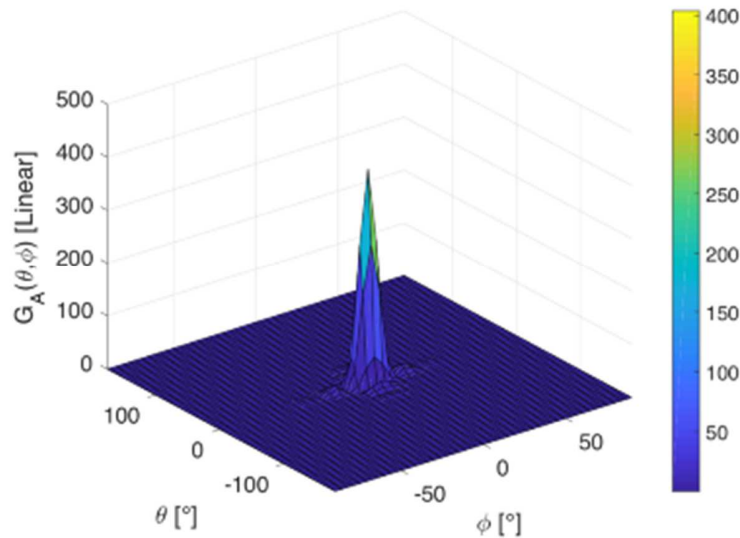


Figure 6 - « Array gain » pour le cas irréaliste où un utilisateur dans une cellule est le seul utilisateur actif pendant 6 minutes. Une puissance de crête se crée dans une direction [9].

Dans ce cas, il n'y a pas de « *multi-user massive MIMO* » et nous ne pouvons pas augmenter la capacité des cellules en utilisant des multiplex spatiaux. En réalité, la capacité disponible dans une cellule est partagée entre les différents utilisateurs, qui sont souvent situés à des endroits différents. Il est donc plus réaliste de calculer un diagramme de rayonnement moyen qui prend en compte plusieurs utilisateurs et emplacements. La figure 7 montre la situation dans laquelle 6 utilisateurs se voient attribuer chacun la capacité de la cellule pendant 60 secondes. Il en résulte un diagramme de rayonnement plus moyen, qui montre cependant encore des pics clairs vers les emplacements des 6 utilisateurs. La figure 8 calcule ensuite la situation où 5 utilisateurs sont actifs pendant 1 seconde à chaque fois. Ainsi, en 6 minutes, nous aurons en moyenne un total de  $5 \cdot 60 \cdot 6$  positions. Le résultat est un diagramme de rayonnement régulier avec un pic clair.

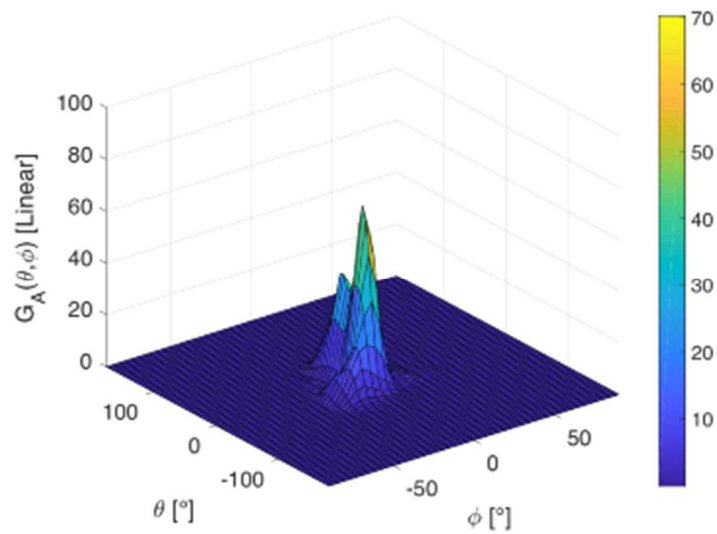


Figure 7 - « Array gain » dans le cas où 6 utilisateurs sont chacun actifs pendant 1 minute. L'array gain moyen est donc l'array gain de chacun de ces 6 utilisateurs dont la moyenne a été calculée. Par conséquent, le pic est nettement plus bas que dans le cas irréaliste précédent. Cependant, ce diagramme de rayonnement a encore des pics clairs qui dépendent de l'emplacement spécifique des 6 utilisateurs dans cette expérience, et n'est pas suffisamment représentatif de tous les emplacements pour qu'on puisse en tirer des conclusions générales [9].

En se basant sur l'analyse de l'array gain moyen du réseau pour différents scénarios, les auteurs concluent que, dans le scénario d'un utilisateur par cellule pendant 6 minutes, dans 95 % des cas, la puissance ressentie est seulement égale à 26 % de celle qui est mesurée dans le cas d'une cellule traditionnelle et que, dans 99 % des cas, cette puissance ne représente que 33 % de la puissance typique. Une augmentation de la puissance par un facteur 3 semble donc pouvoir être motivée sans que cela entraîne une augmentation effective à l'exposition justement parce que les puissances sont moins « gaspillées ». Des facteurs encore plus élevés sont possibles pour les scénarios dans lesquels plusieurs utilisateurs sont actifs.

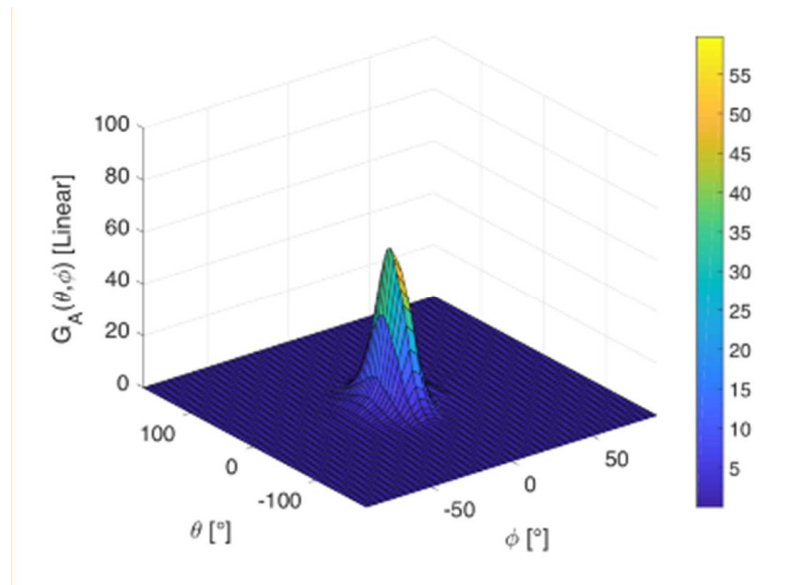


Figure 8 - « Array gain » moyen dans le cas où 5 utilisateurs sont actifs pendant 1 seconde chacun. Le résultat est un array gain fortement moyenné, avec une forme très régulière. Un tel diagramme de rayonnement moyen basé sur des moyennes suffisantes de situations possibles peut constituer une bonne méthode pour analyser les systèmes « MIMO massif » [9].

Une deuxième étude dans [12] arrive à la même conclusion. Ils utilisent une méthode statistique qui modélise le « *multi-user massive MIMO* » par l'établissement d'une moyenne de faisceaux vers plusieurs utilisateurs en 3D. Même pour une utilisation élevée de données dans une cellule, ils concluent que 95% des emplacements voient une puissance qui est quatre fois inférieure à ce qu'on pourrait attendre dans un système 4G typique.

Cependant, il n'existe actuellement aucune directive générale qui définisse comment le rayonnement « *MIMO massif* » doit effectivement être modélisé et régulé même si des propositions de méthodes de mesures sont proposées dans la littérature. Cette question fait néanmoins l'objet d'une attention internationale, et une directive et une méthode devraient être adoptées prochainement. Le comité propose de suivre les recommandations internationales.

<sup>12</sup> B. Thors, A. Furuskär, D. Colombi et C. Törnevik, « Time-Averaged Realistic Maximum Power Levels for the Assessment of Radio Frequency Exposure for the Radio Frequency Stations Base Stations 5G Using Massive MIMO », dans *IEEE Access*, vol. 5, p. 19711-19719, 2017.

### 2.3.2 Amélioration du bilan de liaison par « *channel hardening* » (durcissement du canal)

En utilisant le « *MIMO massif* », ou un grand nombre d'antennes à la station de base, il est possible d'améliorer considérablement la puissance du signal reçu par le récepteur. Il y a d'abord et avant tout l'*array gain* ou gain d'antenne, qui se traduit par une augmentation de puissance proportionnelle au nombre d'antennes. 100 antennes donnent donc un *array gain* de 20 dB. Cet *array gain* est illustré à la Figure 9 où un *array* de 128 antennes donne clairement une puissance moyenne plus élevée au récepteur pour la même puissance totale de sortie. Les puissances sont donc ainsi nettement moins gaspillées dans l'environnement. De plus, il y a aussi le *channel hardening gain*, ce qui signifie que les variations statistiques de la qualité de la liaison sont considérablement réduites si on utilise le « *MIMO massif* ». Ceci se remarque à la surface jaune de la Figure 9, qui est considérablement plus plate que la surface verte représentant le canal pour une antenne. Cela réduit les baisses temporaires dans le canal, ce qui améliore sensiblement la liaison. Il n'est donc plus nécessaire d'appliquer les « *worst case power margins* ». En d'autres termes, il devient possible d'estimer plus précisément la qualité du canal par rapport au récepteur.

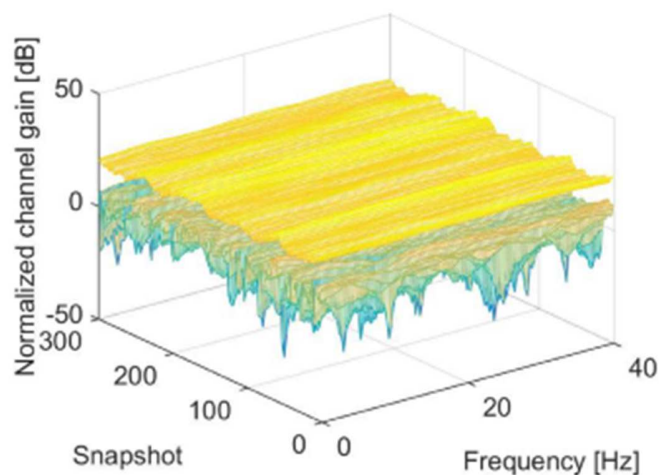


Figure 9 - L'influence du « *MIMO massif* » sur le bilan de liaison, ou l'intensité du signal reçu du côté du récepteur, est importante. Le signal reçu devient plus fort en moyenne, mais la variation devient également plus faible. Ce « *channel hardening* » ou durcissement du canal est mesuré pour un système « *MIMO massif* » à 128 antennes. Le canal « *MIMO massif* » est en jaune, et le vert représente le canal pour la meilleure antenne. Il est frappant de voir à quel point le plan jaune est plus haut et plus plat [repris de 12].

L'*array gain* et le *channel hardening gain* s'appliquent à la fois aux liaisons montantes et aux liaisons descendantes. Le résultat est que le canal entre l'UE ou l'utilisateur et la station de base s'améliore également. Cela permet en outre au terminal d'émettre une puissance inférieure de 20-30dB, grâce à l'*array gain* et au *channel hardening gain*. **Cette situation a des conséquences importantes pour l'exposition effective de l'utilisateur actif au rayonnement de son propre appareil, qui peut être 100 à 1000 fois inférieur pour la même quantité de données.** Il convient de noter que le rayonnement de l'appareil domine généralement lorsque l'exposition au rayonnement est calculée pour les utilisateurs actifs, car la puissance de sortie du téléphone est parfois aussi élevée que 30 dBm, alors que la puissance reçue de la station de base est souvent seulement de -70 à -100 dBm (une différence de 100 dB donne une puissance qui est plus faible par un facteur de 10.000.000.000).

D'autres recherches sont nécessaires pour comprendre si le *channel hardening gain* s'applique dans toutes les situations, y compris en visibilité directe ou dans d'autres situations particulières. Une première étude expérimentale dans [13] pour une installation « *MIMO massif* » d'intérieur confirme qu'il y a un fort *channel hardening*, car la variation du canal vu par l'*array* est plus faible. Cependant, le « *hardening* » mesuré en réalité est moins fort que le « *hardening* » attendu en théorie. Ou, comme l'illustre la figure 10, l'écart-type mesuré dans la pratique est effectivement plus faible si plusieurs antennes sont utilisées, mais la diminution est moins prononcée que prévu d'après un modèle théorique.

---

<sup>13</sup> S. Gunnarsson, J. Flordelis, L. Van der Perre et F. Tufvesson, « Channel Hardening in Massive MIMO-A Measurement Based Analysis », *2018 IEEE 19th International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC)*, Kalamata, 2018, pages 1-5.

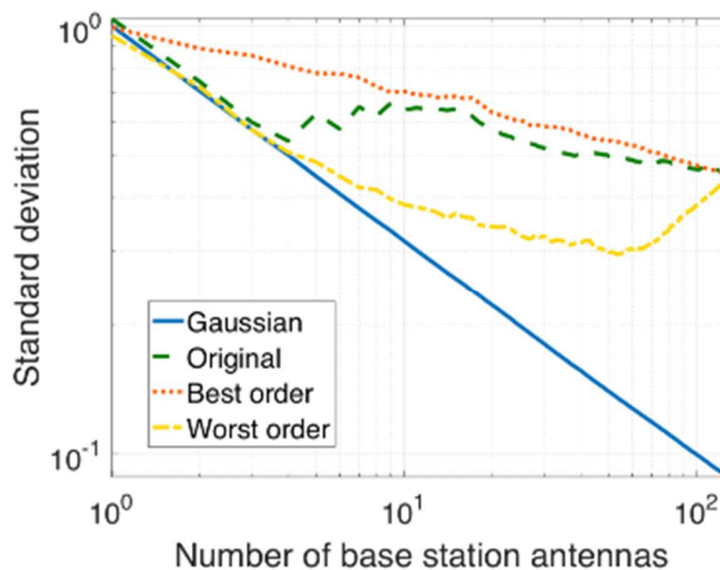


Figure 10 - Écart-type du renforcement du canal en fonction du nombre d'antennes dans la station de base. Dans le scénario théorique idéal, cette variation diminue en fonction du nombre d'antennes. La mesure montre que la variation diminue effectivement, mais plus lentement que dans le scénario théorique idéal. En tout cas, c'est encourageant, car cela montre que le canal d'un système « MIMO massif » est plus prévisible, ce qui permet d'avoir une puissance plus faible pour le terminal [figure tirée de 12].

### 2.3.3 Exposition aux ondes millimétriques

Le déploiement de la technologie 5G dans les bandes millimétriques (mmWave) n'est pas encore directement attendu, car elle n'est pas encore performante ([14]) et, en termes de régulation du spectre, ces bandes de fréquences ne sont pas encore prêtes à être mises en service. Toutefois, il n'est pas exclu que ces bandes doivent être mises en service à long terme afin de répondre à la demande croissante de capacité et de connectivité. À des fréquences plus élevées, il est possible de fournir un certain nombre de Gigahertz en bande passante (B de la figure 4). Il est donc important de déterminer dès à présent comment l'ordonnance devra être adaptée à l'avenir lorsque la communication dans les bandes millimétriques sera utilisée.

Un premier aspect est lié aux « moyennes statistiques et spatiales » du rayonnement, car les ondes millimétriques utilisent des antennes à très grande surface (par rapport à la longueur d'onde) qui sont très directives et émettent des faisceaux étroits. Étant donné que cette approche statique a déjà été abordée à la section 3.1, nous n'entrerons pas dans le détail ici.

<sup>14</sup> <https://spectrum.ieee.org/tech-talk/telecom/wireless/verizons-5g-rollout-experiences-a-mixed-bag-so-far>, consulté le vendredi 8 mars 2019.

Un deuxième aspect est lié à la propagation spécifique de ces ondes à haute fréquence. Comme les antennes millimétriques sont petites, elles ne peuvent recevoir qu'une faible quantité d'énergie. Par conséquent, il est nécessaire de transmettre plus de puissance afin de garantir qu'une puissance suffisante soit reçue pour une communication de données réussie. De plus, ces ondes sont très sensibles aux obstacles ; par exemple, le corps humain est typiquement un « bloqueur » de ces rayons [15]. Il en résulte aussi que la majeure partie de la puissance à ces fréquences est réfléchiée par la peau. Dans [16], les simulations montrent que 34% à 42% de la puissance d'un signal de 60 GHz sont réfléchis par la peau.

## 2.4 Avis

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 essentiel de pouvoir augmenter la quantité de spectre (B), le nombre d'antennes (n) et la puissance de sortie.

Afin d'optimiser l'utilisation du spectre (B) et des antennes (n), la 5G propose un certain nombre de nouvelles technologies :

- la technologie millimétrique permet d'utiliser la grande quantité de spectre à de hautes fréquences (B) ;
- le « *MIMO massif* » permet de concentrer le placement d'antennes au même endroit (n).

Toutefois, les deux technologies nécessitent une adaptation de la méthode de calcul du rayonnement actuellement de la norme, en tenant compte de l'effet spatial des communications « *MIMO massif* » et millimétrique.

---

<sup>15</sup> C. Slezak, V. Semkin, S. Andreev, Y. Koucheryavy et S. Rangan, « Empirical Effects of Dynamic Human-Body Blockage in 60 GHz Communications, » dans *IEEE Communications Magazine*, vol. 56, no 12, pp. 60-66, décembre 2018.

<sup>16</sup> T. Wu, T. S. Rappaport et C. M. Collins, « The human body and millimeter-wave wireless communication systems: Interactions and implications », *2015 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, Londres, 2015, pp. 2423-2429.



## 3 Effets sur la santé

Depuis plus de deux décennies, des recherches scientifiques ont été menées par de nombreux laboratoires académiques et indépendants, de façon à évaluer les effets potentiels des champs radiofréquences (RF) sur la santé humaine. Ces recherches ont utilisé de nombreux types d'études complémentaires : études *in vitro* sur des cellules cultivées en laboratoire, études *in vivo* sur des animaux modèles, études cliniques réalisées sur des volontaires et études épidémiologiques. Les principaux résultats de ces études ont fait l'objet de nombreux rapports d'expertise collective, nationaux et internationaux dont les plus récents [1, 2] ont déjà été résumés et commentés dans le rapport 2015-2016 et dans le rapport 2017-2018 du comité d'experts sur les radiations non ionisantes de la région de Bruxelles-capitale. Ce chapitre fera une mise au point sur les rapports d'expertise collective les plus récents et une revue non exhaustive des recherches scientifiques marquantes et publiées très récemment.

### 3.1 Les études scientifiques

L'évaluation du risque lié à l'exposition aux champs électromagnétiques en général et aux champs RF en particulier est confrontée à l'existence d'études et de résultats contradictoires : certaines études montrent des effets tandis que d'autres études « similaires » n'en montrent pas. L'hétérogénéité des résultats est particulièrement difficile à percevoir pour les non-scientifiques, public et politiques, qui souhaitent des réponses claires sur le danger des ondes RF (les ondes RF sont dangereuses pour la santé / les ondes RF ne sont pas dangereuses pour la santé).

Tous les rapports d'expertise collective appliquent des critères de qualité pour déterminer quelles études scientifiques seront incluses dans leur évaluation et, par conséquent, les publications qui ne présentent pas ces critères en sont exclues. Il se trouve que les études écartées de l'analyse collective pour un manque de qualité scientifique rapportent souvent des effets biologiques dans des cellules en culture ou chez les animaux. En 2016, à l'issue de nombreuses expertises collectives et des commentaires récurrents des associations anti-ondes sur l'absence de publications à leurs yeux « significatives » dans ces expertises, des recommandations pour produire des études et des publications de qualité sur les effets biologiques et toxicologiques des champs RF ont été publiées [3].

Deux revues ont ensuite utilisé ces recommandations et recherché la relation entre le nombre de critères de qualité inclus dans une étude et les résultats de l'étude [4, 5]. Ces analyses se placent au-delà des protocoles qui sont très hétérogènes et ne considèrent que le résultat : effet / pas d'effet. La figure ci-dessous résume l'analyse de Vijayalaxmi & Prihoda, 2019 [5] qui ont considéré 4 indices de qualité :

1) expérience ou analyse *en aveugle* : l'expérimentateur ne sait pas si l'échantillon qu'il manipule ou analyse est l'échantillon exposé ou non,

2) *dosimétrie* correcte de l'exposition RF : l'exposition des cellules est idéalement caractérisée par simulation et mesures expérimentales (champ électrique ou échauffement) pour déterminer le niveau de Débit d'absorption spécifique (DAS),

3) présence de *contrôles positifs* : il s'agit de vérifier que le système biologique est capable de réagir à une stimulation connue produisant des résultats qui vont dans le sens de l'hypothèse et que la technique utilisée fonctionne comme attendu –

4) *exposition factice* ou sham : il s'agit de comparer en tout point, excepté l'exposition aux RF, que les conditions de manipulation des cellules en lien avec l'exposition aux RF (changement de salles, d'incubateur, introduction dans le système d'exposition) n'induisent pas d'effets sur les paramètres étudiés.

Les paramètres biologiques d'intérêt sont les lésions génétiques (lésions de l'ADN, foyers 53BP1 ou gamma-H2AX marqueurs de cassures double brin de l'ADN, micronoyaux, aberrations chromosomiques, échanges de chromatides sœurs, mutations) étudiés dans 225 articles avec un total de 2160 tests portant sur des cellules en culture ou des animaux. L'étude montre que plus le nombre de critères de qualité présents augmente, plus le pourcentage d'études montrant des lésions génétiques (études positives) est faible. La même corrélation existe pour l'amplitude de l'effet.

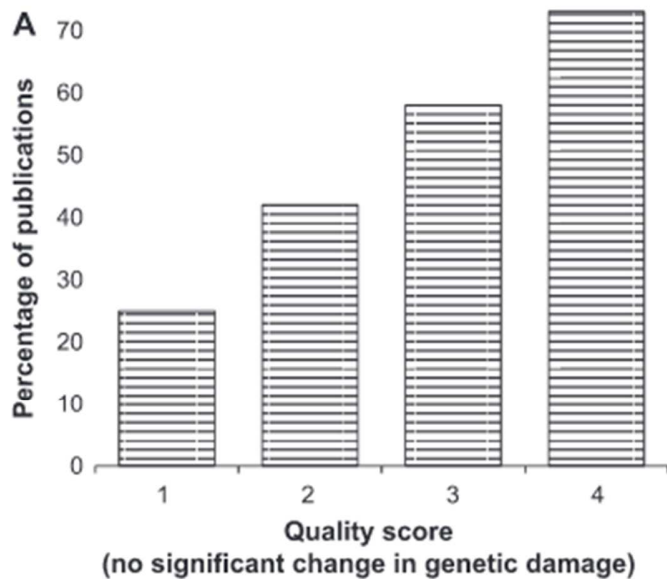
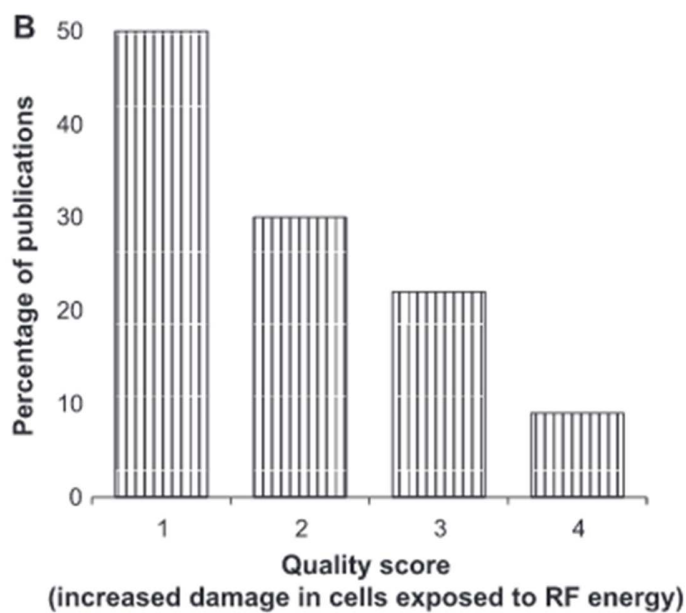


Figure 11 de Vijayalaxmi & Prihoda, 2019 [5]

A: pourcentage d'études publiées ne rapportant aucune différence significative dans le niveau des lésions génétiques entre les cellules exposées aux RF et les cellules contrôles en fonction du nombre de critères de qualité : un, deux, trois ou quatre critères de qualité (en aveugle, dosimétrie, contrôles positifs, exposition factice (contrôle)).

Les données indiquent une corrélation positive entre les deux indices.



B: pourcentage d'études publiées rapportant une augmentation des lésions génétiques dans les cellules exposées aux RF par rapport aux cellules témoins, en fonction du nombre de critères de qualité : un, deux, trois ou quatre critères de qualité (en aveugle, dosimétrie, contrôles positifs, exposition factice (contrôle)). Les données indiquent une corrélation négative entre les deux indices.

Simko et al 2016 [4] ont utilisé les mêmes critères de qualité, plus

5) le *contrôle de la température* : l'exposition RF induit un échauffement proportionnel au niveau de DAS, qui est soit compensé par thermostatation (circulation d'air ou d'eau), soit comparé à un échauffement conventionnel équivalent.

Les auteurs ont ici considéré 483 résultats expérimentaux *in vitro* issus de 104 articles portant sur deux autres paramètres biologiques : l'apoptose (mort cellulaire programmée) et le cycle/prolifération cellulaire (et les 2 conjoints). La conclusion de ces auteurs est similaire, ils démontrent une association négative entre l'observation d'effets cellulaires et le nombre de critères de qualité dans les études. Moins de 2% des études de plus haute qualité (5 critères de qualité présents) montrent des effets au niveau cellulaire, soit 2 sur 109 études. Il est intéressant de noter que ces deux études utilisent le même système d'exposition et des niveaux d'exposition proches (1,3 et 2 W/kg) mais, malheureusement, elles ne permettent d'aboutir à aucune conclusion claire. Dans l'une, on observe l'induction de l'apoptose (mort cellulaire programmée) dans des neurones primaires de rats médiée par l'induction d'*Apoptosis-inducing factor* (AIF) mais pas de la caspase 3, tandis que l'autre étude observe une activation de la caspase 3 dans des lymphocytes humains en prolifération sans induction d'apoptose ; les informations sont donc relativement incohérentes et nécessitent des travaux supplémentaires.

Ces données viennent appuyer une des particularités de la recherche en bioélectromagnétisme, une recherche interdisciplinaire qui, du fait de l'interface, doit gérer de nombreux artéfacts possibles. Ainsi par exemple, lorsque l'on immobilise un rat mâle pendant plusieurs heures dans une cage en plastique pour l'exposer à des RF, les lésions histologiques observées au niveau des testicules peuvent être aussi bien le résultat d'un stress mécanique intense que de l'exposition RF. Lorsque les animaux témoins ne sont pas comparables en termes de durée de contention aux animaux exposés, une telle étude est dite « non informative » car le facteur de confusion que représente le stress mécanique ne permet pas de conclure sur l'effet des RF.

En conclusion, l'inclusion d'au moins quatre critères de qualité (en aveugle, dosimétrie, contrôles positifs, exposition factice) dans les études biologiques est un pré-requis majeur qui garantit que les données obtenues puissent être utiles pour évaluer les risques pour la santé résultant d'une exposition aux RF.

## 3.2 Ce que la 5G va changer sur les interactions ondes-organismes

L'attribution des fréquences de la 5G variera sans doute d'un pays à l'autre. Néanmoins, le besoin d'avoir une large couverture, associé à la nécessité d'avoir un très haut débit conduira à l'utilisation de plusieurs plages de fréquences : i) en dessous de 1 GHz ; ii) entre 1 et 6 GHz ; iii) 26 et/ou 28 GHz ; iv) 40 et/ou 66-71 GHz. Cette montée en fréquence implique que l'énergie associée au photon augmentera aussi, mais que la profondeur de pénétration de l'onde dans l'organisme diminuera.

En ce qui concerne l'énergie associée aux photons, même pour les fréquences les plus élevées de la 5G (autour de 70 GHz), celle-ci restera près de 100 000 fois inférieure au niveau requis pour ioniser<sup>17</sup> des molécules biologiques. On reste donc dans le domaine des ondes non ionisantes, avec des énergies qui sont également insuffisantes pour pouvoir rompre les liaisons de faible énergie qui régissent les interactions entre les molécules biologiques au sein des cellules. Cependant, comme pour les ondes radiofréquences actuellement utilisées en téléphonie, ces plus hautes fréquences peuvent aussi induire la rotation des molécules dipolaires libres, ce qui induit un échauffement des tissus. Ces effets thermiques apparaissent pour des expositions à de fortes densités de puissance incidente (au-delà de 10 mW/cm<sup>2</sup>), qui sont supérieures aux normes actuelles (les applications grand public ne doivent pas dépasser 1 mW/cm<sup>2</sup>). La réglementation nous protège donc de ces effets thermiques.

Pour les fréquences élevées, la faible pénétration dans le corps implique une absorption très localisée de l'énergie, essentiellement par les tissus cutanés. Cette absorption localisée du champ électromagnétique se traduit par des débits d'absorption spécifique (DAS) relativement importants, même pour des valeurs de densité de puissance inférieures aux normes limites. Pour ces plus hautes fréquences, on va donc avoir un changement au niveau des tissus cibles. Par exemple, à 66-71 GHz, le cerveau ne sera plus atteint par ces ondes et l'intégralité de l'absorption se fera dans les couches superficielles de la peau. Par rapport à la polémique sur le lien potentiel entre l'exposition aux radiofréquences et l'apparition de cancers du cerveau, cette situation peut être perçue comme plus sécuritaire. Toutefois, il est important de rappeler que la peau contient des capillaires sanguins et des terminaisons nerveuses. Ce tissu a donc la possibilité de communiquer via la sécrétion de facteurs ou via le système nerveux périphérique, avec l'ensemble du corps. Il faudra donc, dans un avenir proche, étudier la possibilité d'une réponse systémique, c'est-à-dire d'une réponse physiologique globale, en réponse à une exposition de la peau.

En ce qui concerne les effets biologiques de la 5G, on peut penser que les fréquences les plus basses (en dessous de 1 GHz ou entre 1 et 6 GHz) auront les mêmes effets que les radiofréquences utilisées par la 2G, 3G et la 4G. La littérature scientifique sur le sujet a été analysée par différentes agences en Europe. L'Union Européenne, par l'intermédiaire de son comité scientifique des risques sanitaires émergents et nouveaux [1], l'ANSES en France [2] ou encore l'autorité suédoise de radioprotection [6, 7] arrivent toutes à des conclusions similaires. Les études *in vitro* et *in vivo* présentent des résultats hétérogènes, mais dans

---

<sup>17</sup> Pour rappel, une onde électromagnétique est dite ionisante quand l'énergie associée à l'onde est suffisamment importante (supérieure à 10 électronvolts) pour pouvoir arracher un électron à la couche externe des atomes. C'est le cas des rayons X ou des rayons gamma, mais pas des rayonnements visibles, infrarouges ou radiofréquences qui sont moins énergétiques.

la majorité des cas, aucun effet délétère reproductible n'a été détecté. Dans certaines études, des effets sur certains paramètres, tel que le stress oxydatif par exemple, ont été rapportés, mais ces effets sont souvent transitoires et de faible ampleur. De plus, le modèle biologique utilisé semble jouer un rôle important dans la détection de l'effet, et les mécanismes pouvant expliquer un tel effet ne sont pas encore connus.

Pour les fréquences les plus hautes de la 5G (26-28 GHz ; 40 GHz et 66-71 GHz), peu d'études ont pour l'instant été réalisées. Les signaux exacts et les équipements utilisant ces fréquences n'étant pas encore définis et en fonctionnement, il est normal qu'aucune étude épidémiologique ne soit encore disponible. Toutefois, quelques études *in vitro* et *in vivo* ont d'ores et déjà été réalisées. En 2012, l'ANSES a réalisé une analyse de ces études dans le cadre d'une évaluation des risques sanitaires liés à l'utilisation des scanners corporels utilisant les ondes millimétriques aux alentours de 24 GHz [8]. Ce rapport souligne que la majorité des effets biologiques ont été observés avec des niveaux d'exposition qui vont au-delà des normes admises. À ces niveaux de puissance, l'exposition provoque un échauffement local et il est difficile de distinguer les effets électromagnétiques purs, des effets thermiques. Pour de faibles niveaux de puissance, proches de ceux attendus lors d'utilisations en télécommunication, aucun effet sanitaire n'a pu être mis en évidence lors de ces expériences [9]. Si ces résultats sont rassurants, il ne faut pas perdre de vue que les données disponibles pour le moment ne permettent pas de tirer de conclusions en ce qui concerne les risques à long terme ou l'existence de sensibilités individuelles particulières.

### 3.3 L'étude NTP (National Toxicological Programme)

Il nous paraît important d'aborder les résultats de la dernière étude de cancérogenèse américaine, cette étude d'un coût de plus de 30 millions de \$ et qui a été présentée par ses auteurs comme « la plus grande étude sur les effets cancérogènes des radiofréquences ». Les résultats de cette étude ont été présentés au public successivement dans un rapport préliminaire, un rapport interne puis un rapport final après avis d'un comité d'experts extérieurs. Cet historique de la gestion des résultats scientifiques, présenté plus en détail ci-dessous, a engendré une grande confusion quant au message à retenir de cette étude. En effet, chaque étape, assortie d'un avis officiel de l'institut américain en charge de l'étude (le national toxicological programme), a été largement médiatisée et majoritairement sur-interprétée par la presse et les associations.

L'étude dite « étude NTP » est une étude toxicologique et de cancérogenèse d'une exposition chronique corps entier aux ondes radiofréquences de la téléphonie mobile chez le rat et la souris. Le « National Institute of Environmental Health Sciences » (NIEHS) a en effet financé cette étude dans le cadre du « National Toxicological Programme » (NTP) entre 2010 et 2014. Le NTP a mené ces études conformément aux directives de la santé et de la sécurité du laboratoire et selon les bonnes pratiques de laboratoire de la « Food and Drug Administration » (FDA). Les soins et l'utilisation des animaux sont conformes à la politique et l'éthique des services de santé publique. Des résultats partiels de l'étude ont été mis à disposition sous forme d'un rapport préliminaire en mai 2016 [9]. Les études complètes ont été soumises à des audits d'assurance qualité rétrospectifs. Les rapports NTP complets sur les études sur le rat [11] et sur la souris [12] ont été mis à disposition sur internet le 2 février 2018, mis en consultation publique en mars 2018. Un groupe d'experts extérieurs a ensuite évalué les résultats complets de l'étude NTP et émis

un avis, différent en plusieurs points de l'avis du NTP. Le NTP a finalement accepté et repris pour avis final, l'avis du groupe d'experts extérieurs. Les rapports finaux corrigés ont été diffusés le 1er novembre 2018.

Dans cette étude NTP, des rats et des souris mâles et femelles ont donc été exposés à des émissions intermittentes de type GSM (système mobile en Europe) et CDMA (système mobile aux Etats-Unis), à 900 MHz pour les rats et à 1900 MHz pour les souris. La durée quotidienne d'exposition était de 9 heures par jour sur une période de 18 heures (10 min « ON », 10 minutes « OFF »), 7 jours sur 7. Pour chacune des 2 espèces, l'étude comporte deux groupes : le groupe 28 jours et le groupe 2 ans. Les expositions ont été effectuées telles que présentées dans le tableau suivant, avec le groupe exposé facticement (0 W/kg) commun pour les 2 modes d'exposition pour chaque espèce.

Tableau 1 – Expositions des rats et des souris dans l'étude NTP

RAT – 900 MHz GSM/CDMA		SOURIS – 1900 MHz GSM/CDMA		ICNIRP / EU
Exposition à partir de 6 jours de gestation		Exposition à l'âge de 5-6 semaines		Valeur limite d'exposition publique
28 jours (après la naissance)	Vie entière (2 ans)	28 jours	Vie adulte (2 ans)	Vie entière
0 W/kg	0 W/kg	0 W/kg	0 W/kg	0,08 W/kg
3 W/kg	1,5 W/kg	5 W/kg	2,5 W/kg	
6 W/kg	3 W/kg	10 W/kg	5 W/kg	
9 W/kg	6 W/kg	15 W/kg	10 W/kg	

Il y avait donc, pour chaque espèce, 7 groupes de chaque sexe : un groupe exposé facticement et 3 groupes à un niveau de DAS différent et deux types de modulation (GSM ou CDMA).

L'étude de 2 ans a porté sur environ 100 animaux par groupe. Les auteurs ont en effet considéré que les incidences observées sous exposition RF seraient probablement faibles et pour cette raison, le nombre d'animaux par groupe a été doublé par rapport au nombre d'animaux habituellement utilisé dans les études de cancérogenèse au NTP. Une étude histologique complète a été réalisée pour détecter tout type de tumeur chez les animaux et des analyses génotoxiques ont été effectuées sur les cellules sanguines, cérébrales et hépatiques.

Les résultats de l'étude confirment que la tolérance à la chaleur diminue avec la taille des animaux, qui croît avec l'âge. Les groupes « 28 jours » montrent qu'au-delà de 6 W/kg corps entier, on observe chez le rat une diminution de la survie des nouveau-nés et une diminution du poids des rats à partir de la période de lactation (et jusqu'à 14 semaines pour l'étude de 2 ans). Enfin, une diminution du poids des femelles gestantes est également observée surtout pendant la période de lactation. En revanche, toutes les souris (exposées à l'âge adulte) ont survécu jusqu'à la fin de l'étude de 28 jours. Le poids corporel moyen des groupes exposés mâles et femelles était similaire à celui des témoins. C'est bien la taille plus

petite des souris qui limite l'effet d'échauffement ; ce qui suggère que c'est l'échauffement moins bien supporté chez les rats qui aurait pour conséquences les effets observés.

Chez le rat, l'espèce la plus sensible donc, la valeur de 6 W/kg a été choisie comme le DAS corps entier le plus important qui puisse être appliqué de façon prolongée sans produire de décès par hyperthermie jusqu'à un âge avancé. Cette valeur est supérieure à la valeur de DAS corps entier de 4 W/kg, précédemment identifiée comme seuil de danger d'exposition aiguë pour la perturbation de l'apprentissage chez les rongeurs et les primates, et très supérieure à la valeur limite d'exposition corps entier de 0,08 W/kg. Elle est plus proche de la valeur limite d'exposition locale de 2 W/kg, qui est la limite du DAS des téléphones portables, mais pour une zone exposée plus restreinte, limitée à 10 g. Il est important de souligner que les conditions et les seuils de danger en exposition locale et en exposition corps entier ne sont pas transposables. Les valeurs de 6 et 3 W/kg permettent donc de rechercher si, autour des niveaux de danger identifiés pour des expositions aiguës en corps entier, des risques cancérigènes pourraient exister lors d'expositions chroniques.

Les faits les plus marquants qui ressortent de cette étude pour les groupes de 2 ans sont les suivants :

**Chez la souris**, on note une augmentation de la survie du groupe mâle à 5 W/kg et une augmentation des lymphomes malins chez les femelles à 2,5 et 5 W/kg (mais pas à 10 W/kg). Cependant, l'incidence des lymphomes malins observée chez les contrôles femelles est faible par rapport aux valeurs habituelles des contrôles historiques. Ceci constitue un biais dont il faut tenir compte dans l'analyse et l'interprétation des résultats. Des lésions de l'ADN ont été observées dans le cortex frontal chez les mâles, et dans les leucocytes chez les femelles exposées à la modulation CDMA, pas GSM. Ces effets n'ont pas été à l'origine de tumeurs chez les souris.

**Chez le rat**, on note que la survie des contrôles mâles, diminuée à partir de 75 semaines, est inhabituellement courte par rapport aux contrôles historiques. Ces rats auraient développé une insuffisance rénale contrairement aux groupes de rats exposés aux RF, sans explication identifiée. Ceci introduit une difficulté d'interprétation des résultats de cancérogénèse. En effet, l'incidence des tumeurs augmentant avec l'âge, les différences d'incidence observées entre les groupes doivent être corrigées par la différence de survie.

Une augmentation des schwannomes malins du cœur est observée chez les rats mâles (pas les femelles), significative à 6 W/kg pour les RF modulées en CDMA (pas en GSM). Une cardiopathie est également observée à 3 et 6 W/kg chez les mâles et les femelles exposés à la modulation GSM et à 6 W/kg chez les mâles seulement exposés à la modulation CDMA. Il peut y avoir un lien entre la surcharge thermique intermittente chronique et la cardiomyopathie si les mécanismes de réaction à la chaleur (vasodilatation, accélération du rythme cardiaque) sollicitent exagérément le muscle cardiaque.



Compte tenu de l'ensemble des résultats et de l'avis du groupe d'experts extérieurs, le NTP conclut :

- (i) Pour le schwannome cardiaque malin, il existe des **preuves claires d'effet cancérigène** chez le rat mâle avec la modulation CDMA.
- (ii) Pour le gliome, il existe **certaines preuves d'effet cancérigène** en regard des variations d'incidence observées chez les rats mâles exposés aux signaux GSM et CDMA.
- (iii) Pour le phéochromocytome, il existe **certaines preuves d'effet cancérigène** en regard des variations d'incidence observées chez les rats mâles exposés au signal GSM.

Cet avis ne précise pas les niveaux de DAS auxquels les effets sont significatifs, généralement au niveau le plus haut de 6 W/kg chez le rat. De plus, à ce jour, il n'existe aucune preuve sur le plan de la physique pour une différence entre la modulation CDMA et GSM, ni d'explication physiologique pour une différence entre mâles et femelles pour des tumeurs non hormono-dépendantes.

Enfin, il est intéressant de noter que l'étude n'a pas montré de différence de mobilité ni de concentration des spermatozoïdes chez le rongeur mâle. Ces résultats ne confirment pas ceux de plusieurs études précédentes, récemment revues par Kesari et Agarwal [13].

En conclusion, il s'agit d'une étude comportant un certain nombre de critères de qualité recherchés dans une étude de ce type (sur des rongeurs), en particulier une excellente dosimétrie et des groupes d'animaux importants (90 animaux/groupe). En revanche, l'analyse des tumeurs n'a pas été faite en aveugle et il n'y a pas de groupe « contrôle cage » qui aurait pu compenser, chez les rats, le problème des animaux exposés factivement. Un groupe « témoin positif » n'était pas vraiment envisageable dans la mesure où il n'existe pas d'agents capables d'augmenter l'incidence de toutes les tumeurs (l'étude a recherché des modifications dans l'apparition de tous les types de tumeurs).

Les résultats montrent que quelques tumeurs apparaissent significativement augmentées, mais ces résultats sont biaisés par une survie inhabituellement basse des rats mâles exposés factivement, ainsi qu'une incidence inhabituellement faible de certaines tumeurs chez les souris femelles exposées factivement (même si aucune preuve d'effet cancérigène n'a été retenue chez la souris). Les différences observées entre genre et entre espèces ne permettent pas d'avancer une explication cohérente de causalité. Ces éléments ne sont pas en faveur d'une relation robuste de causalité entre l'exposition et les pathologies identifiées.

Dans son dernier avis, le NTP mentionne le niveau d'exposition auquel apparaissent les tumeurs du cœur en déclarant : "clear evidence that male rats exposed to high levels of radio frequency radiation (RFR) like that used in 2G and 3G cell phones developed cancerous heart tumors". En revanche, la FDA et l'ICNIRP soulignent, comme indiqué ci-dessus, que ces résultats manquent de cohérence globale et ne sont donc pas directement extrapolables à l'homme, et que de plus, le schwannome malin du cœur est une tumeur exceptionnelle chez l'homme.

## 3.4 Effet des radiofréquences sur l'EEG

Dans la littérature sur les effets biologiques des champs radiofréquences, le seul effet biologique qui soit considéré reproductible est un effet sur l'électroencéphalogramme (EEG). Il s'agit d'un effet biologique et non sanitaire car, à ce jour, aucune conséquence des modifications observées au niveau de l'EEG n'a été mise en évidence sur le sommeil ou une quelconque pathologie. Une synthèse des nombreuses études publiées sur ce sujet est présentée ci-dessous et est abordée par Wallace et Selmaoui [69].

### 3.4.1 Effets des RF sur l'EEG en éveil

Les études concernant les effets des champs radiofréquence sur l'EEG d'éveil ont montré une certaine cohérence d'effet biologique correspondant à une modification de la puissance spectrale de la bande alpha. Dans la plupart des études qui ont montré une modification du rythme alpha, certaines ont rapporté une augmentation de la puissance de la bande alpha [14-27], d'autres ont montré une diminution [28-34] alors que d'autres études n'ont montré aucun effet sur la puissance spectrale de bande alpha [35-40]. La raison pour laquelle la bande alpha réagit différemment à l'exposition aux RF reste inconnue pour le moment. Le problème principal réside probablement dans l'utilisation de différents critères d'inclusion des participants, de différents protocoles expérimentaux, différentes méthodes et / ou différentes intensités ou fréquences, rendant ainsi la comparaison des données plus difficile.

En effet, l'analyse de la littérature montre, par exemple, que la tranche d'âge des participants variait considérablement selon les études. Les résultats ont montré des réponses différentes à l'exposition aux RF entre les adolescents, les adultes et les personnes âgées.

Les autres différences entre les études résident également dans le planning de participation des sujets car les sessions expérimentales pouvaient avoir lieu le même jour ou à un intervalle d'une semaine. D'autres études n'ont pas indiqué si elles avaient contrôlé certaines variables, telles que la consommation de café, d'alcool, de drogues et de nicotine qui sont des facteurs de confusion potentiels. En effet, il a été démontré que la consommation de ces substances était corrélée à la modification de la puissance spectrale de la bande alpha [41-49] et devrait être prise en considération. L'inclusion des femmes dans les études nécessite une attention particulière quant à leur période du cycle menstruel. En effet, leur inclusion dans l'étude doit se faire uniquement pendant la phase folliculaire de leur cycle menstruel, afin d'éviter toute interférence avec le rythme EEG. Il a été démontré que la phase lutéale du cycle menstruel affecte le rythme de la bande alpha [50-53]. Une corrélation entre les niveaux de cortisol et les modifications du rythme de la bande alpha de l'EEG a été également rapportée [54, 55], ce qui suggère que les niveaux de cortisol devraient être contrôlés comme biomarqueur de stress, comme dans l'étude de Ghosn et al. [32]. Certains auteurs [18, 19] suggèrent que la modulation pulsée du signal GSM serait nécessaire pour induire la modification de l'EEG, alors que d'autres [30, 37] ne trouvent aucune différence entre l'exposition à un signal RF continu ou pulsé GSM. De plus, il existe des différences méthodologiques entre les études, comme l'utilisation de la position du téléphone et le DAS qui en découlerait, ou encore la durée d'exposition qui varie de quelques minutes [29, 35] à près d'une heure [16]. De ce fait, toutes ces différences rendent la comparaison difficile pour la détermination du facteur potentiellement déterminant dans l'effet des radiofréquences sur l'EEG.

Quoiqu'il en soit, cet effet biologique ne semble pas avoir de conséquence sur la santé. L'augmentation de la puissance spectrale de la bande alpha est retrouvée dans l'état de relaxation en éveil avec les yeux fermés tandis que sa diminution est apparentée avec l'acquisition de données, l'attention ou la vigilance. Ce sont donc des phénomènes physiologiques sans conséquences sur la santé et par conséquent, jusqu'à présent, aucun lien n'a été déterminé entre la modification de la puissance spectrale de la bande alpha et des pathologies.

### 3.4.2 Effets des RF sur l'EEG du sommeil

En ce qui concerne le sommeil, plusieurs études ont recherché les effets d'une exposition RF sur l'EEG du sommeil. Les chercheurs ont regardé par exemple la puissance spectrale de l'EEG dans les différentes bandes de fréquences et l'architecture du sommeil, à savoir le sommeil lent et paradoxal avec ses différents stades. Certaines études ont même regardé la quantité de sommeil, le délai d'endormissement et les réveils. Certains auteurs n'ont trouvé aucun effet des champs radiofréquences [56-63] alors que d'autres trouvent que le champ RF modifie significativement quelques-uns des paramètres du sommeil [18, 64-66].

### 3.4.3 Conclusions

Plusieurs études ont été réalisées pour déterminer si l'exposition aux RF des téléphones portables affecte l'activité électrique du cerveau, avec des approches comprenant l'EEG d'éveil ou l'EEG de sommeil. Globalement, il n'y a aucune preuve claire que cette mesure de l'activité cérébrale est systématiquement affectée par l'exposition aux RF. En ce qui concerne l'EEG d'éveil, les résultats sont plus cohérents, plusieurs études rapportant des effets dans la bande de fréquences alpha, principalement pendant l'exposition, mais parfois aussi après l'exposition. De même, les résultats concernant l'EEG de sommeil ont également montré des altérations des bandes de fréquence alpha et du fuseau de sommeil pendant le sommeil non-paradoxal, à la fois lorsque l'exposition a lieu avant et pendant le sommeil. Dans l'ensemble, certaines preuves suggèrent des modifications mineures de l'activité électrique du cerveau liées à l'exposition aux RF. En ce qui concerne les enfants, les adolescents et les patients souffrant de diverses maladies, très peu de recherches ont été menées. En outre, malgré les effets observés chez les adultes en bonne santé, rien ne permet actuellement de penser que ces effets soient liés de quelque manière que ce soit à la santé ou au bien-être. Le mécanisme d'action derrière ces effets modestes reste également inconnu.

## 3.5 Effet des RF sur les enfants

En 2013, l'agence française ANSES recommandait de réduire l'exposition des enfants aux RF émises par les téléphones mobiles [2]. En 2015, la loi 2015-136 relative à la sobriété, à la transparence, à l'information et à la concertation en matière d'exposition aux ondes électromagnétiques, dite « loi Abeille » était votée par le parlement en France. **En juillet 2016, l'ANSES publiait un rapport scientifique dédié sur la thématique des effets des expositions aux champs RF sur la santé des enfants [67].**

On ne peut que constater que les enfants possèdent un téléphone portable de plus en plus précocement et utilisent de multiples appareils émettant des ondes électromagnétiques dans la gamme des radiofréquences (tablette tactile, jouets et montres connectés, etc.). Or, l'ANSES rappelle que les enfants peuvent être plus exposés que les adultes en raison de leurs spécificités morphologiques et anatomiques, notamment de leur petite taille et de la nature immature de leurs tissus. Ainsi, les modélisations numériques montrent que, tout en restant en dessous des limites d'exposition pour le public, les aires cérébrales proches de la boîte crânienne sont plus exposées chez l'enfant que chez l'adulte. Cela résulte à la fois de caractéristiques anatomiques, en particulier le lobe de l'oreille plus fin chez l'enfant et des propriétés diélectriques des tissus immatures. De plus, pour des fréquences autour de 100 MHz et de 1 à 4 GHz, les personnes de taille inférieure à 1,30 m (incluant les enfants) absorbent davantage les champs RF. Il a ainsi été montré qu'au niveau maximal autorisé pour le public, l'exposition corps-entier de ces personnes peut dépasser les restrictions de base (au sens de l'ICNIRP). Cependant, on peut rappeler que les niveaux d'exposition dans l'environnement quotidien sont très inférieurs aux limites d'exposition autorisées pour le public, ce qui implique que cette configuration ne se présente pas dans la vie courante.

D'après l'ANSES [67], l'analyse des études humaines, épidémiologiques, cliniques, et animales disponibles n'a pas permis de conclure à l'existence d'un effet de l'exposition aux champs RF sur un certain nombre de paramètres tels que le comportement, le développement et les effets tératogènes, le développement de tumeurs, le système reproducteur mâle et femelle, le système immunitaire et la toxicité systémique. En revanche, cette analyse a permis de conclure à un effet possible de l'exposition aux champs RF sur les fonctions cognitives avec, globalement, une amélioration des performances (études humaines et animales). Le bien-être apparaît également impacté par l'exposition aux champs RF et l'ANSES note une influence sur la fatigue des enfants. Cependant, les données disponibles ne permettaient pas de déterminer si la fatigue était liée à l'exposition aux champs RF ou à l'usage des téléphones (notamment la nuit). L'ANSES appelle donc à une incitation pour un usage raisonnable du téléphone mobile par les enfants (communications nocturnes, fréquence et durée des appels...) et recommande d'évaluer l'impact sanitaire et psychosocial (apprentissage scolaire, relations sociales et familiales...) lié à l'usage des technologies de communication mobile chez les enfants.

Dans le cadre de la « loi Abeille », la publicité pour les téléphones portables ne doit pas cibler les enfants de moins de 14 ans. L'ANSES recommande d'étendre cette disposition aux autres appareils communicants destinés aux enfants et d'informer le public que l'ensemble des dispositifs émetteurs de champs électromagnétiques doit respecter la conformité aux valeurs limites réglementaires.

L'agence recommande enfin de poursuivre les recherches sur l'impact des champs RF sur les fonctions cérébrales et les fonctions cognitives à différents âges chez l'enfant et le jeune animal. Enfin, concernant les nouvelles technologies de communication, des recherches sur l'impact psychosocial et sur les troubles relevant de la santé mentale (stress, addiction, dépression) sont attendues.

## 3.6 L'hypersensibilité électromagnétique

Depuis quelques années, certaines personnes rapportent divers problèmes de santé qu'elles attribuent à leur exposition aux champs électromagnétiques. Les symptômes décrits sont nombreux et très variables d'un individu à l'autre.

Deux aspects caractérisent ces symptômes :

1) ils sont non spécifiques et parfois très communs dans la population (maux de tête, troubles du sommeil, problème de concentration etc.);

2) aucune lésion ou dysfonctionnement identifiable peut expliquer leur survenue.

En absence de critères de diagnostic fiables, il résulte que seule l'auto-déclaration des patients permet de définir cette pathologie, nommée «hypersensibilité électromagnétique» (EHS) ou parfois «intolérance environnementale idiopathique attribuée aux champs électromagnétiques». La littérature scientifique sur le sujet est importante et en 2018, l'ANSES a publié un rapport d'expertise sur ce thème [68]. Le rapport souligne la grande complexité de la question de l'hypersensibilité électromagnétique. Cette complexité se manifeste au travers de l'importante diversité de symptômes décrits (près de 80 symptômes cités car toutes les personnes se déclarant EHS ne souffrent pas des mêmes maux) et par le fait que les champs électromagnétiques incriminés par les personnes se déclarant EHS peuvent être parfois très différents (des extrêmement basses fréquences aux radiofréquences). Cette hétérogénéité n'a pas permis de faire ressortir des critères de diagnostic ou des critères de classification, ce qui complique l'étude de ce trouble et peut laisser supposer que l'EHS ne correspond pas à un problème médical unique. Le rapport souligne aussi qu'il existe de nombreuses analogies entre l'EHS et d'autres troubles ou syndromes médicalement inexpliqués, tels que la sensibilité chimique multiple ou la fibromyalgie. Ceci ajoute une complexité supplémentaire et pose la question de savoir si ces divers troubles fonctionnels ne représentent que des variantes d'un seul et même état pathologique ou s'ils constituent chacun une pathologie propre. Quoiqu'il en soit, les symptômes ressentis par les personnes se déclarant EHS correspondent à une réalité vécue et ils peuvent être handicapants.

La question principale concernant l'EHS reste son origine et la part de l'exposition aux ondes électromagnétiques dans le déclenchement de ce trouble fonctionnel. L'ANSES a analysé une quarantaine d'études dites de « provocation » où des personnes EHS volontaires ont été exposées, ou non, à des ondes électromagnétiques en double aveugle. Ces études n'ont pas permis de mettre en évidence de relation causale entre l'exposition et l'apparition des symptômes relevant de l'EHS. Pour l'ANSES, ceci suggère deux hypothèses :

Hypothèse 1 :« les symptômes ressentis par les personnes se déclarant EHS ne seraient pas dus aux expositions aux champs électromagnétiques et il n'existerait pas d'anomalie biologique et / ou physiologique objectivable lorsqu'elles sont exposées aux champs électromagnétiques »;

Hypothèse 2 : « l'absence de résultat serait due aux limites méthodologiques des études de provocation (sélection des sujets, taille des échantillons, nature des expositions, ...etc) ».

En absence de preuve scientifique démontrant le rôle de l'exposition aux champs électromagnétiques dans l'apparition de l'EHS, certains chercheurs ont étudié le rôle de l'effet *nocebo*. Le comité d'experts de l'ANSES a analysé une quinzaine d'articles scientifiques. Il ressort de cette analyse que « *l'effet nocebo joue certainement un rôle non négligeable dans la persistance de l'EHS* ». Cependant, l'implication de cet effet *nocebo* dans la première apparition des symptômes et leur attribution à une exposition à des champs électromagnétiques n'est pas démontrée.

Au final, le rapport de l'ANSES n'a pas pu faire ressortir de tableau clinique spécifique, ni d'hypothèse crédible de mécanisme pouvant expliquer l'EHS. L'analyse des études ne permet pas d'établir un lien de cause à effet entre l'apparition de ces symptômes et l'exposition à des champs électromagnétiques. Cependant, l'ANSES souligne que la réalité des symptômes ressentis, ainsi que l'isolement psycho-social subi par certaines personnes se déclarant EHS nécessitent et justifient une prise en charge adaptée par les acteurs des domaines sanitaire et social.

### 3.7 Conclusion

Ces dernières années, l'effort de recherche a été poursuivi et de nombreuses études ont été menées sur les effets biologiques potentiels des champs électromagnétiques de type radiofréquences. La qualité de ces études est variable, ce qui peut être source d'erreur pour l'évaluation du risque. C'est pourquoi nous avons principalement porté notre analyse sur les rapports gouvernementaux car ces derniers n'ont tenu compte que des études qui remplissaient les critères de qualité scientifique élémentaires. Les nouvelles études n'ont pas permis d'identifier un risque avéré, ni de mettre sur la piste d'un mécanisme d'action crédible. De même, les nouvelles publications sur l'« hypersensibilité électromagnétique » n'ont pas permis de mettre en évidence un lien direct entre exposition aux RF et apparition de symptômes, ni d'identifier des caractéristiques physiologiques susceptibles d'aider au diagnostic ou au développement de traitements thérapeutiques efficaces.

L'évaluation du risque est rendue difficile par la présence de résultats contradictoires qui ne permettent pas de tirer de conclusions fiables, ni dans le sens d'un effet sanitaire, ni dans le sens d'une absence totale d'effet. L'étude NTP qui a été tant médiatisée en est l'exemple parfait. L'apparition statistiquement significative de quelques types particuliers de tumeurs chez le rat pourrait bien être principalement due au fait que la survie des contrôles était anormalement basse, et non au fait que les groupes exposés aux RF présentaient un niveau de tumeurs particulièrement haut.

En termes de recherche, il faut reconnaître que tous les scénarios n'ont pas été étudiés et qu'on ne connaît pas encore les conséquences potentielles d'une exposition vie entière sur la plupart des maladies neurodégénératives, le comportement ou l'anxiété par exemple.

En conclusion, le fait que la grande majorité des études expérimentales de qualité ne montrent pas d'effet délétère de l'exposition RF est rassurant en termes de santé publique. Les risques psycho-sociaux liés à l'usage des équipements RF doivent néanmoins faire l'objet d'études complémentaires.

Au final, la science peut évaluer les risques liés à l'exposition aux champs RF en déterminant le « poids de la preuve » mais apporter une réponse scientifique simple, voire simpliste, ne sera pas vraiment possible. En effet, il faudrait prouver scientifiquement et sans l'ombre d'un doute l'innocuité des radiofréquences (soit prouver le risque zéro !) alors que le nombre de situations possibles est infini, avec l'existence de différents types d'ondes électromagnétiques et de signaux pouvant aboutir à des expositions combinées y compris avec d'autres sources environnementales, tels des polluants chimiques par exemple.

La plupart des études citées dans le chapitre santé font référence à des niveaux élevés de champ et à l'utilisation d'un téléphone, dans le contexte spécifique des antennes, il est difficile de faire les analyses sans faire d'approximations.

Les études scientifiques basées sur des expériences in vivo et in vitro utilisent un fort niveau de puissance pendant un temps limité (plutôt pour mimer les conditions d'utilisation de téléphone). L'idée étant d'exposer à des niveaux forts pour augmenter la probabilité d'observer quelque chose. L'approche suppose toujours un effet dose, car c'est un phénomène général bien établi pour les expositions aux produits chimiques, à la chaleur, à la lumière, aux UV, aux rayons X etc. Très peu d'études utilisent des puissances faibles sur des périodes très longues pour mimer l'effet des antennes.

L'approche défendue est que si aucun effet délétère n'est observé avec des expositions fortes, il est raisonnable de supposer qu'aucun effet ne sera observable avec des expositions faibles. Il faut souligner que jusqu'à présent, il n'a jamais mis en évidence de réponse biologique délétère aux RF, pouvant laisser supposer qu'un effet cumulatif dans le temps pourrait exister. Un champ de recherche supplémentaire reste ouvert pour explorer cette question.

### 3.8 Bibliographie

- [1] SCENIHR (Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks). 2015. Opinion on *"Potential health effects of exposure to electromagnetic fields (EMF)"*
- [2] ANSES 2013. Mise à jour du rapport d'expertise collective *"Radiofréquences et santé"*.
- [3] Vijayalaxmi, 2016. Good study design and quality publications: biological and health effects of radiofrequency fields. *Mutat Res*; 810:6–12.
- [4] Simko et al, 2016. Quality matters. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 13: 701.
- [5] Vijayalaxmi and Prihoda, T. J. 2019. Comprehensive Review of the Quality of the Publications and Meta-analysis of Genetic Damage in Mammalian Cells Exposed to Non-Ionizing Radiofrequency Fields. *Radiat. Res.* 191, 20–30. doi: 10.1667/RR15117.1
- [6] Eleventh report from SSM's Scientific Council on Electromagnetic Fields. 2016. *"Recent Research on EMF and Health Risk"*
- [7] Twelfth report from SSM's Scientific Council on Electromagnetic Fields. 2018. *"Recent Research on EMF and Health Risk"*
- [8] ANSES 2012, Rapport d'expertise collective *"Évaluation des risques sanitaires liés à l'utilisation du scanner corporel à ondes millimétriques E<sub>qo</sub>"*.

- [9] Zhadobov M., Chahat N., Sauleau R., Le Quement C., and Le Drean Y. 2011. Millimeter-Wave Interactions with the Human Body: State of Knowledge and Recent Advances. *Int J Microwave & Wireless tech.* 3(2), 237–247
- [10] Report of Partial Findings from the National Toxicology Program Carcinogenesis Studies of Cell Phone Radiofrequency Radiation in Hsd:Sprague Dawley® SD rats (Whole Body Exposures). 2016.
- [11] NTP technical report on the toxicology and carcinogenesis studies in Hsd:Sprague Dawley SD rats exposed to whole-body radio frequency radiation at a frequency (900 MHz) and modulations (GSM and CDMA) used by cell phones. 2018 (TR595) [https://www.niehs.nih.gov/ntp-temp/tr596\\_508.pdf](https://www.niehs.nih.gov/ntp-temp/tr596_508.pdf)  
[https://www.niehs.nih.gov/ntp-temp/tr595\\_508.pdf](https://www.niehs.nih.gov/ntp-temp/tr595_508.pdf)
- [13] Kesari KK, Agarwal A, Henkel R. 2018. Radiations and male fertility. *Reprod Biol Endocrinol.* 16(1):118. doi: 10.1186/s12958-018-0431-1.
- [14] Croft R.J., Chandler J.S., Burgess A.P., Barry R.J., Williams J.D., Clarke A.R. (2002) Acute mobile phone operation affects neural function in humans. *Clinical neurophysiology:* 113:1623-1632.
- [15] Croft R., Hamblin D., Spong J., Wood A., McKenzie R., Stough C. (2008) The effect of mobile phone electromagnetic fields on the alpha rhythm of human electroencephalogram. *Bioelectromagnetics:* 29:1-10.
- [16] Croft R.J., Leung S., McKenzie R.J., Loughran S.P., Iskra S., Hamblin D.L., Cooper N.R. (2010) Effects of 2G and 3G mobile phones on human alpha rhythms: Resting EEG in adolescents young adults, and the elderly. *Bioelectromagnetics* 31:434-444.
- [17] Curcio G., Ferrara M., Moroni F., D'Inzeo G., Bertini M., De Gennaro L. (2005) Is the brain influenced by a phone call? An EEG study of resting wakefulness. *Neuroscience research* 53:265-270.
- [18] Huber R., Treyer V., Borbely A.A., Schuderer J., Gottselig J.M., Landolt H.P., Werth E., Berthold T., Kuster N., Buck A., Achermann P. (2002) Electromagnetic fields, such as those from mobile phones, alter regional cerebral blood flow and sleep and waking EEG. *Journal of sleep research* 11:289-295.
- [19] Regel S.J., Gottselig J.M., Schuderer J., Tinguely G., Rétey J.V., Kuster N., Landolt H-P., Achermann P. (2007) Pulsed radio frequency radiation affects cognitive performance and the waking electroencephalogram. *Neuroreport* 18:803-807.
- [20] Reiser H., Dimpfel W., Schober F. (1995). The influence of electromagnetic fields on human brain activity. *European Journal of medical research* 1:27-32.
- [21] Von Klitzing L. (1995) Medical/biological Study (experimental study) Low-Frequency pulsed electromagnetic fields influence EEG of man. *Physica Medica* 11:77-80.
- [22] Lebedeva N., Sulimov A., Sulimova O., Kotrovskaya T., Gailus T. (2000) Cellular phone electromagnetic field effects on bioelectric activity of human brain. *Critical reviews in biomedical engineering* 28:323-338.
- [23] Vecchio F., Babiloni C., Ferreri F., Curcio G., Fini R., Del Percio C., Rossini .PM. (2007) Mobile phone emission modulates interhemispheric functional coupling of EEG alpha rhythms. *The European journal of neuroscience* 25:1908-1913.
- [24] Vecchio F., Babiloni C., Ferreri F., Buffo P., Cibelli G., Curcio G., van Dijkman S., Melgari J.M., Giambattistelli F., Rossini P.M. (2010) Mobile phone emission modulates inter-hemispheric functional coupling of EEG alpha rhythms in elderly compared to young subjects. *Clinical neurophysiology: official journal of the International Federation of Clinical Neurophysiology* 121:163-171.
- [25] Vecchio F., Tombini M., Buffo P., Assenza G., Pellegrino G., Benvenga A., Babiloni C., Rossini P.M. (2012) Mobile phone emission increases inter-hemispheric functional coupling of electroencephalographic alpha rhythms in epileptic patients. *International journal of psychophysiology:* 84:164-171.
- [26] Suhhova A., Bachmann M., Karai D., Lass J., Hinrikus H. (2013) Effect of microwave radiation on human EEG at two different levels of exposure. *Bioelectromagnetics* 34:264-274.
- [27] Roggeveen S., van Os J., Viechtbauer W., Lousberg R. (2015) EEG Changes Due to Experimentally Induced 3G Mobile Phone Radiation. *PLoS one* 10:e0129496.



- [28] D'Costa H., Trueman G., Tang L., Abdel-rahman U., Abdel-rahman W., Ong K., Cosic I. (2003) Human brain wave activity during exposure to radiofrequency field emissions from mobile phones. *Australas Phys Eng Sci Med* 26:162-167.
- [29] Maby E., Le Bouquin Jeannes R., Faucon G. (2006) Short-term effects of GSM mobiles phones on spectral components of the human electroencephalogram. *Conference proceedings: Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society IEEE Engineering in Medicine and Biology Society Annual Conference* 1:3751-3754.
- [30] Perentos N., Croft R.J., McKenzie R.J., Cosic I. (2013) The alpha band of the resting electroencephalogram under pulsed and continuous radio frequency exposures. *IEEE transactions on bio-medical engineering* 60:1702-1710.
- [31] Vecchio F., Buffo P., Sergio S., Iacoviello D., Rossini P.M., Babiloni C. (2012) Mobile phone emission modulates event-related desynchronization of alpha rhythms and cognitive-motor performance in healthy humans. *Clinical neurophysiology*: 123:121-128.
- [32] Ghosn R., Yahia-Cherif L., Hugueville L., Ducorps A., Lemarechal J.D., Thuróczy G., de Seze R., Selmaoui B. (2015) Radiofrequency signal affects alpha band in resting electroencephalogram. *Journal of neurophysiology* 113:2753-2759.
- [33] Yang L., Chen Q., Lv B., Wu T. (2017) Long-Term evolution electromagnetic fields exposure modulates the resting state EEG on alpha and beta bands. *Clinical EEG and neuroscience* 48:168-175.
- [34] Vecsei Z, Knakker B, Juhász P, Thuróczy G, Trunk A, Hernádi I. (2018) Short-term radiofrequency exposure from new generation mobile phones reduces EEG alpha power with no effects on cognitive performance. *Sci Rep.* 8(1):18010. doi: 10.1038/s41598-018-36353-9.
- [35] Röschke J., Mann K. (1997) No short-term effects of digital mobile radio telephone on the awake human electroencephalogram. *Bioelectromagnetics*: 18:172-176
- [36] Hietanen M., Kovala T., Hämäläinen A-M. (2000) Human brain activity during exposure to radiofrequency fields emitted by cellular phones. *Scandinavian journal of work, environment & health* 87-92.
- [37] Perentos N., Croft R.J., McKenzie R.J., Cvetkovic D., Cosic I. (2007) Comparison of the effects of continuous and pulsed mobile phone like RF exposure on the human EEG. *Australasian Physics & Engineering Sciences in Medicine* 30:274-280.
- [38] Loughran S.P., Benz D.C., Schmid M.R., Murbach M., Kuster N., Achermann P. (2013) No increased sensitivity in brain activity of adolescents exposed to mobile phone-like emissions. *Clinical neurophysiology* 124:1303-1308.
- [39] Trunk A., Stefanics G., Zentai N., Kovács-Bálint Z., Thuróczy G., Hernadi I. (2013) No effects of a single 3G UMTS mobile phone exposure on spontaneous EEG activity, ERP correlates, and automatic deviance detection. *Bioelectromagnetics* 34:31-42.
- [40] Zentai N., Csathó A., Trunk A., Fiocchi S., Parazzini M., Ravazzani P., Thuróczy G., Hernádi I. (2015) No effects of acute exposure to Wi-Fi electromagnetic fields on spontaneous EEG activity and psychomotor vigilance in healthy human volunteers. *Radiation research* 184:568-577.
- [41] Reeves R.R., Struve F.A., Patrick G. (2002) Topographic quantitative EEG response to acute caffeine withdrawal: a comprehensive analysis of multiple quantitative variables. *Clinical Electroencephalography* 33:178-188.
- [42] Siepmann M., Kirch W. (2002) Effects of caffeine on topographic quantitative EEG. *Neuropsychobiology* 45:161-166.
- [43] Herning R.I., Better W., Tate K., Cadet J.L. (2003) EEG deficits in chronic marijuana abusers during monitored abstinence. *Annals of the New York Academy of Sciences* 993:75-78.
- [44] Teneggi V., Squassante L., Milleri S., Polo A., Lanteri P., Ziviani L., Bye A. (2004) EEG power spectra and auditory P300 during free smoking and enforced smoking abstinence. *Pharmacology Biochemistry and Behavior* 77:103-109.

- [45] Deslandes A., Veiga H., Cagy M., Piedade R., Pompeu F., Ribeiro P. (2005) Effects of caffeine on the electrophysiological, cognitive and motor responses of the central nervous system. *Brazilian Journal of Medical and Biological Research* 38:1077-1086.
- [46] Domino E.F., Ni L., Thompson M., Zhang H., Shikata H., Fukai H., Sakaki T., Ohya I. (2009) Tobacco smoking produces widespread dominant brain wave alpha frequency increases. *International Journal of Psychophysiology* 74:192-198.
- [47] Lansbergen M.M., Dumont G.J., van Gerven J.M., Buitelaar J.K., Verkes R.-J (2011) Acute effects of MDMA (3, 4-methylenedioxyamphetamine) on EEG oscillations: alone and in combination with ethanol or THC (delta-9-tetrahydrocannabinol). *Psychopharmacology* 213:745-756.
- [48] Fisher D.J., Daniels R., Jaworska N., Knobelsdorf A., Knott V.J. (2012) Effects of acute nicotine administration on resting EEG in nonsmokers. *Experimental and clinical psychopharmacology* 20:71.
- [49] Lithari C., Klados M.A., Pappas C., Albani M., Kapoukranidou D., Kovatsi L., Bamidis P.D., Papadelis C.L. (2012) Alcohol affects the brain's resting-state network in social drinkers. *PLoS one* 7:e48641.
- [50] Becker D., Creutzfeldt O., Schwibbe M., Wuttke W. (1982) Changes in physiological, EEG and psychological parameters in women during the spontaneous menstrual cycle and following oral contraceptives. *Psychoneuroendocrinology* 7:75-90
- [51] Solis-Ortiz S., Guevara M., Corsi-Cabrera M. (2004) Performance in a test demanding prefrontal functions is favored by early luteal phase progesterone: an electroencephalographic study. *Psychoneuroendocrinology* 29:1047-1057.
- [52] Brötzner C.P., Klimesch W., Doppelmayr M., Zauner A., Kerschbaum H.H. (2014) Resting state alpha frequency is associated with menstrual cycle phase, estradiol and use of oral contraceptives. *Brain research* 1577:36-44.
- [53] Bazanova O.M., Nikolenko E.D., Barry R.J. (2017) Reactivity of alpha rhythms to eyes opening (the Berger effect) during menstrual cycle phases. *International Journal of Psychophysiology* 122:56-64.
- [54] Sannita W.G., Loizzo A., Garbarino S., Gesino D., Massimilla S., Ogliastro C. (1999) Adrenocorticotropin-related modulation of the human EEG and individual variability. *Neuroscience letters* 262:147-150.
- [55] Tops M., Wijers A.A., van Staveren A.S., Bruin K.J., Den Boer J.A., Meijman T.F., Korf J. (2005) Acute cortisol administration modulates EEG alpha asymmetry in volunteers: relevance to depression. *Biological psychology* 69:181-193.
- [56] Wagner P, Röschke J, Mann K, Hiller W, Frank C. (1998) Human Sleep Under the Influence of Pulsed Radiofrequency Electromagnetic Fields: A Polysomnographic Study Using Standardized Conditions. *Bioelectromagnetics*, 19 (3), 199-202
- [57] Wagner P, Röschke J, Mann K, Fell J, Hiller W, Frank C, Grözinger M. (2000) Human Sleep EEG Under the Influence of Pulsed Radio Frequency Electromagnetic Fields. Results From Polysomnographies Using Submaximal High Power Flux Densities. *Neuropsychobiology*, 42 (4), 207-12.
- [58] Loughran SP, McKenzie RJ, Jackson ML, Howard ME, Croft RJ. (2012) Individual Differences in the Effects of Mobile Phone Exposure on Human Sleep: Rethinking the Problem. *Bioelectromagnetic*, 33 (1), 86-93
- [59] Fritzer G, Göder R, Friege L, Wachter J, Hansen V, Hinze-Selch D, Aldenhoff JB. (2007). Effects of Short-And Long-Term Pulsed Radiofrequency Electromagnetic Fields on Night Sleep and Cognitive Functions in Healthy Subjects. *Bioelectromagnetics*, 28 (4), 316-25
- [60] Danker-Hopfe H, Dorn H, Bahr A, Anderer P, Sauter C. (2011). Effects of Electromagnetic Fields Emitted by Mobile Phones (GSM 900 and WCDMA/UMTS) on the Macrostructure of Sleep. *J Sleep Res*, 20 (1 Pt 1), 73-81
- [61] Danker-Hopfe H, Dorn H, Bornkessel C, Sauter C. (2010). Do mobile phone base stations affect sleep of residents? Results from an experimental double-blind sham-controlled field study. *Am J Hum Biol*, 22 (5), 613-8

- [62] Schmid MR, Murbach M, Lustenberger C, Maire M, Kuster N, Achermann P, Loughran SP. (2012) Sleep EEG Alterations: Effects of Pulsed Magnetic Fields Versus Pulse-Modulated Radio Frequency Electromagnetic Fields. *J Sleep Res*, 21 (6), 620-9
- [63] Regel SJ, Tinguely G, Schuderer J, Adam M, Kuster N, Landolt HP, Achermann P. (2007). Pulsed Radio-Frequency Electromagnetic Fields: Dose-Dependent Effects on Sleep, the Sleep EEG and Cognitive Performance. *J Sleep Res*, 16 (3), 253-8
- [64] Huber R, Treyer V, Borbély A, Schuderer J, Gottselig J M, Landolt H-P, Werth E, Berthold T, Kuster N, Buck A, Achermann P (2000). Electromagnetic Fields, Such as Those From Mobile Phones, Alter Regional Cerebral Blood Flow and Sleep and Waking EEG. *J Sleep Res*, 11 (4), 289-95
- [65] Hung C-S, Anderson C, Horne JA, McEvoy P. (2007) Mobile Phone 'Talk-Mode' Signal Delays EEG-determined Sleep Onset. *Neurosci Lett*, 421 (1), 82-6.
- [66] Lowden A, Akerstedt T, Ingre M, Wiholm C, Hillert L, Kuster N, Nilsson J P, Arnetz B. (2011). Sleep After Mobile Phone Exposure in Subjects with Mobile Phone-Related Symptoms. *Bioelectromagnetics*, 32 (1), 4-14.
- [67]** ANSES 2016. Rapport d'expertise collective « *Exposition aux radiofréquences et santé des enfants* ».
- [68] ANSES 2018, Rapport d'expertise collective « *Hypersensibilité électromagnétique ou intolérance environnementale idiopathique attribuée aux champs électromagnétiques* »
- [69] Wallace, J., Selmaoui, B. (2019). Effect of mobile phone radiofrequency signal on the alpha rhythm of human waking EEG: A review. *Environmental Research* 175, 274-286.

## 4 Impacts spécifiques sur l'économie

### 4.1 Aspects macro-économiques

*Objectifs : Poursuivre l'analyse des impacts du développement de la technologie 5G pour le marché mondial et européen (et comme demandé en Asie et aux Etats-Unis) notamment en termes : de croissance; de contribution directe et indirecte à l'activité économique; d'emploi; d'infrastructures; de financement public; de services rendus ainsi que de barrières.*

#### 4.1.1 Avant- propos

Comme pour les versions précédentes, les chiffres repris dans cette partie doivent être considérés comme indicatifs. Même si les données s'affinent, il s'agit souvent de prévisions. Par ailleurs les sources prises en compte ne mentionnent pas toujours d'informations complètes sur les indicateurs chiffrés, notamment, leur signification précise, par exemple, en terme de distinction entre connexions et souscriptions ou encore d'année de référence des unités monétaires citées, ainsi que de taux de conversion \$/€. Des incertitudes en résultent et invitent le lecteur à rester prudent.

Cette version gardera grosso modo la même structure que la précédente (Rolain, Y. et al., 2018) et le contenu des paragraphes de cette section doit être considéré comme des compléments. L'idée initiale d'aborder les applications 5G pour l'Internet des objets (IdO) ainsi que sur les connexions machines à machines (M2M) dont peut faire bénéficier la 5G ne sera que partiellement couverte car il est trop tôt. De nombreux équipements susceptibles de s'interconnecter par réseaux sans fil (cellulaires ou Wifi) ne sont pas encore disponibles. Il est de même prématuré pour des applications à l'échelle mondiale qui demandent des réseaux cellulaires suffisamment étendus.

Il est prévu que la 5G décolle en 2019-2020, années d'une entrée sur le marché (Cerwall, P. et al., 2018). Ceci implique encore l'introduction de puces de troisième génération (permettant des vitesses d'1 Gbps ainsi que la commercialisation d'appareils adaptés (smartphones, ...) ce qui n'est pas encore le cas en ce début 2019 (Pujol et al., 2019). Les livraisons de smartphones 5G ne représenteraient que 1% des ventes en 2020 (Wieland, K., 2019). Une adoption de masse ne serait pas attendue avant 2025.

Dans l'attente, on assiste à la mise en place de phases-test, préalables aux essais de déploiement de réseaux et à leur développement commercial.

## 4.1.2 Marchés mondial et européen du secteur mobile 5G : le nombre de souscriptions mobiles attendues et le trafic mobile – Les phases de tests et de déploiement

Au niveau mondial, la majorité du déploiement des réseaux est attendue pour 2020. Les projections indiquent que le nombre de souscriptions 5G dépasseront le milliard en 2023 (Cerwall P. et al., 2018) soit environ 12% des souscriptions mobiles sur 7,2 milliards de smartphones et passeraient à 1,7 milliards en 2025 (Pujol et al., 2018). Ce chiffre correspond à celui d'une autre source : 1,5 milliards de souscriptions à la fin 2024 (Cerwall P. et al., 2018), soit 17 % de toutes les souscriptions. Pour les connexions<sup>18</sup>, une étude (Juniter, 2017) mentionne 1,4 milliards en 2025, ce qui est peu par rapport au nombre de souscriptions. En 2025, une majorité des souscriptions reviendrait à l'Asie : 960 (58 %), suivies par l'Amérique : 329 (20 %) (Manero, C. et Pujol, F., 2018). En termes de connexions : 4,1 milliards seraient dévolues à l'IdO en 2024 (Sue, M., 2018 ; Cerwall, P. et al., 2018) et 3,1 milliards en 2025 selon GSMA (GSMA, 2018a).

Le passage de la 4G à la 5G devrait être rapide. Actuellement, de nombreuses phases test sont en cours. Ces progrès bénéficient de la forte implication du secteur des communications mobiles avec le soutien des autorités publiques.

Ainsi aux USA, Verizon, un des 4 opérateurs<sup>19</sup> de téléphonie mobile, a réalisé des essais (ondes millimétriques, aller-retour, très hautes vitesses, véhicules en mouvement) notamment avec les fabricants d'équipements Nokia et Qualcomm dans 11 villes dès 2017 (Pujol, F. et al., 2019). Des premiers lancements commerciaux (Apple TV, Google Chromecast) ont suivi au sein de quelques villes. AT&T a également démarré tôt ses essais dans une dizaine de villes (Bell, P., 2018). Comme indiqué dans la section 3.3.3 de ce rapport, les retours d'expériences de ces actions ne sont pas toujours concluants compte tenu d'une insuffisance de développement. En plus, les expérimentations ont une portée partielle car les premiers smartphones ne seront mis sur le marché que dans le courant 2019.

On peut observer le même engouement en Asie du sud-est : Corée du sud, Japon et Chine. (Pujol, F. et al., 2019). La Corée du sud est la première à se faire connaître par un lancement commercial dans le cadre des jeux olympiques d'hiver en février 2018 où un service vidéo fonctionnant sur 28 GHz a été utilisé. Depuis, le développement de la 5G s'y poursuit dans quelques villes. Au Japon, de même, il est prévu le développement d'un réseau 5G, notamment pour les jeux olympiques et paralympiques d'été en 2020. Entretemps, les trois opérateurs ([NTT Docomo](#), [KDDI](#) et SoftBank Group) se sont lancés dans des essais portant sur de nouvelles fréquences ou débits notamment des applications associées dans le domaine du rail. Enfin en Chine, l'initiative est très soutenue par les autorités. Les trois opérateurs<sup>20</sup> sont impliqués dans la construction de stations de base et des essais dans plusieurs villes dont Pékin, Tianjin, Shanghai et

---

<sup>18</sup> Les souscriptions correspondent aux abonnés mobiles uniques. Les abonnés uniques peuvent disposer de plusieurs connexions mobiles (c'est-à-dire de cartes SIM).

<sup>19</sup> Quatre opérateurs de téléphonie mobile dominant aux États-Unis : AT & T, Sprint, T-Mobile et Verizon.

<sup>20</sup> Il s'agit de China Mobile, China Unicom et China telecom.

Shenzhen (Hatt, T. et Lacopino, P., 2018). Des lancements commerciaux sont prévus en 2020 dans le cadre du programme “Made in China 2025”.

A l'échelle de l'Europe, d'après IDATE Digiworld (Manero, C. et Pujol, F., 2018), le nombre de souscriptions devait atteindre 274 millions en 2025 soit 17 % de la part mondiale (11% pour l'EU-28). GSMA (GSMA, 2018b) mentionne des chiffres inférieurs et ceci en terme de connexions: 203 millions en 2025.

A l'instar de ce qui se passe ailleurs dans le monde, plusieurs pays de l'Europe des 28<sup>21</sup> se sont d'ores et déjà lancés dans des essais à l'échelle de villes (GSMA, 2018b) et de corridors transfrontières (Pujol, F. et al., 2019). Le rapport “Digital Economy and Society Index” sur la connectivité mentionne 80 essais et études pilotes (DESI report, 2018). Ces essais préfigurent des phases de déploiement dans l'attente d'autres en conditions réelles, lorsque les smartphones 5G seront disponibles. Actuellement deux réseaux commerciaux ont été lancés, l'un en Finlande (Tampere), et l'autre en Estonie (Talinn). D'autres devraient suivre au début 2019. Ils sont le fruit de collaborations entre les opérateurs locaux (Deutsche Telekom, Orange, SFR, Bouygues, Vodafone, KPN, T-Mobile Austria, etc) et des partenaires technologiques (Ericsson, Nokia, Huawei, Samsung,...). Parmi les pays les plus actifs, on peut citer : l'Espagne, la France, l'Allemagne, l'Italie, le Royaume-Unis, la Finlande, l'Estonie, les Pays-Bas, le Portugal, la Roumanie. La Suisse également a émis le désir de rester dans la course en partenariat avec ses trois opérateurs: [Swisscom AG](#) (avec Ericsson), [Sunrise Communications AG](#) (avec Huawei) et [Salt SA \(avec Nokia\)](#). Des réseaux test sont déployés à Berthoud, Lausanne, Berne, Zurich, Genève ou Lucerne (Swisscom, 2018).

Pour le trafic mobile dans un contexte mondial, la question a été soulevée dans le précédent rapport (Rolain, Y et al., 2018). Parmi les éléments neufs publiés depuis, on note qu'il est attendu que les débits du réseau 5G atteignent 136 exabytes (EB) par mois à la fin 2024 (Cerwall et al. 2018). Ce débit correspond à 25 % du trafic mondial. Ericsson mentionne également une hausse de plus de 5x du trafic entre 2018 et 2024 et ceci grâce à une extension de capacité du réseau et une diminution des coûts par byte (Cerwall, P. et al., 2018)). S'y ajoutera l'extension des applications avec les développements de l'internet des objets (marchés verticaux).

### 4.1.3 Moteur de croissance

Au niveau mondial, les retombées macroéconomiques attendues du réseau 5G ont peu fait l'objet de nouvelles études prospectives chiffrées, du moins pour le long terme, et les informations (Campbell, K et al., 2017) reprises dans le précédent rapport (Rolain et al., 2018) restent valides. Pour le court terme, à part pour le secteur des communications, l'impact devrait être limité.

---

<sup>21</sup> La mise en place de l'Observatoire européen de la 5G par la DG Connect de la Commission européenne permet de suivre l'introduction de la 5G sur les marchés de l'UE-28, les évolutions et les applications attendues. Actuellement, deux rapports trimestriels confiés à Idate Digiworld ont été publiés.

Pour l'Europe et le moyen terme, les résultats de l'étude SMART (EC, 2016) financée par la Commission Européenne et considérée dans le précédent rapport restent d'actualité (Rolain et al., 2018).

#### 4.1.4 Contribution directe et indirecte à l'activité économique

Une première contribution en terme de valeur ajoutée concerne l'activité des opérateurs et gestionnaires de réseau, des fournisseurs d'infrastructures et d'équipements, les fournisseurs d'applications et de services, les taxes, etc. Dans cet ensemble les revenus espérés des opérateurs comptent pour plus de 60% de l'ensemble (GSMA, 2018a). Une fois de plus, et en terme de chiffres, peu de nouveautés sont intervenues depuis le précédent rapport (Rolain et al., 2018). Il faut toutefois mentionner que la contribution de spectres de bandes d'ondes millimétriques (mmWave) entre 24 GHz et 86 GHz pourrait constituer en terme de quote-part un apport de 565 milliards de \$ au PIB mondial (GSMA, 2018c).

Les retombées positives de l'effet "réseau" de la 5G ont fait l'objet d'évaluations économiques et sont mentionnées dans le précédents rapport (Rolain et al., 2018).

Deux contributions y sont considérées :

Une première contribution concerne l'activité des fournisseurs d'équipements, des opérateurs et gestionnaires de réseau. Seuls des chiffres concernant l'UE (28) ont pu être trouvés. Les financements nécessaires en UE (28) se situeraient à 56,6 milliards d'€ en 2020 et 58 milliards d'€ en 2025 (EC, 2016).

L'autre contribution concerne les retombées directes et indirectes (impacts induits) liées aux usages du réseau. Au niveau mondial, l'impact de la 5G en termes de ventes globales de biens et services se chiffrerait à 12,3 billions de \$ en 2035, ce qui représente 4,6 % du produit mondial (Campbell, 2017). Au niveau européen, les « bénéfiques » annuels directs dans 4 secteurs verticaux (automobile, santé, transport et énergie) et ceux indirects (induits) sociétaux (industrie, 63 % et consommateurs 37 %) s'élèveraient au total à 113,1 milliards d'euros par an (EC, 2016). Peu d'éléments neufs sont depuis intervenus.

#### 4.1.5 Emploi

La création d'emplois a été abordée pour le long terme dans le précédent rapport (Rolain et al., 2018). Mais à court terme, on peut s'attendre à des pertes d'emploi notamment chez des opérateurs dans le but de réduire leurs coûts. Comme l'annonce Jeff McElfresh du géant AT&T : *"To win in this new world, we must continue to lower costs and keep getting faster, leaner, and more agile."* *"This includes reductions in our organization, and others across the company, which will begin later this month and take place over several months."* (Brodkin, J., 2019). On est clairement face à un mécanisme de création-destruction d'emplois, exacerbé par la concurrence et la course au leadership.

## 4.1.6 Infrastructures (antennes et relais)

La 5G repose sur trois bandes de fréquences-clés pour permettre une couverture large et toutes les options d'utilisation. Ces trois bandes de fréquences se situent soit en-dessous de 1 GHz (700 MHz) utile pour des couvertures larges et l'IdO, soit de 1 à 6 GHz (3,6-3,7) et soit encore au-dessus de 6 GHz (24-28) nécessaires pour assurer de hauts débits très rapides. Le tout implique des modifications d'antennes existantes, l'ajout d'antennes pour de nouvelles fréquences sans compter l'addition de petites cellules (antennes > 6 GHz). Ces dernières nécessitent l'installation d'un réseau dense (150 par km<sup>2</sup> ou plus) qui peut s'avérer assez coûteuse<sup>22</sup> (Grijping, F. et al., 2018a) puisqu'elle prend en compte le coût de l'antenne, du site, de l'alimentation électrique et de l'entretien, etc. En plus, pour chaque antenne, des permissions sont requises de la part du propriétaire du terrain et des autorités locales. Le tout peut prendre plus d'une année, alors qu'il faut, d'après Sprint, un jour pour installer l'antenne. Cette situation peut être intenable pour une densification à grande échelle (5gamericas.org et smallcellforum.org 2018). Parmi les solutions, des partages de pylônes/antennes entre opérateurs sont toujours possibles voir par exemple l'accord entre Telefonica UK et Vodafone UK en Grande-Bretagne (Morris, A., 2019). Ainsi si un surcoût de 86% est cité pour le réseau 5G, le partage de réseaux devrait limiter ce surcoût à 57% (Grijping, F. et al., 2018b). En plus, il y a des possibilités d'intégration dans les infrastructures urbaines: réverbères, panneaux de signalisation, etc.

En Europe, il faut signaler l'existence de la directive 2014/61/UE (directive sur la réduction des coûts liés à la large bande) qui a pour but la promotion des réseaux à moindre coût notamment par:

- i) " l'utilisation conjointe des infrastructures physiques existantes" ;
- ii) et des synergies entre les secteurs pour un déploiement plus efficace des nouvelles infrastructures physiques" (EC, 2014).

En complément, la toute récente modification de la directive 2018/1972/UE (directive fixant le Code Européen des Communications Electroniques) prévoit entre autres d'alléger la réglementation, mais encore d'encourager les co-investissements pour le déploiement de nouveaux réseaux comme ceux de la 5G (EC, 2019).

Les coûts généraux du déploiement de la 5G au niveau mondial et en Europe ont été abordé dans le précédent rapport.

En ce qui concerne les coûts d'antennes liés au respect de normes d'émissions de sévérité croissante, les informations n'ont pas pu être trouvées pour la 5G. Une étude de PWC (Mathis, A. et al., 2013) a toutefois été réalisée en 2013 à la demande des opérateurs suisses pour établir des comparaisons avec quelques pays européens sur les bandes de fréquences 900 MHz et 2100 MHz. Elle indique des surcoûts du mobile de 24,9 à 34,5 % pour le respect de la norme Suisse (4 V/m (900 MHz) et 6 V/m (2,3 GHz)) par rapport à l'Allemagne, l'Autriche et la France qui respectent la norme de l'ICNRIP (41 V/m (900 MHz) et 61 V/m (2,3

---

<sup>22</sup> Voir § Barrières



GHz)). Ce surcoût est également estimé à 24,9% pour l'Italie qui respecte des normes proches de celles de la Suisse. Avec la décision des autorités suisses de prolonger le maintien de normes strictes pour le déploiement de la 5G, il faut s'attendre à ce que les coûts de réseaux y restent élevés du fait de la nécessité de multiplier le nombre d'antennes de moindre puissance. Cependant et de manière générale, le recours aux hautes fréquences prévues pour la 5G nécessite automatiquement d'accroître le nombre d'antennes de petites tailles.

#### 4.1.7 Financement public – Recettes d'attribution de spectres

En complément aux informations fournies dans notre précédent rapport (Rolain et al., 2018). Il est important de souligner la poursuite du soutien de la Commission Européenne dans le cadre du marché unique digital au travers de ses programmes de recherches (H2020). Il faut y ajouter aussi un soutien financier de la part de la BEI qui a investi 500 millions d'€ auprès de Nokia pour sa contribution au développement de la 5G. De même en Chine, des fabricants d'équipements comme ZTE et Huawei ont bénéficié de subventions (72 millions de \$) pour leur contribution au développement de la 5G. (Pujol, J. et al., 2019).

Différents critères sont pris en compte par les autorités publiques pour les prix des taxes et des licences d'utilisation de spectre, notamment:

i) des *"prix au consommateur abordables ;*

ii) *des investissements soutenables pour les opérateurs (antennes, acquisition de fréquences);*

iii) *des niveaux optima de revenus pour les États.*

*La combinaison de ces trois objectifs est un exercice complexe" (Delannoy, E., 2018).*

Dans l'engouement du développement de la 5G et pour les acquisitions de fréquences, des enchères sont lancées par les régulateurs/autorités à l'attention des opérateurs désireux d'acquérir des licences pour les fréquences complémentaires dans les bandes de 600-700 MHz, 3,4-3,7 GHz et 26 GHz et plus.

Les montants de ces enchères sont communiqués au compte-goutte. Ils atteignent des sommes assez élevées ce qui implique la disposition de budgets importants et demande des garanties d'utilisations de licences à long terme (10-20 ans). A titre d'exemple, les enchères en Italie se sont élevées à 4,42 milliards d'€ (5G Observatory, 2019) dont 2,2 milliards d'€ pour les fréquences moyennes. En Suisse, les trois opérateurs ont acquis leurs licences 5G pour le montant de 379 millions \$ et ce pour une période de 15 ans (5G Observatory, 2019). Pour les opérateurs, de tels montants peuvent entraîner des répercussions compensatoires en termes de perte d'emploi et de sauvegarde de leur compétitivité.

Chez certains opérateurs aucune hausse de tarif n'est prévue par rapport à la 4 G. Pour d'autres la hausse est prévue (via abonnements, routeur).

### 4.1.8 Services rendus

Les applications bénéficiant de l'effet de réseau de la 5G sont multiples et restent encore en partie méconnues (celles-ci devant encore en partie être créées). Leur capacité sera renforcée par de très haut débit, des temps de latence réduits et la possibilité d'interconnexions multiples sans fil ou non. Leurs apports font référence à trois concepts (GSMA, 2018d ; Campbell, K., et al., 2017) :

- i) l'"internet massif des objets" (IdO) poursuivant/améliorant les actions antérieures "machines à machines" (M2M). L'Internet massif des Objets concerne les communications entre appareils. Leurs applications sont multiples et concernent les secteurs : de l'énergie, des transports et infrastructures, de la santé, des villes intelligentes, smart building, de l'administration publique, de l'éducation, de la vente au détail et des services financiers;
- ii) le haut débit mobile amélioré (extension de la couverture cellulaire y compris bureaux, parcs industriel, centre commerciaux, etc., en développement;
- iii) et enfin des applications critiques essentielles (véhicules autonomes, réseaux intelligents, automatisations complexes) prévues pour le futur.

Les applications d'IdO et communications M2M impliquent de très grandes quantités de données à transférer. Les prévisions indiquent 3,1 milliards de connexions IdO en 2025 d'après GSMA (GSMA, 2018d).

### 4.1.9 Barrières

A côté des barrières relatives à la hausse de coûts déjà dénoncés ci-avant pour les opérateurs et dans le précédent rapport, il faut citer celles liées à la sécurité. En effet, l'infrastructure de la 5G implique des milliards de connections très rapides entre terminaux, machines, voitures, etc., ce qui pose des questions de sécurité avec acuité. Actuellement, Huawei un des plus grands fournisseurs d'équipements est soupçonné d'espionnage industriel alors qu'il est impliqué depuis plusieurs années sur des marchés européens, australiens, ... Des retards sont possibles en cas de renégociations de la part d'opérateurs comme Vodafone, Orange, Deutsch Telekom, sous la pression de leurs gouvernements respectifs (Lyons, J., 2019).

## Bibliographie

5G americas.org. and smallcellforum.org , 2018: “Small cell siting challenges and recommendations” - 43 p.

5G Observatory, 2019: Archive for the ‘5G auctions’ <https://5gobservatory.eu/category/5g-auctions/>

Bell, P., 2018: “5G in the Foreground in U.S. and Canada” TeleGeography’s GlobalComms Database - 6p.

Brodkin, J., 2019 “AT&T plans layoffs despite claiming tax cut would create 7,000 jobs” Ars Technica news letter, 1/9/2019

Campbell, K., Di ley, 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 - 34 p.

Cerwall, P., Lundvall, A., Jonsson, P., Carson, S., Möller, R., Lindberg, P., Öhman, K., Sorlie, I., Queirós, R., Muller, F., Englund, L., Arvedson, M., Carlsson, A., 2018: Ericsson Mobility Report, Nov 2018 - 32 p.

Delannoy, E., 2018: “investments in 5G” ITU Regional Seminar 5G implementation in Europe and CIS, Budapest, 3 July 2018 – 15 p.

DESI (Digital Economy and Society Index), 2018: “Connectivity Broadband market developments in the EU” - 52 p.

EC, 2014: “Directive 2014/61/UE du parlement européen et du conseil du 15 mai 2014 relative à des mesures visant à réduire le coût du déploiement de réseaux de communications électroniques à haut débit”. *Journal Officiel L 155, 23.5.2014, p. 1–14*

EC, 2016: “Identification and quantification of key socio-economic data to support strategic planning for the introduction of 5G in Europe”. SMART 2014/0008 – Tech4i2 ; Real Wireless ; CONNECT, Trinity College Dublin; InterDigital - Publications Office of the European Union , Luxembourg - 114 p.

EC, 2018: “Directive (EU) 2018/1972 du parlement européen et du conseil du 11 décembre 2018 établissant le code des communications électroniques européen”. *Journal Officiel L 321/36, 17.12.2018, p. 36–210*

Grijpink, F., Ménard, A., Sigurdsson, H. and Vucevic , N., 2018a: “The road to 5G: The inevitable growth of infrastructure cost”. McKinsey&Company. Article, February 2018

Grijpink, F., Ménard, A., Sigurdsson, H. and Vucevic , N., 2018b: “Network sharing and 5G: A turning point for lone riders “. McKinsey&Company. Article, February 2018

GSMA, 2018a: “The Mobile Economy 2018” GSMA Intelligence - 56 p.

GSMA, 2018b: “The Mobile Economy Europe 2018 “ GSMA Intelligence - 41 p.

GSMA, 2018c: "Study on socio-economic benefits of 5g services provided in mmwave bands " - GSMA The WRC Series - 61 p.

GSMA, 2018d: "New gsma report highlights integral role of mobile iot networks in 5g future" GSMA Press release, May 15, 2018

Juniper, 2017: Juniper Research Press release - 2017

Hatt, T. and Lacopino, P., 2018: "5G in China: the enterprise story" - GSMA - 25 p.

Lyons, J., 2019: "Vodafone Suspends Huawei Networking Equipment Purchases"

SDxCentral's Newsletter, January 25, 2019

Manero, C., Pujol, F., 2018: IDATE DigiWorld News letter, 25 juin 2018

Mathis, A., Sutter, B., Kartscher, P., 2013: "Mobile network cost study - Analysis of cost drivers related to the construction, operation and maintenance of mobile networks" PWC - 60 p.

Morris, A., 2019: "Telefónica and Vodafone Add 5G to UK Network Sharing Accord" - SDxCentral's Newsletter, January 23, 2019

Pujol, F., Manero, C., Jaffal, T., 2019: 5G Observatory – Quarterly Report 2 - IDATE DigiWorld - 65 p.

Rolain, Y., Beauvois, V., Erzeel, D., Hecq, W., Lagroye, I., Pollin, S., Rebreau, L., Vanderstreaten, J., Verschaeve, L., 2018 : "Rapport du comité d'experts sur les radiations non ionisantes 2017-2018" - Bruxelles-Environnement - 34 p.

Sue, M., 2018: "Ericsson Predicts There Will Be 1.5 Billion 5G Subscribers in 6 Years". SDxCentral's Newsletter, November 27, 2018

Swisscom, 2018 : "Swisscom veut déployer la 5G sur 60 sites d'ici fin 2019" - <https://www.swisscom.ch/fr/about/medien/.../60-sites-d-ici-2019-avec-la-5g.html>

Vodafone, 2018: "Vodafone italy acquires spectrum for 5G services" Vodafone Group,

<https://www.vodafone.com/.../vodafone.../vodafone-italy-acquires-...>

Wieland, K., 2019 : "50,000 5g smartphone arrivals in the UK during 2019" 5G NewsLetter, 21 January 2019

## 4.2 Aspects micro-économiques

### 4.2.1 Situation du secteur des télécommunications mobiles en Belgique

#### 4.2.1.1 Le marché belge de la téléphonie mobile

Fin 2017, le marché belge de la téléphonie mobile comptait au total 11,96 millions de cartes SIM, y compris les trois opérateurs de réseaux, les MVNO<sup>23</sup> et à l'exclusion du M2M (machine-to-machine). Il s'agit d'une diminution de 4,7 % par an. Cette diminution est imputable à la diminution du nombre de clients des services prépayés : -27,2% à 3,06 millions. La base de clients mobiles postpayés poursuit sa croissance avec 556 266 cartes SIM supplémentaires pour atteindre 8,9 millions à fin 2017 (+6,7%). 24,8 % d'entre eux font partie d'une offre groupée avec service fixe contre 19,4 % un an plus tôt. Cette tendance reflète la préférence croissante des consommateurs pour les forfaits combinant les services fixes et mobiles. Le nombre de cartes SIM machine-to-machine à la fin de 2017 était de 2.384 188, soit +8,1% de plus annuellement<sup>24</sup>.

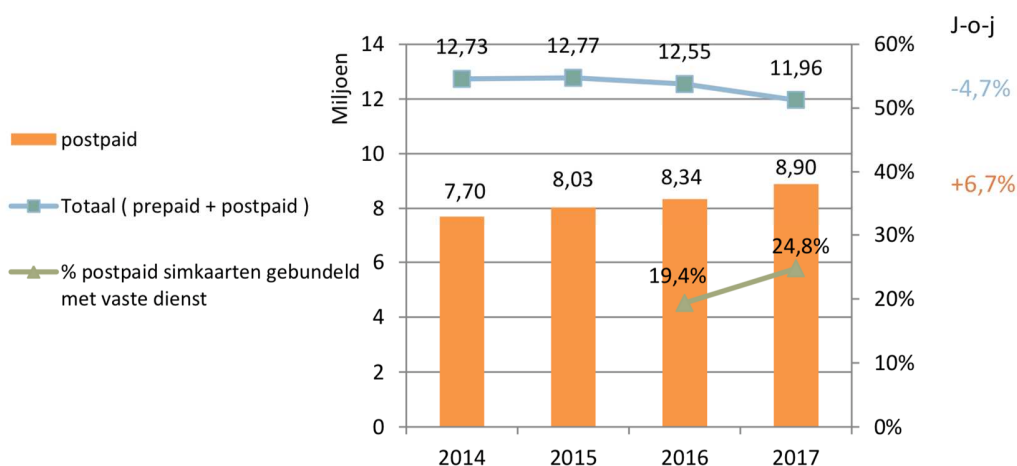


Figure 12 : Composition du marché mobile. Source: Situation du marché des communications électroniques et de la télévision en 2017 [https://www.bipt.be/public/files/fr/22524/2017\\_Statistisch-verslag\\_fr.pdf](https://www.bipt.be/public/files/fr/22524/2017_Statistisch-verslag_fr.pdf), consulté le 25/02/2019.

<sup>23</sup> MVNO : Mobile Virtual Network Operators

<sup>24</sup> Source : Situation du marché des communications électroniques et de la télévision en 2017, IBPT (2018), [https://www.bipt.be/public/files/fr/22524/2017\\_Statistisch-verslag\\_fr.pdf](https://www.bipt.be/public/files/fr/22524/2017_Statistisch-verslag_fr.pdf) consulté le 25/02/2019.,</1058

Le marché des MVNO se contracte en raison de l'acquisition de Base par Telenet en février 2016. Suite à cette acquisition, les clients de Telenet hébergés sur le réseau d'Orange sont progressivement transférés vers le réseau de Base. Cette migration, qui s'est achevée à 90 % fin 2017, conduit à une augmentation de la part de marché des opérateurs de réseaux mobiles (MNO) de 77,3 % à 87,7 % (95 %, light MVNO compris). La part de marché des clients full MVNO chute de 15,3% à 4,8%.

La large bande mobile continue de croître : un peu plus de 79% des cartes SIM actives des opérateurs de réseau mobile (y compris Telenet à partir de 2017) utilisent des données mobiles contre 65% un an plus tôt.

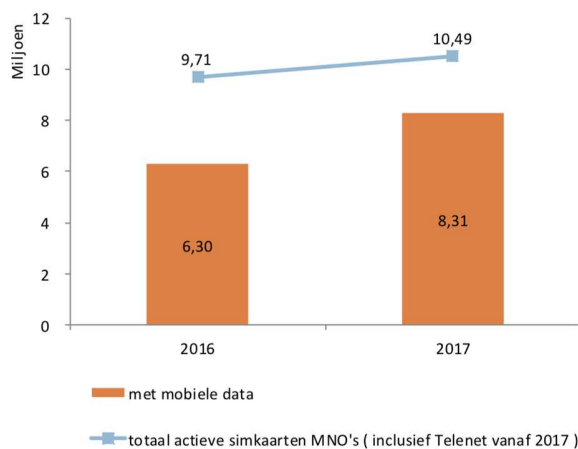


Figure 13 - Utilisation de la large bande mobile. Source: Situation du marché des communications électroniques et de la télévision en 2017 [https://www.bipt.be/public/files/fr/22524/2017\\_Statistisch-verslag\\_fr.pdf](https://www.bipt.be/public/files/fr/22524/2017_Statistisch-verslag_fr.pdf), consulté le 25/02/2019

Si l'on inclut les MVNO Scarlet et Nethy, l'on dénombrait un peu moins de 8,6 millions de cartes SIM large bande fin 2017 : + 14,8 % sur une base annuelle. La plupart des cartes SIM large bande sont utilisées dans des smartphones (93,2%) plutôt que dans des tablettes/PC (6,8%).

La 4G est davantage utilisée. Sur les 8,306 millions de cartes SIM actives proposées sur le réseau propre, 70,4% génèrent du trafic 4G, soit +6,4 points sur une base annuelle.

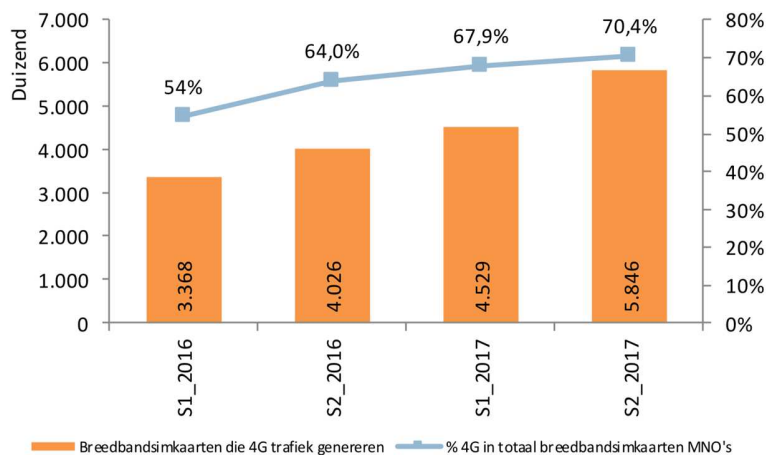


Figure 14 - Utilisation 4G. Source: Situation du marché des communications électroniques et de la télévision en 2017 [https://www.bipt.be/public/files/fr/22524/2017\\_Statistisch-verslag\\_fr.pdf](https://www.bipt.be/public/files/fr/22524/2017_Statistisch-verslag_fr.pdf), consulté le 25/02/2019

Le taux de pénétration de la large bande mobile a fortement augmenté en 2017. Pour 100 Belges, l'on compte 75,6 cartes SIM de données à la fin de 2017 : Soit 9,3 de plus que fin 2016. Sur la période 2015-2017, la croissance semestrielle moyenne est de 6,1%.

Avec une pénétration de 72% à fin juillet 2017, la Belgique occupe la 24e place du classement de l'UE-28. Cette position est restée inchangée par rapport à juillet 2016.

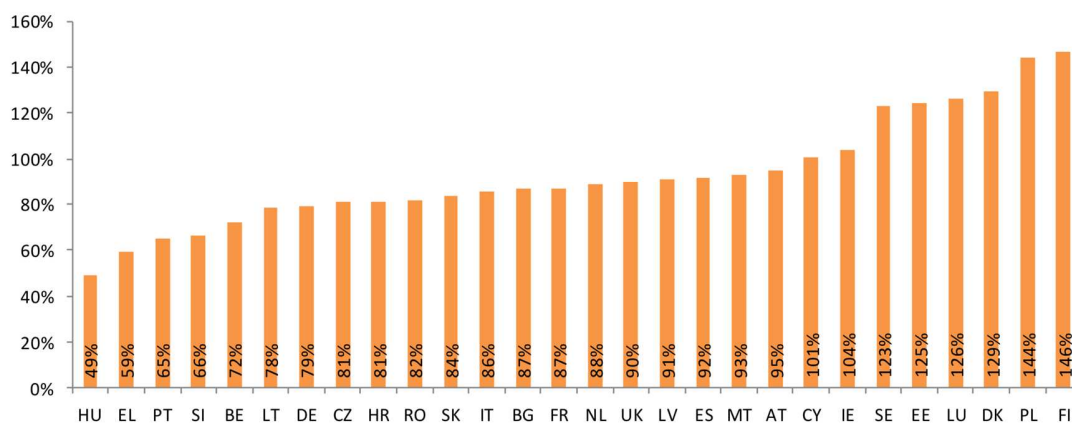


Figure 15 - Pénétration large bande mobile au sein de l'UE-28. Source: Situation du marché des communications électroniques et de la télévision en 2017 [https://www.bipt.be/public/files/fr/22524/2017\\_Statistisch-verslag\\_fr.pdf](https://www.bipt.be/public/files/fr/22524/2017_Statistisch-verslag_fr.pdf), consulté le 25/02/2019

#### 4.2.1.2 Trafic vocal mobile

Le trafic vocal mobile des clients de détail (hors appels vers messagerie vocale, incluant l'itinérance) a augmenté de 397,3 millions de minutes pour un total de 17,36 milliards en 2017. Les appels en itinérance sortant ont enregistré la plus forte croissance : +37,5% pour les appels vers des abonnés à l'étranger et +34,4% pour les appels provenant d'abonnés à l'étranger. En conséquence, la part de l'itinérance sortante dans le volume vocal mobile total grimpe de 3,9 à 5,1%.

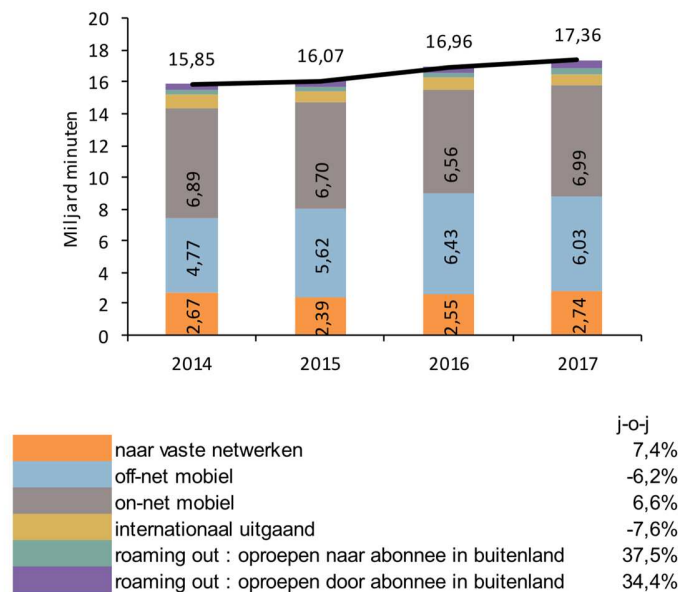


Figure 16 - Nombre de minutes de trafic vocal mobile. Source: Situation du marché des communications électroniques et de la télévision en 2017 [https://www.bipt.be/public/files/fr/22524/2017\\_Statistisch-verslag\\_fr.pdf](https://www.bipt.be/public/files/fr/22524/2017_Statistisch-verslag_fr.pdf), consulté le 25/02/2019

Sous l'impulsion de l'introduction du RLAH (« *Roaming Like At Home* », ou IATN pour Itinérance Aux Trafics Nationaux), le trafic généré par les visiteurs étrangers en itinérance sur les réseaux mobiles belges augmente également : +52 % pour atteindre 925 millions de minutes en 2017.

#### 4.2.1.3 Consommation de données mobiles

La consommation de données mobiles augmente de 63% sur une base annuelle pour un total de 127,8 milliards de mégaoctets, en partie suite à l'augmentation du nombre de cartes SIM 4G et à l'introduction du RLAH : +253%, indiquant une élasticité significative de ce service.



L'augmentation du volume de données inclus pour les abonnés d'offres groupées constitue également un incitant. Depuis le 23 juin 2017, les offres groupées Wigo de Telenet incluent une quantité améliorée de données mobiles pouvant être partagées entre les membres de la famille. Depuis le 1er août 2017, les clients du pack Tuttimus chez Proximus bénéficient d'un plus gros volume de données inclus pouvant aller jusqu'au double. Enfin, à partir du 14 septembre 2017, Orange a accordé tous les mois 100% d'internet mobile supplémentaire pour lequel il ne faut rien payer à tous les abonnements postpaid faisant partie de son offre convergente LOVE.

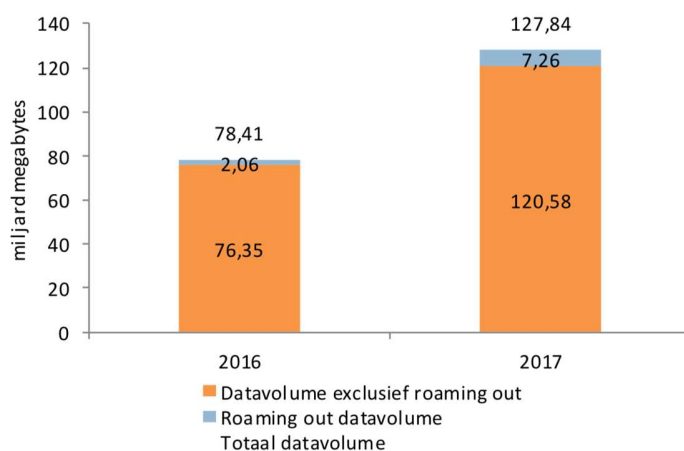


Figure 17 - Consommation de données mobiles. Source: Situation du marché des communications électroniques et de la télévision en 2017 [https://www.bipt.be/public/files/fr/22524/2017\\_Statistisch-verslag\\_fr.pdf](https://www.bipt.be/public/files/fr/22524/2017_Statistisch-verslag_fr.pdf), consulté le 25/02/2019

La consommation moyenne de données mobiles par mois et par carte SIM de données active dépasse la limite de 1 gigaoctet (1,17 gigaoctet/mois). En comparaison avec d'autres pays de l'OCDE, les Belges consomment peu de données. La consommation de données mensuelle moyenne en 2016 se situe, avec 0,8 gigaoctet par mois, bien en deçà de la moyenne de l'OCDE de 2,3 gigaoctets. Cela peut s'expliquer en grande partie par le fait que des réseaux WiFi sont disponibles presque partout dans notre pays.

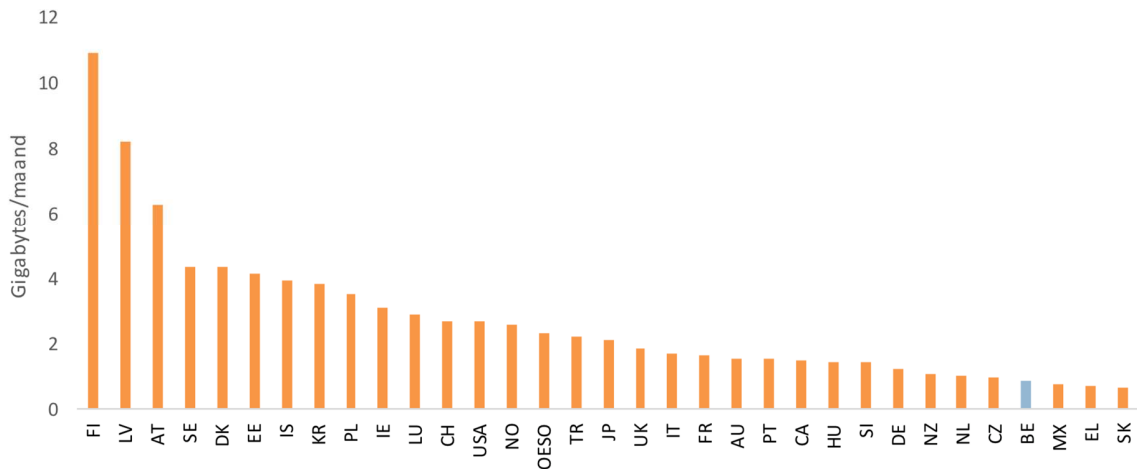


Figure 18 - Comparaison de la consommation de données mobiles dans les pays de l'OCDE. Source: Situation du marché des communications électroniques et de la télévision en 2017 [https://www.bipt.be/public/files/fr/22524/2017\\_Statistisch-verslag\\_fr.pdf](https://www.bipt.be/public/files/fr/22524/2017_Statistisch-verslag_fr.pdf), consulté le 25/02/2019

Une répartition par technologie permet de constater que le trafic 3G et le trafic 4G ont enregistré une hausse de, respectivement, 7,4 % et 122,2 %. Cependant, comme de plus en plus de trafic est acheminé via le réseau 4G, l'importance de la 3G diminue. Cela se traduit par une diminution de la part de la 3G dans le trafic mobile total, de 33,1% à 19,3%.

En termes de volume de données mensuel moyen, seule la 4G (+53%) enregistre une croissance. Le volume de données mensuel moyen par carte SIM de données 3G diminue légèrement, de 1%, et reste sous le seuil de 1 gigaoctet par mois.

#### 4.2.1.4 Chiffre d'affaires des opérateurs télécoms

Pour la deuxième année consécutive, le chiffre d'affaires total des opérateurs de réseau mobile est en baisse : -1,5 % pour atteindre 3 588 milliards d'euros. Le chiffre d'affaires a été influencé négativement par la baisse absolue du chiffre d'affaires de gros généré par les SMS (-55 millions d'euros) et l'itinérance de détail (-33 millions d'euros). Le chiffre d'affaires de gros généré par la voix a également régressé (-17 millions d'euros) suite à la baisse du tarif de gros régulé pour la terminaison d'appel sur des numéros mobiles de 1,18 eurocentime/minute à 0,99 eurocentime/minute. La baisse globale peut être limitée par la croissance du chiffre d'affaires de gros généré par l'itinérance des visiteurs (+33 millions), des équipements (+18 millions), des services de détail (+7 millions d'euros) et des M2M (+2 millions d'euros).

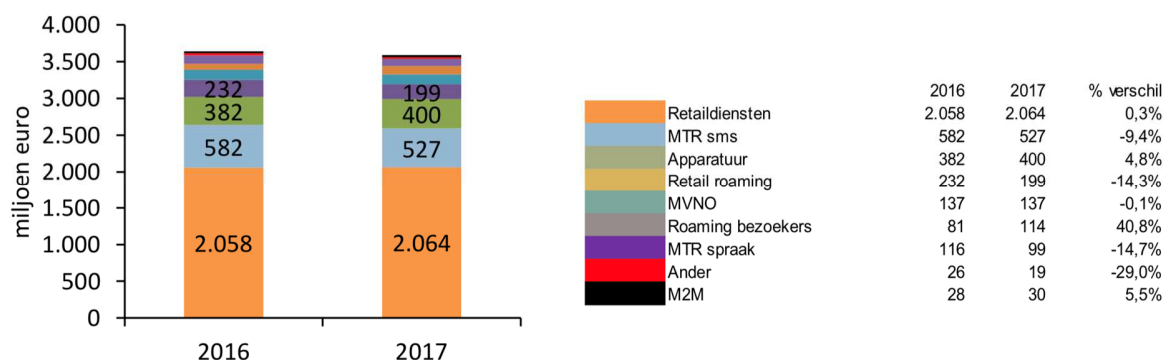


Figure 19 - Composition du chiffre d'affaires des opérateurs télécoms. Source: Situation du marché des communications électroniques et de la télévision en 2017 [https://www.bipt.be/public/files/fr/22524/2017\\_Statistisch-verslag\\_fr.pdf](https://www.bipt.be/public/files/fr/22524/2017_Statistisch-verslag_fr.pdf), consulté le 25/02/2019

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

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

Le secteur des Technologies de l'Information et de la Communication (TIC) en Belgique est principalement un secteur de services, puisque 94% des entreprises actives dans ce secteur le sont dans le secteur des services. Les entreprises développant des activités commerciales représentent 4,6 % du secteur, tandis que les industries de transformation et de traitement ne représentent que 1,3 % de l'ensemble des entreprises. Dans les secteurs des services, c'est la branche Programmation, conseil et autres activités informatiques (62) qui joue le rôle le plus important, avec plus de 72 % des effectifs en 2016. *Les entreprises de télécommunications (61) constituent le deuxième contingent le plus important du secteur.* En termes de dynamique, le nombre d'entreprises du secteur a augmenté de 7,5 % au cours de la période d'observation (2012-2016), principalement en raison de la croissance du nombre d'entreprises du secteur 62 (voir ci-avant). Les secteurs où les réductions d'effectifs ont été les plus importantes sont la branche 26,8 (fabrication de supports optiques et magnétiques) (-3,3%), mais avec un très petit nombre d'entreprises actives dans cette branche et la branche 61 (voir ci-avant) (-36,6%).

D'une manière générale, sur la base de l'indice de l'économie numérique et de la société (DESI)<sup>25</sup>, la Belgique occupe la 8e place dans le classement DESI 2018, avec un score total de 0,61. Bien que notre score se soit amélioré par rapport à 2016 (0,59), notre pays a perdu deux places dans le classement au profit du Royaume-Uni et de l'Irlande. Toutefois, la Belgique fait partie du groupe de tête (avec le Danemark, la Suède, la Finlande, les Pays-Bas, le Luxembourg, l'Irlande et le Royaume-Uni). Le point fort de la Belgique est son excellente connectivité avec une couverture et des taux d'utilisation de la large bande très élevés. *Dans ce domaine, toutefois, la Belgique doit continuer à encourager l'utilisation de la large bande mobile.* Une autre force de la Belgique réside dans l'intégration réussie des technologies numériques dans les entreprises. Les compétences numériques des Belges sont bonnes, mais ne s'améliorent pas. Notre pays compte un faible pourcentage de diplômés en sciences exactes, technologie, ingénierie et mathématiques (STEM). La Belgique obtient des<sup>26</sup> résultats moyens en termes de disponibilité et d'utilisation des services publics numériques.

La Belgique occupe le 5e rang en matière de connectivité. La Belgique a perdu une place par rapport au classement de 2017. Les points forts de la Belgique sont la couverture NGA en internet haut débit rapide (deuxième place) et son taux d'utilisation (deuxième place), la couverture internet haut débit ultrarapide (troisième place) et son taux d'utilisation (troisième place). *Deux faiblesses doivent être mentionnées ici : l'utilisation de l'internet mobile à large bande, pour laquelle nous nous classons modestement au 24e rang dans l'UE-28. Bien que nos performances s'améliorent régulièrement depuis un certain nombre d'années, nous n'avons pas réussi à rattraper notre retard par rapport aux autres pays de l'UE.* L'indice des prix du haut débit est notre deuxième préoccupation, car nous nous classons au 19e rang dans l'UE-28. Sur ce dernier point, notre performance est probablement influencée par le fait que les opérateurs belges n'offrent pas d'abonnements internet à des débits inférieurs à 30 Mbps, ce qui surévalue le prix moyen du haut débit dans notre pays par rapport aux pays où ce type d'abonnement existe.

Par ailleurs, en 2017, la part du chiffre d'affaires réalisée par les entreprises belges dans le commerce électronique a dépassé le seuil de 30% et atteint 31,4% (contre 25,4% en 2015 et 28,6% en 2016). 60% du chiffre d'affaires issu du commerce électronique est généré par des transactions de type EDI<sup>27</sup>, tandis que 40% est généré par les ventes via un site web traditionnel. Avec une part de 31,4%, les entreprises belges

---

<sup>25</sup> L'indice relatif à l'économie et à la société numériques ou « Digital Economy and Society Index », ci-après dénommé « DESI », est un indice composite développé par la Commission européenne DG CNECT pour évaluer l'évolution des pays de l'Union européenne vers une économie et une société numériques. L'indice comprend 34 indicateurs pertinents, articulés autour de cinq composantes : connectivité, capital humain, utilisation d'internet, intégration de la technologie numérique et services publics numériques. Le score global du DESI est calculé en tant que moyenne pondérée des indices standardisés de chacune de ses cinq composantes : connectivité (25%), capital humain (25%), utilisation d'internet (15%), intégration des technologies numériques (20%) et services publics numériques (15%).

<sup>26</sup> Source : Baromètre de la société de l'information 2018, SPF Économie, PME, Classes moyennes et Énergie, [consulté le 27/2/2019](#).

<sup>27</sup> EDI : Electronic Data Interchange - échange de données informatisées pour remplacer l'échange de données sur papier.

obtiennent de bien meilleurs résultats que les entreprises européennes (18,3%) et que celles des pays voisins où la part varie entre 13,8% (Luxembourg) et 20,7% (Allemagne).

En outre, 99,6 % des entreprises ont accès à l'internet. Les petites entreprises se rapprochent de plus en plus : seulement 0,4 % n'y auront pas accès en 2017, contre 3 % trois ans plus tôt. 97,9% des entreprises basées en Belgique disposent d'une connexion internet haut débit (fixe ou mobile). Ce pourcentage est de près de 100 % dans les grandes entreprises (99,8 %), tandis que 2,4 % des petites entreprises n'ont pas de connexion à large bande. Environ trois quarts des entreprises belges (73%) utilisent une connexion haut débit mobile, ce qui est supérieur à la moyenne européenne (69%). L'utilisation de ce type de connexion est particulièrement élevée parmi les grandes entreprises (95%) et les moyennes entreprises (86%). Parmi les petites entreprises, 70 % utilisent la large bande (contre 64 % en 2015 et 71 % en 2016). 40% des entreprises belges achètent des services de *cloud computing*, ce qui représente une hausse de 11,1 points de pourcentage sur une période d'un an.

L'utilisation de ce type de service varie considérablement selon la taille de l'entreprise : environ trois grandes entreprises sur quatre (76 %) achètent des services de *cloud computing* payants, contre environ une entreprise moyenne sur deux (49 %) et un peu moins de quatre petites entreprises sur dix (37 %).

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

Le Service Public Fédéral (SPF) Économie utilise les codes NACEBEL suivants pour déterminer l'importance du secteur des TIC en Belgique. Il est frappant de constater que, selon les données<sup>28</sup> disponibles chez Statbel, les entreprises du segment 26.8 (voir tableau 1) affichent une tendance à la baisse de l'emploi, car elles mènent souvent des activités de recherche et développement de pointe via des supports optiques et magnétiques.

---

<sup>28</sup> Statbel : <https://bestat.statbel.fgov.be/bestat/crosstable.xhtml?datasource=095cb5e3-a398-4372-8f30-3f9d96b3abd7> , consulté le 27-02-18.

Tableau 2 - Codes Nacebel Secteur TIC Belgique. Source : Barometer van de informatiemaatschappij 2018, FOD Economie, K.M.O., Middenstand en Energie, <https://economie.fgov.be/nl/publicaties/barometer-van-de-4>, geraadpleegd op 27/2/2019.

## ICT-sector

### Definitie van de ICT-sector (a)

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)

Si l'on examine la démographie des entreprises (la composition et l'évolution de la cohorte de sociétés actives) qui font partie des segments susmentionnés, on constate que le nombre d'entreprises reste relativement stable, mais affiche une croissance de 7,5 %.

Tableau 3 - Démographie des sociétés actives dans les TIC en Belgique

### Demografie van ondernemingen

Tabel 2.26. Evolutie van het aantal ondernemingen in de ICT-sector

NACE	2012	2013	2014	2015	2016
26.1	149	148	156	162	133
26.2	185	191	178	177	175
26.3	105	100	94	95	86
26.4	89	84	85	86	86
26.8	15	9	7	6	7
46.5	1.777	1.764	1.748	1.746	1.741
58.2	563	553	558	573	596
61	5.849	6.232	4.830	3.979	3.769
62	22.783	23.495	24.220	25.478	27.106
63.1	2.497	2.599	2.681	2.821	2.958
95.1	938	931	934	933	910
<b>TOTAAL</b>	<b>34.950</b>	<b>36.106</b>	<b>35.491</b>	<b>36.056</b>	<b>37.567</b>

Bron: Btw-aangiften, FOD Economie - AD Statistiek - Statistics Belgium.

Le chiffre d'affaires du secteur des TIC s'élevait à 32,8 milliards d'euros en 2016. Entre 2013 et 2016, ce chiffre d'affaires a connu une croissance de 20,2%. Les deux branches d'activité qui génèrent la majorité de ce chiffre d'affaires sont la branche 61 (36,4%) et la branche 62 (34,7%). Il est intéressant de noter que le secteur « Télécommunications » génère un chiffre d'affaires supérieur à celui de la branche « Programmation, conseil et autres activités informatiques », qui compte presque 8 fois plus d'entreprises. Cela s'explique par la présence de nombreuses grandes entreprises au sein de la branche 61, en particulier les principaux opérateurs de télécommunications en Belgique. L'évolution du chiffre d'affaires est positive pour toutes les branches à l'exception des branches 26.4 et 95.1.

Tableau 4 - Chiffre d'affaires des entreprises actives dans le secteur belge des TIC. Source : Barometer van de informatiemaatschappij 2018, FOD Economie, K.M.O., Middenstand en Energie, <https://economie.fgov.be/nl/publicaties/barometer-van-de-4, geraadpleegd op 27/2/2019>.

## Omzet

Tabel 2.27. Evolutie van de omzet van de ICT-sector (in duizend euro)

	2013	2014	2015	2016
26.1	1.533.149	1.391.158	1.562.371	1.737.689
26.2	83.369	79.797	83.193	92.577
26.3	348.850	617.160	579.939	609.562
26.4	143.200	135.389	157.556	123.285
26.8				
46.5	3.083.602	3.437.817	3.689.292	4.221.687
58.2	81.363	99.505	104.372	116.933
61	11.455.926	11.621.355	11.935.497	11.946.863
62	8.061.457	8.840.786	10.203.702	11.368.960
63.1	2.421.457	2.406.985	2.476.190	2.515.880
95.1	72.084	64.496	83.973	53.003
<b>TOTAAL</b>	<b>27.284.457</b>	<b>28.694.447</b>	<b>30.876.085</b>	<b>32.786.438</b>

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

Il est en outre à noter que, selon les chiffres fournis par Ericsson & Arthur D. Little, le chiffre d'affaires des acteurs des TIC actifs en Belgique se compose en grande partie du chiffre d'affaires généré par les services de soutien et/ou les affaires avec les fournisseurs d'énergie, les services publics, le secteur manufacturier et l'ordre public. Il est frappant de constater que l'industrie automobile, les médias et les transports publics représentent une part plus faible du chiffre d'affaires.

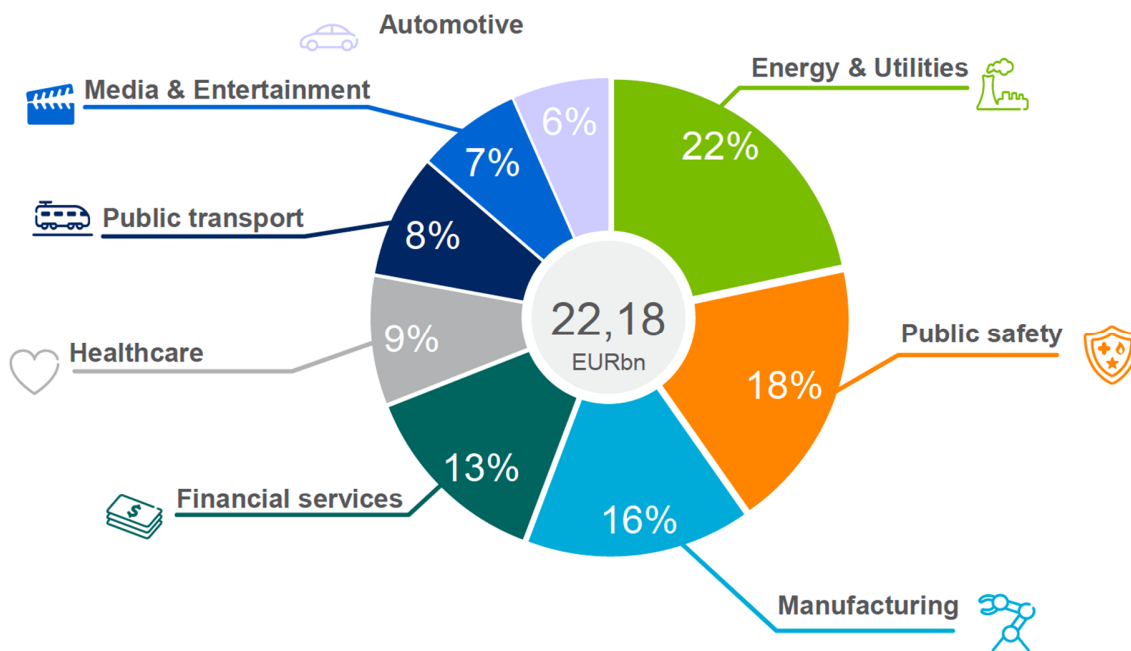


Figure 20 - Composition du chiffre d'affaires des entreprises TIC en Belgique<sup>29</sup>

La valeur ajoutée nette dans le secteur des TIC s'élève à plus de 14,5 milliards d'euros en 2016, soit une augmentation de 14% par rapport à 2013. En termes de chiffre d'affaires, les branches 61 et 62 représentent plus des ¾ de la valeur ajoutée totale dans le secteur des TIC. Les secteurs avec la plus forte croissance en valeur ajoutée sont respectivement la branche 26.2 (+49,9%), la branche 46.5 (+38,8%), la branche 58.2 (+33,6%) et la branche 62 (+24,1%). En revanche, l'évolution des branches 26.8 et 95.1, qui apportent une contribution marginale à la valeur ajoutée du secteur dans son ensemble, a fléchi au cours de la période.

<sup>29</sup> The 5G Business Potential, Industry digitalization and the untapped opportunities for operators – Executive summary, 2017, Ericsson NV.



Tableau 5 - Valeur ajoutée réalisée par les entreprises actives dans le secteur belge des TIC.

## Toegevoegde waarde

Tabel 2.28. Netto toegevoegde waarde in de ICT-sector (in duizend euro)

	2013	2014	2015	2016
26.1	675.790	541.650	677.487	691.898
26.2	34.795	39.956	43.646	52.169
26.3	375.505	417.547	400.742	435.012
26.4	55.574	51.473	52.449	56.872
26.8	2.042	2.303	1.771	1.852
46.5	408.500	447.019	426.847	566.881
58.2	76.249	83.653	98.857	101.895
61	5.296.247	5.419.285	5.485.912	5.612.078
62	4.508.852	4.474.054	4.847.055	5.597.790
63.1	1.267.670	1.260.371	1.320.699	1.376.218
95.1	46.654	42.569	42.569	36.732
<b>TOTAAL</b>	<b>12.747.878</b>	<b>12.779.882</b>	<b>13.398.034</b>	<b>14.529.398</b>

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

Tableau 6 - Investissements des entreprises du secteur des TIC en 2017

Groupe	1er trimestre 2017	2e trimestre 2017	3e trimestre 2017	4e trimestre 2017
26.1	3.739.000,00 €	6.427.000,00 €	4.034.000,00 €	7.542.000,00 €
26.2	1.832.000,00 €	€ -	984.000,00 €	€ -
26.3	1.238.000,00 €	2.052.000,00 €	1.529.000,00 €	1.736.000,00 €
26.4	3.642.000,00 €	3.557.000,00 €	1.167.000,00 €	1.459.000,00 €
26.8	16.648.000,00 €	21.262.000,00 €	16.099.000,00 €	37.323.000,00 €
46.5	14.929.000,00 €	10.688.000,00 €	8.783.000,00 €	24.246.000,00 €
58.2	1.862.000,00 €	2.118.000,00 €	2.064.000,00 €	7.567.000,00 €
61	283.491.000,00 €	272.284.000,00 €	221.987.000,00 €	373.873.000,00 €
62	110.951.000,00 €	99.212.000,00 €	95.293.000,00 €	125.486.000,00 €
63.1	57.276.000,00 €	€ -	61.662.000,00 €	97.514.000,00 €
95.1	967.000,00 €	823.000,00 €	€ -	859.000,00 €
<b>Total par trimestre</b>	<b>496.575.000,00 €</b>	<b>418.423.000,00 €</b>	<b>413.602.000,00 €</b>	<b>677.605.000,00 €</b>

Le volume total des investissements pour 2017 dans le secteur belge des TIC s'élevait à environ 2 milliards d'euros. Jusqu'en 2018, les chiffres montrent en outre que le volume des investissements a suivi le même rythme jusqu'au troisième trimestre de 2018. Dans les sections suivantes, nous examinerons si l'incertitude concernant la mise aux enchères des licences pour la technologie 5G et l'introduction d'un quatrième acteur sur le marché des télécommunications peuvent jouer un rôle à cet égard.

Le nombre de postes de travail dans le secteur belge des TIC s'élevait à 102.142 unités en 2017, soit une augmentation de 3,8% par rapport à 2016. Sur l'ensemble de la période d'observation, le nombre de postes de travail a augmenté de 9,5 %. Les secteurs qui ont le plus contribué à cette croissance sont les branches 63,1<sup>30</sup> (traitement de données et hébergement web) (+ 32,6%) et 62 (conception de programmes informatiques) (+ 24,8%). Il est intéressant de noter la réduction constante du nombre de postes de travail dans la branche « Télécom », qui reflète la consolidation de cette branche depuis plusieurs années. Près de ¼ des postes de travail du secteur des TIC en 2017 proviennent des secteurs d'activité 61 et 62. Les secteurs industriels ne génèrent que 7,3 % des postes de travail.

#### 4.2.2.3 *Situation économique du secteur télécom en Région de Bruxelles-Capitale*

Les graphiques ci-dessous donnent un aperçu de la situation économique de l'ensemble du secteur des TIC en Région de Bruxelles-Capitale (RBC). Le premier graphique montre que le secteur des TIC dans son ensemble (tel que conceptualisé par Statbel [voir ci-dessus]) est en baisse en termes de chiffre d'affaires. En moyenne sur la période présentée (2015-2017), le chiffre d'affaires a baissé de 1,556 %.

En ce qui concerne spécifiquement le secteur des télécommunications en RBC, les chiffres montrent que le chiffre d'affaires associé fluctue autour de 8 milliards d'euros par an et qu'ici aussi une baisse est perceptible sur la période indiquée. Le chiffre d'affaires total relativement élevé de ce segment dans le secteur des TIC est dû au fait que beaucoup des grands opérateurs actifs en Belgique sont établis en RBC. Cela a également pour effet que le secteur des télécommunications au sein de l'ensemble de l'industrie des TIC en RBC représente environ 65 % du chiffre d'affaires réalisé, avec ici aussi une légère baisse en 2017 (62 % du chiffre d'affaires).

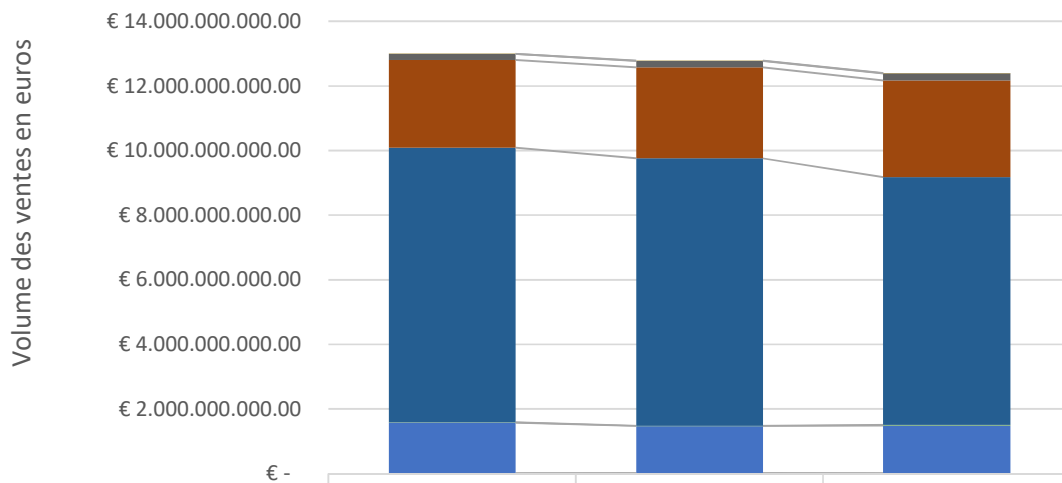
Outre le secteur des télécommunications, il est intéressant de constater que le segment Programmation informatique, conseil et activités connexes semble augmenter en termes de chiffre d'affaires réalisé. Dans le secteur plus large des TIC, ce segment représente la réalisation d'environ 21 à 24 % du chiffre d'affaires généré dans la région.

Le segment Commerce de gros d'équipements d'information et de communication reste relativement stable sur la période observée et représente à son tour environ 12% du chiffre d'affaires réalisé dans le secteur des TIC à Bruxelles.

---

<sup>30</sup> Les codes des branches peuvent être retrouvés dans le tableau 1

## Évolution du chiffre d'affaires du secteur des TIC en RBC



	2015	2016	2017
■ 95.1 Réparation d'ordinateurs et d'équipements de communication	€ 7.359.000.00	€ 5.950.000.00	€ 8.393.000.00
■ 63.1 Traitement de données, hébergement et activités connexes; portails Internet	€ 176.655.000.00	€ 206.717.000.00	€ 216.211.000.00
■ 62 Programmation informatique, consultance et activités annexes	€ 2.721.497.000.00	€ 2.816.446.000.00	€ 2.993.460.000.00
■ 61 Télécommunication	€ 8.499.504.000.00	€ 8.274.602.000.00	€ 7.672.164.000.00
■ 58.2 Édition de logiciels	€ 7.220.000.00	€ 7.730.000.00	€ 12.556.000.00
■ 46.5 Commerce de gros d'équipements de l'information et de la communication	€ 1.572.671.000.00	€ 1.466.340.000.00	€ 1.490.543.000.00
■ 26.4 Fabrication de produits électroniques grand public	€ 1.817.000.00	€ 2.131.000.00	€ 1.636.000.00
■ 26.3 Fabrication d'équipements de communication	€ -	€ -	€ -
■ 26.2 Fabrication d'ordinateurs et d'équipements périphériques	€ 7.432.000.00	€ 5.686.000.00	€ 3.015.000.00
■ 26.1 Fabrication de composants et cartes électroniques	€ -	€ 2.229.000.00	€ -

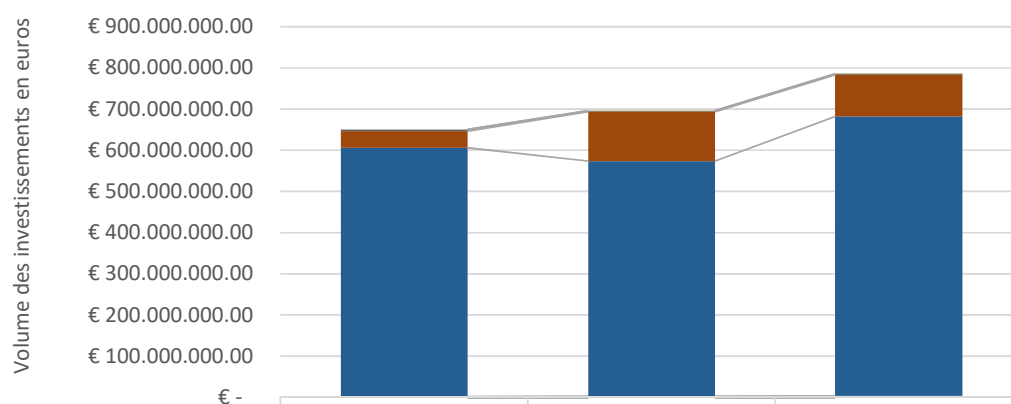
Figure 21 - Évolution du chiffre d'affaires du secteur des TIC en RBC

En ce qui concerne les investissements réalisés, sur la base des informations disponibles, il est à remarquer que dans le secteur des TIC en RBC, le volume total des investissements fluctue. Pour 2015, le volume total des investissements est de l'ordre de 650 millions d'euros, alors qu'en 2017, il avoisinait les 785 millions d'euros. On observe donc une tendance à la hausse sensible du total des investissements réalisés par les entreprises en RCB qui font partie de ce secteur.

En outre, on constate que les entreprises qui constituent ensemble le segment Programmation informatique, conseil et activités connexes affichent un degré croissant d'investissement au cours de la période observée. Le TCAC sur la période en termes d'investissements est de 6,5%.

Il est également à noter que la part du segment des télécommunications est à nouveau très importante. La part des acteurs des télécommunications dans le volume total des investissements réalisés en RBC dans ce secteur est d'environ 90%. Toutefois, on observe ici une tendance à la baisse, ce qui indique une diminution progressive des investissements. Ce dernier point peut toutefois s'expliquer par le fait qu'avec l'éventuelle introduction prochaine de la 5G et le degré de maturité des réseaux 3G et 4G, les investissements supplémentaires destinés à étendre le réseau 4G et à maintenir les réseaux 3G et 4G sont systématiquement en baisse. En outre, il n'est pas inconcevable que les investissements supplémentaires de ces acteurs soient actuellement reportés après la décision finale sur les licences 5G et l'introduction ou non d'un 4<sup>ème</sup> opérateur télécom sur le marché belge.

## Évolution des investissements dans le secteur des TIC en RBC



	Totaal 2015	Totaal 2016	Totaal 2017
■ 95.1 Réparation d'ordinateurs et d'équipements de communication	€ -	€ 43.000.00	€ 23.000.00
■ 63.1 Traitement de données, hébergement et activités connexes; portails Internet	€ 3.830.000.00	€ 1.693.000.00	€ 1.738.000.00
■ 62 Programmation informatique, consultance et activités annexes	€ 40.004.000.00	€ 120.319.000.00	€ 101.479.000.00
■ 61 Télécommunication	€ 604.924.000.00	€ 571.332.000.00	€ 678.756.000.00
■ 58.2 Édition de logiciels	€ -	€ 61.000.00	€ -
■ 46.5 Commerce de gros d'équipements de l'information et de la communication	€ 1.362.000.00	€ 2.388.000.00	€ 3.247.000.00
■ 26.4 Fabrication de produits électroniques grand public	€ -	€ -	€ -
■ 26.3 Fabrication d'équipements de communication	€ -	€ -	€ -
■ 26.2 Fabrication d'ordinateurs et d'équipements périphériques	€ -	€ 14.000.00	€ -
■ 26.1 Fabrication de composants et cartes électroniques	€ -	€ -	€ 7.000.00

Figure 22 - Évolution des investissements dans le secteur des TIC en RBC

## 4.2.3 Politiques de soutien à l'économie numérique

### 4.2.3.1 Politique fédérale

En ce qui concerne l'économie numérique, le gouvernement fédéral a mis en place un cadre fiscal et social transparent pour l'économie collaborative. Depuis début 2017, les revenus générés via une plate-forme électronique dans le cadre de prestations occasionnelles entre particuliers bénéficient d'un taux d'imposition préférentiel de 10% si ces revenus ne dépassent pas 5.100 euros par an. Un système de « *taxshelter* » a été instauré pour les startups. Les personnes physiques qui investissent dans une startup (\*) bénéficient d'un avantage fiscal de 45% ou 30% selon qu'il s'agit d'une mini-entreprise ou d'une petite entreprise. L'investissement est limité à 100.000 euros sur une base annuelle (et ne dépasse pas un maximum de 250.000 euros). Dans le domaine de la santé en ligne (« *eHealth* »), la Confédération a lancé un programme de 3 millions d'euros pour promouvoir le développement d'applications mobiles *eHealth*. Le ministre de l'Agenda numérique a développé (à travers des sessions d'information et des ateliers) une campagne intitulée « Tournée digitale » pour sensibiliser les PME aux opportunités offertes par la technologie numérique et le commerce électronique. La déduction fiscale pour innovation a été étendue aux revenus provenant des logiciels protégés par le droit d'auteur. Cette mesure vise à encourager les entreprises à développer des logiciels innovants en Belgique<sup>31</sup>.

### 4.2.3.2 Digital Belgium

Le plan « *Digital Belgium* » vise à placer la Belgique à l'avant-garde du déploiement des réseaux internet ultrarapides. À l'horizon 2020, au moins la moitié des connexions internet devraient avoir un débit de 1 Gbps. En concertation avec les communes concernées, les autorités régionales et les opérateurs, un plan d'action « zones blanches » est en cours d'élaboration.

L'objectif est de fournir aux ménages qui ne sont actuellement pas couverts un accès à une connexion internet d'au moins 30 Mbps.

Les mesures envisagées incluent notamment :

- Mesures visant à réduire les coûts du déploiement de l'internet à large bande dans le cadre de la mise en œuvre de la directive 2014/61/UE ;
- Mesures visant à promouvoir l'investissement dans les zones où il n'y a pas encore d'infrastructure ;
- Miser sur une combinaison de différentes technologies d'accès, y compris le satellite ;
- Exigences plus strictes pour la couverture mobile.

---

<sup>31</sup> Source : Baromètre de la société de l'information 2018, SPF Économie, PME, Classes moyennes et Énergie, – consulté le 27-02-19.

En ce qui concerne la stimulation des investissements, l'IBPT a proposé un allègement de la régulation des marchés de la large bande afin de permettre aux opérateurs ne disposant pas encore d'un réseau à 30 Mbps dans les zones blanches de pouvoir déployer ou moderniser leur réseau avec la garantie de ne pas devoir ouvrir celui-ci à leurs concurrents.

En ce qui concerne la dynamique concurrentielle sur le marché des télécommunications, le système *Easy Switch* est opérationnel depuis le 1er juillet 2017. Ce système simplifie et accélère le processus de changement d'opérateur. Comme sur le marché de la téléphonie mobile, le nouvel opérateur est responsable des aspects techniques et administratifs du changement, sans le moindre risque d'interruption de service et de double facturation. En outre, la réglementation limite la plage de passage du technicien de l'opérateur en vue de l'installation des dispositifs techniques à une demi-journée maximum. L'absence de passage de celui-ci dans la plage fixée donne droit à une indemnisation.

#### 4.2.3.3 Ressources humaines numériques

Dans un monde où les technologies jouent un rôle sans cesse croissant, la maîtrise des compétences numériques revêt une importance cruciale. Un fonds fédéral a été créé en avril 2017. Ce fonds débloquera 18 millions d'euros au cours des trois prochaines années. Le « *Digital Belgium Skills Fund* » finance des projets misant sur le développement des compétences numériques chez les enfants, les jeunes et les jeunes adultes socialement vulnérables. La confiance est un élément clé du développement de l'économie numérique. Le plan prévoit d'œuvrer à cette confiance à travers trois types d'actions. Un plan d'urgence est en cours d'élaboration pour le secteur des télécommunications afin d'assurer la continuité des services et réseaux publics de communications électroniques en cas de crise. Ce plan sera prêt courant 2018. En mai 2017, le gouvernement fédéral a pris six mesures importantes pour renforcer la cybersécurité en Belgique.

1. A l'avenir, les services du *Computer Emergency Respons Team* (CERT.be) seront équipés d'un centre d'appels qui sera ouvert jour et nuit. Toute entreprise peut y faire appel en cas d'attaque informatique.
2. Un système alerte et informe les secteurs " vitaux " (énergie, finances, transports) des menaces visant les infrastructures critiques.
3. Le *Centre for Cyber Security Belgium* (CCB) mène également des campagnes d'information et de sensibilisation auprès des PME, qui sont la cible de 45% des cyberattaques.
4. Les services fédéraux disposeront également d'un nouvel outil d'analyse des cyber-risques, qui sera étendu au secteur privé dans une deuxième phase. Cet instrument est en cours de développement avec l'aide du Luxembourg, qui en dispose déjà.
5. Un Information Security Operations Center est mis en place au sein du gouvernement fédéral, qui se concentre sur la protection des infrastructures critiques du gouvernement (détection et gestion des incidents, coordination des interventions).
6. Enfin, la Belgique transposera en 2018 la directive européenne sur la sécurité des réseaux et des systèmes d'information (SRI), qui prévoit une meilleure coopération internationale et une obligation de notification des incidents.



À l'horizon 2020, les citoyens et les entreprises doivent être en mesure de traiter leurs contacts avec le gouvernement par voie électronique au moyen d'applications conviviales. Un portail unique, convivial et de qualité permettra aux citoyens d'utiliser tous les services publics fédéraux. Les autorités fédérales reconnaissent désormais l'application « *itsme* » comme méthode d'authentification fiable pour l'utilisation des services publics électroniques fédéraux.

## 4.2.4 Importance des réseaux pour l'économie numérique et introduction de nouvelles technologies à Bruxelles

Dans le cadre de ses conseils au Département de l'Environnement de Bruxelles, différentes parties prenantes du secteur des télécommunications ont été interrogées sur l'impact micro-économique de la 5G à Bruxelles. Ceci, dans le but de collecter des données clés sur l'impact actuel et futur de la 5G sur l'industrie TELCO en Belgique et plus particulièrement à Bruxelles. L'information ci-dessous est tirée de cinq entretiens : deux avec des représentants des opérateurs de télécommunications actifs à Bruxelles, deux avec des représentants des fournisseurs d'infrastructures de télécommunications actifs à Bruxelles, une avec un représentant de la fédération des entreprises de haute technologie.

### 4.2.4.1 *Perspective de mise en œuvre 5G à Bruxelles : Opérateurs*

#### 4.2.4.1.1 Investissements

1) Prévoyez-vous dans votre modèle d'entreprise, pour justifier un nouvel investissement dans la technologie 5G, en tant qu'opérateur, une contribution directe et indirecte croissante au développement économique de la Région bruxelloise grâce à cet investissement ?

- Pouvez-vous expliquer en quoi consisterait un tel investissement ?

À la base, l'investissement dans la technologie 5G sera nécessaire pour fournir une capacité supplémentaire. Le spectre disponible s'avérera insuffisant au vu de l'augmentation soutenue du trafic de données mobiles. Compte tenu de la croissance exponentielle de la demande en trafic de données mobiles, un supplément de capacité permettra d'éviter d'éventuels encombrements.

De plus, la mise en œuvre de la technologie 5G signifie également le déploiement d'une nouvelle architecture. Elle prévoit de nouveaux processus et peut donc contribuer au développement de nouveaux services. Tant en termes de traitement et de routage que de stockage des données, la 5G permettra d'agir beaucoup plus au niveau de l'utilisateur local, ce qui permettra d'optimiser le spectre et les ressources en fonction des besoins et/ou des souhaits spécifiques des utilisateurs.

L'approbation de cette croissance n'entraîne actuellement aucune augmentation du nombre d'antennes installées en Belgique, en partie à cause de la nouvelle technologie « MIMO massif », qui rend inutile l'installation d'antennes supplémentaires, et en partie parce que les opérateurs ne souhaitent pas augmenter immédiatement la densité du réseau.

En termes d'investissements dans la technologie 5G, il suffit, selon les opérateurs, d'améliorer les sites existants et d'ajouter de nouvelles technologies si nécessaire. Ce qui est possible, cependant, c'est que les sites existants soient réaménagés afin d'obtenir une meilleure couverture et de meilleures performances. De plus, des investissements supplémentaires dans de petites cellules sont également possibles, ceci afin d'optimiser le réseau. Cependant, ces investissements ne sont pas considérés comme étant de grande portée par les opérateurs.

Il existe actuellement plusieurs chiffres sur l'impact micro-économique de la 5G pour la Belgique. Jusqu'en 2023, la mise en œuvre devrait entraîner des recettes supplémentaires pouvant atteindre 13 milliards d'euros, ce qui entraînera la création d'environ 35.000 emplois.

2) Sur la période 2015-2016, les opérateurs de l'époque actifs sur le territoire bruxellois ont investi un total de 109 millions d'euros dans les réseaux mobiles. Comment pensez-vous que cet effort va encore évoluer sous l'impulsion de la mise en œuvre de la 5G ?

On s'attend à ce que les niveaux d'investissement restent globalement les mêmes ; le volume d'investissement se situe actuellement autour de 10 à 12 % du chiffre d'affaires, mais, en raison de la mise en œuvre de la 5G, on prévoit que les investissements augmenteront encore temporairement pour atteindre un niveau maximum estimé de 23 %. Il est également clair que pour le réseau 4G existant, le déploiement du réseau est désormais achevé et qu'actuellement, on n'investit plus que pour optimiser la capacité locale. La prochaine vague d'investissement sera l'investissement dans la 5G, les priorités découlant des priorités que le régulateur impose aux opérateurs.

#### 4.2.4.1.2 Utilisateurs

3) Quels sont, d'après vous, les types d'utilisateurs et d'entreprises qui vont utiliser la 5G ?

Actuellement, le premier intérêt pour la 5G commence à émerger au sein de l'industrie. Les opérateurs se basent donc sur une forte valeur ajoutée pour les acteurs industriels, grâce à la mise en œuvre de la nouvelle technologie. La fonctionnalité du réseau actuel se limite à un seul endroit et les sites radio sont répartis sur le territoire ; avec la 5G, il y aura des systèmes informatiques de pointe répartis sur le territoire, de sorte que la sécurité et le stockage de données peuvent être assurés localement. Ce dernier point est essentiel pour les entreprises : il faut de la puissance informatique, du stockage, du routage, une sécurité suffisante pour contrôler ces aspects, et tout cela est possible dans une architecture 5G qui peut être décentralisée, virtualisée ou localisée.

Selon les opérateurs, il y a peu de chances actuellement pour que l'industrie locale soit déjà suffisamment consciente des possibilités offertes par la technologie, raison pour laquelle ils demandent qu'on fasse connaître les possibilités offertes par la nouvelle technologie en concertation avec l'industrie et le gouvernement. En outre, les opérateurs estiment peu probable que l'utilisation de la technologie soit le résultat d'une poussée technologique ; selon eux, elle commencera plutôt par une demande du marché.

En outre, le marché résidentiel contribuera également à l'utilisation croissante des données mobiles. Ceci est également visible dans l'aperçu ci-dessus concernant l'augmentation de l'utilisation des données mobiles pour la région belge.

#### 4.2.4.1.3 Scénarios d'utilisation

- 4) Quels sont pour vous, en tant qu'opérateur, les scénarios d'utilisation les plus développés et donc les plus intéressants auxquels la technologie 5G va contribuer ? Quels scénarios d'utilisation allez-vous prioritairement mettre en avant dans la période précédant l'introduction de la technologie ?

Actuellement, les opérateurs mettent en lumière l'importance de la réduction de latence résultant de l'utilisation de la 5G ; ils voient aussi l'avantage d'optimiser le taux de couverture et d'améliorer les dispositions en matière de service minimum. Ce qui est frappant, cependant, c'est que contrairement aux fournisseurs de technologie (voir ci-dessous), les opérateurs ne se concentrent pas directement sur l'évolution des scénarios d'utilisation. Ils affirment en outre que les scénarios d'utilisation seront plutôt la conséquence d'applications qui peuvent être conçues par l'industrie et par les utilisateurs résidentiels, ou qui devraient être commercialisées en tant que telles par ceux-ci.

#### 4.2.4.1.4 Politique

- 5) Dans quelle mesure le cadre politique actuel crée-t-il une marge de manœuvre suffisante pour le déploiement de la 5G ?

Avec l'ordonnance actuellement en place, les opérateurs peuvent commencer à se demander s'il est possible ou non de déployer la 5G à Bruxelles. Même si l'ordonnance est adoptée, il y a encore de fortes chances qu'elle soit attaquée. Les opérateurs déclarent également qu'un premier pas dans la bonne direction a été franchi, mais qu'il est plus logique de reprendre les normes en matière de rayonnement de l'UE. Rien qu'en Belgique, il existe trois réglementations environnementales différentes, pour un pays plus petit que certaines villes chinoises. Ceci est source d'incertitudes et d'inégalités dans les investissements et la réglementation à suivre.

- 6) En tant qu'opérateur, avez-vous réduit, augmenté ou ajusté vos investissements dans le cadre de la 5G en raison du cadre politique ? Avez-vous l'intention de les adapter à l'avenir ou si le cadre politique change ?

Pour le moment, il n'y a pas encore d'investissements ; nous devons aussi voir si la norme bruxelloise en matière de rayonnement permet un développement suffisant de la 5G. Les opérateurs tirent déjà le meilleur parti des dispositions actuelles, mais la situation n'est pas idéale selon eux. La technologie doit également mûrir encore davantage afin de permettre ou de justifier davantage d'investissements. De plus, les essais ne peuvent actuellement pas être effectués en raison du cadre réglementaire. Par conséquent, il n'y a pas encore de demande, car l'industrie n'a pas encore la possibilité d'œuvrer avec la nouvelle

technologie. C'est pourquoi des organismes consultatifs tels que Gartner recommandent actuellement aux acteurs de l'industrie de ne pas encore investir dans des technologies compatibles 5G.

#### 4.2.4.1.5 Avenir

Comme nous sommes encore dans une phase initiale sur le plan technologique, il n'est pas encore possible à l'heure actuelle de déterminer l'impact micro-économique sur Bruxelles. Les opérateurs auront besoin de quelques années de plus pour estimer l'impact sur Bruxelles et pour permettre à la technologie de mûrir davantage. Toutefois, il est important que le cadre législatif soit suffisamment souple pour justifier les investissements nécessaires. Il est également important de créer un cadre dans lequel les opérateurs et les autres acteurs peuvent procéder à des essais ensemble et ainsi se renforcer mutuellement. Cette dernière phase devra impérativement avoir lieu, en partie sous l'impulsion des investissements qui seront réalisés dans les pays voisins, ce qui nécessitera également une réflexion locale sur la position concurrentielle de notre région et des entreprises qui y sont implantées. Dans le même contexte, il conviendrait également d'examiner si, compte tenu de l'accent mis sur les activités industrielles, il convient de ne pas rechercher quelle est la valeur ajoutée de la mise en œuvre de la 5G pour la région bruxelloise, compte tenu de la composition ou du panier d'activités économiques déjà développées dans la région et peut être développées à l'avenir.

#### 4.2.4.2 *Perspective d'implémentation de la 5G à Bruxelles : Fournisseurs*

##### 4.2.4.2.1 Investissements

Les fournisseurs affirment qu'ils vont encore un peu différer leurs propres investissements et les lier à la demande de la part de clients potentiels.. Cela s'explique en partie par le fait qu'en Europe, les montants pour l'achat des licences 5G sont sujets à des fluctuations particulièrement fortes et il existe donc une incertitude quant à la manière dont ces licences seront proposées aux opérateurs. Les fournisseurs affirment, par exemple, qu'en Italie, des montants très élevés sont demandés pour l'achat d'une licence alors qu'en Suisse, l'acquisition est moins onéreuse, mais la vente est assortie de conditions. Cette façon de travailler, dans laquelle la vente de la licence est liée à un modèle de récupération pour le gouvernement, est jugée intéressante par les fournisseurs, tant pour le gouvernement que pour leurs propres clients (clients des fournisseurs).

##### 4.2.4.2.2 Utilisateurs

Selon les fournisseurs, le marché de la 5G se composera de trois segments. Il y a le marché de la consommation, ou marché résidentiel ; c'est le marché sur lequel les opérateurs se concentrent actuellement et c'est aussi le segment sur lequel les opérateurs se sont organisés dans le passé. Le problème ici est que ces utilisateurs ne miseront pas sur les services que la 5G peut offrir et grâce auxquels elle peut ajouter de la valeur. Par conséquent, il est peu probable que cette partie du marché résidentiel soit disposée à payer plus cher pour utiliser la technologie 5G. En revanche, le deuxième marché, celui des entreprises, composé de tous les « verticaux », tous les segments, sera en mesure d'exploiter la valeur de

la technologie mobile 5G, puisque la 5G apportera une nouvelle boîte à outils qui répond à certaines des préoccupations avec lesquelles l'industrie est déjà confrontée. Pensez aux communications extra-sécurisées, aux *Service Level Agreements* (SLA) spéciaux ou aux services liés à la localisation. En outre, les fournisseurs identifient le secteur public ou le gouvernement lui-même comme troisième marché. Ils identifient spécifiquement l'extension de services d'importance sociale : les soins de santé, l'administration, les données ouvertes, les villes intelligentes, qui peuvent toutes être desservies par les possibilités technologiques supplémentaires contenues dans la boîte à outils 5G.

En ce qui concerne plus particulièrement la mise en œuvre de la 5G à Bruxelles, compte tenu également de la composition du secteur des TIC, l'accent supplémentaire mis sur la numérisation et l'automatisation sera important pour la distribution de la valeur ajoutée découlant de l'exploitation complète de la 5G pour les applications industrielles. Concrètement, la question sera de savoir si la fourniture de services à valeur ajoutée via le réseau 5G augmentera le chiffre d'affaires des entreprises actives dans le secteur des TIC et dans quelle mesure les opérateurs télécoms ou les sociétés de programmation informatique, de conseil et assimilées capteront la part de cette augmentation qui sera compatible avec la 5G. Il est en effet concevable que ces dernières entreprises soient celles qui accompagneront l'intégration de la technologie auprès des clients industriels et s'adjugeront ainsi une part de la valeur ajoutée réalisée.

#### 4.2.4.2.3 Scénarios d'utilisation

En ce qui concerne les scénarios d'utilisation spécifiques, les fournisseurs prévoient beaucoup plus d'applications possibles que ce n'était le cas pour les opérateurs. Mais cela s'explique aussi en partie par le fait que, dans ces scénarios, les fournisseurs proposent des solutions intégrales sur le marché. Cela signifie qu'une mise en œuvre plus rapide de la 5G est bénéfique à la fois pour la vente de l'infrastructure de diffusion de la 5G et pour la vente d'applications « *end-user* » qui n'apportent de valeur ajoutée qu'à l'utilisateur final, à condition que la 5G soit déployée. Certains des scénarios d'utilisation pertinents (en RBC) qui ont été présentés dans ces cas sont expliqués ci-dessous.

- La 5G pour les congrès internationaux ou les événements internationaux à haut risque : Il s'agit d'événements où la sécurité des données et la sécurité des personnes et des environnements revêtent une importance particulière. Il est en outre suggéré que la 5G sera également importante pour le transport connexe vers et depuis ce type d'événements.
- Plates-formes de trafic : ces plates-formes doivent intégrer des données publiques et privées, optimiser et améliorer les applications existantes. Cela nécessite beaucoup de bases de données, mais aussi un réseau fiable.
- Drones : Les drones ont besoin d'un réseau mobile pour voler librement. Pour pouvoir voler sans pilote, la latence est également importante car il doit être possible d'intervenir rapidement en cas d'urgence ou de défaillance technique.
- *5G network slicing* (découpage en tranches du réseau 5G) : Pour les transports publics, un réseau virtuel peut être mis en place à la fois pour promouvoir la sécurité des transports et de la circulation et pour améliorer le confort des usagers.

#### 4.2.4.2.4 Politique

Les fournisseurs sont conscients des ambitions au niveau fédéral belge, mais prennent acte du report de la mise aux enchères des licences. Cependant, cela a pour conséquence que les fournisseurs retardent leurs propres investissements et attendent la demande de clients potentiels. En outre, ils œuvrent à l'élaboration d'une approche appropriée pour la mise aux enchères des licences.

#### 4.2.4.2.5 Avenir

Les fournisseurs s'attendent à ce que les avantages concurrentiels découlant de méthodes de travail plus rapides et plus efficaces soient et restent importants pour les entreprises belges. La technologie 5G joue un rôle particulier à cet égard. Dans une certaine mesure, la 4G peut permettre les services à valeur ajoutée, mais, à terme, cela entraînera des déficits structurels. De plus, le déploiement de la nouvelle technologie 5G prendra beaucoup de temps. Si le déploiement commence dans un délai de deux ans, la technologie ne sera prête que dans cinq ans. Ainsi, selon les fournisseurs, il est important de rétablir la confiance (à la fois au sein du gouvernement et entre le gouvernement et l'industrie) et de pouvoir procéder à la mise aux enchères des licences.

À l'avenir, les fournisseurs voient un fort potentiel dans l'utilisation de la technologie 5G. Sur la base des chiffres fournis par Ericsson & Arthur D. Little, un chiffre d'affaires total supplémentaire estimé à 7,2 milliards d'euros est prévu pour la période 2020-2026 grâce à la numérisation et aux services stimulés par la 5G. Dans un premier temps, une contribution d'environ 0,894 milliard d'euros au chiffre d'affaires des opérateurs sera apportée au cours de la période 2020-2026, grâce à la fourniture de la connectivité et à l'installation de l'infrastructure réseau. À cela viennent s'ajouter 3,5 milliards d'euros provenant de la fourniture de services via le réseau 5G, dont, selon cette source, les opérateurs peuvent capter environ 50%. Enfin, en raison des nouvelles opportunités qu'offre la technologie 5G, de nouveaux services et produits devront également être développés. Ces produits supplémentaires représentent selon la même source un potentiel de croissance du chiffre d'affaires de 2,68 milliards d'euros pour le secteur. Les opérateurs pourraient capter environ 33 % de cette valeur ajoutée. Ainsi, les informations fournies par l'intermédiaire d'un des fournisseurs représentent un chiffre d'affaires plus élevé d'environ 3,5 milliards d'euros pour les opérateurs sur la période 202-2026 en raison de l'exploitation de la technologie 5G.

#### 4.2.4.3 *Perspective de mise en œuvre de la 5G à Bruxelles : Utilisateur final professionnel*

Pour la discussion du point de vue de l'utilisateur final professionnel, il est actuellement fait appel à un avis émis par Gartner<sup>32</sup>.

---

<sup>32</sup> Four Key Ways Enterprises Should Plan for 5G, 2017, Gartner, <https://www.gartner.com/doc/3787788/key-ways-enterprises-plan-g>, consulté le 17/02/2018.

Sur la base des feuilles de route du développement technologique et des calendriers de mise en place des fournisseurs, il est supposé que la technologie 5G sera largement disponible après 2020. C'est, plus tard que prévu initialement par les utilisateurs informatiques. Dans de nombreux cas, un déploiement complet est prévu après 2023. Les entreprises s'attendent à ce que la 5G offre certains avantages, comme une latence ultra-faible, mais actuellement les fournisseurs promeuvent principalement d'autres caractéristiques telles que les débits de données multi-Gigabit et les connexions à large bande et/ou l'accès large bande sans fil. D'autre part, Gartner note que la plupart des scénarios d'utilisation actuels et nouveaux ne nécessitent pas la technologie 5G étant donné les capacités des technologies de réseau 3G et 4G LTE disponibles. De plus, Gartner estime peu probable que les utilisateurs professionnels paieraient un supplément pour l'utilisation de la nouvelle technologie 5G. Un sondage limité mené par Gartner montre que seul un faible pourcentage des personnes interrogées étaient disposées à payer un petit supplément pour le service 5G et que 26% n'étaient tout simplement pas prêts à payer pour ce service.

Par conséquent, Gartner conseille aux responsables opérationnels en charge de la planification et de l'approvisionnement des services et des appareils mobiles :

- de ne pas utiliser d'équipements ou de services 5G normalisés accessibles au public avant 2020 ;
- de définir des scénarios d'utilisation clairs pour lesquels l'utilisation de la nouvelle technologie conduit manifestement une valeur ajoutée. Ceci, pour profiter des caractéristiques de performance uniques de la 5G ;
- de soutenir l'utilisation de services et de technologies obsolètes pour tous les autres scénarios d'utilisation jusqu'en 2022 au moins ;
- d'examiner si des augmentations de prix potentielles pour les futurs plans 5G des opérateurs sont imminentes et d'informer ainsi l'entreprise qu'ils préfèrent les fournisseurs qui ne facturent pas de prime pour le service de données 5G et/ou qui continuent à garantir la prise en charge des anciennes applications.

#### *4.2.4.4 Perspective de mise en œuvre 5G à Bruxelles : Utilisateur final résidentiel*

Aucun utilisateur résidentiel n'a été contacté au cours de l'établissement de cet avis. Toutefois, il est recommandé aux autorités bruxelloises d'organiser, le cas échéant, une enquête sur le sujet auprès des parties prenantes, afin de donner la parole à l'utilisateur final local et d'obtenir la validation des hypothèses utilisées par les opérateurs et les fournisseurs.

## 5 Suggestions

– Le comité propose de suivre autant que possible les normes et directives internationales en ce qui concerne les méthodes de calcul et de mesures relatives aux technologies 5G.

## 6 Conclusion générale

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 d'affaires, du moins pour le principal groupe d'entreprises faisant partie du secteur des TIC à Bruxelles. 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 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 spectres (nouvelles licences), le nombre d'antennes (petites cellules et mMIMO) ainsi que la puissance produite.

Afin d'optimiser le spectre disponible ainsi que l'augmentation d'antennes, la 5G propose un certain nombre de nouvelles technologies :

- La technologie aux bandes millimétriques permet de mieux utiliser la disponibilité de spectre dans les hautes fréquences ;
- L'utilisation de mMIMO rend possible la densification d'antennes sur une seule localisation ;

Toutefois, les deux technologies nécessitent une révision de la méthode de calcul du rayonnement définie dans la législation, en tenant compte de l'effet spatial des MIMO Massive ainsi que des particularités du comportement des ondes aux bandes millimétriques. La proposition du comité est de suivre autant que possible les lignes directrices internationales définies.





## 7 Annexe : Rémunérations payées par membre en 2018

Nom	Prénom	Total jetons présence (ne tient pas compte des visioconférences)	Montant total (€)
Aerts	Geoffrey	1	100
BEAUVOIS	Véronique	3	450
Erzeel	David	2	200
Hecq	Walter	3	300
Lagroye	Isabelle	0	0
Le Dréans	Yves	1	100
Pollin	Sofie	2	200
Rolain	Yves	2	200
Selmaoui	Brahim	0	0

# Annexe Rapport : validation du logiciel Mithra-REM

## 8 Résumé

Une campagne de mesure a été réalisée par Bruxelles-Environnement parmi les membres de son personnel et suite à un appel à candidats. En comparant les résultats de mesure aux simulations réalisées par le logiciel Mithra-REM, nous obtenons une bonne corrélation entre mesure et simulation, avec une légère surestimation des résultats de la part du logiciel de simulation. D'autre part, nous mesurons une atténuation moyenne de 5 dB, principalement expliquée par le matériau du châssis au niveau duquel a été effectuée la mesure. Ces tendances méritent des mesures supplémentaires afin d'être confirmées ou infirmées.

## 9 Matériel et Méthodes

### 9.1 Mesures

#### 9.1.1 Appels à candidats

Deux vagues d'appel à candidats ont été réalisées au sein de Bruxelles-Environnement, la première au sein de la division « Autorisation et Partenariats » et la deuxième au sein de la division « Inspectorat et sols pollués ». Chaque appel a consisté en un formulaire google form. Le formulaire, bilingue, présentait la thématique et demandait au personnel motivé à réaliser une mesure du rayonnement dans leur habitation de remplir les informations permettant de juger l'implantation des antennes et l'intérêt de la mesure (Annexe A1).

Une sélection des réponses a été effectuée afin de privilégier des mesures efficaces et au-dessus des capacités de détection de l'analyseur de spectre.

#### 9.1.2 Protocole de mesure

69 mesures ont été réalisées entre le 27/03/2017 et le 16/03/2018, sur 29 sites différents. Neuf de ces sites se trouvaient en voirie et 20 dans des habitations.

Ces mesures se distribuent sur l'ensemble de la région de Bruxelles-Capitale (Figure 23).



Figure 23 : Localisation des différents sites de mesure en Région de Bruxelles Capitale.

Les mesures ont été effectuées selon les dispositions précisées par l'AGRBC du 08 octobre 2009 fixant la méthode et les conditions de mesure du champ électromagnétique émis par certaines antennes à l'aide d'un analyseur de spectre (Narda® SRM 3006) équipé d'une sonde de champ électrique de 420 MHz à 6 GHz. L'analyseur de spectre était placé lors de chaque mesure sur un trépied en bois permettant d'élever la sonde à 1.5 m du sol. L'analyseur effectue un moyennage de 40 secondes pour chaque bande de fréquence présentée dans le tableau suivant (Tableau 7)

Tableau 7 : Bandes de fréquences mesurées par l'analyseur de spectre. Les fréquences sont présentées en Hz.

	LTE 800		GSM 900_UMTS 900		GSM 1800_LTE1800		UMTS 2100		LTE2600		3400_3600	
	Fmin	Fmax	Fmin	Fmax	Fmin	Fmax	Fmin	Fmax	Fmin	Fmax	Fmin	Fmax
Telenet	791	801	925.1	935.3	1855	1880	2125.3	2140.1	2655	2670		
Proximus	801	811	935.3	941.1	1805	1830	2110.3	2125.3	2620	2640		
			947.1	953.7								
Orange	811	821	941.3	946.9	1830.1	1854.9	2154.9	2169.7	2670	2690		
			953.9	959.9								
B-Lite											3450	3499
											3550	3599

Dans le cas le plus simple des mesures en voirie, le point maximal de champ électrique a été déterminé à l'aide d'un mesureur large bande (Narda®) et la mesure a eu lieu en ce point, la sonde étant dirigée vers l'antenne visible.

Dans le cas des mesures en habitation, trois types de mesures ont été effectuées de manière systématique. Après avoir localisé la fenêtre où le champ est maximum à l'aide d'un mesureur à large bande, une mesure a lieu dans le plan de cette fenêtre ouverte ou à l'extérieur (Ext). Deux autres mesures ont lieu au niveau de la même fenêtre, 50 cm à l'intérieur, la première fenêtre ouverte (Fop) et la deuxième fenêtre fermée (Fclo). Un exemple de telles installations est présenté sur la figure suivante (Figure 24)



Figure 24 : Exemple d'installation du mesureur selon les trois types de mesures systématiques. A : dans le plan de la fenêtre, ouverte ; B : à 50cm de la fenêtre, ouverte ; C : à 50cm de la fenêtre, fermée.

Dans l'éventualité où le champ serait plus élevé quelque part dans la pièce ailleurs qu'au niveau de la fenêtre, une quatrième mesure serait réalisée.

Tableau 8 : résumé des mesures réalisées en visite

Mesure	Nom	
Voirie	Ext	Systematique
Habitation		
Plan ou extérieur	Ext	Systematique
50 cm Intérieur Fenêtre ouverte	Fop	Systematique
50 cm Intérieur Fenêtre fermée	Fclo	Systematique
Intérieur maximum	In	Optionnel

Dans le cadre des mesures à l'intérieur d'habitations, différentes caractéristiques du bâtiment ont été notées lors de la mesure ou *a posteriori* afin de tenter d'enrichir l'analyse des résultats. Ces caractéristiques sont présentées dans le Tableau 9.

Tableau 9 : caractéristiques des bâtiments où ont eu lieu les mesures. Toutes les caractéristiques ont été relevées sur place à l'exception de l'année de construction du bâtiment. L'âge du bâtiment est une estimation, basée sur les photos aériennes de Bruxelles disponibles sur le site <http://bruciel.brussels>. Les photographies n'étant disponibles que pour les années 1930, 1944, 1950, 1970 et 1996, l'année de construction est considérée comme étant l'année à partir de laquelle le bâtiment apparaît sur les photographies.

Caractéristique	Description	Valeurs
Etage	Etage auquel a eu lieu la mesure	De 0 (rez de chaussée) à 4
Type	Type de parois	Façade ou sous toiture inclinée
Vitrage	Nombre d'épaisseur de vitrage de la fenêtre où ont eu lieu les mesures	Simple ou Double
Châssis	Matériau des châssis de la fenêtre où ont eu lieu les mesures	Bois, Aluminium ou PVC

Bâti	Année de construction du bâtiment	1930, 1940, 1950, 1970, 2000
------	-----------------------------------	------------------------------



## 9.2 Simulations

Les simulations ont été réalisées à l'aide du logiciel de ray tracing Mithra-REM (Geomod-CSTB, version 1.6.10). Les données d'antennes ont dans un premier temps été téléchargées depuis le cadastre en ligne afin de correspondre à la situation autorisée au jour de la mesure. Nous avons sélectionné une distance entre récepteur de 1m pour les simulations horizontales et en façade. Lorsque les résultats de simulations devaient être obtenus pour comparer des mesures réalisées en habitation, le building modélisé dans le logiciel était modifié afin de doubler le nombre d'étages et obtenir plus de récepteur sur l'axe vertical. Tous les autres paramètres sont restés par défaut.

Tableau 10 : Correspondance sélectionnée entre simulations et localisation des mesures.

Localisation mesure	Valeur simulée
Plan + Extérieur	Out
50cm In Fenêtre ouverte (Fop)	Out
50cm In Fenêtre fermée (Fclo)	In

### 9.2.1 Modélisation du bâti

Dans deux occasions, l'environnement modélisé s'éloignait de la réalité du terrain en influençant le résultat. Dans ces cas, une demande a été introduite auprès du CIRB afin de remodeliser les bâtiments qui posaient problème avant d'effectuer les simulations.

## 9.3 Analyses statistiques

Les analyses statistiques (corrélations) ont été réalisées avec le logiciel R (R version 3.3.3 (2017-03-06)).  
Corrélation de Pearson, seuil  $\alpha=5\%$ .

## 10 Résultats

### 10.1 Mesures brutes

La comparaison entre valeurs mesurées et simulées montre une bonne corrélation positive, statistiquement significative (Figure 25 -  $R^2=0.51$ ,  $F_{1,67}=70.99$ ,  $P<0.0001$ ).

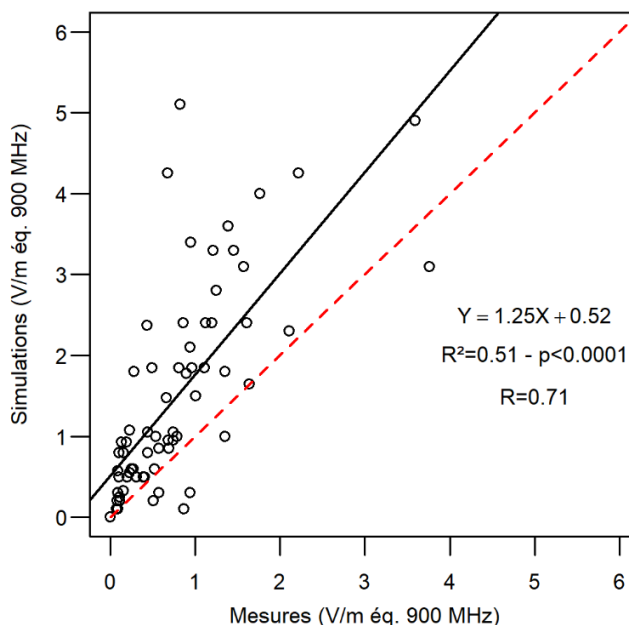


Figure 25 : Corrélation entre les mesures et les valeurs simulées au même point géographique. La ligne rouge pointillée représente  $Y=X$ .  $N=69$

Les mesures réalisées sur deux sites ont montré des résultats fortement éloignés de la tendance générale. Concernant le premier site, les valeurs simulées étaient très inférieures aux valeurs mesurées. Après investigation, il est apparu qu'un site d'antennes n'était pas pris en compte dans la zone d'investigation de 200m incluant le point de mesure. Une nouvelle simulation avec une zone d'investigation plus large qui inclue le site en question a été réalisée, ce qui augmente les valeurs de simulation. En ce qui concerne le deuxième site de mesures divergeant, les investigations n'ont pas permis de mettre en évidence de raisons pouvant expliquer les différences. Ces investigations ont notamment porté sur la taille de la zone d'investigation et la position et l'azimut des antennes relevées en visite. Deux nouvelles mesures ont été réalisées sur ce site en date du 06/02/2019, à l'extérieur et à 50cm de distance l'une de l'autre. La moyenne de ces deux mesures a été prise en compte dans l'analyse afin de recalculer la relation. Les données d'antennes n'ont pas été modifiées entre la première mesure de 2017 celles de 2019.

En tenant compte de ces deux corrections, la relation s'en voit améliorée (Figure 26 –  $R^2=0.62$  -  $F_{1,63}=106.2$ ,  $P<0.0001$ ).

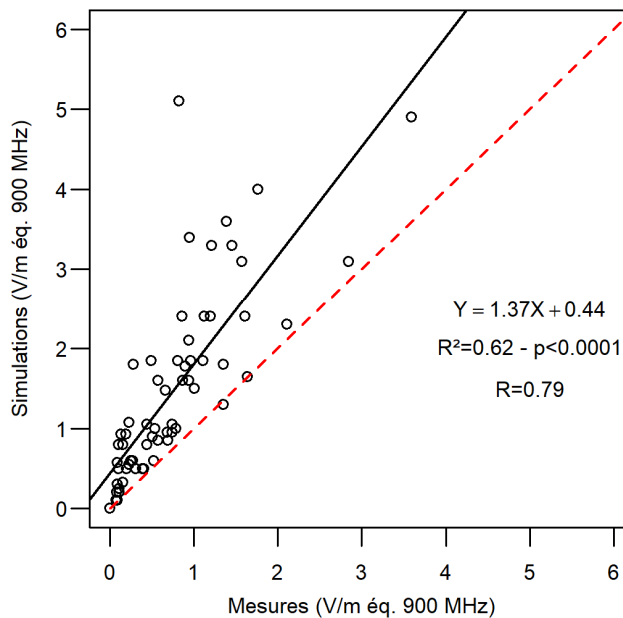


Figure 26 : Corrélation entre les mesures et les valeurs simulées au même point géographique après correction et exclusion de points atypiques. La ligne rouge pointillée représente  $Y=X$ .  $N=65$

## 10.2 Atténuations

La comparaison des niveaux de champs électriques mesurés aux mêmes endroits avec la fenêtre ouverte ou fermée permet d'obtenir une estimation de l'atténuation moyenne des parois rencontrées dans les sites de mesures.

L'atténuation des parois a été mesurée en dB pour 16 lieux de mesures différents. La moyenne de ces atténuations est de  $5.31 \text{ dB} \pm 4.81 \text{ dB}$ .

Cela donne une atténuation de  $5.49 \text{ dB} \pm 5.21 \text{ dB}$  en dessous de 1 GHz et  $7.55 \text{ dB} \pm 5.1 \text{ dB}$  au-dessus de 1 GHz. Cette première analyse de l'atténuation ne tient pas compte des limites de détection du mesureur qui créent parfois des résultats d'atténuation sous-estimés. Une analyse approfondie sera effectuée prochainement.

Ces deux valeurs sont à comparer à celles données dans l'Arrêté du 30 Octobre 2009 qui sont de 4 dB en dessous de 1GHz et 6 dB au-dessus de 1 GHz.

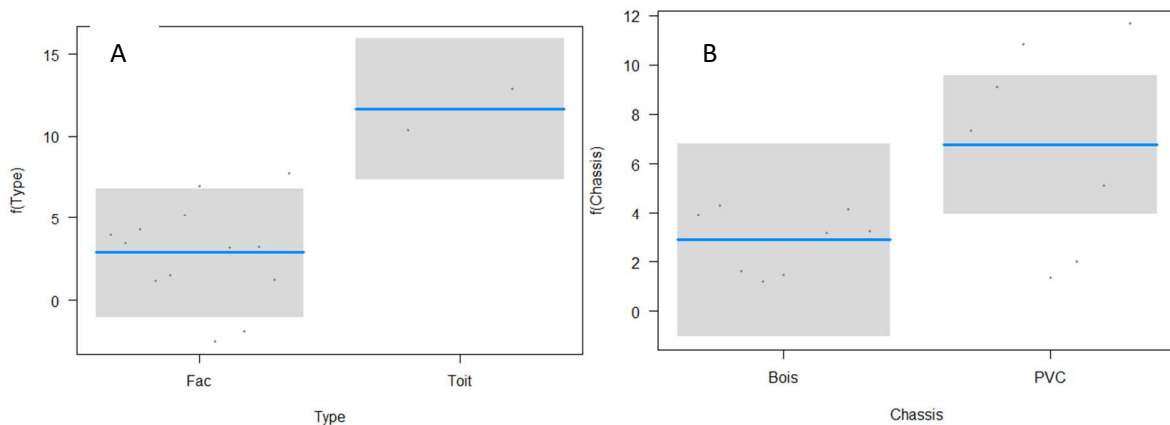
Et à la valeur de 7 dB pour des bâtiments avec fenêtres donnée par l'étude COST 231.

Nous avons effectué une analyse par modèle linéaire généralisé (GLM) de l'atténuation en fonction des caractéristiques des bâtiments et leurs interactions. Le modèle final est déterminé par itération sur base du critère d'information d'Akaike (AIC), sélectionnant le modèle le plus parcimonieux.

Le modèle ainsi sélectionné tient compte des caractéristiques Etage, Type, Chassis et Bati, ainsi que les interactions en Etage et Bati et entre Type et Bati. Seules les variables Chassis et les interactions Etage:Bati et Type:Bati sont significatives, avec un pseudo-R<sup>2</sup> général de 0.75 (Tableau 11).

Tableau 11 : Résultats de la GLM la plus parcimonieuse.

Variable	F	<i>p</i>
Etage	0.97	0.35
Type	4.24	0.07
Chassis	10.09	0.01 *
Bati	0.66	0.44
Etage :Bati	5.17	0.05 *
Type :Bati	6.26	0.03 *



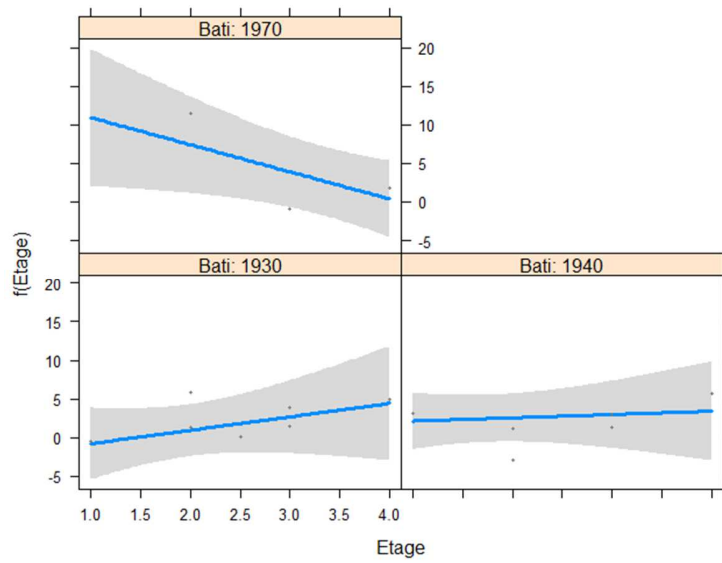


Figure 28 : Diagrammes de dispersion conditionnelle entre l'atténuation des parois et l'interaction entre Etage et année de construction du bâtiment. L'ombrage représente les intervalles de confiance à 95% et les points représentent les résidus partiels.

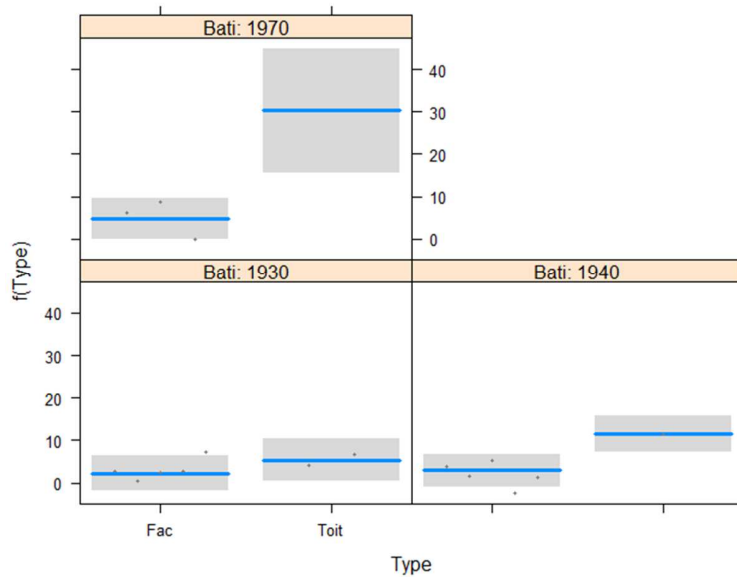


Figure 29 : Diagrammes de dispersion conditionnelle entre l'atténuation des parois et l'interaction entre type de volume et année de construction du bâtiment. L'ombrage représente les intervalles de confiance à 95% et les points représentent les résidus partiels.

## 11 Discussion et conclusion

### 11.1 Corrélation mesures

Le principal enseignement de l'analyse présentée dans ce rapport est qu'il existe une forte relation, statistiquement significative entre mesures et simulations. Le logiciel de simulation Mithra-REM a tendance à surestimer le champ électrique, comme le montre le coefficient angulaire de la régression linéaire présentée sur la Figure 25 et la Figure 26. Cette surestimation est en faveur du citoyen.

Il est important de relever que le rapport entre simulation et mesures que nous observons est pratiquement le même que celui obtenu en France<sup>33</sup>. En effet, nous obtenons un rapport de  $1.41 \times 1.37 = 1.93$  (soit le rapport de notre étude entre simulation et mesure, multiplié par les 3dB d'atténuation des technologies) entre les simulations en puissance maximale et les mesures. En France, le rapport entre simulations à puissance maximale et mesures est de 1.6. Une étude suédoise a montré un même rapport de  $2.09$ <sup>34</sup> (Figure 30).

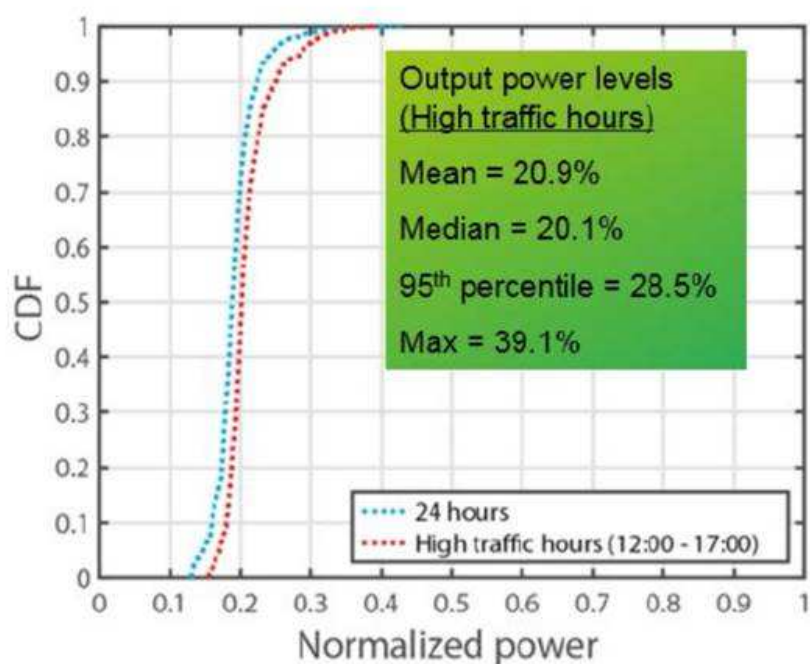


Figure 30 : Comparaison entre une puissance maximum et des mesures de puissance selon IEC TR 669 ED2

<sup>33</sup> Lignes directrices nationales sur la présentation des résultats de simulation de l'exposition aux ondes émises par les installations radioélectriques.

Version 1.0 ; Décembre 2015. ANFR

<sup>34</sup> IEC TR 669 ED2: Case studies supporting IEC 62232 – Determination of RF field strength and SAR in the vicinity of radiocommunications base stations for the purpose of evaluating human exposure. Draft technical report. Date of circulation: 2018.12.07

Malgré la significativité de la relation, on observe une grande variabilité dans la distribution des résultats de mesure et de simulation, qui n'est expliquée qu'à 62%. Les causes de cette variabilité peuvent être nombreuses et peuvent impliquer aussi bien l'étape de la mesure que celle de la simulation. Au niveau de la mesure, la standardisation du protocole de mesure permet de limiter au maximum des variations liées au positionnement de la sonde. Cependant, certains paramètres relatifs à la position des antennes, leur hauteur, leur azimute ou également les puissances injectées au moment de la mesure peuvent varier entre les données autorisées et prises en compte pour les simulations et les données effectivement mises en place *in situ*. L'ensemble des sites d'antennes n'a pas pu être visité et aucune variation par rapport à la situation autorisée n'a été constatée pour le site visité. En ce qui concerne les simulations, les résultats peuvent également être soumis à des variations, notamment à cause de modélisation du bâti ne correspondant pas à la réalité (modélisation en blocs vs réalité beaucoup plus nuancée) ou à cause de la non prise en compte d'antennes se situant hors de la zone d'investigation de 200m. Comme présenté dans le matériel et méthodes, nous avons veillé à limiter ces sources de variation et les avons corrigées dans le simulateur lorsque nous les avons rencontrées.

## 11.2 Facteurs d'atténuation

L'atténuation moyenne mesurée *in situ* dans 19 sites dont les caractéristiques de bâtiment sont très différentes est de  $4,18 \text{ dB} \pm 4.62 \text{ dB}$ . Ces valeurs sont similaires à celles mesurées dans d'autres études, notamment l'étude COST 231<sup>35</sup> qui indique une valeur de 7 dB pour des bâtiments avec fenêtres

De manière plus précise, nous mesurons une atténuation de  $4.23 \text{ dB} \pm 5.03 \text{ dB}$  en dessous de 1 GHz et  $5.71 \text{ dB} \pm 5.50 \text{ dB}$  au-dessus de 1 GHz.

Ces deux valeurs sont à comparer à celles données dans l'Arrêté du 30 Octobre 2009 qui sont de 4 dB en dessous de 1GHz et 6 dB au-dessus de 1 GHz.

L'analyse des caractéristiques des bâtiments permet de mettre en évidence des tendances intéressantes concernant la variation des atténuations. De prime abord, il paraît surprenant que le nombre d'épaisseurs de vitrage ne ressort pas en tant que variable explicative. Cela est dû au fait que la très grande majorité des fenêtres où ont été effectuées les mesures étaient composées de double vitrage.

La GLM la plus parcimonieuse montre que la variable la plus significative en ce qui concerne l'atténuation est le matériau du châssis.

Bien que non significative, nous observons également une forte tendance d'influence du type de volume, puisque l'atténuation semble plus élevée sous les toitures. Cette observation devrait être étayée par l'augmentation de mesure sous toitures inclinées, puisque seulement deux mesures ont été prises en compte. Cette tendance n'est cependant pas surprenante puisque l'inclinaison des toitures implique une augmentation de la réflexion du champ électrique.

Sur base de l'étude COST 231<sup>36</sup>, l'onde électromagnétique forme un angle lorsqu'elle arrive sur le toit et que, dès lors, il existe une atténuation supplémentaire due à la réflexion. En effet, une partie de cette onde est réfléchi à l'instar du phénomène existant sur les façades.

---

<sup>35</sup> COST Action 231 : Digital mobile radio towards future generation systems. Final report. European Commission. Directorate-General Telecommunications, Information society, Information Market and Exploitation of Research (1999)

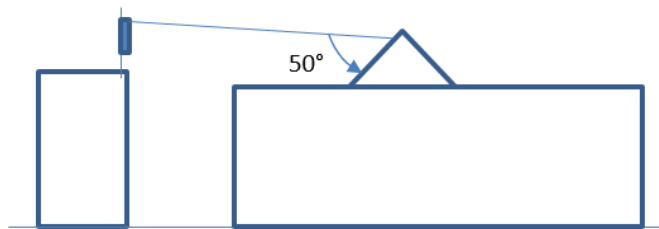
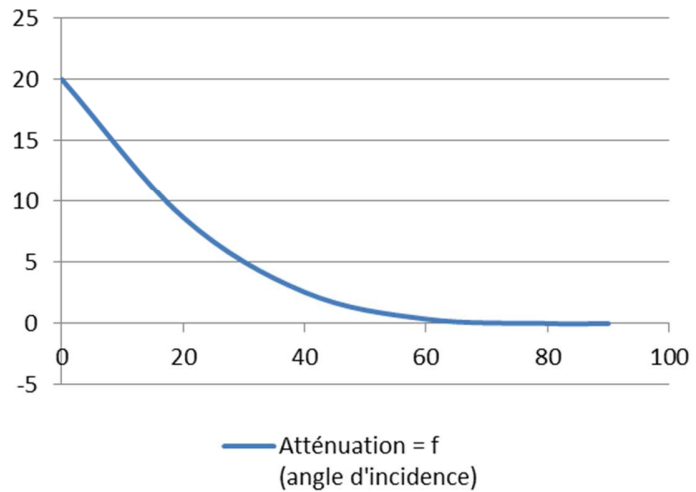
<sup>36</sup> COST Action 231 : Digital mobile radio towards future generation systems. Final report. European Commission. Directorate-General Telecommunications, Information society, Information Market and Exploitation of Research (1999)



$$\text{Atténuation} = 20 \cdot (1 - \sin\theta)^2$$

Angle (°)	Atténuation (dB)
0	20.0
5	16.7
10	13.7
15	11.0
20	8.7
25	6.7
30	5.0
35	3.6
40	2.6
45	1.7
50	1.1
55	0.7

**Atténuation = f (angle d'incidence)**



D'autre part, l'existence d'interaction entre les différentes caractéristiques semble logique puisque ces variables ne sont pas indépendantes entre elles. Par exemple, les matériaux des châssis ou le nombre d'épaisseurs de vitrages sont naturellement liés à l'année de construction du bâtiment, sauf dans le cas de rénovations.

### 11.3 Perspectives

La tendance d'une atténuation plus élevée sous les toits inclinés est très intéressante dans le cadre de la simulation du champ électrique. Cette augmentation peut s'expliquer de nombreuses façons, inclinaison du toit, isolation, etc. Davantage de mesures sont cependant nécessaires afin de confirmer ou infirmer cette tendance.

D'autres paramètres pourraient être étudiés afin d'affiner l'analyse des atténuations. En premier lieu, l'angle d'incidence entre la source du rayonnement principale et le récepteur pourrait être relativement facilement intégré dans l'analyse.

D'autres mesures sont néanmoins nécessaires, afin surtout d'améliorer notre connaissance des paramètres influençant l'atténuation des parois.