

Evaluation de l'impact Carbone de l'arrêt des réseaux 2G-3G et la migration de leurs services vers la 4G/5G

Questions fréquemment posées (FAQ)

Comité d'experts techniques sur les réseaux mobiles

Septembre 2023

Evaluation de l'impact carbone de l'arrêt des réseaux 2G et 3G et la migration de leurs services vers la 4G-5G

Comité d'experts technique sur les réseaux mobiles

Questions fréquemment posées (FAQ)

1 L'exercice considère l'arrêt des deux technologies, la 2G et la 3G. Pourtant, l'extinction d'une technologie puis de l'autre est a priori ce qui se profile (cf. annonces des opérateurs). Pourquoi un tel choix pour étude ?

Cette étude repose sur la comparaison de deux scénarios : l'un où la 2G et la 3G sont conservées, et l'autre quand les deux technologies ont été migrées vers de la 4G-5G. Même si les annonces qui ont été faites précisent que 2G et 3G seront éteintes successivement, seules quelques années séparent ces deux extinctions. Etudier exclusivement l'extinction d'une technologie ou l'autre compliquerait l'étude et n'apporterait un éclairage que sur une fenêtre de quelques années. L'étude vise à fournir un éclairage sur une plus longue période ; il est donc pertinent d'étudier un scénario d'extinction de la 2G et de la 3G.

2 L'étude prend en compte explicitement les stations de base (accès radio). Mais qu'en est-il des autres parties d'un réseau mobile comme le cœur de réseau, la collecte, les contrôleurs de l'accès radio pour lesquels on ne voit pas de calculs dans l'étude ?

L'étude repose sur une analyse comparative entre un scénario conservant la 2G-3G, et l'autre où ces deux technologies ont été migrées en 4G-5G. Ainsi l'objectif est d'évaluer la différence d'impact entre deux scénarios, plutôt que l'impact total de chaque scénario. Ainsi, les processus ou les données d'entrée/sortie peuvent être exclus s'ils sont identiques dans les deux systèmes de produits.

Pour cette raison, le réseau d'agrégation/collecte, les sites radios (hors stations de base) n'ont pas donné lieu à une évaluation quantitative.

Les contrôleurs de l'accès radio 2G/3G (BSC, RNC)¹, le cœur de réseau ont un faible impact énergétique en comparaison de l'accès : ils n'ont donc pas donné lieu à une évaluation quantitative.

¹ Les contrôleurs radio pèsent que quelques pourcents selon les estimations d'un opérateur membre du Comité

3

L'étude analyse le poids des réseaux 2G et 3G pour un opérateur générique, néanmoins, il existe des sites en RAN Sharing en 2G/3G entre plusieurs opérateurs. L'extinction de la 2G/3G par un seul opérateur ne signifie pas nécessairement une extinction des technologies 2G/3G sur le site, dès lors que le site sera toujours exploité par les autres opérateurs. Avez-vous évalué l'impact du partage dans votre scénario ?

L'étude ne prend pas en compte le partage, c'est une hypothèse simplificatrice. En effet comme l'étude évalue un ratio (l'évaluation est faite en relatif), le partage s'appliquant aussi bien à la bande 900MHz en 2G/3G, qu'aux autres bandes de fréquences et technologies, l'ordre de grandeur du résultat reste par conséquent valable.

4

Le poids relatif des réseaux 2G et 3G ne va-t-il pas évoluer à horizon 2025/2030, au moment de l'extinction ?

Dans un premier temps le comité a évalué le poids à date des réseaux 2G et 3G afin de déterminer l'intérêt d'une étude plus approfondie. Ce poids s'avérant non négligeable (voir annexe A de la note), il a été décidé d'approfondir l'analyse sur la base de la comparaison de deux scénarios (voir notamment la réponse aux deux premières questions de ce document FAQ, la note principale détaillée, dont son annexe B à ce sujet). La comparaison des 2 scénarios prend bien en compte un trafic réduit à la date Tm sur la 2G-3G, et donc le « poids » de la 2G-3G dans un horizon éloigné.

5

En considérant la dimension temporelle et l'extinction des réseaux, n'est-il pas plus adapté de présenter le poids des réseaux 2G et 3G en valeur absolue ?

Comme indiqué dans la question précédente, le comité a évalué le poids à date des réseaux 2G et 3G afin de déterminer l'intérêt d'une étude plus approfondie. Pour cela, la part relative des réseaux 2G et 3G est une information plus facilement accessible et suffisante pour répondre à cet objectif.

Puis dans le cadre de l'étude approfondie basée sur la comparaison des deux scénarios, le gain du scénario 4G-5G par rapport au scénario 2G-3G a été évalué en absolu sur la partie réseau pour une année, et la valeur en relatif a été également donnée.

L'analyse réseau montre que la migration des technologies 2G-3G vers les technologies 4G-5G permet un gain continu et régulier de consommation électrique par rapport à la conservation des technologies 2G-3G dans le réseau de l'opérateur mobile de référence à partir de la date Tm. Ce gain de consommation électrique entre les scénarios analysés apporte un gain d'empreinte carbone également continu et régulier depuis la date Tm.

Mais cette migration a un impact carbone à la date Tm pour les terminaux mobiles (cas de la frontière de référence) et l'IoT (cas de la frontière des TIC étendue) ne supportant pas les technologies 4G-5G.

L'étude a aussi évalué les durées nécessaires en nombre de mois depuis la date Tm afin d'atteindre les points d'équilibre pour les deux frontières considérées entre les gains réseaux continus et réguliers et le coût carbone des terminaux non 4G-5G à la date Tm.

6 A mesure que l'échéance de l'extinction des réseaux 2G/3G avance, le trafic sur ces réseaux sera de plus en plus faible. Est-ce que cette baisse du trafic aura un impact sur le poids énergétique des réseaux 2G et 3G ? En particulier dans votre hypothèse de charge des stations de base de 30%.

Le Comité a évalué de façon macroscopique le poids de la consommation énergétique des réseaux 2G/3G relativement à l'ensemble des réseaux, ceci a montré que la 2G/3G représentait un impact énergétique non négligeable sur l'ensemble des réseaux mobiles en France. Par la suite, l'étude a montré qu'à horizon de la date Tm, le trafic sur la 2G/3G devenait faible, justifiant d'autant plus l'intérêt de l'analyse du remplacement des technologies 2G/3G par 4G/5G.

7 Quelle est l'origine de l'hypothèse de charge des stations de base à 30% ? Ne faudrait-il pas différencier la charge qui pèse sur les réseaux 2G/3G et celle sur les réseaux 4G ?

L'hypothèse de charge journalière des stations de base de 30% a été considérée selon une vision macroscopique pour la première partie de l'étude afin de déterminer l'intérêt d'une approche plus approfondie. Cette valeur de 30% provient d'une hypothèse d'une station de base avec une charge moyenne qui semble raisonnable selon les opérateurs membres du Comité. La seconde partie de l'étude affine davantage cette hypothèse.

8 La répartition de la configuration des stations de base dans le parc de sites mobiles ne modifie-t-elle pas le poids relatif des réseaux 2G/3G ?

Le parc des sites 2G et 3G est composé de sites de différentes générations, avec des configurations variées. D'un côté, considérer que l'ensemble du parc est équipé selon l'ancienne génération permet de définir une borne supérieure de l'empreinte des réseaux 2G et 3G ; d'un autre côté, considérer que l'ensemble du parc est équipé d'une génération plus récente permet de définir une borne inférieure du poids des réseaux 2G et 3G. Par conséquent, en bornant le calcul entre ces deux configurations, cette information permet d'évaluer le poids relatif des réseaux 2G et 3G à date et dans un avenir proche. Les valeurs de consommation énergétique des stations de base 2G/3G de différentes générations sont issues de mesures en laboratoire par un équipementier membre du Comité.

Dans le cadre de l'étude détaillée de la comparaison des deux scénarios démarrant à une date Tm lorsque les services de la 2G-3G sont portés en 4G-5G dans le cas du scénario de migration, l'ensemble des matériels des stations de base 2G-3G et 4G-5G ont été considérés de nouvelle génération car la date Tm est plus lointaine avec une durée de 6 ans entre l'annonce de la fin de la 2G-3G et la migration elle-même. Une étude de sensibilité sur les valeurs de consommation électrique de ces stations de base vient compléter l'analyse pour tenir compte de la disparité possible des différents matériels de nouvelle génération.

9 L'étude considère que les services portés par la 900 MHz en 2G et en 3G (comme la voix et le M2M) seraient portés par la 900 MHz en 4G et 5G. Un scénario où la bande 900 MHz (bande qui porte 2G et 3G) serait éteinte et où les services actuels 2G et 3G seraient portés sur les autres bandes est-il envisageable ?

L'étude a examiné le cas où les services supportés par la 900 MHz en 2G/3G seraient portés en 4G/5G par une autre bande cible (ex. 700 MHz) sans nécessité dans le cadre de l'étude de préjuger du cadre d'utilisation de la bande 900 MHz. Ainsi une extinction de la bande 900 MHz pourrait théoriquement être envisagée et ne changerait rien en termes de résultats et conclusions de l'évaluation; néanmoins, l'utilisation du spectre de l'opérateur serait sous optimale et ne

permettrait pas de tirer les pleines performances des ressources à sa disposition pour faire face à la demande croissante de données mobiles. Les fréquences de la bande 900 MHz sont particulièrement intéressantes pour les opérateurs car il s'agit d'une bande basse qui porte loin et pénètre bien dans les bâtiments. Le spectre bande basse des opérateurs est relativement faible et dans les zones qui sont ou seront surchargées sur cette bande basse, il est beaucoup plus intéressant d'un point de vue investissement mais aussi environnemental de réutiliser ces fréquences avec des équipements déjà déployés et compatibles 4G le plus souvent que de rajouter de la capacité en déployant de nouvelles fréquences ou en rajoutant des sites pour densifier la zone. Il est à noter que ces gains carbone n'ont pas été modélisés dans l'étude.

10

Pourquoi avoir fait le choix de ne considérer que les services voix et M2M sur les réseaux 2G et 3G ? Il existe des services data (notamment en 3G) et des services SMS.

Les services de données mobiles utilisés en 2G/3G restent marginaux. En effet le trafic de données mobiles transitant en 2G/3G ne représente que moins de 4% (sur la base des données de l'Observatoire du marché de l'Arcep) du trafic total de données mobiles à date, et sera encore plus faible à la date Tm, date à laquelle l'étude commence à comparer les deux scénarios.

11

Pourquoi avez-vous considéré dans l'étude que l'ensemble du matériel radio est prêt à accueillir la 4G/5G à la date de migration ?

Comme indiqué dans la note détaillée, même si l'étude ne fait pas l'hypothèse d'une date précise pour Tm, cette date étant relativement lointaine pour des raisons opérationnelles, l'ensemble des stations de base 900 MHz de l'opérateur de référence aura été modernisé à cette date pour supporter les technologies 4G et 5G à cause de l'obsolescence du matériel plus ancien et de son remplacement.

12

L'extinction des technologies 2G et 3G aura un impact sur les terminaux : du grand public et du M2M. En effet, tous les terminaux 2G/3G qui existeront à la date Tm devront être remplacés. Cet impact dépend notamment de la date Tm considérée dans l'étude (tout comme l'impact sur les équipements réseaux). N'aurait-il pas été préférable de mener ces études sur 2 dates Tm différentes pour évaluer ces impacts ?

L'étude ne fait pas d'hypothèse sur la date Tm elle-même mais considère une durée de 6 ans entre la date Ta (annonce par l'opérateur de référence de l'arrêt des technologies 2G-3G) et la date Tm (date de la migration vers la 4G-5G)². L'ensemble des opérateurs mobiles, membres du Comité, ont considéré cette durée comme réaliste, et l'ensemble du Comité n'a pas considéré qu'une étude de sensibilité est nécessaire sur ce paramètre.

² A noter les annonces d'extinction des 3 opérateurs mobiles à la date de la rédaction de la note : (Orange) <https://reseaux.orange-business.com/articles/arret-2g-et-3g/>, (SFR) <https://actus.sfr.fr/tech/news/bientot-la-fin-de-la-2g-et-3g-202201260005.html> et (Bouygues Telecom) <https://www.bouyguestelecom-entreprises.fr/bblog/arret-programme-des-technologies-2g-et-3g-4-questions-pour-tout-comprendre/#:~:text=S'inscrivant%20dans%20ce%20mouvement,ans%20plus%20tard%2C%20fin%202029>.

13

Dans une étude parue en 2020, pour le compte de la FFT³, il est évoqué que la 2G consomme 37 kWh/Go, la 3G : 2,9 kWh/Go, la 4G : 0,6 kWh/Go, et la 5G : 0,06 kWh/Go. Ces chiffres avancés par la FFT sont-ils compatibles avec les chiffres obtenus dans cette étude ?

Les chiffres calculés dans cette étude sont obtenus en raisonnant à partir des services 2G/3G portés en 4G/5G, la comparaison avec la consommation énergétique par Go consommé n'est pas évidente. On retrouve néanmoins la même tendance que dans cette étude : 2G et 3G sont moins efficaces que 4G et 5G pour écouler du trafic.

14

Une alternative à l'extinction totale des deux technologies 2G et 3G pourrait consister à maintenir un seul réseau 2G/3G sur le territoire, pensez-vous qu'une telle alternative pourrait emporter des gains carbone par rapport à une extinction ?

Afin d'évaluer les impacts environnementaux du maintien d'un seul réseau 2G-3G, et avec une approche méthodologique analogue déjà décrite dans la note détaillée, on peut par exemple comparer les 2 scénarios suivants, l'un avec 3 réseaux migrés en 4G/5G et un réseau maintenu en 2G/3G, et l'autre où les quatre réseaux ont été migrés en 4G/5G à une date appelée Tm4. La comparaison est réalisée à partir de la date Tm4 pour les mêmes services, soient les services voix et M2M qui utilisaient la 2G/3G avant les différentes migrations.

Une analyse comparative est développée en Annexe de ce document. Dans cet exemple, sachant qu'il est difficile de prévoir le comportement exact des différents utilisateurs des 3 réseaux qui vont migrer en 4G/5G et dont les terminaux (smartphones, feature phone, IoT) ne supportent pas un réseau sans 2G/3G, deux cas ont été considérés pour le scénario avec le réseau unique 2G/3G :

1. Tous ces utilisateurs décident de rester sur les réseaux allant migrer vers la 4G/5G, et leurs différents terminaux doivent être migrés en 4G/5G.
2. Tous ces utilisateurs décident de migrer vers le réseau unique 2G-3G et conservent leurs terminaux.

Dans le premier cas, l'existence du réseau unique conduit aux mêmes conclusions que le scénario de référence de la note détaillée.

Dans le deuxième cas, le réseau unique permet d'éviter 4 x Ic (« Ic » : Impact carbone) à la date Tm4 ce qui multiplie par 4 les points d'équilibre identifiés dans le scénario de référence de la note détaillée (en tenant notamment compte du fait que la consommation du réseau unique 2G/3G est très similaire à la consommation d'un réseau ne portant le trafic que d'un opérateur). Par ailleurs, au-delà du point d'équilibre atteint, le réseau 2G/3G a un impact carbone négatif équivalent à la quasi-totalité de sa consommation électrique.

Cette analyse ne préjuge pas de la durée pendant laquelle ce réseau unique 2G/3G pourrait être maintenu. En effet, ce réseau 2G/3G ne pourra être maintenu indéfiniment pour des raisons opérationnelles et industrielles. Par ailleurs, l'annonce au marché du maintien d'un réseau 2G/3G pourrait avoir entre temps induit des achats d'objets 2G/3G après les différentes dates Ta d'annonces d'arrêt de la 2G/3G, qui ne seraient pas produites dans le cas où tous les réseaux auraient arrêté la 2G/3G. Tous ces achats d'objets 2G/3G génèreraient alors un impact carbone supplémentaire⁴ à l'arrêt du réseau 2G/3G maintenu, en plus de l'équivalent de la consommation

³ <https://www.fftelecoms.org/app/uploads/2020/12/20201215-FFT-Etude-Economie-des-Telecoms-2020-vSynthese.pdf>

⁴ A déterminer par calcul d'amortissement à la date d'arrêt du réseau 2G/3G en fonction de la durée de vie des différents objets et du moment où ils ont été achetés.

électrique de ce réseau pendant son existence. **L'impact carbone « Ic » évité à la date Tm4 ne peut donc être pris dans sa totalité.**

En conclusion, l'alternative du réseau 2G/3G maintenu apporterait une augmentation de la consommation énergétique ainsi que de l'impact environnemental par rapport au scénario où les 4 réseaux 2G/3G seraient migrés en 4G/5G.

Par ailleurs, le maintien d'un seul réseau 2G/3G sur le territoire soulève de nombreux problèmes, aussi bien de faisabilité technique et opérationnelle, de QoS pour les utilisateurs, mais également réglementaires (notamment s'il était contraire au principe de neutralité technologique) et environnementaux.

En effet il paraît peu réaliste pour des raisons opérationnelles pour les opérateurs et industrielles pour les fournisseurs de maintenir indéfiniment un réseau 2G/3G en France, et cela d'autant plus que les réseaux 2G/3G vont disparaître les uns après les autres au niveau mondial et en Europe⁵ : dans l'hypothèse où il serait décidé de maintenir un tel réseau 2G/3G longtemps, son ou ses opérateur(s) et fournisseur(s) d'équipements réseaux et de terminaux seraient confrontés à une augmentation des coûts et à la raréfaction des expertises pour ces technologies.

Enfin, d'un point de vue technique, ce réseau 2G/3G irait à l'encontre de la bonne utilisation des fréquences puisqu'il monopoliserait du spectre pour un usage peu efficace.

15

La frontière de référence étendue de l'étude n'intègre pas certains terminaux utilisant la technologie 2G/3G (comme les téléalarmes, les modules *eCall* équipant certaines voitures, les ascenseurs, etc.). Pourquoi ne pas les avoir pris en compte dans la borne supérieure de l'impact ?

Bien que bon nombre d'objets communicants utilisant la technologie 2G/3G seraient impactés par la migration, il n'est pas pour autant correct d'inclure systématiquement tous les objets dans le cadre de l'étude. Les terminaux considérés dans le cadre de l'étude sont ceux qui font partie du périmètre défini dans le cadre des TIC, spécifié par la version en vigueur de la Recommandation ITU-T L.1450. Par ailleurs, la recommandation met en garde de ne pas intégrer dans les TIC tout ce qui possède de la connectivité (comme voitures et réfrigérateurs), car autrement cela rendrait la définition des TIC vide de sens et induisant un risque du double comptage avec d'autres secteurs (par exemple, secteur de transport et mobilité pour le cas de la voiture connectée). C'est à cet effet, que le choix du Comité sur la définition d'un périmètre de référence étendue de l'étude, s'est concentré à ne retenir qu'une sélection d'objet IoT, sur la base de la Recommandation et éclairé par l'avis du Comité d'experts sur la mesure.

En conclusion, certains objets IoT (comme les téléalarmes, les modules *eCall* équipant voitures, les ascenseurs, etc.) indépendamment de leur volume, n'étant pas considérés par la Recommandation ITU L.1450 comme faisant partie des TIC, ne sont pas pris en compte dans l'étude.

16

Pourquoi l'étude n'a pas considéré l'option d'une mise en veille des équipements réseaux 2G/3G comme possibilité pour réaliser des gains énergétiques dans la phase de transition jusqu'à l'extinction effective de ces réseaux ?

Il est considéré qu'à la date Tm, les opérateurs n'auront plus qu'un seul RRU 2G/3G par cellule radio avec la bande de fréquences 900 MHz, à configuration minimum (1 seul TRX 2G ; une seule porteuse 3G) qui porteront l'ensemble des services (Voix, IoT) pour les terminaux ne supportant que les technologies 2G-3G (et pas 4G-5G).

⁵ <https://onomondo.com/blog/2g-3g-sunset/>

Différentes fonctions de veille pour de la 2G-3G sont basées sur des coupures de cellules, coupures de TRX pour la 2G, coupure de porteuse pour la 3G, ou endormissement de l'ensemble du RRU suivant différents critères comme la charge. Or, avec une seule bande de fréquences utilisée (900 MHz), ces fonctions de veille ne sont pas utilisables et donc ne sont pas compatibles avec le cas 2G-3G étudié.

Seules quelques fonctions de veille 2G-3G plus spécifiques apparaissent utilisables dans le cas étudié dans la note, mais les économies d'énergie apparaissent trop faibles pour être prises en compte dans le cas de base étudié⁶.

17

Comment l'étude a-t-elle pris en considération l'impact de l'extinction sur les terminaux (téléphones et objets connectés) opérés par les opérateurs mobiles virtuels considérant leur positionnement spécifique et leur part de marché non négligeable (aux alentours de 10% toutes technologies confondues) ?

L'étude a fait l'hypothèse que le parc des opérateurs mobiles virtuels (MVNO) est rattaché au parc de leurs opérateurs de réseau hôte. Au regard des annonces de calendrier d'extinction faites par les opérateurs français accueillant des MVNO, et considérant le délai laissé jusqu'à la date effective de l'extinction, cette hypothèse est par conséquent raisonnable.

18

Pour quelle raison avez-vous considéré uniquement le module de connectivité dans la comptabilisation de l'impact carbone des objets connectés 2G/3G dans le cadre du périmètre de référence étendu et non la totalité de l'objet ? et comment justifier votre choix de la valeur retenue dans l'étude concernant l'impact carbone embarqué de ces objets ?

Comme indiqué dans la note détaillée, l'étude considère les terminaux faisant partie du secteur des TIC en se référant à la Recommandation ITU-T L. 1450. Cette Recommandation n'est pas explicite et prescriptive sur le périmètre de comptabilisation de l'impact de l'IoT ; ceci est due à la diversité des profils de composition des objets d'une part et la difficulté de définir une frontière nette entre la part relative à la connectivité et les autres fonctionnalités/modules embarqués dans l'objet d'autre part. Par conséquent, pour évaluer l'impact carbone embarqué des objets, il est proposé dans l'étude de se limiter à la part de la connectivité de l'objet : cette part inclue le modem et tous les autres éléments supportant la fonctionnalité de connectivité de l'objet (ex. antennes, cartes SIM etc.). Un tel choix, bien qu'il suppose un périmètre a priori restrictif, est en cohérence avec la caractérisation des TIC (dont l'objet principal est connectivité) et permet de limiter les incertitudes face au manque de données pour caractériser l'objet dans son ensemble.

L'étude a retenu une valeur de l'impact carbone embarqué basée sur la publication de T. Pirson et D. Bol⁷ (2021), en raison de la transparence sur la modélisation et les données sous-jacentes, complémenté par un échange avec T. Pirson. Il est à noter, à la connaissance du Comité, qu'il y a peu de données disponibles sur l'impact carbone IoT. En somme, le choix de la valeur retenue dans l'étude semblait se conformer à la démarche du Comité de chercher à limiter au maximum l'incertitude sur les données utilisées tout en privilégiant la transparence.

⁶ Quelques pourcents d'après un fournisseur membre du Comité, et moins de 10% d'après un opérateur également membre du Comité. On peut également noter que l'étude de sensibilité réalisée sur les valeurs de consommation des stations de base prend très largement en compte ce type de variation de consommation.

⁷ « Assessing the embodied carbon footprint of IoT edge devices with a bottom-up life-cycle approach », 2021, Thibault Pirson et David Bol.

Annexe à la Question n°14

Etude de cas du maintien d'un réseau unique 2G/3G

Cette annexe (faisant référence à la Question n°14) examine l'impact environnemental du maintien d'un seul réseau 2G/3G par rapport à un scénario d'extinction de l'ensemble des réseaux 2G/3G disponibles et la migration de leurs services vers la 4G/5G. Il est à noter que le maintien d'un réseau unique 2G/3G pourrait envoyer un signal encourageant l'achat de nouveaux équipements terminaux (téléphones et IoT) 2G/3G non compatibles 4G/5G. Cet effet desservant l'impact environnemental associé au réseau maintenu 2G/3G, est difficile à appréhender et il n'est pas pris en compte dans cette évaluation.

L'analyse développée dans cette annexe fait abstraction de nombreuses considérations notamment : la date exacte à partir de laquelle le réseau unique maintenu entrerait en service et la durée (nécessairement limitée) pendant laquelle ce réseau serait maintenu. La non prise en compte de l'extinction inévitable de ce réseau unique 2G/3G minimise le coût carbone associé à ce scénario. L'analyse n'entre également pas dans les détails des aspects techniques, économiques ou encore juridiques de mise en œuvre d'un tel réseau unique.

Description des scénarii de comparaison

Afin d'évaluer les impacts environnementaux du maintien d'un seul réseau 2G-3G, et avec une approche méthodologique analogue déjà décrite dans la note détaillée, on peut par exemple comparer les deux scénarios suivants :

- **Un scénario de référence** : où les 4 réseaux 2G/3G ont migré vers la 4G/5G à une date appelée Tm4.
- **Un scénario avec un réseau unique 2G/3G** : où trois réseaux 2G/3G ont migré en 4G/5G à une date appelée Tm4 alors qu'un réseau unique 2G/3G est maintenu.

La comparaison est réalisée à partir de la date Tm4 pour les mêmes services, soient les services voix et M2M qui utilisaient la 2G/3G avant les différentes migrations.

Par différence entre les deux scénarios, il reste la différence entre la consommation électrique des services restants voix et M2M sur le réseau 2G/3G maintenu et la consommation électrique d'un réseau 4G/5G pour ses services Voix et M2M⁸ provenant de sa migration précédemment réalisée.

Dans le cadre du scénario où un réseau unique 2G/3G serait maintenu, il est difficile de prévoir le comportement exact des différents utilisateurs des 3 réseaux qui vont migrer en 4G/5G et dont les terminaux (smartphones, feature phone, IoT) ne supportent pas un réseau sans 2G/3G.

Afin d'appréhender le comportement de ces utilisateurs sur les résultats de cette étude de cas, deux variantes du scénario avec réseau unique 2G/3G ont été considérées :

- **Cas 1** : tous ces utilisateurs décident de rester sur les réseaux allant migrer vers la 4G/5G, et leurs différents terminaux doivent être migrés en 4G/5G ; on se retrouve là dans une situation

⁸ Avec la même approche méthodologique que dans la note détaillée dont la règle d'allocation pour les parties non variables en fonction de la charge de la consommation électrique des stations de base 4G-5G.

analogue au schéma déjà analysé dans la note détaillée. Ainsi, dans cette variante, chaque réseau ayant migré en 4G/5G conserve son trafic 2G/3G sur son réseau migré.

- **Cas 2** : tous ces utilisateurs décident de migrer vers le réseau unique 2G-3G et conservent leurs terminaux. Dans ce cas, le trafic mobile associé passe sur le réseau unique.

Développement mathématique et résultats de l'évaluation

Dans ce qui suit, les 2 scénarios et leurs variantes sont traduits mathématiquement en reprenant les hypothèses et notations utilisées dans la note détaillée.

Scénario de référence (tous les réseaux sont passés en 4G/5G)

A partir de la date T_{m4} , les réseaux 4G/5G consomment collectivement $(4 \times A)$ kWh où A , la consommation quotidienne d'un réseau 4G/5G ayant accueilli du trafic précédemment en 2G/3G, est égale à : $24 * (a_{45} * M * \text{Trafic-voixMax}/\text{CapacitéMaxVoix}_{45} + K * b_{45}) * \text{Nb_BS}$ (« Consommation-BS₄₅ » dans la note détaillée multipliée par le nombre de stations de base à la date T_m).

Ces réseaux ont un impact carbone collectif égal à $(4 * I_c)$ du fait du remplacement des terminaux / IoT ne supportant pas la 4G/5G à la date T_m .

Scénario avec réseau unique 2G/3G (cas 1)

A partir de la date T_{m4} , les 3 réseaux 4G/5G ayant accueilli du trafic précédemment en 2G/3G consomment collectivement $(3 \times A)$ kWh quotidiennement.

Ces réseaux ont un impact carbone collectif égal à $(3 * I_c)$ du fait du remplacement des terminaux / IoT ne supportant pas la 4G/5G à la date T_m .

Le réseau 2G/3G qui subsiste consomme quant à lui B kWh quotidiennement avec B égal à : $24 (a_{23} * M * \text{Trafic-voixMax}/\text{CapacitéMaxVoix}_{23} + b_{23}) * \text{Nb_BS}$ (« Consommation-BS₂₃ » dans la note détaillée multipliée par le nombre de station de base à la date T_m).

En faisant abstraction de l'extinction inévitable future de ce réseau 2G/3G, il n'y a pas d'impact I_c .

L'écart de consommation électrique quotidienne entre le scénario avec réseau unique (cas 1) et le scénario de référence est égal à : $(3 \times A + B) - (4 \times A) = B - A$.

La différence de consommation entre un réseau 2G/3G et un réseau 4G/5G ayant repris le trafic voix précédemment en 2G/3G (« $B - A$ ») tout en étant associé à un remplacement de terminaux (« I_c ») est le scénario de l'étude principale. Les mêmes conclusions s'appliquent donc, à la différence que le I_c évité ne peut être pris dans sa totalité puisqu'il y aura un I_c' (pouvant être supérieur à I_c) lors de l'inévitable extinction future du réseau unique 2G/3G.

Scénario avec réseau unique 2G/3G (cas 2)

Dans ce cas, il n'y a pas de trafic provenant des services 2G/3G sur les réseaux 4G/5G, par conséquent, la consommation 4G/5G est nulle pour ces services. Par ailleurs, il n'y a pas, à la date T_{m4} , d'impact carbone de terminaux ne supportant pas 4G/5G, car ces terminaux sont maintenant sur le réseau unique.

Un réseau 2G/3G consomme quotidiennement B kWh avec B égal à : $24 * (a_{23} * M * \text{Trafic-voixMax}/\text{CapacitéMaxVoix}_{23} + b_{23}) * \text{Nb_BS}$ (« Consommation-BS₂₃ » dans la note détaillée multipliée par le nombre de station de base à la date T_m).

Le réseau unique consomme quotidiennement (sur la base des services 2G/3G migrant tous sur le réseau unique et sans nouveaux terminaux arrivant sur ce réseau) B' kWh avec B' égal à :

24 $(a_{23} * M * 4 * \text{Trafic-voixMax}/\text{CapacitéMaxVoix}_{23} + b_{23}) * \text{Nb_BS}$ (« Consommation-BS₄₅ » dans la note détaillée multipliée par le nombre de station de base à la date Tm)

Or :

$$(B' - B)/B' = (3 * a_{23} * M * \text{Trafic-voixMax}/\text{CapacitéMaxVoix}_{23}) / (a_{23} * M * 4 * \text{Trafic-voixMax}/\text{CapacitéMaxVoix}_{23} + b_{23}) = (3 * 540 * 44\% * 1,5/152,4) / (540 * 44\% * 4 * 1,5/152,4 + 585) = 1,2\%.$$

Le réseau unique 2G/3G accueillant l'ensemble du trafic 2G/3G des 4 réseaux 2G/3G avant la date Tm4 consomme à 1,2% près, autant qu'un réseau 2G/3G supportant le trafic 2G/3G d'un seul opérateur.

Le surplus de consommation électrique quotidienne entre le scénario avec réseau unique (cas 2) et le scénario de référence est égal à :

$$(B' - 4 * A) / (4 * A) = B * 101,2\% / (4 * A) - 1 = 14,10 * 101,2\% / (4 * 0,08) - 1 = 4359\%$$

Le réseau 2G/3G maintenu permet d'éviter (4*Ic) à la date Tm4 ce qui multiplie par 4 les points d'équilibre identifiés dans le scénario de référence de la note détaillée (Section 2.3.9). Ce gain ne peut cependant être pris dans sa totalité puisqu'il y aura un Ic' (pouvant être supérieur à Ic du fait du possible effet de l'annonce du maintien d'un réseau unique 2G/3G sur l'achat de nouveaux terminaux uniquement 2G/3G) lors de l'inévitable extinction du réseau unique 2G/3G.