

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

Rapport détaillé

Comité d'experts techniques sur les réseaux mobiles

Septembre 2023

AVANT-PROPOS

Le Comité d'experts technique sur les réseaux mobiles a été créé par l'Arcep en 2018. Composé d'experts techniques travaillant sur un horizon à long terme, le Comité peut fournir une recommandation/un aperçu technique indépendant permettant de partager des points de vue et de construire un consensus sectoriel sur toute question technique relative aux réseaux et technologies mobiles. Présidé par Catherine Mancini de l'entreprise NOKIA, le secrétariat et la gestion du Comité sont assurés par l'Arcep.

Les publications du Comité d'experts techniques sur les réseaux mobiles

Intitulé de l'étude	Date de publication
Rapport du comité d'experts techniques sur les enjeux de coexistence dans les bandes 3,4 - 3,8 GHz	05/2019
Evaluation de la consommation énergétique d'un déploiement 4G vs 5G	01/2022
Evaluation de l'impact carbone de l'arrêt des réseaux 2G-3G et la migration de leurs services vers la 4G/5G	09/2023

Table des matières

1. Objectif et cadrage de l'étude	5
2. Etude de l'impact carbone du remplacement des réseaux 2G-3G	6
2.1. Introduction	6
2.2. Méthodologie et hypothèses	7
2.2.1. Cadre méthodologique.....	7
2.2.2. Méthodologie	8
2.2.3. Hypothèses.....	10
2.3. Résultats et conclusions	11
2.3.1. Introduction.....	11
2.3.2. Détermination de la différence des consommations électriques d'une station de base 2G-3G avec une station de base 4G/5G	11
2.3.3. Evaluation du trafic Erlang voix à l'heure la plus chargée.....	12
2.3.4. Evaluation du nombre de stations de base 900 MHz à la date Tm	14
2.3.5. Evaluation numérique de la différence des consommations électriques des stations de base 2G-3G avec les stations de base 4G/5G dans la bande 900 MHz	16
2.3.6. Cas où une autre bande cible basse serait utilisée pour les technologies 4G/5G	18
2.3.7. Conclusions sur la partie réseau.....	19
2.3.8. Prise en compte des « biens de l'utilisateur final des TIC » dans les résultats	19
2.3.8.1. Le cas des téléphones mobiles et smartphones.....	20
2.3.8.2. Le cas des objets connectés M2M.....	24
2.3.9. Résultat des évaluations sur l'ensemble de la frontière de référence et la frontière de référence étendue (cas de base).....	25
2.3.10. Conclusions sur les résultats des évaluations sur l'ensemble des deux frontières.....	28
3. Annexes A : Calcul du poids énergétique des réseaux 2G-3G	28
3.1. Méthodologie et hypothèses	28
3.1.1. Méthodologie	28
3.1.2. Hypothèses.....	29
3.1.3. Répartition des sites d'émission par technologie/bande.....	30
3.1.4. Configuration de stations de base et consommation énergétique des équipements radio	31
3.1.5. Calcul du poids énergétique à horizon 2025.....	32
3.2. Résultats	32
4. Annexe B : Impact carbone du remplacement des réseaux 2G-3G	33
4.1. Intensité carbone/mix énergétique	33

4.2. Frontière des systèmes étudiés et règles d'exclusions	34
4.2.1. Frontière de référence des systèmes étudiés	34
4.2.2. Règles d'exclusion et extension de la frontière de référence	36
4.2.3. Synthèse des exclusions dans le cadre de l'étude.....	39
4.2.4. Considérations sur l'appréciation des potentiels effets rebonds dues à l'extinction des réseaux 2G-3G	41
4.3. Impact carbone embarqué des biens de l'utilisateur final des TIC	44
4.3.1. Données d'impact carbone considérés pour les terminaux téléphoniques.....	44
4.3.2. Données d'impact carbone considérés pour les objets connectés IoT.....	44
4.3.3. Calcul du cout carbone des terminaux avec amortissement	46
4.4. Détermination de la distribution des téléphones et IoT sur la base de leur cycle de vie ..	49
4.4.1. Détermination de la distribution des smartphones et de ces téléphones restants sur la base de leur cycle de vie.....	49
4.4.2. Détermination de la distribution des feature phones et de ces téléphones restants sur la base de leur cycle de vie.....	55
4.4.3. Cas de l'IoT	58
4.5. Etude de sensibilité	60
4.5.1. Description des cas de l'étude de sensibilité	62
4.5.2. Quelques conclusions intéressantes sur l'étude sensibilité réalisée	69
4.6. Prise en compte de la recommandation ITU-T L.1410	70
4.6.1. Considération de conformité relative à l'étude comparative entre services ICT.....	70
4.6.2. Analyse de la transparence et la qualification des données	75
4.7. Eléments explicatifs de la règle d'allocation pour la consommation de la 4G/5G	84
5. Annexe C : Glossaire	86
6. Annexe D : Références et bibliographie	87
7. Annexe E : Composition du Comité d'experts	89

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

Rapport détaillé de l'étude

1. Objectif et cadrage de l'étude

Le niveau de couverture atteint aujourd'hui par la 4G – en passe de rattraper ceux de la 2G et de la 3G¹ – ainsi que la croissance continue du parc de terminaux compatibles avec les services 4G pose la question de la pertinence du maintien des réseaux 2G et 3G sur le territoire. Aussi, le besoin croissant en données mobiles portées principalement par la 4G et par la 5G peut justifier la réutilisation des ressources fréquentielles allouées actuellement aux réseaux 2G et 3G à des technologies plus récentes et spectralement plus efficaces (4G/5G).

L'extinction de la technologie 2G-3G est un choix qui relève de la stratégie de chaque opérateur prenant en compte des considérations multiples telles que les contraintes opérationnelles, des considérations techniques, la stratégie marché, le maintien des compétences, etc. Il faut souligner en particulier que le mix de technologies complexifie l'exploitation du réseau, et conserver les connaissances pour gérer et optimiser des technologies anciennes est une gageure alors que la complexité des réseaux 4G et 5G ne cesse de croître.

Trois opérateurs de réseaux mobiles en France Métropolitaine ont déjà communiqué sur le calendrier d'extinction de leurs réseaux 2G-3G. Il s'agit d'un mouvement mondial vers des technologies plus récentes et efficaces spectralement et énergétiquement, mieux adaptées aux usages actuels et futurs des clients des réseaux mobiles. Le GSA a identifié 142 opérateurs² ayant annoncé la fermeture prochaine des réseaux 2G et/ou 3G, ou ayant déjà éteint ceux-ci.

L'enjeu environnemental est également un élément important de cette décision. Le débat public s'est d'ailleurs déjà emparé du sujet.

Le comité d'experts techniques mobile, installé par l'Arcep en octobre 2018, a initié des travaux techniques pour apprécier l'empreinte carbone des réseaux 2G et 3G et la migration de leurs services vers la 4G/5G. Le Comité rassemble des experts représentant les opérateurs de réseaux mobiles, des équipementiers, ainsi que des participants issus du monde académique et de l'ANFR. Sa présidence est assurée par Catherine Mancini, et son secrétariat par les services de l'Arcep. La composition du comité est décrite en *Annexe E : Composition du Comité d'experts* de ce document.

La présente étude constitue le livrable de ces travaux. Destinée aux acteurs publics notamment, elle vise à apporter des éléments qualitatifs et quantitatifs quant à l'enjeu environnemental de type changement climatique de l'extinction des réseaux 2G et 3G.

L'étude du poids énergétique de ces réseaux permet de mesurer l'ampleur de l'enjeu énergétique et de poser les éléments d'une première analyse.

¹ Lien vers les statistiques de couverture Mon Réseau Mobile de l'Arcep: <https://monreseau-mobile.arcep.fr/>

² <https://gsacom.com/paper/2g-3g-switch-off-october-2022-summary/>

L'extinction des réseaux 2G et 3G et la migration de leurs services auront un impact énergétique et matériel qui seront quantifiés : le cas de l'obsolescence possible d'éléments matériels du réseau et des terminaux faisant partie du secteur des Technologies de l'Information et des Communications (TIC)³ est également étudié.

Cette étude ne vise pas à se substituer à une étude précise qu'un opérateur réaliserait dans le cadre de son réseau spécifique, mais bien à évaluer l'impact carbone d'une telle migration.

Cette note est accompagnée d'un document FAQ reprenant les questions fréquemment posées sur l'étude.

Tous commentaires sur cette note sont bienvenus à l'adresse mail ComiteExpertsMobile@arcep.fr d'ici 30/12/2023.

2. Etude de l'impact carbone du remplacement des réseaux 2G-3G

2.1. Introduction

En première approche du problème, l'étude a examiné la part de la consommation énergétique de la 2G-3G dans le réseau global des opérateurs mobiles à travers deux approches complémentaires permettant ainsi d'aboutir à une fourchette d'estimation et de dégager des tendances : une approche dite « générique » considérant un profil d'opérateur générique moyen avec une répartition moyenne des sites mobiles de l'ensemble des opérateurs et une approche dite « spécifique » sur la base de données primaires issues d'un opérateur membre du Comité.

Afin de cadrer l'évaluation dans un contexte temporel plus réaliste d'extinction, le poids des réseaux 2G et 3G est évalué, selon les deux approches, à date et à horizon 2025 considérant ainsi les obligations réglementaires prévues à cette échéance⁴.

La description détaillée des hypothèses et le développement calculatoire pour chacune des deux approches sont explicités en [Annexes A : Calcul du poids énergétique des réseaux 2G-3G](#) de la note.

Les différents résultats obtenus à travers les deux approches constituent différents faisceaux d'indices indiquant que les réseaux 2G et 3G portent **une part non négligeable de la consommation globale des réseaux**. En effet, le poids énergétique des réseaux 2G et 3G se situe aujourd'hui entre 21% et 33% de l'ensemble des stations de base des réseaux, et pourrait constituer environ 17% à horizon 2025 selon les hypothèses considérées.

Cette part de la consommation, loin d'être marginale, amène à réfléchir au gain que l'on pourrait attendre d'une extinction de ces réseaux.

Mais, comme la 2G-3G permet des services comme la voix et le M2M, il n'est pas possible de couper purement et simplement ces technologies car il est nécessaire d'assurer la pérennité de ces services, qui d'une façon alternative pourraient être portés par des technologies 4G/5G. Ce basculement vers les technologies 4G/5G ne pourrait être réalisé que dans un futur moyen ou long terme à cause des contraintes opérationnelles et commerciales impliquées par une telle migration.

³ Au sens de la Recommandation ITU-T L.1450 « Methodologies for the assessment of the environmental impact of the information and communication technology sector » (09/2018)

⁴ https://www.arcep.fr/fileadmin/user_upload/grands_dossiers/5G/procedure-attribution-bande-3_5GHz-obligations.pdf

Ainsi, dans le développement qui suit, l'étude évalue l'impact environnemental de type changement climatique de l'extinction des technologies 2G et 3G, et de la migration de leurs services vers les technologies 4G/5G.

La note est développée avec d'une part deux chapitres principaux décrivant la méthodologie et hypothèses utilisées, puis les résultats et conclusions, et d'autre part [Annexe B : Impact carbone du remplacement des réseaux 2G-3G](#) détaillant différents éléments repris dans ces deux chapitres.

2.2. Méthodologie et hypothèses

2.2.1. Cadre méthodologique

La méthodologie va reposer sur la comparaison de deux scénarios :

- Un scénario de référence avec de la 2G et 3G
- Un scénario de migration avec le remplacement de la 2G et la 3G par de la 4G/5G.

Différentes considérations permettent d'appréhender comment définir ces scénarios :

- La 2G n'utilise à date que la bande 900 MHz. La bande 2,1 GHz est en train d'être migrée par les différents opérateurs mobiles vers de la 4G ou 5G, avec de la 3G seulement présente dans la bande 900 MHz. L'hypothèse de l'étude est donc que l'ensemble de la 2G et 3G n'utilisent plus que des stations de base dans la bande 900 MHz.
- La 2G et 3G permettent essentiellement des services voix et M2M. Une autre hypothèse simplificatrice est que l'étude doit se focaliser sur ces deux services.
- Dans le scénario de migration vers la 4G/5G, les services utilisant encore la 2G-3G à la date T_m sont portés par une fréquence basse. Une bande basse est nécessaire afin d'obtenir une bonne couverture des services voix et M2M qui utilisaient auparavant la bande 900 MHz avec les technologies 2G-3G.
- Ainsi, et afin de comparer simplement les deux scénarios, il est supposé dans une première option que l'ensemble du trafic voix et M2M utilisant les technologies 2G et 3G reste sur la fréquence 900 MHz dans le scénario de migration. Une autre option étudiée est le cas où tous ces services utilisent une autre bande de fréquences comme la bande 700 MHz dans le cas du scénario de migration.

La méthodologie repose sur une évaluation en différentiel d'un scénario de référence et d'un scénario de migration :

- Scénario de référence : Les services voix et M2M utilisant un réseau mobile 2G et 3G dit de référence⁵ dans la bande de fréquences 900 MHz.
- Scénario de migration : Les mêmes services voix et M2M utilisant un réseau mobile 4G/5G dont l'ensemble des équipements du réseau de référence avec de la 2G et 3G ont été migrés en 4G/5G à la date T_m .

Il faut noter que la date T_m correspond à partir du moment où les 2 technologies 2G et 3G ont été migrées en 4G/5G dans le cas du scénario de migration. Cela ne signifie pas que les deux technologies ont été migrées en même temps, sachant que cette étude n'évalue pas la situation intermédiaire avant la date T_m pendant laquelle une seule technologie (2G ou 3G) aurait été migrée.

⁵ Le réseau de référence est défini dans le [chapitre 2.2.3](#)

Le scénario de migration est comparé avec le scénario de référence pour le réseau mobile en France Métropolitaine de l'opérateur de référence, sur une durée d'une année.

La migration considérée consiste à faire porter les services utilisant une ou plusieurs technologies anciennes par de la 4G/5G, c'est-à-dire essentiellement de la voix et du M2M.

Les deux cas suivants ont été étudiés pour le scénario de migration :

- Les services utilisant encore la 2G-3G à la date Tm sont portés sur la bande 900 MHz en 4G/5G.
- Ces mêmes services sont portés en 4G/5G sur une autre bande basse⁶ comme par exemple la bande 700 MHz.

Les différentes étapes suivantes du cycle de vie sont prises en compte dans l'analyse comparative :

- Extraction de matières premières, production et distribution.
- Utilisation : consommation électrique des différents équipements réseaux et certains serveurs du centre de données (ex. IMS)

La phase de fin de vie des équipements n'est pas évaluée (sauf pour les smartphones).

L'ensemble des équipements considérés dans l'étude fait partie du secteur des Technologies de l'Information et des Communications (TIC) au sens de la Recommandation ITU-T L.1450. La frontière précise des systèmes étudiés et règles d'exclusions de l'étude sont décrites dans le chapitre [4.2 Frontière des systèmes étudiés et règles d'exclusions](#).

2.2.2. Méthodologie

Dans le cas d'une analyse comparative, si l'objectif est d'évaluer la différence d'impact entre deux systèmes de produits, plutôt que l'impact total de chaque système de produits, les processus ou les données d'entrée/sortie peuvent être exclus s'ils sont identiques dans les deux systèmes de produits⁷ (dans le cas d'espèce, entre deux services TIC).

Le tableau ci-dessous synthétise, en parcourant le schéma fonctionnel de comparaison, les points de différence identifiés entre le scénario de référence et de migration, qui font l'objet d'évaluation dans le cadre de l'analyse comparative.

Tableau 1 – Points de différence entre le scénario de référence et de migration

Catégorie de produits	Equipement	Différences identifiées	Observations (exclusions, allocations etc.)
Centre de données	Plateforme de service IoT/M2M	Même plateforme : Pas d'évaluation nécessaire	
	Serveurs IMS (pour voix et SMS sur LTE)	A étudier sur la phase d'usage uniquement.	Impact négligé ⁸
Réseau	Cœur de réseau	Cœur de réseau circuit dans le cas du scénario de référence avec une configuration de qui pourrait être maintenue dans le scénario de référence ⁸	Impact négligé ⁸

⁶ Une bande basse est nécessaire afin d'obtenir une bonne ouverture des services voix et M2M qui utilisaient auparavant la bande 900 MHz avec les technologies 2G-3G.

⁷ Comme indiqué dans les généralités de la deuxième partie de la recommandation ITU-L 1410.

⁸ Se référer au Chapitre [Synthèse des exclusions dans le cadre de l'étude](#) de l'Annexe B pour plus de détails

	Réseau backbone	Même réseau : Pas d'évaluation nécessaire	
	Contrôleurs radio 2G-3G	Matériel supprimé dans le cas de la migration. Evaluation à considérer sur la phase usage uniquement	Impact négligé (en cohérence avec les règles de coupure ⁸)
	Réseau d'agrégation/collecte	Même réseau et même volume de trafic : Pas d'évaluation nécessaire	
	Sites radio 900 MHz (hors stations de base)	Mêmes composants : Pas d'évaluation nécessaire	
	Stations de base 900 MHz	A étudier sur la phase fabrication pour le scénario de migration si nouveau matériel déployé à Tm. Phase d'usage à étudier.	Il est supposé que l'ensemble des équipements dans le réseau sont déjà prêts pour supporter la 4G/5G (pas de nouveau matériel nécessaire). Règle d'allocation nécessaire pour considérer la quote-part des services voix/M2M dans l'impact de la phase d'usage des stations de base 900 MHz en 4G/5G
Téléphones mobiles	Smartphones non Volte	A étudier sur la phase de fabrication à la suite du remplacement anticipé des smartphones non compatibles Volte dans le scénario de migration	Prise en compte de la quote-part restante de la durée de vie du smartphone dans le cadre de l'amortissement de son impact carbone embarqué. Prise en compte du cas des smartphones reconditionnés
	Feature phone	A étudier sur la phase de fabrication à la suite du remplacement anticipé des feature phone par des téléphones compatibles Volte dans le scénario de migration	Prise en compte de la quote-part restante dans la durée de vie du feature phone dans le cadre de l'amortissement de son impact carbone embarqué.
Objets communicants	IoT cellulaire 2G-3G	A étudier sur la phase de fabrication à la suite du remplacement anticipé des modules IoT cellulaires exclusivement 2G-3G par des modules IoT compatibles 4G/5G dans le scénario de migration	Prise en compte de la quote-part restante dans la durée de vie du terminal IoT dans le cadre de l'amortissement de son impact carbone embarqué. Seul le module de connectivité (modem) de l'objet communicant est considéré dans l'évaluation.

Il est d'autre part important d'examiner pour chaque ensemble d'équipements du schéma fonctionnel de comparaison, si les services voix et M2M utilisent exclusivement l'ensemble d'équipements, ou si d'autres services l'utilisent également.

Dans ce dernier cas, l'ensemble des équipements est partagé entre plusieurs services, et une règle d'allocation doit être définie entre ces services⁹.

Dans le cas du scénario de référence 2G-3G, les services voix et M2M utilisent exclusivement les ensembles d'équipements à évaluer.

Par contre, dans le cas du scénario de migration, les stations de base 4G/5G sont également utilisées par le service de données, nécessitant de définir une règle d'allocation.

Le chapitre *Hypothèses* ainsi que *Annexe B : Impact carbone du remplacement des réseaux 2G-3G* décrivent précisément la règle d'allocation pour ces stations de base.

⁹ Voir chapitre 6.3.3.9 de la recommandation ITU-T L.1410 pour la procédure d'allocation pour les services ICT

Les données d'impact ACV des différents équipements à évaluer pour les deux scénarios vont être calculés sur la base des frontières et règles d'exclusions et des règles d'allocation, puis sommé pour chaque scénario.

2.2.3. Hypothèses

Le réseau de référence doit être défini précisément pour les ensembles des équipements retenus dans le schéma fonctionnel de comparaison :

- Le nombre de stations de base 900 MHz considéré dans le réseau de référence sera la moyenne du nombre de stations de base 900 MHz en France métropolitaine des réseaux 2G-3G, extrapolé à la date Tm (voir chapitre « évaluation du nombre de stations de base 900 MHz à la date Tm »).
- Il est considéré que l'opérateur va régulièrement moderniser et renouveler les stations de base 2G-3G 900 MHz, et qu'ainsi l'ensemble du matériel est déjà prêt pour supporter la 4G/5G à la date Tm¹⁰, c'est-à-dire supportant notamment le MIMO 2x2, et cela dans le cas des deux scénarios¹¹.
- L'autre cas de migration étudié des services considérés est l'utilisation d'une autre bande basse cible de fréquences (comme la bande 700 MHz) avec déjà de la 4G/5G.

Ainsi l'étape de fabrication n'est pas à évaluer pour la partie réseau dans le cas des deux scénarios.

Pour le trafic voix considéré dans l'étude depuis la date Tm, l'étude se base sur l'hypothèse suivante :

- Le volume de trafic voix est considéré comme constant pour les deux scénarios. Ce trafic est évalué en fonction du trafic voix connu à fin 2021 et d'un pourcentage de ce trafic restant sur 2G-3G à la date Tm (voir Chapitre [Evaluation du trafic Erlang voix à l'heure la plus chargée](#)).

Le trafic M2M/IoT dans un réseau mobile sera évalué afin de mieux cerner son impact sur cette étude.

Les stations de base 4G/5G 900 MHz sont partagées entre d'une part les services voix, M2M et d'autre part le service pour les données.

Ainsi, l'approche suivante va permettre de définir une règle d'allocation pour les stations de base 4G/5G:

- La consommation électrique d'une station de base 4G, 5G est constituée de la somme d'une partie fixe (alimentation de différents circuits électroniques des RRU émission des canaux communs dans les différents secteurs, et équipement BBU), et d'une partie variable proportionnelle à la charge de la station de base.
 - La partie variable de la consommation électrique qui provient du trafic du scénario de migration doit être entièrement conservée.
 - Par contre, la partie fixe de la consommation électrique doit être partagée entre les services voix/M2M et données car les ressources correspondantes (alimentation de circuits électroniques des RRU, émission des canaux communs, BBU) sont bien partagées : la règle d'allocation pourra ne prendre en compte qu'une partie de la partie fixe de la consommation électrique de la station de base pour le scénario de migration dans le cas de l'utilisation de la bande 900 MHz pour les services migrés (voir

¹⁰ 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.

¹¹ Dans le cas de la 2G-3G, il faut noter qu'il y a des impacts environnementaux supplémentaires pour le maintien en condition opérationnelle de ces technologies, comme le remplacement de parties de matériel obsolète d'équipements pour les contrôleurs radio 2G-3G (BSCs, RNCs) et leur maintenance.

chapitre *Résultats et conclusions* ainsi que *Annexe B : Impact carbone du remplacement des réseaux 2G-3G* pour des explications et illustrations détaillées).

2.3. Résultats et conclusions

2.3.1. Introduction

La différence des consommations électriques d'une station de base 2G-3G avec une station de base 4G/5G est d'abord déterminée avec un calcul littéral.

Cette différence dépend du trafic voix à l'heure chargée d'une station de base à la date T_m : ce trafic est ensuite évalué.

L'évaluation numérique est ensuite réalisée.

2.3.2. Détermination de la différence des consommations électriques d'une station de base 2G-3G avec une station de base 4G/5G

Le calcul ci-dessous détermine la différence entre la consommation électrique pendant une journée d'une station de base 2G-3G dans la bande 900 MHz avec une station de base 4G/5G utilisant la même bande de fréquences, et en utilisant la règle d'allocation.

Le trafic M2M/IoT est évalué entre 6 Mo et 24 Mo par jour par cellule en moyenne sur le réseau mobile¹², ce qui en fait un trafic négligeable à écouler par de la 4G/5G à l'heure chargée : seul le trafic voix est dimensionnant et considéré dans l'évaluation ci-dessous.

L'hypothèse est que la consommation électrique instantanée exprimée en kilowatt d'une station de base 2G-3G ou 4G/5G peut être approximée par une fonction affine de la forme $a*x + b$ (où x est la charge et a ainsi que b deux coefficients exprimés en kW).

La courbe suivante (Figure 1), représentative de la situation en France¹² fournit la charge normalisée (c-à-d. charge maximum = 100%) d'une station de base au cours de la journée pour la voix.

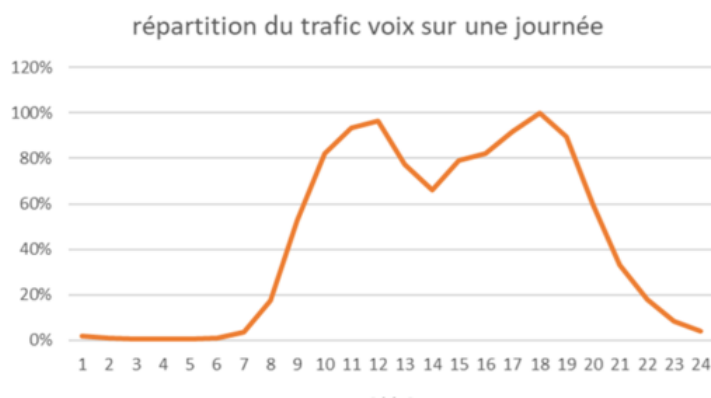


Figure 1 - Courbe typique de la répartition du trafic journalier voix

La moyenne de cette courbe normalisée est égale à 44%. L'heure la plus chargée représente 9,4% du trafic total de la journée.

¹² Sur la base d'informations fournies par un opérateur membre du Comité et d'un échange avec ses différents autres membres.

La consommation électrique instantanée (en kW) d'une station de base sera alors de la forme :

- Consommation (t) = a*L(t) + b, ou L est la fonction périodique de période 24h déduite de la courbe marron normalisée ci-dessus en la multipliant par la charge maximum (Charge BH) au moment des heures les plus chargées pour la voix.

Pour connaître la consommation totale de la station de base sur l'ensemble de la journée exprimée en kWh, il faudra donc intégrer sa consommation instantanée sur les 24 heures de la journée de la façon suivante :

$$\text{Consommation-BS (kWh)} = \int_{t=0}^{24} (a * L(t) + b) dt = a * \int_{t=0}^{24} L(t) dt + 24b = \mathbf{24 (a * \text{Moyenne (L)} + b)}$$

Avec Moyenne (L) = Charge-Max-Voix * M, avec M = Moyenne (courbe normalisée marron) = 44%

$$\mathbf{\text{Consommation-BS (kWh)} = 24 (a * M * \text{Charge-Max-Voix} + b)}$$

Pour la 2G-3G, on aura ainsi :

$$\mathbf{\text{Consommation-BS}_{23} \text{ (kWh)} = 24 (a_{23} * M * \text{Charge-Max-Voix}_{23} + b_{23})}$$

Et pour la 4G/5G avec ces mêmes services voix et M2M, on aura hors fonction d'allocation :

$$\mathbf{\text{Consommation-BS}_{45} \text{ (kWh)} = 24 (a_{45} * M * \text{Charge-Max-Voix}_{45} + b_{45})}$$

Soit Charge-Max la charge maximum considérée à l'heure chargée d'une station de base 4G/5G pour des services voix, M2M et données.

En considérant la fonction d'allocation, on aura alors :

$$\mathbf{\text{Consommation-alloc-BS}_{45} \text{ (kWh)} =}$$

$$\mathbf{24 (a_{45} * M * \text{Charge-Max-Voix}_{45} + b_{45} * \text{Charge-Max-Voix}_{45} / \text{Charge-Max})}$$

Soit Trafic-voixMax le trafic maximum de la voix écoulé à l'heure chargée par la station de base 2G-3G et 4G/5G, exprimé en Erlang. Ce trafic correspond au trafic voix restant sur la 2G/3G à la date Tm, et écoulé sur une station de base.

Charge-Max-Voix₂₃ = Trafic-voixMax / CapacitéMaxVoix₂₃, avec CapacitéMaxVoix₂₃ exprimé en Erlang

Charge-Max-Voix₄₅ = Trafic-voixMax / CapacitéMaxVoix₄₅, avec CapacitéMaxVoix₄₅ exprimé en Erlang

Pour la 2G-3G, on aura ainsi :

$$\mathbf{\text{Consommation-BS}_{23} \text{ (kWh)} = 24 (a_{23} * M * \text{Trafic-voixMax} / \text{CapacitéMaxVoix}_{23} + b_{23})}$$

En considérant la fonction d'allocation, on aura alors :

$$\mathbf{\text{Consommation-alloc-BS}_{45} \text{ (kWh)} = 24 (a_{45} * M * \text{Trafic-voixMax} / \text{CapacitéMaxVoix}_{45} + K * b_{45})}$$

Avec K = (Trafic-voixMax / CapacitéMaxVoix₄₅) / Charge-Max

K est le coefficient de la règle d'allocation de b₄₅.

2.3.3. Evaluation du trafic Erlang voix à l'heure la plus chargée

Afin de d'évaluer le trafic Erlang voix sur l'ensemble des réseaux mobiles en France, il est nécessaire de déterminer sur ces réseaux mobiles :

- Le trafic de communications vocales au départ des mobiles en France.

- Le trafic de communications vocales mobiles vers mobiles en France.
- Le trafic de communications vocales fixes vers mobiles en France.
- Le trafic pour les services vocaux au départ des mobiles en France.

C'est l'ensemble de ces communications vocales qu'il faut considérer afin de déterminer le trafic total en Erlang.

Le document de l'ARCEP [ARCEP – 2022] sur les services de communications électroniques en France permet de connaître ces différents trafics. Les chiffres de T4 2021 ont été retenus.

Trafic de la téléphonie mobile selon le mode de souscription (en millions de minutes)	T4 2020	T1 2021	T2 2021	T3 2021	T4 2021	Variation T421/T420
Abonnements et forfaits	53 571	52 881	52 610	48 174	50 624	-5,5%
Cartes prépayées	1 855	1 789	1 786	1 706	1 654	-10,9%
Trafic de communications vocales au départ des mobiles	55 426	54 671	54 396	49 880	52 278	-5,7%
dont communications mobiles en voix sur Wifi	1 792	1 920	1 855	1 747	2 153	20,2%

Figure 2 - Statistiques de trafic mobile selon le mode de souscription

Trafic de la téléphonie mobile par destination d'appel (en millions de minutes)	T4 2020	T1 2021	T2 2021	T3 2021	T4 2021	Variation T421/T420
Communications mobiles vers fixe national	7 908	7 548	7 170	6 386	6 612	-16,4%
Communications mobiles vers mobiles nationaux	45 635	45 329	45 375	41 133	43 725	-4,2%
Communications mobiles vers l'international	857	812	811	798	733	-14,4%
Roaming out *	1 027	981	1 040	1 562	1 209	17,7%
Trafics de communications au départ des mobiles	55 426	54 671	54 396	49 880	52 278	-5,7%

(*) Le "roaming out" correspond aux appels émis et reçus à l'étranger par les clients des opérateurs mobiles français.

Figure 3 - Statistiques de trafic mobile par destination de l'appel

Trafic de "Roaming in" des opérateurs mobiles	T4 2020	T1 2021	T2 2021	T3 2021	T4 2021	Variation T421/T420
Communications vocales (en millions de minutes)	1 226	1 237	1 275	1 610	1 333	8,8%
Trafic de SMS (en millions)	99	94	105	206	137	38,3%
Consommation de données (en teraoctets)	17 710	18 548	23 064	52 595	37 279	110,5%

Les chiffres en italique ont été modifiés par rapport à la publication précédente.

Figure 4 - Statistiques de trafic de l'itinérance entrante mobile

Le trafic de communications vocales au départ des mobiles sur les réseaux français est déterminé de la façon suivante sur la base des données des services de communications électroniques en France :

- Trafic de communications au départ des mobiles – voix sur WiFi – *roaming out* + *roaming in*

Communications vocales depuis les lignes fixes (en millions de minutes)	T4 2020	T1 2021	T2 2021	T3 2021	T4 2021	Variation T421/T420
Vers fixe national	8 094	7 813	7 074	5 690	6 029	-25,5%
Vers l'international	835	802	735	580	581	-30,3%
Vers les mobiles	3 714	3 655	3 511	3 006	2 983	-19,7%
Ensemble des communications depuis les lignes fixes	12 642	12 269	11 319	9 277	9 594	-24,1%

Figure 5 - Statistiques de trafic voix au départ du fixe

Trafic vers les services vocaux à valeur ajoutée (en millions de minutes)	T4 2020	T1 2021	T2 2021	T3 2021	T4 2021	Variation T421/T420
Au départ des clients des opérateurs fixes	605	617	567	552	543	-10,1%
Au départ des clients des opérateurs mobiles	692	670	664	661	704	1,8%
Trafic total	1 296	1 287	1 231	1 213	1 247	-3,8%

Figure 6 - Statistiques de trafic vers les services vocaux à valeur ajoutée

		Commentaires
Période sélectionnée	T4 2021	
Trafic de communications vocales au départ des mobiles (sur un trimestre; en millions de minutes)	50624	Valeur ARCEP
Au départ des mobiles, dont voix sur WIFI	2153	Valeur ARCEP
Dont roaming out	1209	Valeur ARCEP
Roaming in	1333	Valeur ARCEP
Trafic de communications vocales au départ des mobiles sur réseaux mobiles (sur un trimestre; en millions de minutes)	48595	Voix sur WIFI soustraite Roaming out soustrait Roaming in rajouté
Communication mobiles vers mobiles nationaux	43725	Valeur ARCEP
Communications fixes vers les mobiles	2983	Valeur ARCEP
Services vocaux à valeur ajoutée	704	Valeur ARCEP
Total trafic de communications vocales sur réseaux mobiles (sur un trimestre; en millions de minutes)	96007	Appels départ+Mobile2Mobile + fixes vers mobiles + services vocaux
Total trafic de communications vocales sur réseaux mobiles (sur une journée; en millions de minutes)	1052	On divise par le nombre de jours dans un trimestre
Total trafic de communications vocales sur réseaux mobiles (à l'heure la plus chargée; en millions de minutes)	99.16	On multiplie par la part de trafic à l'heure chargée
Nombre de communications voix en parallèle à l'heure la plus chargée sur l'ensemble des réseaux (en millions de communications) --> nombre de millions d'Erlang à l'heure chargée	1.65	Nombre de minutes de communication à l'heure chargée / 60

Figure 7 - Synthèse des statistiques de trafic mobile en France métropolitaine pour l'opérateur de référence

Pour le scénario de référence, Il est estimé qu'un trafic voix représentant 10% du trafic voix¹³ de fin 2021 restera sur 2G-3G à la date Tm. 20% du trafic voix restant sur 2G-3G est également étudié dans le cas d'une étude de sensibilité (voir chapitre *Evaluation numérique de la différence des consommations électriques des stations de base 2G-3G avec les stations de base 4G/5G dans la bande 900 MHz*).

Pour déterminer le trafic voix sur une station de base à la date Tm, il est nécessaire d'évaluer le nombre de stations de base à cette date (voir chapitre suivant).

2.3.4. Evaluation du nombre de stations de base 900 MHz à la date Tm

L'objectif de ce chapitre est d'évaluer le nombre de stations de bases 900 MHz à la date Tm.

Un historique de l'évolution du nombre de stations 900 MHz est décrit ci-dessous, afin de permettre de mieux appréhender l'évaluation recherchée.

Parmi les différents observatoires publiés par l'ANFR [ANFR - 2023], les nombres de stations de base GSM900 MHz et UMTS900 MHz au premier janvier de 2017 à 2022 ont été repris dans le tableau suivant :

Pour chaque opérateur, le nombre de stations de base 900 MHz est considéré comme étant égal à :

- Max (GSM900, UMTS 900)

¹³ Sur base de l'évaluation d'un opérateur membre du Comité et acceptée par consensus en son sein.

Tableau 2 - Statistiques des stations de base 900MHz par opérateur en France métropolitaine

	1/1/2017	1/1/2018	1/1/2019	1/1/2020	1/1/2021	1/1/2022
GSM 900 ORANGE	18181	18457	18871	18976	18961	19210
GSM900 SFR	17232	18379	19534	19563	19696	19954
GSM 900 BYT	12560	14893	17612	18838	19350	20013
GSM 900 FREE	0	0	0	0	0	0
TOTAL GSM 900	47973	51729	56017	57377	58007	59177
UMTS 900 ORANGE	13583	16738	18976	21781	24254	26645
UMTS 900 SFR	13254	16317	18629	19510	20655	21770
UMTS 900 BYT	8921	11933	15459	18650	20422	21660
UMTS FREE	8487	12082	14422	16961	19330	21572
TOTAL UMTS	44245	57070	67486	76902	84661	91647
Stations de base 900 MHz ORANGE	18181	18457	18976	21781	24254	26645
Stations de base 900 MHz SFR	17232	18379	19534	19563	20655	21770
Stations de base 900 MHz BYT	12560	14893	17612	18838	20422	21660
Stations de base 900 MHz FREE	8487	12082	14422	16961	19330	21572
TOTAL stations de base	56460	63811	70544	77143	84661	91647

Tableau 3 - Taux d'évolution de déploiement des stations de base 900MHz par opérateur

Augmentation par année	2017	2018	2019	2020	2021	raison géométrique-1 sur 5 ans	raison géométrique-1 sur 3 ans
Stations de base 900 MHz ORANGE	1.5%	2.8%	14.8%	11.4%	9.9%	7.9%	12.0%
Stations de base 900 MHz SFR	6.7%	6.3%	0.1%	5.6%	5.4%	4.8%	3.7%
Stations de base 900 MHz BYT	18.6%	18.3%	7.0%	8.4%	6.1%	11.5%	7.1%
Stations de base 900 MHz FREE	42.4%	19.4%	17.6%	14.0%	11.6%	20.5%	14.4%
TOTAL stations de base	13.0%	10.6%	9.4%	9.7%	8.3%	10.2%	9.1%
Rapport évolution année précédente		81.0%	88.7%	104.2%	84.7%		

En examinant ces différents chiffres, il est considéré qu'en 2022 et les années suivantes, le nombre de sites 900 MHz évolue essentiellement en fonction du nombre de nouveaux sites physiques radio créés, avec les hypothèses suivantes :

- Le pourcentage de nouveaux sites 900 MHz en 2022 tous opérateurs confondus est de 5%
- L'augmentation en pourcentage du nombre de sites d'une année à l'autre est égale à 80%¹⁴ à l'augmentation du nombre correspondant l'année précédente : ce nombre est appelé « rapport d'évolution ».

Année	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028
Augmentation par année	5.0%	4.0%	3.2%	2.6%	2.0%	1.6%	1.3%
Augmentation cumulée depuis 2021	5.0%	9.2%	12.7%	15.6%	17.9%	19.9%	21.5%

Figure 8 - Taux d'augmentation des sites 900 MHz à horizon 2028

¹⁴ Valeur choisie par les membres du Comité pour les années futures et correspondant à la fourchette basse du rapport d'évolution des années précédentes

Le tableau a été arrêté à 2028, car après avec ce modèle, l'augmentation serait de 1% environ en 2029, et moins ensuite, ce qui devient négligeable.

Ainsi, avec 91 647 sites 900 MHz en 2021 et le modèle utilisé, cela donne environ 110 000 sites 900 MHz tous opérateurs confondus à la date T_m ¹⁵ (soit 27 500 sites pour l'opérateur du réseau de référence modélisé).

2.3.5. Evaluation numérique de la différence des consommations électriques des stations de base 2G-3G avec les stations de base 4G/5G dans la bande 900 MHz

Le document « JRC Science for Policy Report » (voir [JRC – 2023]) fournit respectivement dans les tableaux 24 et 26, les consommations électriques d'une station de base GSM/EDGE et d'une station de base LTE dans les 3 états « Busy-load-state », « Medium-Load-State » et « Low-load-state ».

Le standard *ETSI ES 202 706-1 v.1.6.1* (voir [ETSI – 2018]) fournit respectivement dans les annexes B et D les paramètres de référence pour un système GSM/EGDE et LTE :

- Pour GSM :
 - le tableau B.1 indique que le « Low load » correspond à l'émission seulement du BCCH (canaux communs GSM) avec les autres TRX en mode « idle » ;
 - le tableau B.2 indique que le que le « Busy hour traffic » correspond à 50% du trafic maximum que la station de base peut écouler.
- Pour LTE :
 - La définition du « Low load » montrent que les signaux des canaux communs sont émis, mais qu'aucune donnée n'est transportée ;
 - La définition du « Busy hour load » montre que 50% des blocs de ressources radio (PRB) pour la donnée sont émis.

Ainsi dans les deux cas, le « Low load » correspond à une charge de 0%, et le « Busy hour load » correspond à une charge de 50%.

Soient **Conso-Low** et **Conso-busy** exprimées en Watt les consommations respectives de la station de base avec les charges « low load » et « busy load » telles qu'indiquées dans le document [JRC – 2023].

Avec le modèle affine utilisé¹⁶ :

$\text{ConsoBS}(x) = a \cdot x + b$ exprimé en W, avec « x » la charge de la station de base

$\text{ConsoBS}(0) = b = \text{Conso-Low}$

$\text{ConsoBS}(50\%) = \frac{1}{2} a + b = \frac{1}{2} a + \text{Conso-Low} = \text{Conso-busy}$

Pour déterminer les valeurs « a » et « b » recherchées on a donc :

- $b = \text{Conso-Low}$
- $a = 2 \cdot (\text{Conso-busy} - \text{Conso-Low})$

Les valeurs pour une puissance de "Radio Unit <= 200 W" sont utilisées.

¹⁵ Il est supposé que la date T_m la plus proche est 2028. Sachant que le nombre de sites 900 MHz ne devrait pas évoluer significativement après cette date de 2028, 27 500 sites 900 MHz pour l'opérateur de référence est applicable pour toute date T_m dans cette étude.

¹⁶ Comme par exemple expliqué dans la Recommandation L.1390 ([ITU – 2022]) à ce sujet.

Tableau 4 - Paramètres du modèle de consommation énergétique de la station de base 2G-3G et 4G/5G

2G/3G		4G/5G		2G/3G		4G/5G	
BS: Busy-load	BS: Low-load	BS: Busy-load	BS: Low-load	BS: a	BS: b	BS: a	BS: b
855.0	585.0	780.0	560.0	540.0	585.0	440.0	560.0

Il faut noter que pour cette étude, c'est la valeur « b » pour la 2G-3G qui va le plus influencer les résultats de l'étude par rapport aux autres valeurs « a » et « b ».

Dans le cas 2G-3G, les canaux communs de la 2G et de la 3G sont émis, alors que la valeur de « b » déterminée ne tient compte que des canaux communs 2G (et du reste de la consommation électrique de la station de base ne dépendant pas de la charge comme BBU et autres éléments constants dans le reste de la station de base).

La valeur « b » d'une station de base 2G-3G est donc supérieure à la valeur « b » déterminée ici : la consommation électrique de la station de base est donc probablement minimisée, donnant des gains plus réduits pour la migration 4G/5G. Ceci sera couvert par l'étude de sensibilité réalisée.

Le cas de base est évalué sur la base d'un trafic voix uniformément réparti sur l'ensemble des stations de base.

La capacité VoLTE est celle équivalente à la même bande passante (8,7 MHz), sans préjuger de la capacité à l'utiliser totalement.

Une première étude de sensibilité est ensuite réalisée en considérant le cas suivant de stations de bases plus chargées :

- 80% du trafic voix sur 20% des stations de base, correspondant à du trafic voix 4 fois plus important que le trafic moyen ;
- 20% du trafic reste sur 2G-3G à la date Tm.

Une deuxième étude de sensibilité est réalisée en considérant une charge max 4G/5G de 25% au lieu de 50% dans le cas de base, sachant qu'il faut souligner que 50% est bien la valeur par défaut considérée par l'ETSI (comme expliqué ci-dessus), notamment pour la 4G et 5G.

Tableau 5 - Résultats du gain réseau calculé pour le cas de base et les 2 études de sensibilité

N° cas étudié pour la partie réseau	type paramètre	Cas de base	Etude sensibilité	Etude sensibilité 2
M	Commun	44%	44%	44%
%voix sur 2G-3G	2G-3G	10%	20%	10%
Facteur multiplicatif du nombre moyen de Erlang par station de base	Commun	1.0	4.0	1.0
Trafic-voixMax (par station de base, Erlang)	Commun	1.5	12.0	1.5
Nombre Station Base à la date Tm	Commun	110000	110000	110000
CapacitéMaxVoix2	2G	17.4	17.4	17.4
CapacitéMaxVoix3	3G	135.0	135.0	135.0
CapacitéMaxVoix23	2G,3G	152.4	152.4	152.4
a23 (w)	2G,3G	540.0	540.0	540.0
b23 (w)	2G,3G	585.0	585.0	585.0
Consommation-BS23 (kWh) sur 24h	2G,3G	14.10	14.55	14.10
CapacitéMaxVoix45	4G,5G	600	600	600
Charge-Max (dont data)	4G,5G	50%	50%	25%
a45 (w)	4G,5G	440.0	440.0	440.0
b45 (w)	4G,5G	560.0	560.0	560.0
K: Coefficient règle d'allocation de b45	4G,5G	0.50%	4.01%	1.00%
Consommation-BS45 (kWh) par station de base, sur 24h, avec règle d'allocation	4G,5G	0.08	0.63	0.15
Gain réseau 4G-5G vs 2G-3G /BS sur 24h (kWh)		14.02	13.92	13.96
Gain réseau 4G-5G: référence 2G-3G		99.44%	95.66%	98.96%

Les deux cas de sensibilité sur cette partie réseau numérotés 2 et 3 sont également intégrés dans l'étude générale de sensibilité, avec le premier cas constituant le cas de base.

Le gain indiqué en pourcentage est la consommation évitée par les stations de base 4G/5G avec pour référence la consommation des stations de base 2G/3G :

$$\text{Consommation évitée par 4G/5G vs 2G/3G} = (C - Q)/C$$

C consommation des stations de base 2G/3G en kWh pendant une année à partir de Tm

Q consommation des stations de base 4G/5G avec règle d'allocation en kWh pendant la même année.

La coupure des contrôleurs radio 2G-3G (RNC, BSC) apporte des gains supplémentaires pour le scénario 4G/5G, qui ne sont pas évalués dans le tableau-ci-dessus (et pas intégrés dans la référence 2G-3G), mais ces gains relativement faibles¹⁷ ne modifient pas la conclusion ci-dessus. Il est en de même pour les gains apportés par la coupure du cœur de réseau circuit (MSC), qui sont encore plus faibles.

2.3.6. Cas où une autre bande cible basse serait utilisée pour les technologies 4G/5G

La méthodologie repose sur une évaluation en différentiel d'un scénario de référence et d'un scénario de migration :

¹⁷ La consommation électrique des contrôleurs radios 2G-3G représente quelques pourcents de la consommation électriques des stations de base 2G-3G 900 MHz (voir *Frontière des systèmes étudiés et règles d'exclusions* de l'annexe B).

- Scénario de référence : Les services voix et M2M utilisant un réseau mobile 2G et 3G dit de référence¹⁸ dans la bande de fréquences 900 MHz.
- Scénario de migration dans cas-ci : Les mêmes services voix et M2M utilisant un réseau mobile 4G/5G dont l'ensemble des équipements du réseau de référence avec de la 2G et 3G ont été migrés en 4G/5G à la date Tm dans une autre bande basse cible fréquences (comme la bande 700 MHz) utilisant déjà de la 4G/5G.

L'hypothèse est qu'à la date Tm différents services, dont de données, utilisent déjà largement la bande de fréquences cible considérée pour de la 4G/5G.

Les stations de base 4G/5G dans la bande de fréquences cible (comme le 700 MHz) sont donc partagées entre d'une part les services voix, M2M provenant des technologies 2G-3G et d'autre part les autres services dont des données utilisant la bande cible à la date Tm.

On se retrouve dans une situation analogue au cas du portage des services 2G-3G sur la bande 900 MHz, avec la même approche pour définir la règle d'allocation, des principes de calculs identiques, et la même conclusion.

Il est à noter qu'une façon simple d'appréhender ce cas est de considérer que le très faible trafic voix va induire une consommation énergétique supplémentaire très faible des stations de base 4G/5G dans la bande cible (comme le 700 MHz), et qu'ainsi c'est quasiment l'ensemble de la consommation énergétique 2G-3G dans la bande 900 MHz qui est gagnée.

2.3.7. Conclusions sur la partie réseau

Au vu de la capacité voix 2G-3G d'un site tri secteur 900 MHz (152,4 Erlang), le trafic voix 2G-3G à horizon de la date Tm est très faible (entre 1,5 Erlang à 12 Erlang, soit 1 à 8% de la capacité) et indique que la bande 900 MHz serait alors sous utilisée, et le niveau d'efficacité énergétique de cette bande serait très faible.

Le déport des services voix/M2M sur la bande 900 MHz en 4G/5G rend cette charge voix encore plus négligeable, de par la magnitude de la capacité VoLTE (600 Erlang) ; ainsi 1,5 Erlang et 12 Erlang de trafic voix correspondent seulement à 0,25% et 2% de la capacité voix de la station de base. Comme la capacité restante de la station de base (la presque totalité en fait) serait alors utilisée pour des usages data, une part très faible de la consommation énergétique serait utilisée spécifiquement pour la voix. C'est ce qui est modélisé par le coefficient K de la règle d'allocation. Ceci explique notamment ce gain énergétique comme un levier important pour migrer vers la 4G/5G.

Dans le cas où une autre bande cible basse (comme le 700 MHz) serait utilisée pour les services 2G-3G, un gain très fort serait également généré par l'arrêt de la 2G-3G.

2.3.8. Prise en compte des « biens de l'utilisateur final des TIC » dans les résultats

L'annexe [Frontière des systèmes étudiés et règles d'exclusions](#) décrit la frontière de référence de l'étude comprenant la partie réseaux, ainsi que pour les biens de l'utilisateur final des TIC les téléphones mobiles, les smartphones. Les objets connectés utilisés pour les besoins de communication entre machines (M2M/IoT) sont intégrés dans le cadre d'une frontière de référence étendue.

Cette étude est construite en évaluant la différence d'impact carbone entre le scénario de référence avec de la 2G et 3G, et un scénario de migration avec le remplacement de la 2G et la 3G par de la

¹⁸ Le réseau de référence est défini dans le chapitre [Hypothèses](#)

4G/5G, et cela à partir de la date Tm (moment où les 2 technologies 2G et 3G ont été migrées en 4G/5G).

Pour les téléphones mobiles, les smartphones ainsi que les objets connectés M2M, il est donc nécessaire d'évaluer le nombre de ces terminaux qui ne supporteraient pas la 4G/5G à la date Tm, et qu'il faudrait alors remplacer à partir de cette date, et de prendre en compte la quote-part restante de la durée de vie à la date Tm de ces terminaux dans le cadre de l'amortissement de leurs impacts de carbone embarqué (voir chapitre 4.3.3 pour le calcul du coût carbone des terminaux avec amortissement).

Le tableau suivant indique les coûts unitaires de carbone embarqué pour les différents types de terminaux (smartphones, feature phone, IoT)

Tableau 6 Valeurs des coûts unitaires de carbone embarqué

Coût unitaire du carbone embarqué d'un smartphone (kgCO2e)	72,24	Cette valeur unitaire intègre le reconditionnement. Voir le chapitre 4.3.3 pour le calcul du coût carbone des terminaux avec amortissement et la prise en compte du reconditionnement dans le chapitre 4.3.3.2. Voir la valeur hors reconditionnement dans le chapitre 4.3.1.
Coût unitaire du carbone embarqué d'un feature phone (kgCO2e)	14,00	Voir le chapitre 4.3.1
Coût unitaire du carbone embarqué d'un module IoT (kgCO2e)	4,60	Voir chapitre 4.3.2

Pour chaque type de terminal (smartphones, feature phone, IoT), l'impact carbone total dû à la migration de ces terminaux est donné par l'égalité suivante :

Impact carbone total (kgCO2e) pour un type de terminal

= nombre d'unités carbone * coût unitaire du carbone embarqué (kgCO2e) pour ce type de terminal.

Les nombres d'unité carbone pris en compte dans ces calculs sont déterminés dans les deux prochains chapitres. Ces nombres d'unité carbone prennent en compte l'amortissement des différents terminaux à la date Tm comme expliqué dans le chapitre 4.3.3¹⁹.

2.3.8.1. Le cas des téléphones mobiles et smartphones

Dans le cas des téléphones mobiles, il est nécessaire d'évaluer le nombre de ces terminaux pour l'opérateur de référence qui ne supporteraient pas la voix sur LTE à la date Tm, et qu'il faudrait alors remplacer à partir de cette date dans le cas du scénario de migration.

Pour ces téléphones mobiles, les éléments suivants doivent être pris en compte dans l'analyse :

- Dans le cadre d'une décision de l'arrêt des technologies 2G-3G qui lui est propre, chaque opérateur mobile aura ses propres dates Ta et Tm, respectivement dates de l'annonce et du remplacement des deux technologies par 4G/5G. Faire une simple moyenne à date de parcs de téléphones mobiles des quatre opérateurs pour les extrapoler ensuite à la même date Tm, reviendrait à considérer que les quatre opérateurs ont la même date Ta au moment de la rédaction de cette note, puis la même date Tm. Ceci ne correspondrait pas à la réalité, car les historiques et stratégies des opérateurs mobiles sont spécifiques. Les paramètres de

¹⁹ Ce chapitre montre que le nombre d'unités carbone pour un terminal ayant encore S années dans son cycle de vie normal à la date Tm et une durée de vie de D années est égal à S/D sur la base d'une hypothèse d'un amortissement carbone linéaire.

l'opérateur de référence à la date T_a seront choisis de façon à rendre l'opération de migration à la date T_m raisonnable en termes de planning dont notamment le nombre de terminaux mobiles et objets IoT/M2M impactés par la migration.

- Il est nécessaire de différencier les feature phones et les smart phones car l'empreinte carbone de ces différents types de téléphones est très différente, ainsi leurs nombres et vétustés. Dans le cadre de l'étude, pour les terminaux à remplacer dans l'évaluation du scénario de migration à la date T_m , un feature phone sera considéré comme remplacé par un feature phone, et un smartphone par un smartphone.²⁰
- Il est nécessaire de connaître la distribution (pourcentage) par ancienneté des différents terminaux dans le réseau de l'opérateur de référence ne supportant pas la voix sur LTE à la date T_a de l'annonce de l'opérateur de l'arrêt des technologies 2G-3G de façon à évaluer les terminaux à remplacer dans le cas du scénario de migration. Ces différents nombres à la date T_a sont représentés par différentes valeurs D_i , avec i étant l'ancienneté du terminal :
 - D_1 : % de terminaux de moins d'un an d'ancienneté (intervalle entre 0 et 1 année)
 - D_i : % pourcentage de terminaux de moins de i années (intervalle entre $i-1$ et i années)
 - Si \max est la durée de vie maximale du terminal, alors $D_i=0$ pour $i>\max$.
 - Les durées de vie maximum respectives des smartphones et feature phones sont de 8 et 10 ans²¹.
 - Il faut souligner que la série des valeurs D_i varient chaque année (2020, 2021, 2022, ...). Une notation exacte aurait été $D_{i,j}$, avec i étant l'ancienneté des terminaux l'année j ($j=2020, 2021, 2022 \dots$), sachant que c'est la table avec j =année avant T_a qui va nous intéresser.
 - Voir dans l'annexe B le chapitre *Détermination de la distribution des téléphones et IoT sur la base de leur cycle de vie* relatif à la détermination de la distribution des smartphones / feature phones et de ces téléphones restants sur la base de leur cycle de vie.
- De façon à extrapoler le nombre de terminaux juste avant la date T_m , il est nécessaire de connaître le pourcentage de terminaux restants dans le réseau après i années. Ces différents nombres sont représentés par différents valeurs R_i , avec i étant l'ancienneté du terminal. Ces valeurs R_i sont uniquement dépendantes du cycle de vie du terminal :
 - R_i : % pourcentage de terminaux restants au bout de i années
 - Si \max est la durée de vie maximale du terminal, alors $R_i=0$ pour $i>\max$.
 - L'hypothèse est que les différentes valeurs R_i , qui sont liées au cycle de vie du terminal sont indépendantes de l'année considérée. Ou dit autrement, la série des valeurs R_i ($R_1, R_2 \dots R_{\max}$) sont applicables quelle que soit l'année.
 - Aucune autre sous segmentation que smartphone / feature phone n'a été introduite (marque de téléphone, taille de l'écran, prix ...).
 - Voir dans l'annexe B le chapitre *Détermination de la distribution des téléphones et IoT sur la base de leur cycle de vie* relatif à la détermination de la distribution des smartphones / feature phones et de ces téléphones restants sur la base de leurs cycles de vie.
- Dans le scénario de migration, de nouveaux terminaux Voix-sur-LTE (VoLTE) viennent remplacer des terminaux non VoLTE plus anciens qui auraient pu continuer à fonctionner en

²⁰ Il n'est tenu compte que des contraintes extérieures qui seraient imposées à un utilisateur par le scénario de migration, ce qui n'est pas par exemple le cas quand un utilisateur décide de remplacer son feature phone par un smartphone dont la tendance existe indépendamment du remplacement des technologies 2G-3G par 4G/5G.

²¹ Ces durées de vie maximum sont observées dans le réseau d'un opérateur mobile membre du Comité

2G-3G. Dans le calcul de l'empreinte carbone de la comparaison des deux scénarios, il faut tenir compte de ce différentiel d'ancienneté : voir annexe B, chapitre *Calcul du cout carbone des terminaux avec amortissement* à ce sujet.

En plus des tables Di et Ri pour les smartphones et feature phones ainsi que leurs valeurs de carbone embarqué, les paramètres principaux pour l'évaluation des terminaux mobiles de l'opérateur de référence pour cette étude sont les suivants :

- Durée Tm-Ta = 6 ans
- 2 million de feature phones à la date Ta : aucun de ces feature phones n'est VoLTE²²
- 18 million de smartphones²³ à la date Ta :
 - 98%²⁴ des smartphones ayant moins d'un an d'ancienneté à la date Ta sont VoLTE.
 - 80%²⁴ des smartphones ayant entre un et deux ans d'ancienneté à la date Ta sont VoLTE.
- Tous les nouveaux téléphones mobiles sont Voix/LTE à partir de la date Ta.

Pour cette partie sur les terminaux, l'étude se base sur les éléments complémentaires suivants :

- Le *Roaming* est compris comme n'ayant pas d'impact sur les résultats de cette étude :
 - *Roaming-in* : la tendance de la pénétration de terminaux voix sur 4G/5G, ainsi que le remplacement des technologies 2G-3G par 4G/5G est mondiale, dont européenne : il n'y a pas de raison de penser que la migration 4G/5G en France va avoir un impact spécifique important sur les terminaux d'utilisateurs ayant une carte SIM d'un opérateur à l'étranger, y compris ceux prévoyant de voyager en France.
 - *Roaming-out* : de même, il n'y a pas non plus de raison de penser que la migration de réseaux étrangers va spécifiquement grandement accélérer la pénétration des terminaux supportant voix sur 4G/5G en France.
 - Même à supposer qu'il puisse y avoir un certain impact, et sachant que les volumes de trafic *roaming-in/out* sont similaires, la résultante d'impact carbone sur le réseau de référence français et réseaux étrangers sera nulle.

Cas des smartphones

²² Des feature phones supportant la VoLTE sont déjà vendus. Néanmoins, une hypothèse conservatrice a été choisie.

²³ Il y a environ 80 millions de cartes SIM actives en France fin 2022, qui comprennent à peu près 4 millions de cartes internet voir [ARCEP – 2023]. Cela fait en moyenne $(80-4)/4 = 19$ millions de cartes SIM pour les téléphones. Sur la base d'un ratio 90%/10% (sur la base d'une information d'un opérateur mobile membre du Comité), cela ferait environ 17 millions de cartes SIM en moyenne par opérateur pour les smartphones et 1,9 millions pour les feature phones. Le chiffre de 1,9 millions de cartes SIM correspond à 1,9 millions de téléphones (équipements), soit environ 2 millions. Le nombre de smartphones (équipements) serait environ de 17/1,1 ou 17/1,15 (ratio considéré par le Comité), car un smartphone peut avoir 2 cartes SIM. Cela ferait environ entre 15 et 15,5 millions de smartphones (équipements) en moyenne. L'opérateur de référence a été choisi avec un majorant pour les smartphones (18 millions) et une étude de sensibilité est réalisée sur le nombre de feature phones.

²⁴ Un pourcentage a été partagé par un Opérateur mobile, membre du Comité avec un pourcentage plus faible choisi pour l'opérateur de référence dans l'étude afin de prendre de la marge pour l'évaluation de l'impact carbone de la migration vers la 4G/5G.

Tableau 7 - Calcul du nombre d'unités carbone pour les Smartphones

Année i	RESTANTS Ri (table)	Distribution Di (table)	Nombre terminaux année Ta (kU)	Ratio terminaux voix/LTE à année i	Ancienneté terminaux juste après Tm	Table RESTANTS Décalée	Nombre terminaux à Tm (kU) non Voix/LTE	Nombre années S du cycle de vie restants à Tm	Nombre Unités de carbone pour scénario migration (kU)
1	100.00%	32.02%	5763	98%	7.0	3.27%	3.8	2.0	0.9
2	99.42%	32.11%	5780	80%	8.0	0.52%	6.1	1.0	0.8
3	65.98%	19.55%	3518	0%	9.0	0.00%	0.0	0	0.0
4	29.10%	8.95%	1611	0%	10.0	0.00%	0.0	0	0.0
5	13.45%	4.09%	737	0%	11.0	0.00%	0.0	0	0.0
6	7.49%	2.21%	399	0%	12.0	0.00%	0.0	0	0.0
7	3.27%	0.93%	167	0%	13.0	0.00%	0.0	0	0.0
8	0.52%	0.14%	25	0%	14.0	0.00%	0.0	0	0.0
TOTAL		100.00%	18000				9.9		1.7

Pour la détermination des tables Ri et Di, voir le chapitre *Détermination de la distribution des smartphones et de ces téléphones restants sur la base de leur cycle de vie* en Annexe B.

Pour le calcul du nombre d'unités de carbone pour le scénario de migration, voir le chapitre *Calcul du coût carbone des terminaux avec amortissement* de l'annexe B. Le schéma ci-dessous montre dans un exemple illustratif où la date Ta serait à fin 2022 pourquoi il faut bien considérer des terminaux d'ancienneté 7 et 8 ans juste après Tm (début 2029 dans l'exemple illustratif), et reporter les valeurs jaunes dans le tableau précédent comme ratio de terminaux toujours fonctionnement (part des restants) début 2029 par rapport à fin 2022.

Tableau 8 - Exemple illustratif du cycle de vie d'un terminal

Dates	Ta: fin de cette année là						Tm: fin de cette année là		
Année	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
Ancienneté terminal introduit l'année 2022	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Nombre S d'années restantes du cycle de vie normal du terminal		8	7	6	5	4	3	2	1

Cas des feature phones

Tableau 9 – Calcul du nombre d'unités carbone pour les Feature Phones

Année i	RESTANTS Ri (table)	Distribution Di (table)	Nombre terminaux année Ta (kU)	Ratio terminaux voix/LTE à année i	Ancienneté terminaux juste après Tm	Table RESTANTS Décalée	Nombre terminaux à Tm (kU) non Voix/LTE	Nombre années S du cycle de vie restants à Tm	Nombre Unités de carbone pour scénario migration (kU)	% impact carbone sur total
1	100.00%	17.55%	351	0%	7	20.27%	71	4	28.47	54.82%
2	99.42%	18.18%	364	0%	8	13.52%	49	3	14.83	28.57%
3	76.98%	14.64%	293	0%	9	9.00%	34	2	6.84	13.18%
4	49.10%	10.95%	219	0%	10	4.00%	18	1	1.78	3.44%
5	38.45%	9.00%	180	0%	11	0.00%	0	0	0.00	0.00%
6	28.49%	7.71%	154	0%	12	0.00%	0	0	0.00	0.00%
7	20.27%	6.75%	135	0%	13	0.00%	0	0	0.00	0.00%
8	13.52%	5.79%	116	0%	14	0.00%	0	0	0.00	0.00%
9	9.00%	5.79%	116	0%	15	0.00%	0	0	0.00	0.00%
10	4.00%	3.66%	73	0%	16	0.00%	0	0	0.00	0.00%
TOTAL		100.00%	2000				173		51.93	100.00%

Pour la détermination des tables Ri et Di, voir le chapitre *Détermination de la distribution des feature phones et de ces téléphones restants sur la base de leur cycle de vie* (Annexe B). Pour le calcul du nombre d'unités de carbone pour le scénario de migration, voir le chapitre *Calcul du cout carbone des terminaux avec amortissement* (Annexe B).

Seuls les terminaux d'une ancienneté juste avant Tm strictement inférieure à 10 ans sont considérés, car les terminaux d'une ancienneté supérieure (10, 11, 12 ans etc.) auront déjà disparu à la date Tm.

2.3.8.2. Le cas des objets connectés M2M

Les objets utilisés pour la communication cellulaire entre machines (M2M) et équipés de modems ne supportant pas la technologie 4G/5G devraient être remplacés prématurément à la date de migration. Ce remplacement anticipé devra être pris en compte dans l'évaluation de l'impact du scénario de migration.

La prise en compte de l'impact du remplacement de ces objets dans l'étude est conditionnée par trois considérations : le périmètre des objets concernés ; l'inventaire des objets visés à la date de migration Tm et les données d'impact carbone embarqué de ces objets.

Les principaux choix retenus pour adresser ces considérations sont synthétisés ci-dessous (les détails sont explicités en Annexe B) :

- **Périmètre des objets concernés** : Bien que bon nombre d'objets communicants sont impactés par la migration vers la technologie 4G/5G, seule une sélection d'objets connectés devra être incluse dans l'évaluation, en ligne avec le cadre méthodologique de l'étude spécifié en amont, définissant ainsi une frontière de référence étendue de l'étude. La sélection d'objets concernés, incluant notamment les interphones, les terminaux de paiement, les équipements IoT pour la télérelève etc. est détaillée dans le chapitre *Périmètre des objets IoT* (en Annexe B).
- **Inventaire des objets à la date de migration Tm** : L'annexe B dans son chapitre *Cas de l'IoT* explique la méthodologie utilisée qui est analogue à celle des téléphones mobiles, afin de déterminer le nombre d'unités carbone à considérer pour l'IoT. Ce nombre d'unités carbone

est à multiplier par le carbone embarqué d'un objet (voir paragraphe suivant) afin de déterminer l'impact carbone embarqué total de ces objets.

- **Données d'impact carbone embarqué de ces objets** : Les données d'impact sont estimées en réutilisant l'approche de modélisation Bottom-Up développée par Pirson et Bol²⁵. Il est à noter que le périmètre matériel retenu dans l'évaluation ne concerne que le module de communication de l'objet (modem, antenne, etc.) (cf. plus de détails dans le Chapitre *Données d'impact carbone considérés pour les objets connectés IoT* en Annexe B).

Une étude de sensibilité (voir Chapitre *Etude de sensibilité* en Annexe B) comprenant différents cas spécifiques pour l'IoT vient évaluer l'impact sur les résultats de l'étude de la variation de différents paramètres comme la valeur de l'impact carbone embarqué du module de communication de l'objet ou influençant le nombre d'unités carbone, comme les ventes d'objets avant la date Ta et après cette date, et le nombre d'objets à la date Ta.

2.3.9. Résultat des évaluations sur l'ensemble de la frontière de référence et la frontière de référence étendue (cas de base)

Les résultats doivent permettre d'évaluer l'intérêt carbone de la migration des technologies 2G-3G vers les technologies 4G/5G pour la frontière de référence et la frontière de référence étendue.

Ainsi, comme montré dans l'analyse réseau, 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 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.

Le tableau suivant résume les principaux résultats pour les différents types de terminaux²⁶:

Tableau 10 - Synthèse des principaux résultats sur l'inventaire des terminaux à Ta et Tm

	Smartphones	Feature Phones	Total Téléphones	IoT 10 ans	IoT 15 ans	IoT 20 ans	Total IoT
Nombre total terminaux à date Ta (kU)	18000	2000	20000	2000	1000	1000	4000
Durée de vie maximum (ans)	8	10		10	15	20	
Nombre total terminaux à date Ta (kU) ne pouvant pas supporter la migration en 4G-5G	7729	2000	9729	2000	1000	1000	4000
% terminaux ne pouvant supporter la migration 4G-5G à la date Ta	42.94%	100.00%	48.64%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%
Nombre terminaux à Tm (kU) ne pouvant pas supporter la migration en 4G-5G	9.86	172.68	182.53	213.08	269.26	390.91	873.25
% terminaux ne pouvant supporter la migration à la date Tm par rapport au nombre total à la date Ta	0.05%	8.63%	0.91%	10.65%	26.93%	39.09%	21.83%
Nombre unités de carbone (kU)	1.70	51.93	53.63	65.42	117.56	197.27	380.25
%unité de carbone par rapport total nombre de terminaux à date Ta	0.01%	2.60%	0.27%	3.27%	11.76%	19.73%	9.51%

²⁵ « Assessing the embodied carbon footprint of IoT edge devices with a bottom-up life-cycle approach », 2021, Thibault Pirson et David Bol: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652621031577>

²⁶ Voir Annexe B. Le nombre de smartphones ne supportant pas la voix LTE à la date Ta est calculé en prenant en compte les pourcentages D1 et D2 à la date Ta et les pourcentages de terminaux supportant la voix sur LTE.

L'étude va évaluer les durées nécessaires en nombre de mois depuis la date T_m afin d'atteindre les points d'équilibre pour les deux frontières considérées entre les gains réseaux continus et réguliers et le cout carbone des terminaux non 4G/5G à la date T_m .

Sur la base des différentes hypothèses de la note, ces durées en nombre de mois pour les deux frontières (référence / référence étendue) vont permettre d'évaluer l'intérêt carbone en termes d'impact carbone de la migration 2G-3G vers les technologies 4G/5G dans chacun des deux cas.

L'étude n'a pas pour objectif d'évaluer exactement la quantité de CO₂e des gains environnementaux apportés par l'arrêt 2G-3G et la migration 4G/5G sur l'ensemble des années depuis la date T_m .

Il faut noter que le calcul est juste réalisé pour une année depuis la date T_m afin d'évaluer les durées nécessaires pour atteindre les deux points d'équilibre pour les deux frontières considérées.

Cette étude ne vise pas à se substituer à une étude précise qu'un opérateur réaliserait dans le cadre de son réseau spécifique, mais bien à évaluer l'intérêt carbone d'une telle migration.

Une étude de sensibilité viendra compléter l'étude, qui pourra entre autres permettre de mieux comprendre les paramètres clés et d'attention de la migration.

Le tableau suivant comprend les différents résultats pour le cas de base.

Différents paramètres et résultats varieront en fonction de l'étude de sensibilité réalisée (cf. [Annexe B](#)).

Les différentes valeurs des cases vertes du tableau suivant sont calculées pour les terminaux (smartphone, feature phone, IoT) en divisant les impacts carbonés de ces terminaux par le gain réseaux mensuel, puis sont sommées afin de déterminer les points d'équilibre en nombre de mois sur les deux frontières considérées.

Tableau 11 - Résultats de l'évaluation sur le périmètre de référence et périmètre étendu

Gain 4G-5G vs 2G-3G /BS sur 24h (kWh)	14.02
Intensité électricité (gCO2e/kWh)	44.40
Nombre total station de base	110000
Nombre stations de base opérateur de Référence	27500
Gain Réseau 4G-5G vs 2G-3G annuel (en Tonnes de CO2e) pour opérateur Référence	6250
Gain Réseau 4G-5G vs 2G-3G Mensuel (en Tonnes de CO2e) pour opérateur Référence	521
Smart Phone	
Nombre Unité de Carbone (en KU) opérateur de Référence (après amortissement pour scénario migration)	1.70
Empreinte carbone embarqué 1 smartphone (kg)	72.24
Impact carbone embarqué Téléphones (en Tonnes de CO2e)	123
Impact carbone embarqué Téléphones (Mois économie arrêt 2G-3G)	0.2
Feature Phone	
Nombre Unité de Carbone (en KU) opérateur de Référence (après amortissement pour scénario migration)	51.93
Empreinte carbone embarqué 1 feature phone (kg)	14.00
Impact carbone embarqué Téléphones (en Tonnes de CO2e)	727
Impact carbone embarqué Téléphones (Mois économie arrêt 2G-3G)	1.4
IoT	
Nombre Unités IoT carbone (en KU) opérateur de Référence (après amortissement pour scénario migration)	380.25
Empreinte carbone embarqué 1 objet IoT (kg)	4.6
Impact carbone embarqué embarqué IoT (en Tonnes de CO2e)	1749
Impact carbone embarqué IoT (mois d'économie arrêt 2G-3G)	3.4
Feature Phones + Smart Phones	
Impact carbone embarqué tous Téléphones mobiles (Mois économie arrêt 2G-3G)	1.6
IoT+ Feature Phones + Smart Phones	
Impact carbone embarqué tous Terminaux (Mois économie arrêt 2G-3G)	5.0

L'impact carbone embarqué de tous les téléphones mobiles (exprimé en mois d'économie de l'arrêt 2G-3G) permet de déterminer également la durée nécessaire (en mois) pour atteindre le point d'équilibre de la migration 4G/5G dans le cas du périmètre de référence (cas réseau + tous téléphones mobiles).

L'impact carbone embarqué de tous les terminaux (exprimé en mois d'économie de l'arrêt 2G-3G) permet de déterminer également la durée nécessaire (en mois) pour atteindre le point d'équilibre de la migration 4G/5G dans le cas du périmètre de référence étendu (cas réseau + tous téléphones mobiles + IoT).

2.3.10. Conclusions sur les résultats des évaluations sur l'ensemble des deux frontières

Dans le cas de la frontière de référence (cas réseau + téléphones mobiles), le point d'équilibre est atteint en moins de deux mois.

Dans le cas de la frontière de référence étendue à l'IoT, le point d'équilibre est atteint moins de six mois.

Le cas de base analysé montre ainsi un réel intérêt carbone à migrer la 2G-3G vers la 4G/5G aussi bien pour la frontière de référence, que pour la frontière de référence étendue.

3. Annexes A : Calcul du poids énergétique des réseaux 2G-3G

Cette annexe détaille les développements calculatoires (présentation des deux approches – générique et spécifiques, et les hypothèses associées) permettant de donner une estimation du poids énergétique des réseaux 2G-3G dans l'ensemble du réseau de l'opérateur (toutes technologies confondues).

3.1. Méthodologie et hypothèses

3.1.1. Méthodologie

L'étude calcule la part de la consommation des réseaux mobiles attribuable à la 2G-3G en prenant en compte plusieurs paramètres (architecture de la radio distribuée vs centralisée, configuration MIMO, mutualisation etc.). Il s'agit de calculer la consommation énergétique des stations de base 2G-3G de l'ensemble des stations de base toutes technologies confondues composant le réseau mobile.

Cet exercice est réalisé selon deux approches :

- La première approche dite « **approche générique** » considère un opérateur générique moyen qui détient un réseau mobile composé des technologies 2G, 3G, 4G et 5G avec une répartition moyenne des sites mobiles de l'ensemble des opérateurs.
- L'approche générique est complétée par une approche dite « **approche spécifique** » où le calcul est basé sur le réseau d'un opérateur membre du Comité.

Combiner les deux approches permettra d'aboutir à une fourchette de résultats et de dégager des tendances.

L'étude réalise un inventaire des sites émetteurs utilisant les (la) fréquences qui portent les réseaux 2G et 3G, et de sites émetteurs utilisant les fréquences portant la 4G et la 5G. Cet inventaire est pondéré pour prendre en compte la génération du matériel qui peut être déployée sur les sites mobiles, ainsi que les différentes configurations radio qui peuvent se retrouver en fonction des technologies déployées et des bandes considérées (MIMO, puissance d'émission, largeur spectrale, etc.).

L'étude donne une estimation de la consommation de ces réseaux en valeurs relatives c à d la consommation énergétique des réseaux 2G-3G par rapport à la consommation énergétique globale du

réseau toutes technologies confondues. Il est à noter que la consommation énergétique ne prend en compte que le périmètre station de base uniquement.

Par ailleurs, afin de cadrer l'étude dans un contexte temporel plus réaliste d'extinction, le poids des réseaux 2G et 3G sera évalué à horizon 2025. La projection à cet horizon prend en compte les obligations réglementaires prévues à cette échéance²⁷ notamment l'augmentation du nombre de sites en bande 3,5 GHz, et les obligations du New Deal Mobile²⁸ conduisant à une densification du réseau.

3.1.2. Hypothèses

L'étude se base sur plusieurs hypothèses détaillées ci-dessous et résumées dans le tableau ci-dessous :

Tableau 12 - Principales hypothèses de chaque approche

Approche	Générique	Spécifique
Patrimoine spectral et nombre de sites	L'étude considère la répartition générique suivante : 8,6MHz pour les services 2G-3G portées par la bande 900 MHz et 155MHz pour les services 4G/5G portées par les autres bandes de fréquences FDD et TDD. Nombre de sites : moyenne des sites des 4 opérateurs de réseau selon les statistiques de l'ANFR [ANFR -2023] Détails de la répartition des sites, par technologie et par fréquence (voir ci-dessous)	L'étude considère l'inventaire des sites du réseau d'un opérateur de réseau membre du Comité ainsi que la répartition des fréquences par technologie associée pour le cas de cet opérateur.
Consommation énergétique des équipements	Données de consommation mesurées issues des équipements d'un fournisseur membre du Comité. L'étude considère 30% de charge par technologie.	Valeurs typiques de puissances transmises par technologie dans le réseau de l'opérateur Charge de réseau par technologie non prise en compte, charge équivalente sur l'ensemble des bandes de fréquences du réseau.
Configurations des stations de base ²⁹	3 configurations possibles : station de base centralisée/matériel non rénové, station de base distribuée 2T2R/mono-bande et stations de base distribuées 4T4R multi bandes/matériel rénové. Le choix de ces configurations est détaillé ci-dessous.	La configuration des stations de base équipant le réseau de l'opérateur incluant une part des sites déployés en MIMO 4T4R, l'autre part en 2T2R.
Projection 2025	Ajout de 10 500 sites en bande 3,5 GHz selon les obligations de déploiement des opérateurs inscrites dans leurs Autorisation d'Utilisation de Fréquence en bande 3.5GHz ainsi que les obligations du New Deal à cette échéance. Jusqu'à 2025, la puissance affectée sur les différentes bandes est considérée constante.	

²⁷ https://www.arcep.fr/fileadmin/user_upload/grands_dossiers/5G/procedure-attribution-bande-3_5GHz-obligations.pdf

²⁸ <https://www.arcep.fr/la-regulation/grands-dossiers-reseaux-mobiles/la-couverture-mobile-en-metropole/le-new-deal-mobile.html>

²⁹ En effet les différents sites du réseau n'ont pas la même configuration radio (génération de matériel, type d'antennes MIMO etc.) considérant que : La proportion des sites disposant du MIMO n'est pas la même selon les différentes bandes considérées ; Les largeurs spectrales ne sont pas les mêmes sur les différentes bandes ; Le paramétrage radio n'est pas le même selon les différentes bandes ; Le taux de partage des sites émetteurs n'est pas le même selon les différentes technologies et selon les différentes bandes.

- A date, les sites en bande 3,5 GHz étant encore peu nombreux n'ont pas été pris en compte pour évaluer la part de la 2G-3G dans la consommation énergétique du réseau.
- L'étude ne prend pas en compte la mutualisation des sites entre opérateurs.

3.1.3. Répartition des sites d'émission par technologie/bande

La répartition du patrimoine spectral par technologie et par bande de fréquence est détaillée dans le tableau ci-dessous :

Tableau 13 - Répartition du patrimoine spectral par technologie

Largeur de bande/bande		2G	3G	4G	5G	Total
FDD	700 MHz	X	X	5	5	10
	800 MHz	X	X	10	X	10
	900 MHz	3,6	5	X	X	8,6
	1800 MHz	X	X	20	X	20
	2100 MHz	X	X	10	5	15
	2600 MHz	X	X	20	X	20
TDD	3,5 GHz	X	X	X	80	80

Les nombres de stations de base multi-technologies 2G-3G/4G par bande de fréquences (700/800/900/1800/2100/2600 MHz) en service sont évalués sur la base des résultats fournis par l'ANFR au 1^{er} janvier 2022 dans l'observatoire du déploiement des réseaux mobiles en Métropole **[ANFR-2023]**.

Ceci permet de déterminer les ratios d'émetteurs par bande de fréquences, et de déterminer un ordre de grandeur du ratio de la consommation électrique correspondante.

Les émetteurs de la bande 900 MHz représentent environ **un quart** de l'ensemble des émetteurs. **Ceci donne un ordre de grandeur à terme du ratio de la consommation électrique des technologies 2G-3G** (quand la bande 2100 MHz sera plus largement migrée vers de la 4G/5G, sachant que l'observatoire montre encore environ 54 000 sites en UMTS 2100 MHz).

Par conséquent, la consommation électrique des réseaux 2G-3G représente bien une part non négligeable de la consommation électrique des réseaux mobiles en France, et justifie l'intérêt de cette étude sans conclusion à priori.

Tableau 14 - Proportion des émetteurs par technologie/bande de fréquence à date

Bande de fréquences	Technologies	Nombre	%	Source	Commentaire
700	4G	33,863	9.1%	Observatoire: Tableau de synthèse 4G. LTE700 en service.	700 MHz uniquement pour 4G (hors 5G)
800	4G	69,927	18.8%	Observatoire: Tableau de synthèse 4G. LTE800 en service.	800 MHz uniquement pour 4G
900	2G, 3G	91,647	24.6%	Observatoire: Tableau de synthèse 3G. UMTS900 en service.	GSM 900: 59177 sites; hypothèse que le nombre UMTS900 comprend ce nombre de sites
1800	2G+4G	65,839	17.7%	Observatoire: Tableau de synthèse 4G. LTE1800 en service.	GSM 1800: 4650 sites; hypothèse que le nombre LTE1800 comprend ce nombre de sites
2100	3G+4G	65,839	17.7%	Nombre LTE1800 MHz	LTE 2100: 32418 sites UMTS 2100: 53946 sites Mais de la mutualisation UMTS/LTE Hypothèse d'un nombre voisin de sites 1800 MHz et 2100 MHz.
2600	4G	45,100	12.1%	Observatoire: Tableau de synthèse 4G. LTE2600 en service.	2600 MHz uniquement pour 4G
Total		372,215	100.0%		

Il faut noter que la 5G dans la bande 3,5 GHz n'a pas été prise en compte dans l'évaluation, sachant que les déploiements de la bande 3,5 GHz en est à ses débuts (10 500 sites dans l'observatoire [ANFR-2023]). De plus, la 5G dans les autres bandes de fréquences (700 MHz, 2100 MHz) est de fait prise en compte dans le tableau car mutualisée avec de la 4G.

Au-delà de cette première approximation, le développement ci-dessous estime la part en termes de consommation énergétique des réseaux 2G-3G selon les 2 approches précitées.

3.1.4. Configuration de stations de base et consommation énergétique des équipements radio

Approche générique :

La figure ci-dessous présente une estimation de la part du 900 MHz dans la consommation de la station de base pour différentes configurations d'équipements en fonction de la part de chaque fréquence.

Les différentes consommations énergétiques des éléments radios (RRU, RFU) dans les différentes bandes de fréquences indiquées ci-dessous proviennent de mesures directes effectuées par le fournisseur dans ses laboratoires de ces éléments radio à 30% de charge. Ces différentes valeurs ne sont donc pas le résultat d'un calcul, modèle ou simulations, mais bien des valeurs mesurées en laboratoire.

	Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3
	BS centralisée RFU	BS distribuée RRU 2T2R	BS distribuée RRU 4T et/ou 4R
	RRU-700M-2x60W	RRU-700M-2x40W	RRU Multi-Band - 700M/800M/900M- 2x160W
	RFU-800M-2x60W	RRU-800M-2x40W	
	RFU-900M-2x80W	RRU-900M-2x60W	
	RFU-1800M-2x80W	RRU-1800M-2x60W	RRU Multi-Band - 1800M/2100M- 4x80W
	RFU-2100M-2x80W	RRU-2100M-2x60W	
	RRU-2600M-2x60W	RRU-2600M-2x40W	RRU-2600M-4x40W
Part du 900M dans la consommation de la BTS	33%	29%	24%

Figure 9 - Estimation de la part de la bande 900 MHz dans la consommation d'une station de base

Approche spécifique :

Concernant le sujet de l'impact carbone de l'extinction de la 2G-3G, nous avons fait un exercice d'évaluation de la part énergétique de la 2G-3G sur le périmètre des sites radio uniquement (donc sans tenir compte de l'extinction éventuelle de plateformes de services ou autres éléments du cœur de réseau ou du transport).

En faisant l'exercice sur la base du réseau d'un opérateur membre du Comité, nous arrivons à la **valeur de 21%** (= part énergétique de la 2G-3G au regard de l'ensemble des technologies)

3.1.5. Calcul du poids énergétique à horizon 2025

Dans une perspective fin-2025, où 10 500 sites par opérateur auront été déployés dans la bande 3500 MHz (contrainte réglementaire associée aux autorisations dans cette bande³⁰) ainsi que les obligations New Deal à cette échéance³¹, **ce pourcentage devrait tomber à 17%**.

3.2. Résultats

Dans l'approche générique, il est considéré que le parc de sites mobiles est intégralement de la même génération. Bien que cette hypothèse soit forte, cela permet de borner l'impact que peut avoir la génération du matériel sur le poids relatif de la 2G et de la 3G. En effet, **pour du matériel d'ancienne génération** (configuration de stations de base centralisées), la nouvelle pondération donne un poids relatif de **33%** de la consommation globale de l'ensemble des stations de base du réseau, alors que ce

³⁰ https://www.arcep.fr/fileadmin/user_upload/grands_dossiers/5G/procedure-attribution-bande-3_5GHz-obligations.pdf

³¹ <https://www.arcep.fr/la-regulation/grands-dossiers-reseaux-mobiles/la-couverture-mobile-en-metropole/le-new-deal-mobile.html>

le poids est estimé à **29% pour des stations de base distribuées 2T2R mono-bandes** et à **24% pour du matériel de nouvelle génération** avec stations de bases distribuées 4T4R multi-bandes.

Dans l'approche spécifique, l'étude révèle un ratio du **poids relatif des technologies 2G-3G de l'ordre de 21%**.

A horizon 2025, et en intégrant au réseau 10 500 sites 5G en bande 3,5 GHz avec une configuration adaptée et l'ensemble des déploiements prévus dans le cadre du New Deal à cette échéance, le ratio du poids relatif de la 2G et de la 3G passerait à **17%**.

Ces résultats à horizon 2025 sont à considérer au regard des hypothèses ci-dessus, en effet :

- Si la part de la puissance affectée sur les bandes autre la bande 900 MHz venait à augmenter dans les prochaines années, la part énergétique de la 2G-3G serait donc plus faible que ce qui est calculé dans cette étude ;
- De la même manière, toute opération de densification de réseau (pour raison capacitaire ou complément de couverture) et déploiement de nouvelles bandes de fréquences feraient également baisser la part de la 2G-3G dans la consommation globale du réseau toutes technologies confondues.

4. Annexe B : Impact carbone du remplacement des réseaux 2G-3G

4.1. Intensité carbone/mix énergétique

Afin d'évaluer le « contenu CO2e du kWh » dans le cas du kWh consommé en France, il faut tenir compte du réseau de distribution de l'électricité produite en France, et également importée (cette part importée est faible, sachant que la France est un exportateur d'électricité).

La fiche technique de l'ADEME³² montre également l'intérêt de considérer le contenu du CO2e du kWh consommé par usage, car chaque usage peut avoir un impact significativement différent sur les moyens de production appelés, et donc sur les émissions de CO2e. Cette fiche décrit les principales méthodes de calcul par usage (méthode saisonnée, moyennes par pas de temps temporel, ou à but prospectif intégrant notamment l'analyse des conséquences de la fixation du contenu CO2e à une certaine valeur).

L'annexe 3 de la fiche indique différents contenus du CO2e du kWh consommé par usage au moment de sa rédaction :

Tableau 15 - Facteur d'émission CO2e pour différents usage (extrait depuis la Fiche Technique de l'ADEME)

Résidentiel					Tertiaire				
Chauffage	Climatisation	ECS	Eclairage	Autres	Chauffage	Climatisation	ECS	Eclairage	Autres
210	65	83	121	65	210	66	66	66	66

Ce même document retient dorénavant la valeur de 79 gCO2e /kWh pour le facteur d'émission pour l'usage du chauffage.

A notre connaissance, aucun facteur d'émission n'a été défini pour les réseaux mobiles.

La fiche technique fournit également d'autres informations :

³² Fiche Technique – Positionnement de l'ADEME sur le calcul du contenu CO2 de l'électricité, cas du chauffage électrique- Juillet 2020.

- Les valeurs du contenu moyen depuis 2015 sont comprises entre 55 et 60 gCO₂e/kWh au point de consommation, c'est-à-dire pertes du système incluses. La tendance de ce chiffre moyen depuis 2010 est à la baisse, avec la fermeture progressive des centrales à fioul et à charbon.
- Il est également indiqué que sur la base d'une projection tendancielle de la PPE (Programmation Pluriannuelle de l'Énergie), le contenu moyen en 2035 serait de l'ordre de 17 gCO₂e/kWh en émissions directes et 34 gCO₂e /kWh en calcul avec ACV.

Dans le cadre cette note, l'étude retient la valeur de **60 gCO₂e/kWh** en **2020**³³ et de **34 gCO₂e /kWh** en **2035** avec une extrapolation linéaire entre ces dates (de début 2020 à fin 2035).

L'étude prend également en compte la valeur **de 56,9 gCO₂e/kWh** en **2021 [BASE CARBONE – 2022]** dans le cadre d'une étude de sensibilité, en conservant la valeur de **de 34 gCO₂e/kWh** en **2035** avec une extrapolation linéaire entre 2021 et 2035 (de début 2021 à fin 2035).

Les extrapolations linéaires ont été réalisées afin de déterminer le facteur d'émission à la date Tm³⁴.

4.2. Frontière des systèmes étudiés et règles d'exclusions

Les frontières des systèmes étudiés sont délimitées en cohérence avec l'objectif de l'étude conformément aux dispositions de la Recommandation ITU L.1410.

4.2.1. Frontière de référence des systèmes étudiés

Du point de vue des biens et services basés sur le cycle de vie, l'appendice I de la recommandation UIT-T L.1450 reprend la définition du secteur des TIC de l'OCDE³⁵ pour en dériver les principales catégories suivantes :

- Biens de l'utilisateur final des TIC
- Equipements des réseaux TIC
- Centres de données
- Développement de services TIC et support à l'exploitation.

En particulier, l'appendice I indique que les produits intermédiaires tels que les composants ne sont pas considérés comme des produits TIC en soi, mais comme des composants utilisés pour les produits TIC et seront pris en compte lors du calcul des émissions de GES pour le cycle de vie global des produits TIC.

Dans le cadre de cette étude, seules les deux premières catégories nous intéressent.

L'annexe A de la Recommandation susmentionnée reprend les différentes catégories afin de les définir plus précisément.

Pour la partie réseau, on retrouve directement les différents éléments d'un réseau mobile tels que décrits dans le tableau de cette note montrant le schéma fonctionnel de comparaison entre le scénario de référence vs migration.

³³ 2020 est la date de publication la Fiche Technique de l'ADEME qui a été utilisée.

³⁴ La date de 2029 pour Tm a été choisie dans les calculs pour déterminer les points d'équilibre sachant que ces points d'équilibre sont obtenus en moins d'un an.

³⁵ Il est à noter par exemple que l'INSEE en France repart de la même définition des TIC donnée par l'OCDE, et qu'il apparaît important que les différentes statistiques et résultats d'études publiés repartent de la même base.

Pour les biens de l'utilisateur final des TIC, et comme attendu, l'annexe A inclut les ordinateurs et leurs périphériques, les équipements d'utilisateurs comme les ordinateurs fixes et portables, les téléphones mobiles, smartphones et tablettes.

Par contre, elle exclut différents articles comme télévision, imprimantes, console de jeux considérés dans le secteur des loisirs et media.

Elle indique d'autre part que l'IoT est rendu optionnel.

On pourra aussi noter que l'EDNA³⁶ dans un rapport³⁷ définit les différentes catégories et groupes suivants :



Table 4. Selected devices updated with regional shipment data in the TEM2.0

Category	Group	Device
Automation	– Appliances	<ul style="list-style-type: none"> • Fridges • Freezers • Washing Machines • Tumble Dryers
	– Space Conditioning	<ul style="list-style-type: none"> • Air Conditioners • Smart thermostats
	– Lighting	<ul style="list-style-type: none"> • Home lighting
	– Street lights	<ul style="list-style-type: none"> • Street lights
	– IoT	<ul style="list-style-type: none"> • Sensor/SIM (LTE-M, NB-IoT & LPWA)
ICT	– Audio	<ul style="list-style-type: none"> • Digital Voice Assistants
	– Mobile	<ul style="list-style-type: none"> • Smart Phones
	– Tablet	<ul style="list-style-type: none"> • Tablet
Entertainment	– PC	<ul style="list-style-type: none"> • Desktop • Laptop
	– Display	<ul style="list-style-type: none"> • Smart TV • Digital Signage
Security	– Media Device	<ul style="list-style-type: none"> • Casting Sticks • Games Consoles
	– Control	<ul style="list-style-type: none"> • Smart locks
	– Video	<ul style="list-style-type: none"> • IP cameras

Figure 10 - Extrait du rapport EDNA sur la catégorisation des équipements

On retrouve ainsi sans surprise dans le secteur des TIC, les ordinateurs fixes et portables, les téléphones mobiles, smartphones et tablettes.

³⁶ Electronic Devices and Networks Annex (EDNA): <https://www.iea-4e.org/edna/>

³⁷ <https://www.iea-4e.org/wp-content/uploads/publications/2021/02/EDNA-TEM2.0-Report-V1.0-Final.pdf>

Par contre, selon l'EDNA, l'IoT est ici exclu des TIC pour être introduit dans d'autres catégories notamment la catégorie « automatisation ».

Comme frontière pour les biens de l'utilisateur final des TIC, aussi bien au sens de la recommandation ITU-T L.1450, qu'en reprenant l'approche de l'EDNA, il est tout à fait fondé de ne retenir comme frontière de référence que les ordinateurs fixes et portables, les téléphones mobiles, smartphones et tablettes. Le cas des objets communicants (IoT) devrait être adressé dans le cadre d'une extension de la frontière de référence en ligne avec la marge d'inclusion laissée par la Recommandation (cf. sous-section suivante).

Dans le cadre de cette étude pour le remplacement des technologies 2G-3G, par les technologies 4G/5G, la frontière de référence pour les biens de l'utilisateur final des TIC, se réduit au périmètre des téléphones mobiles et smartphones ; ceci constitue le périmètre de référence de l'étude. La frontière de référence est ensuite étendue pour inclure une sélection spécifique d'objets communicants (IoT), les règles régissant cette extension sont explicitées dans la sous-section suivante.

4.2.2. Règles d'exclusion et extension de la frontière de référence

4.2.2.1. Périmètre des objets IoT

Bien que l'IoT soit rendu optionnel dans la définition du périmètre du secteur des TIC par la Recommandation ITU-T L.1450, celle-ci précise que comme première étape, et en fonction de la disponibilité des données, les catégories suivantes pour l'IoT pourraient être incluses : écrans publics, caméras de surveillance, terminaux de paiement, les modules de communication de compteurs intelligents et « wearables ». En absence d'éléments plus spécifiques pour les besoins de notre étude, le Comité d'experts a procédé en 3 étapes pour la sélection des objets concernés :

- dans un premier temps, la liste des objets communicants susceptibles d'utiliser les technologies 2G-3G a été répertoriée ;
- dans un second temps, cette liste a été soumise pour examen au Comité d'experts techniques sur la mesure³⁸ qui a rendu son avis sur l'inclusion ou non de chaque catégorie d'objet dans le périmètre de l'ICT au regard de son interprétation de la Recommandation ITU-T L.1450. Cet avis est explicité dans l'appendice III du rapport du Comité d'experts techniques sur la mesure de l'impact environnemental du numérique³⁹;
- dans un troisième temps, la frontière de référence étendue a été définie sur la base de cet avis.

Le tableau ci-dessous restitue les choix retenus sur l'inclusion ou l'exclusion des objets communicants dans le cadre de l'étude :

³⁸ Le Comité d'experts techniques sur la mesure est un Comité lancé depuis 2020 par l'Arcep et l'ADEME. Présidé par Catherine Mancini, le Comité regroupe des acteurs industriels, académiques et Think-Tanks du monde du numérique et de l'environnement. Le Comité rend ses avis, en toute indépendance, sur des sujets techniques relatifs à la mesure de l'impact environnemental du numérique.

³⁹ Arcep/ADEME Comité d'experts techniques sur la mesure de l'impact environnemental du numérique (2023) « Evaluation de l'impact environnemental des TIC : Analyse des écarts méthodologiques »

<https://www.arcep.fr/actualites/actualites-et-communiqués/détail/n/environnement-030423.html>

Tableau 16 - Appréciation de l'inclusion/exclusion des objets IoT dans le cadre de l'étude

Objet communicant 2G-3G	Avis du Comité mesure	Choix du Comité mobile
Téléalarmes particuliers/industriels	Exclus	Exclus
Interphone	Inclus, optionnel	Inclus
Terminaux de paiement	Inclus, optionnel	Inclus
Dispositifs eCALL pour voiture	Exclus	Exclus
Dispositif IoT équipant les distributeurs de boissons	Exclus	Exclus
Télérelève et compteurs (eau, électricité etc.)	Inclus, optionnel	Inclus
Dispositifs IoT pour matériel roulant (train)	Exclus	Exclus
Dispositifs IoT pour ascenseurs	Exclus	Exclus
« Wearables »	Inclus, optionnel	Inclus
Dispositifs IoT pour horodateurs/parking	Inclus, optionnel	Inclus
Stations météo	Exclus à date, à discuter(*)	Exclus
Dispositif IoT pour suivi d'objet/géolocalisation	Inclus, optionnel	Inclus
Dispositif DATI/PTI ⁴⁰	Exclus à date, à discuter(*)	Exclus
Téléassistance personnes âgées/handicap	Exclus à date, à discuter(*)	Exclus
Lampadaires connectés	Exclus	Exclus

(*) Dans le cadre d'une évolution future de la Recommandation ITU-T L.1450.

La figure ci-dessous illustre le périmètre d'évaluation retenu dans l'étude (frontière de référence et frontière de référence étendue)

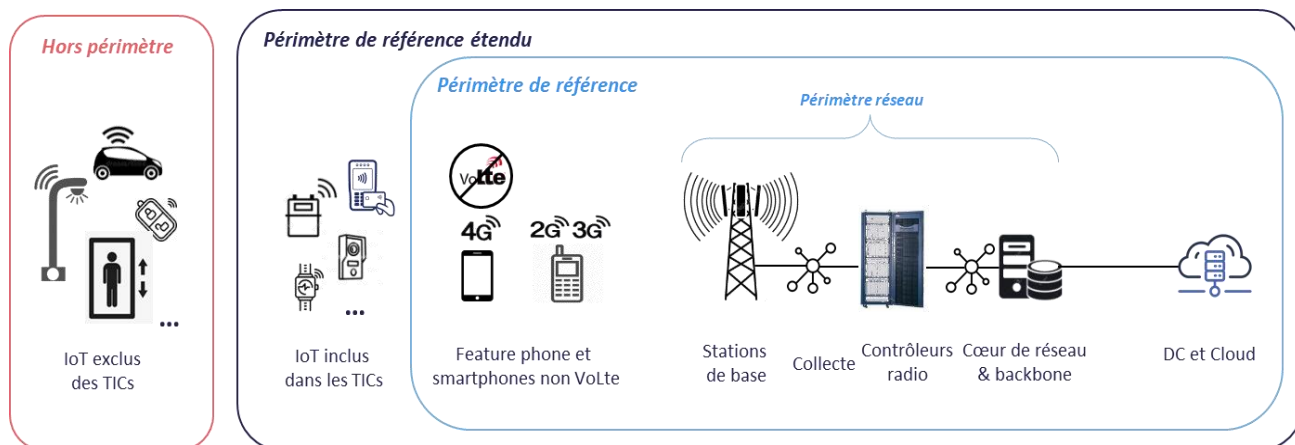


Figure 11 - Illustration du périmètre retenu dans l'étude⁴¹

⁴⁰ Dispositif Alarme travailleurs isolés/Protection Travailleurs Isolés

⁴¹ Bien que les éléments du cœur de réseau et de collecte soient inclus dans le périmètre de l'étude, ceux-ci sont négligés dans le cadre de l'évaluation (leur impact reste marginal) (voir Chapitre *Règles d'exclusion et extension de la frontière de référence* dans Annexe B)

4.2.2.2. Quelques considérations complémentaires sur la frontière des systèmes étudiés

L'INSEE indique qu'un secteur d'activité regroupe les entreprises de fabrication, de commerce ou de service qui ont la même activité principale au sens de la nomenclature d'activités française.

La NAF, nomenclature d'activités française, est une nomenclature des activités économiques productives, principalement élaborée pour faciliter l'organisation de l'information économique et sociale. Afin de faciliter les comparaisons internationales, elle a la même structure que la nomenclature d'activités européenne NACE, elle-même dérivée de la nomenclature internationale CITI⁴².

La version en vigueur de la nomenclature (la NAF rév.2⁴³) comporte les 21 sections suivantes, qui sont communes à la NACE et à la CITI :

- Agriculture, sylviculture et pêche
- Industries extractives
- Industrie manufacturière
- Production et distribution d'électricité, de gaz, de vapeur et d'air conditionné
- Production et distribution d'eau ; assainissement, gestion des déchets et dépollution
- Construction
- Commerce ; réparation d'automobiles et de motocycles
- Transports et entreposage
- Hébergement et restauration
- Information et communication
- Activités financières et d'assurance
- Activités immobilières
- Activités spécialisées, scientifiques et techniques
- Activités spécialisées, scientifiques et techniques
- Administration publique
- Enseignement
- Santé humaine et action sociale
- Arts, spectacles et activités récréative
- Autres activités de services
- Activités des ménages en tant qu'employeurs ; activités indifférenciées des ménages en tant que producteurs de biens et services pour usage propre
- Activités extra-territoriales

Comme constaté à travers cette nomenclature, le secteur numérique n'existe pas en tant que tel.

Ce que l'on appellerait et comprend comme « le numérique », ou les « équipements numériques » sont présents dans l'ensemble de ces sections, montrant la numérisation importante de notre société.

Mais ce concept n'a pas de réalité statistique, permettant une base de frontière claire pour une étude comme celle-ci traitant de technologies standardisées par le 3GPP au niveau mondial, pour des réseaux mobiles utilisant des fréquences harmonisées au niveau Européen, et tout cela dans le cadre d'un

⁴² <https://www.insee.fr/fr/information/2406147>

⁴³ Nomenclatures d'activités et de produits françaises NAF rév2-CPF rév.2.1 Réédition 2020 INSEE

marché unique européen pour lesquels des résultats d'études devraient être comparables. Ceci étant, bien que le questionnement sur la frontière soit légitime en vertu de la numérisation croissante de la société via des technologies comme l'IoT, cette réflexion est déjà portée par d'autres instances dont les travaux en cours au sein du Comité d'experts Arcep/ADEME sur la mesure de l'impact environnemental du numérique.

4.2.3. Synthèse des exclusions dans le cadre de l'étude

Comme décrit dans les précédentes sections, les frontières du système étudié ont été délimitées conformément aux dispositions de la Recommandation ITU L.1410 et ITU L.1450. Une fois, les frontières (c à d, frontière de référence et frontière étendue) du système étudié sont définies, certains processus/activités obligatoires ont été exclus de l'évaluation conformément aux règles d'exclusion spécifiées dans la Recommandation L.1410⁴⁴.

Pour le système de biens, réseaux et services TIC :

- Tous les éléments identifiés comme pertinents à l'étude dans les frontières des systèmes étudiés, et dont les données associées étaient disponibles ou raisonnablement estimables par hypothèses ont été intégrés à l'analyse.
- En général, la modélisation environnementale doit couvrir un pourcentage défini des équipements ou systèmes. Les critères utilisés pour l'exclusion incluent la masse, l'énergie ou le poids de l'impact environnemental (ici carbone), ce dernier peut être adressé par une approche qualitative conformément à la Recommandation L.1410. Le seuil de coupure utilisé dans le cadre de l'étude pour chaque critère est fixé à 5% ; c à d les processus/activités/flux exclus ne doivent pas en cumulé contribuer à augmenter de plus de 5% du critère de l'ensemble du système de produits étudié.
- Etant donné que l'impact environnemental (ici carbone) total de l'ensemble du système est difficile à estimer, une méthode alternative de coupure consisterait à considérer une valeur de référence basée sur les activités les plus importantes dans le système de produits et d'utiliser cette valeur de référence pour justifier l'exclusion de certains processus ou flux ayant une contribution négligeable par rapport à cette valeur. Cette approche est appropriée dès lors qu'un nombre limité de phase/processus sont pré-identifiés comme fortement contributeur (c à d hotspot de l'évaluation environnementale). La Recommandation indique que l'utilisation de données secondaires est considérée suffisante pour établir cette valeur de référence⁴⁵.

Dans le cadre de notre étude, cette méthode de règles de coupure est aussi utilisée ; la valeur de référence considérée est l'impact carbone en phase d'usage des stations de base 900 MHz en 2G-3G dans le scénario de référence, considérant que les stations de base 900 MHz est un hotspot de l'évaluation environnementale du système de produits (scénario de référence et scénario de migration) et sera utilisée pour justifier les exclusions de processus/activités aussi bien dans le scénario de référence que dans le scénario de migration.

Pour certains équipements exclus (cœur de réseau circuit et paquet, contrôleurs radio 2G-3G) l'empreinte carbone de l'équipement comprend à la fois les émissions opérationnelles (phase

⁴⁴ Voir Clause 6.2.4 de la partie I de la Recommandation ITU L.1410 pour plus de détails sur les dispositions relatifs aux règles de coupure pour les systèmes de biens, réseaux et services TIC. Ces dispositions renvoient également aux clauses du standard ISO 14044 relatifs aux règles de coupure.

⁴⁵ "As the total values of environmental impacts can be difficult to calculate, another alternative cut-off method would be to create a reference value based on important activities and to use this reference value to cut-off processes having a negligible contribution compared to that value. Such an approach is especially appropriate when a limited number of processes or phases of a single aspect of the life cycle, contribute by a disproportionate amount to the overall impact. To establish the reference value, secondary data is considered sufficient." (Clause 6.2.4, p.33 de la Recommandation ITU L.1410)

d'usage) et les émissions embarquées des équipements, celles-ci sont calculées sur la base de la méthode de « ratio profiling ». Cette méthode décrite dans le supplément TIC du GHG Protocol⁴⁶ et explicitée dans le Rapport du Comité d'experts sur la mesure⁴⁷ consiste à estimer le carbone embarqué des équipements en appliquant un ratio sur leur émissions opérationnelles (un ratio de 10% est considéré dans notre étude sur la base du supplément TIC du GHG Protocol).

Les processus et activités exclus ont individuellement et en cumulé une contribution inférieure à 5% à la valeur de référence (cf. voir tableau ci-dessous).

Dans le cas d'une analyse comparative comme dans notre étude, des dispositions supplémentaires s'appliquent⁴⁸:

- Outre les dispositions relatives à la prise en compte des effets de premier ordre (c à d l'empreinte directe des biens/réseaux/services TIC) explicitées précédemment, les effets de second ordre devraient être considérés. Pour notre étude, il s'agit des mêmes services voix/M2M portés par la 2G-3G dans le scénario de référence qui sont migrés en 4G/5G dans le scénario de migration. Pour le cas des terminaux téléphoniques, le changement en Volte ne devrait pas changer le comportement de l'utilisateur (pas d'incrément d'utilisation). Pour le cas des objets IoT/M2M, il s'agit principalement de services de couverture qui existaient déjà avec les autres bandes basses (700 et 800 MHz) et dans lequel la migration vers la 900 MHz en 4G/5G ne devrait pas apporter de changement. Les quelques cas de services capacitifs de type IoT/M2M due à la migration, serait potentiellement due à l'incrément de trafic de données due à l'augmentation des fonctionnalités des nouveaux objets IoT de substitution. Pour plus de détails à ce sujet, se référer au développement dans le chapitre 4.2.4.
- L'étude vise à évaluer la différence d'impact entre deux services TIC, plutôt que l'impact total de chaque service TIC, les processus ou les données d'entrée/sortie peuvent être exclus s'ils sont identiques dans les deux services TIC. Ces processus/activités concernent notamment : les réseaux de transmission et backbone, les réseaux de collecte et d'agrégation, les sites radios hors station de base 900 MHz

Les détails des activités exclus/incluses à chaque phase du cycle de vie en fonction de leur exigence dans l'évaluation (obligatoire vs recommandé vs optionnel) sont explicitées dans le Chapitre *Prise en compte de la recommandation ITU-T L.1410* de l'annexe B.

Les activités et processus exclus ont été intégrés dans le cadre de l'analyse de sensibilité comme recommandé dans la Recommandation ITU L.1410 et ISO 14040. Ces variations de 3% indiquées ci-dessous réduiraient les temps d'atteinte des points d'équilibre de la même valeur, ne remettant pas en cause les conclusions de l'étude.

Le tableau ci-dessous synthétise la liste des exclusions assumées dans l'étude :

Tableau 17 - Liste des exclusions considérées dans l'étude

Produit	Processus/Activités exclus	Commentaires et justifications
Cœur de réseau	<ul style="list-style-type: none"> • Quote-part des services voix/M2M dans la consommation du cœur de réseau paquet dans le scénario de migration • Consommation du cœur de réseau circuit dans le scénario de référence 	<ul style="list-style-type: none"> • S'agissant du cœur de réseau circuit : Sur la base du scénario du GSMA [GSMA - 2021], une configuration de cœur de réseau circuit pourrait être maintenue dans le cas du scénario de

⁴⁶ GHG Protocol – ICT Sector Guidance (se référer au Chapitre 5 du guide)

⁴⁷ Se référer à l'appendice II du Rapport du Comité d'experts sur la mesure « Evaluation de l'impact environnemental du secteur TIC : Analyse des écarts méthodologiques » : https://www.arcep.fr/uploads/tx_gspublication/impact-environnement-analyse-ecarts-methodologiques-secteurTIC_avril2023.pdf

⁴⁸ Voir Clause 12.2.3 de la Partie II de la Recommandation ITU L.1410

	<ul style="list-style-type: none"> • Renouvellement des équipements cœur circuit dans le scénario de référence • Mise en rebus anticipée des équipements cœur circuit dans le scénario de migration 	<p>migration. Les opérateurs continuent par ailleurs d'étudier les solutions d'ingénierie permettant d'optimiser les situations où on peut se passer du cœur de réseau circuit et de ce fait de capitaliser sur des gains supplémentaires.</p> <ul style="list-style-type: none"> • S'agissant de IMS : la migration du service voix depuis des MSC vers un cœur IMS va se faire sur un nombre réduit de machines, qui devrait réduire la consommation électrique, ceci rapprochera les points d'équilibre sans changer la conclusion de l'étude, la quantification exacte dépendra des implémentations propres de chaque opérateur.
IMS (centre de données)	<ul style="list-style-type: none"> • Quote-part des services voix/M2M dans la consommation des serveurs de la plateforme IMS. 	
Contrôleur radio 2G-3G	<ul style="list-style-type: none"> • Consommation des équipements RNC/BSC dans le scénario de référence • Renouvellement des équipements RNC/BSC dans le scénario de référence • Mise en rebus anticipée des équipements RNC/BSC dans le scénario de migration 	<ul style="list-style-type: none"> • La consommation électrique des contrôleurs RNC/BSC représente moins de 3% environ de l'ensemble de la consommation énergétique des stations de base 900MHz 2G-3G du réseau dans le scénario de référence. • La contribution de contrôleurs RNC/BSC représente moins de 3,3% de la valeur de référence du scénario de référence.
Feature phone et module IoT	<ul style="list-style-type: none"> • Recyclage et fin de vie 	<ul style="list-style-type: none"> • Les impacts due à la fin de vie (y compris le recyclage) ne sont pas pris en compte du au manque de données et la part marginale⁴⁹ que représente en général la phase de fin de vie dans l'empreinte carbone d'un équipement TIC

4.2.4. Considérations sur l'appréciation des potentiels effets rebonds dues à l'extinction des réseaux 2G-3G

La migration vers la 4G/5G pourrait inciter les utilisateurs des seuls services 2G-3G (voix, SMS, MMS et données à bas débit) à une consommation additionnelle de trafic (effet direct et rebond). Il est possible que certains de ces utilisateurs choisissent par exemple de passer d'un feature phone à un smartphone afin d'accéder à des services du type streaming vidéo, augmentant significativement leur consommation de données sur les réseaux mobiles. A l'inverse, d'autres utilisateurs pourraient choisir de conserver un feature phone 4G/5G. Certains propriétaires de smartphones ne consommeront peut-être que très peu de données (pas d'usages vidéo notamment). Il s'agit donc d'une question complexe car fortement attachée aux changements des comportements des consommateurs.

En tout état de cause, il semble possible de considérer que l'effet rebond lié à l'arrêt des réseaux 2G-3G devrait être très limité. Il s'agit là du résultat de l'analyse des deux principaux effets possibles suivants :

- Celui lié à la migration de mobiles 2G-3G et 4G non VoLTE à des mobiles 4G VoLTE / 5G ;
- Celui lié au *refarming* de la bande 900 MHz en 4G/5G.

⁴⁹ Par exemple, la phase de fin de vie représente moins de 0.2% pour les terminaux selon l'étude ADEME/Arcep sur l'impact environnemental du numérique en France (03/2023) : https://www.arcep.fr/uploads/tx_gspublication/note-synthese-au-gouvernement-prospective-2030-2050_mars2023.pdf

4.2.4.1. Effet rebond du passage des terminaux 2G-3G à des terminaux 4G/5G

S'agissant des terminaux, cela concerne des volumes très faibles :

- A la date Tm, il y a moins de 1% des téléphones qui ne supportent pas la voix sur LTE par rapport au total de téléphones à la date Ta – cf. chapitre *Détermination de la distribution des feature phones et de ces téléphones restants sur la base de leur cycle de vie*)
- Les mobiles plus récents pour des clients qui abandonnent le smartphone (une niche pour le moment selon l'expérience des opérateurs membres du Comité)

Tous ces utilisateurs auront la possibilité de changer un feature phone 2G-3G vers un feature phone VoLTE, s'ils ne souhaitent pas s'équiper smartphone. Ils disposeront dans ce cas des mêmes services avant et après, c.-à-d. appels voix, SMS, MMS.

Il pourrait y avoir un effet rebond pour une partie des utilisateurs qui choisiraient de passer sur un smartphone mais ceci ne concerne pas les clients avec des smartphones 4G non VoLTE qui devront évoluer vers un smartphone compatible VoLTE, qui avait donc déjà accès à la 4G. Pour la partie des utilisateurs équipés de feature phones et qui choisiraient à l'occasion de l'extinction de s'équiper en smartphones compatibles VoLTE, l'étude a évalué le pire cas d'effet rebond associé au passage d'appel voix à des appels visio grâce à la migration en concluant qu'il est quasi-inexistant, ceci est dû essentiellement à la très faible proportion des téléphones concernés à Tm (moins de 1% de la base des téléphones à Ta)⁵⁰. Ainsi, la migration de la voix ne devrait pas générer de trafic supplémentaire significatif.

S'agissant des objets connectés TIC :

Le Comité identifie peu de cas d'usage de l'IoT TIC dans l'étude qui vont se transformer radicalement au passage vers la 4G. Dans le cadre de l'étude, ceci pourrait s'appliquer au cas des nouveaux interphones compatibles 4G/5G générant plus de données que les anciens interphones 2G-3G car équipés de camera par exemple. Dans ce cas de figure et considérant un calcul maximaliste, où tous les nouveaux interphones seraient équipés de ce type de fonctionnalités, cela présenterait un incrément de trafic très faible par site radio au plus de de l'ordre de 0.24Mbps à l'heure chargée⁵¹, soit au pire cas, un incrément de charge par site radio de moins de 1%⁵², ce qui se traduit par une augmentation de la consommation électrique d'un site radio 4G/5G de moins de 1% (considérant

⁵⁰ Considérant les hypothèses les plus conservatrices suivantes : Volume de trafic vidéo associé à un appel vidéo (10MB/min) ; Durée d'un appel vidéo (10min) ; Nombre d'appels vidéos/semaine (7 sessions) ; Taille de photos (10MB/photo) ; nombre de photos échangées par semaine (10 photos) ; Nombre de téléphones concernés (200 000 téléphones) ; on obtient un volume de trafic (photos et appels vidéo) additionnel sur tout le réseau égal à $200\,000 \times 52 \times (10 \times 10^7 + 10 \times 10) = 8320\text{TB}$ par an, soit 2,4Gbps à l'heure chargée sur tout le réseau; ceci représente moins de 0,4 Mbps à l'heure chargée par site (pour rappel : 27 500 sites) ; soit un incrément sur la charge de la station de base de moins de 1%.

⁵¹ Considérant les hypothèses suivantes : Débit requis par call vidéo Interphone (2 à 5 Mbps d'après les chiffres d'un fournisseur de solutions d'intercom en visiophonie (voir <https://www.2n.com>)) ; durée moyenne de session (1 à 5 min) ; nombre de sessions/semaine (1 à 3 sessions) ce qui donne un volume de trafic data de 30 à 375MB/session. Considérant : 9,4% du trafic durant les jours chargés et 391 000 nouveaux intercoms à la date Tm équipés de fonctionnalités d'appels vidéo, nous obtenons un incrément de trafic à l'heure chargée sur tout le réseau entre 0,2Gbps (soit : $391\,000 \times 1 \times 30 \times 52 \times 9\% \times 8 \times 50\% / (365 \times 3600)$) à 6,5Gbps, soit 0,01Mbps à 0,24Mbps.

⁵² Considérant les hypothèses suivantes : Capacité d'une cellule LTE FDD (sans DSS) de largeur de bande 20MHz en 2T2R égale à 35 Mbps (voir annexe A de l'étude du Comité d'experts [Comité – 2022]) ; Capacité pour une cellule LTE FDD de largeur de bande 8.7MHz en bande basse (débit réduit de 20%) estimée à 12,2 Mbps (soit : $35 \times 8,7 \times 20\% / 20$) ; Faisant l'hypothèse que tout l'incrément de trafic data associé à la vidéo des visiophones soit porté exclusivement par la bande 900 MHz, on obtient un incrément de charge du site sur cette bande entre 0,02% et 0,65% (soit : $0,24 / (12,2 \times 3)$).

l'hypothèse conservatrice où les sites 900 MHz 4G/5G auraient une charge maximale de 25% tous services confondus)⁵³. Ainsi, le changement de technologie des objets connectés étudiés dans le cadre de l'étude ne devrait pas accroître la charge des stations (et par conséquent l'impact carbone) de manière substantielle pour remettre en cause l'intérêt de la migration.

4.2.4.2. Analyse du passage du spectre 900 MHz de 2G-3G à 4G/5G en termes de consommation de données

La bande 900 MHz n'est pas une bande capacitaire : malgré ses bonnes qualités de propagation (favorables à la couverture du réseau), elle n'offre qu'une bande passante limitée de par sa taille (2x35 MHz répartis entre les quatre opérateurs mobiles), même avec les technologies plus efficaces 4G/5G. Par conséquent, le *refarming* de ces fréquences après l'arrêt des réseaux 2G-3G n'apportera pas une capacité supplémentaire susceptible de générer des usages différents des services déjà proposés en 4G/5G avec les autres bandes de fréquences des opérateurs.

A niveau de qualité de service constant avant et après *refarming* (ex. le réseau permet d'assurer un débit de 8 Mbps), il n'y a pas de raison que le *refarming* pousse les utilisateurs à consommer plus de données (mêmes usages, même QoS)

Si le réseau est congestionné et que la 4G/5G 900MHz permet d'améliorer la QoS au niveau de la cible, **il pourrait y avoir une consommation plus importante attendue puisque les utilisateurs étaient contraints auparavant par la qualité de service insuffisante** : le réseau n'était pas capable de répondre à la demande client. **Mais cela signifie alors que la demande était déjà plus forte que la capacité du réseau.** L'opérateur répond donc à une demande des clients et permet d'assurer une QoS adéquate. C'est également l'enjeu des campagnes de mesures Arcep que d'inciter les opérateurs à assurer cette QoS.

- Dans ce scénario, si le *refarming* 900MHz n'est pas disponible, l'alternative serait de densifier le réseau avec des sites supplémentaires, ce qui est bien plus négatif d'un point de vue carbone.
- Le nombre de clients concerné et donc de trafic supplémentaire nous semble faible à la date Tm pour parler d'effet rebond.

En conclusion, l'effet rebond reste donc difficile à qualifier et à quantifier, mais l'appréciation des différents faisceaux d'indices explicités ci-dessous indique qu'il devrait rester assez limité.

⁵³ Raisonnement dans le pire cas : Considérant un profil data de 76% (voir [Comité – 2022]) ; la nouvelle charge de la station de base 900 MHz accueillant en plus de son trafic 4G (25%) l'incrément de charge du au trafic des visiophones (0,65%) et celui du trafic vidéo lors des appels visio calculé précédemment (1%) est égale à 26,65% (soit 25%+1%+0,65%); avec les paramètres du modèle de consommation de la station de base 4G/5G (*a,b*) explicités dans les chapitres précédents, on obtient une consommation électrique journalière égale à 15,57KWh (soit $24 \cdot (76\% \cdot 0,44 \cdot 26,65\% + 0,56)$). Sachant que la consommation électrique journalière d'une station de base 4G/5G sans cet incrément de trafic serait égale à 15,45KWh (soit $24 \cdot (76\% \cdot 0,44 \cdot 25\% + 0,56)$), on obtient donc un incrément de consommation quotidienne de 0,13KWh par site 4G/5G, soit un incrément de consommation de 0,83%.

4.3. Impact carbone embarqué des biens de l'utilisateur final des TIC

4.3.1. Données d'impact carbone considérés pour les terminaux téléphoniques

L'utilisation de données publiques d'administrations françaises (Arcep, ANFR, ADEME, CREDOC) par le comité d'experts mobile pour ses différentes études permet de garantir à priori une bonne qualité de ces données.

Pour les valeurs de l'empreinte carbone des terminaux mobiles (smartphones, feature phones), les bases de données Base Carbone et Base IMPACTS (v 2.02) de l'ADEME sont utilisées. La Base Carbone est une base de données publique de facteurs d'émissions nécessaires à la réalisation d'exercices de comptabilité carbone pour les organisations (par exemple, dans le cadre des bilans de GES réglementaires ou volontaires). Elle est administrée par l'ADEME, mais sa gouvernance est multi-acteur et son enrichissement est ouvert. La Base IMPACTS est destinée à supporter des exercices d'affichage environnemental ou la réalisation de bilan produit. Il est à noter qu'un travail de consolidation des données d'impact issues de ces deux bases est en cours par l'ADEME dans le cadre de la création de la Base Empreinte.

- Pour le cas des smartphones, l'étude se base sur les données d'impact construites par le consortium NegaOctet dans le cadre du projet PERFECTO 2018 et alimentant la Base IMPACTS⁵⁴. Il est à noter qu'une certaine variabilité de la donnée entre la valeur retenue et d'autres données sur l'impact du carbone embarqué d'un smartphone en France issues de bases de données comme Boavizta⁵⁵ ou de données d'évaluation carbone de fabricants de terminaux (PCF) (cf. voir Chapitre « [Analyse de la qualité des données](#) »). En dépit de cette variabilité, l'étude a retenu la donnée de la Base IMPACTS en cohérence avec d'autres études récentes de l'ADEME et l'Arcep portant sur l'impact environnemental du numérique⁵⁶.
- Pour le cas des feature phones, la Base IMPACTS n'indique pas des données d'impact pour ce type de terminaux, en revanche cette donnée est inscrite dans la Base Carbone sous la dénomination « téléphone classique »⁵⁷.

En conclusion : Dans cette étude, un feature phone et un smartphone ont ainsi respectivement comme empreinte carbone embarqué (hors phase usage), **les valeurs respectives de 84 et 14 kg de CO2e/unité.**

4.3.2. Données d'impact carbone considérés pour les objets connectés IoT

Les objets connectés IoT se caractérisent par leurs conceptions diverses, ce qui rend la performance de l'ACV pour un objet connecté spécifique loin d'être représentative de la variété des conceptions et des applications dans le domaine de l'IoT. Pour déterminer des données d'impact des objets connectés, l'étude réutilise les travaux et les résultats de l'approche de modélisation *Bottom-Up* dans la

⁵⁴ <https://base-impacts.ademe.fr/gestdoclist>

⁵⁵ <https://datavizta.boavizta.org/manufacturereadata>

⁵⁶ Exemples: l'étude ADEME sur l'impact du reconditionnement (09/2022) : <https://librairie.ademe.fr/dechets-economie-circulaire/5241-evaluation-de-l-impact-environnemental-d-un-ensemble-de-produits-reconditionnes.html>; l'étude ADEME/ARCEP sur l'impact environnemental du numérique en France (03/2023) : https://www.arcep.fr/uploads/tx_gspublication/note-synthese-au-gouvernement-prospective-2030-2050_mars2023.pdf , l'étude ADEME sur l'impact environnemental de la digitalisation des services culturels (11/2022) : <https://librairie.ademe.fr/dechets-economie-circulaire/5942-evaluation-de-l-impact-environnemental-de-la-digitalisation-des-services-culturels.html>

⁵⁷ [https://data.ademe.fr/datasets/base-carbone\(r\)](https://data.ademe.fr/datasets/base-carbone(r))

publication de Pirson et Bol⁵⁸. Dans cette approche, un objet communicant est décomposé en modules fonctionnels (actionneurs, calcul, alimentation, connectivité etc.) ; chaque module fonctionnel est caractérisé par un niveau de spécification matérielle sur une échelle de 0 à 3 pour refléter la complexité du profil matériel de ce module. Le niveau de spécification matérielle de chaque module est relié à une modélisation technique par les auteurs permettant de déterminer les données d'impact carbone de l'objet.

La Recommandation ITU-T L.1450 n'est pas explicite et prescriptive sur le périmètre de comptabilisation de l'impact (c à d les règles d'allocation à utiliser) de l'IoT, ceci est due à la diversité des profils de composition des objets, la difficulté de définir une frontière nette entre la part connectivité et les autres fonctionnalités/modules embarqués dans l'objet⁵⁹. 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 (antennes, tout autres éléments discrets etc.). Un tel choix 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.

En référence à la Table 4 de la Recommandation L.1410, l'ensemble des processus couverts et le type de données sur le périmètre « berceau jusqu'à la porte » (« *Cradle to Gate* ») utilisées pour la comptabilisation de leur impact sont détaillées :

Tableau 18 - Types de données utilisées dans l'étude vs le type de données requises par la Recommandation ITU L.1410

Phase	Processus	Type de données requises par la Recommandation	Type de données utilisées dans l'étude
Acquisition de matières premières	Extraction de matières premières	Secondaire	Secondaire
	Traitement de matières premières	Secondaire	Secondaire
Production	Fabrication de composants (Cf. Tableau 19)	Données primaires ou secondaires spécifiques TIC	Données secondaires spécifiques ICT (Cf. Tableau 19)
	Assemblage (Cf. Tableau 19)	Données primaires ou secondaires spécifiques TIC	Données secondaires spécifiques ICT (Cf. Tableau 19)
	Activités de support du fabricant	Données primaires ou secondaires spécifiques TIC ; données secondaires	Non concerné
	Production de biens support	Données primaires ou secondaires spécifiques TIC ; données secondaires	Non concerné
	Construction de sites spécifiques TIC	Données primaires ou secondaires spécifiques TIC ; données secondaires	Non concerné

- **Modélisation des processus « Fabrication de composants » et « Assemblage »**

En référence à la Table E.1 (Annexe E) de la Recommandation ITU L.1410, les parties constitutives du module de connectivité sont modélisés conformément à la Recommandation. Les autres partie/processus attribuables au module de Connectivité sont également explicités et leur contribution

⁵⁸ « Assessing the embodied carbon footprint of IoT edge devices with a bottom-up life-cycle approach », 2021, Thibault Pirson et David Bol.

⁵⁹ Par exemple, pour les objets les moins sophistiqués, certains modules embarquent plus d'une fonctionnalité.

est estimée via des facteurs de majoration appliqués sur les données d'impact du module de Connectivité dans la publication de Pirson et Bol.

Ces facteurs de majoration sont le fruit de discussions (estimations d'experts) avec Thibault Pirson auteur de l'étude précitée. Ces facteurs de majoration restent cependant soumis à une incertitude :

Tableau 19 - Facteurs de majoration appliqués à la donnée d'impact

Composants	Processus unitaires	Commentaire
B1.1.4 Circuits intégrés (IC)	IC : Modélisation par pièce basée sur la surface de la puce (« Silicon die surface ») avec précision du type de packaging et le nœud technologique. Prise en compte de l'impact de tous les processus unitaires concernés dans la production de l'IC incluant les processus « Frontends » (production du wafer, production de la puce) et les processus « Backend » (acquisition de matières premières, encapsulation/packaging de l'IC).	Pas de majoration
B1.1.5 Parties mécaniques et matérielles	Antennes : Modélisation par pièce et masse via un modèle (ACV paramétrique) personnalisé intégrant les éléments généralement constitutifs d'une antenne, le modèle intègre l'impact de l'acquisition de matières premières ; n'inclue pas l'assemblage.	Pas de majoration Non considération d'une antenne patch
Autres éléments attribuables au module de Connectivité majorant la donnée d'impact considéré (ces éléments sont originellement comptabilisés chez d'autres modules)		
B1.1.3 Eléments électromécaniques	Connecteurs et Shield électromagnétique	Majoration de 10-30%
B1.1.8 Autres composants PCBA	Éléments d'interfaçage avec les autres modules de l'objet IoT (ex. avec le module d'alimentation, l'unité de calcul de l'objet etc.), composants passifs (notamment pour l'adaptation d'impédance)	
B1.1.10 Modules « boîte noire »	ACV « Cradle-to-Gate » de la carte SIM (comprend la carte SIM (IC) + les composants associés permettant son fonctionnement : chariot de la SIM/connecteurs, surface PCB additionnelle, alimentation de la SIM).	Majoration de 175 gCO ₂ e ⁶⁰
B1.1.7 PCB	PCB en cas de montage du modem sur une carte dédiée et processus d'assemblage	Majoration de 50%
B1.2 Assemblage	Non inclus dans le module de connectivité mais dans le module PCB de l'IoT	

En conclusion, la somme des impacts carbone des éléments constitutifs du module connectivité et l'ensemble des éléments attribuables à ce module donne une estimation « *Cradle to Gate* » égale à **4.6 Kg CO₂e/module connectivité**.

4.3.3. Calcul du cout carbone des terminaux avec amortissement

Cette partie explique l'approche de calcul par amortissement considérée pour comptabiliser l'impact carbone embarqué des terminaux dans le scénario de référence et le scénario de migration. Le développement de l'approche distingue le cas spécifique de non prise en compte du

⁶⁰ https://www.izm.fraunhofer.de/en/news_events/tech_news/independent-study-confirms-esim-as-an-environmentally-friendly-sim-solution.html

reconditionnement (exemple : cas des feature phones) puis une généralisation en prenant en compte le reconditionnement (exemple : cas des smartphones)

4.3.3.1. Non prise en compte du reconditionnement

Principe du calcul :

- Un terminal dont l'impact carbone incorporé est C avec une durée de vie de D années a un impact carbone embarqué amorti de C/D chaque année pendant son cycle de vie normal de D années (amortissement linéaire)
- Un terminal dont l'impact carbone embarqué est C que l'on viendrait ne plus utiliser du tout pendant son cycle de vie alors qu'il lui resterait S années dans son cycle de vie normal de D années, a un impact carbone immédiat et unique de $C * S/D$ (comme une immobilisation corporelle (matériel) encore non amortie que l'on viendrait détruire et qui représenterait alors une perte à comptabiliser).
- Pas de reconditionnement pris en compte.

Exemple :

- Un Ancien téléphone mobile de durée de vie 5 ans, d'impact carbone embarqué A est déjà utilisé depuis 3 ans à la date T_m , ainsi, il lui reste 2 ans dans son cycle de vie normal.
- Un Nouveau téléphone mobile de durée de vie 5 ans, d'impact carbone embarqué N est introduit neuf à des moments différents suivant le scénario :
 - o Dans le scénario de référence quand l'Ancien terminal finit son cycle de vie
 - o Dans le scénario de Migration, ce nouveau terminal est introduit dès la date T_m , en venant remplacer l'ancien terminal.

Tableau 20 - Illustration de l'amortissement de l'impact carbone embarqué d'un terminal par scénario

Scénario	Année	1	2	3	4	5	Commentaire
Référence	Impact carbone : cycle vie normal	A/5	A/5	N/5	N/5	N/5	Cycles de vie normaux pour tous les terminaux
Migration	Impact carbone : cycle vie normal	N/5	N/5	N/5	N/5	N/5	
Migration	Impact carbone : arrêt d'un terminal	2/5 A					L'arrêt du terminal ancien à T_m a un impact carbone unique à cette date de 2/5 A
Calcul (Migration - Référence)	Calcul par année	N/5+A/5	N/5-A/5	0	0	0	

- Scénario de référence : impact total de $2/5 A + 3/5 N$
- Scénario de migration : impact total de $2/5 A + 5/5 N$

Différence (migration – référence) = $2/5 N$

On retrouve le même résultat en utilisant les différences année par année entre les deux scénarios

$$\text{Différence (migration – référence)} = N/5 + A/5 + N/5 - A/5 = 2/5 N$$

Ce deuxième calcul montre que le résultat n'est pas lié au nombre d'années sur lequel porte le calcul dès que l'on prend un nombre d'année supérieur ou égal à la durée de vie du terminal ancien (2 ans dans l'exemple).

On peut simplement interpréter le résultat avec un surcout pour le scénario de migration de $N/5$ par année pendant les 2 ans du cycle de vie normal restants de l'ancien terminal.

Autre exemple : cas d'un téléphone non voix/LTE d'une durée de vie de 8 ans remplacé par un smartphone voix/LTE à la date T_m dans le scénario de migration alors qu'il lui restait 1 année de son cycle de vie normal

$$\text{Différence (migration – référence)} = 1/8 N$$

Plus généralement, D étant la durée de vie du nouveau terminal, S étant le nombre d'années restantes du cycle de vie de l'ancien terminal, et N étant l'empreinte carbone embarqué du nouveau terminal, on a :

$$\text{Différence (migration – référence)} = S/D * N = S * (N/D)$$

On peut simplement interpréter le résultat avec un surcout pour le scénario de migration de N/D par année pendant les S ans du cycle de vie normal restants de l'ancien terminal.

On peut également noter que le rapport S/D est nombre d'unités carbone à prendre en compte pour ce terminal

4.3.3.2. Généralisation par la prise en compte du reconditionnement

Le développement qui suit s'applique uniquement au cas des smartphones.

En cas de reconditionnement, le nouveau terminal est un terminal reconditionné aussi bien dans le scénario de référence que dans le scénario de migration.

En reprenant l'exemple d'illustration ci-dessus et considérant : « N' » l'impact carbone embarqué du terminal reconditionné, « D' » la durée de vie théorique du terminal reconditionné, « S » le nombre d'années restantes du cycle de vie de l'ancien terminal, on obtient une différence entre le scénario de référence et de migration égale à :

$$\text{Différence (migration – référence)} = S * (N'/D')$$

La logique de calcul reste la même que celle pour le cas de non prise en compte du reconditionnement sauf à considérer les paramètres suivants :

- « N' » : Impact carbone embarqué du reconditionnement. Cet impact comprend les émissions des processus de reconditionnement incluant le tri et le contrôle, la consommation du site de reconditionnement, le changement des composants défectueux, les tests et toute la logistique associée au reconditionnement (collecte des appareils et approvisionnement en pièces). Cet impact est largement inférieur à l'impact carbone embarqué d'un terminal neuf : $N' = \alpha.N$
- « D' » : Durée de vie d'un terminal reconditionné. Les terminaux reconditionnés bien qu'ils emportent un impact carbone amont plus faible que leur équivalents neufs, ils sont également caractérisés par une durée de vie plus réduite. $D' = \beta.D$

Considérant un ratio « r » de téléphones reconditionnés parmi les ventes de terminaux, l'équation précédente est réécrite comme :

$$\text{Différence (migration – référence)} = r * S * (N'/D') + (1-r) * S * (N/D)$$

Avec les paramètres introduits précédemment, on obtient la forme générale suivante :

$$\text{Différence (migration – référence)} = S \cdot (N/D) \cdot (1 + r \cdot (\alpha/\beta - 1))$$

Afin d'appliquer la formule, les valeurs suivantes ont été considérées :

- « α » : L'étude publiée par l'ADEME sur l'impact des produits reconditionnés⁶¹ considère un impact carbone embarqué de reconditionnement estimé à 8% de celle de l'impact carbone embarqué d'un terminal neuf. Cette donnée correspond à un profil moyen d'un téléphone reconditionné⁶² en France, elle est construite sur la base de données primaires (collecte auprès d'échantillons représentatifs d'acteurs du reconditionnement de téléphones mobiles en France (2020)) et validée par une revue critique.
- « β » : Selon la même étude de l'ADEME, un ratio de 2/3 est considéré entre les deux durées.
- « r » : 13% des terminaux vendus sont reconditionnés selon l'enquête annuelle numérique soutenable (avril 2022) publiée par l'Arcep⁶³.

A supposer que ces valeurs demeurent valides à horizon de la date de migration, on obtient :

$$\text{Différence (migration – référence)} = 0.84 \cdot S \cdot (N/D) = S \cdot ((0,84 \cdot N)/D)$$

La valeur de N étant 86 kgCO₂e (voir chapitre 4.3.1), la valeur de 0,84 * 86 = 72,24 kgCO₂e représente dans cette étude le coût unitaire du carbone embarqué d'un smartphone.

On peut aussi noter que le rapport S/D représente également le nombre d'unités carbone à prendre en compte pour les smartphones.

4.4. Détermination de la distribution des téléphones et IoT sur la base de leur cycle de vie

4.4.1. Détermination de la distribution des smartphones et de ces téléphones restants sur la base de leur cycle de vie

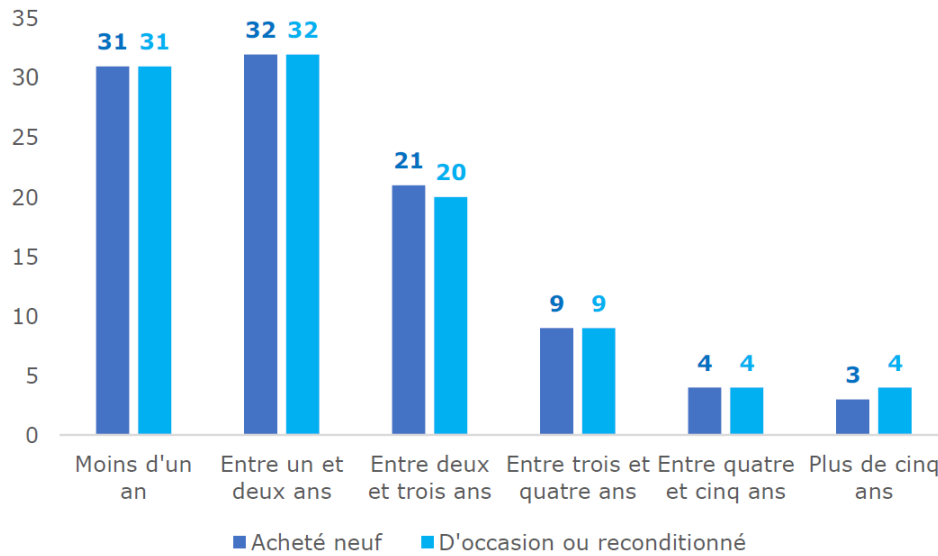
Le graphique suivant est utilisé pour déterminer les deux tables recherchées : distribution des smartphones et smartphones restants :

⁶¹ <https://librairie.ademe.fr/dechets-economie-circulaire/5241-evaluation-de-l-impact-environnemental-d-un-ensemble-de-produits-reconditionnes.html>

⁶² Y compris profil moyen de mode et configuration de reconditionnement.

⁶³ https://www.arcep.fr/uploads/tx_gspublication/enquete-PNS-edition2022-infographie_avril2022.pdf

La durée de détention est identique, que le smartphone soit neuf ou d'occasion
 - Champ : ensemble de la population de 12 ans et plus disposant d'un smartphone, en % -



Source : CREDOC, Baromètre du numérique, édition 2021.

Figure 12 - Distribution de la durée détention d'un smartphone en France d'après le CREDOC

Seul le graphe sur les smartphones neufs est utilisé directement dans l'étude : ce point est ensuite explicité dans ce chapitre.

D_i : Pourcentage de téléphones détenus entre $i - 1$ et i années

Sur la base de l'édition 2021 du baromètre du numérique, **et donc des valeurs de distribution de l'année 2020 étudiée ici**, on a pour les smartphones neufs :

$D_1=31\%$; $D_2=32\%$; $D_3=21\%$; $D_4=9\%$; $D_5=4\%$

En considérant qu'un smartphone a une durée de vie maximum de 8 ans, on a : $D_6+D_7+D_8=3\%$. Les trois valeurs D_6 , D_7 et D_8 ont été réparties en utilisant une hypothèse supplémentaire expliquée dans la suite de ce chapitre.

R_i : Pourcentage de téléphones restants dans le réseau après i années

V_i : Nombre de téléphones vendus avec V_1 représentant les ventes de l'année étudiée (2020)

et V_{i+1} les ventes de l'année précédant les ventes V_i . On a ainsi ici V_2 les ventes de 2019, V_3 les ventes de 2018 etc. V_i : peut aussi être défini comme le nombre de téléphones vendus la i ème année avant 2021.

T_i : Nombre de téléphones entre $i - 1$ et i années d'ancienneté encore dans le réseau.

Ces T_i terminaux atteignent la fin de l'année i ; pour simplifier, on dira que ces T_i terminaux ont i années

$$T_i = V_i * R_i$$

$\frac{T_i}{\sum_{i=1}^{max} T_i} = D_i$; $\sum_{i=1}^{max} T_i$: cette somme représentant le nombre total de terminaux de différents âges encore dans le réseau.

Des deux égalités ci-dessus, on en déduit que :

$$\frac{V_i * R_i}{\sum_{i=1}^{max} T_i} = D_i$$

$$\frac{V_{i+1} * R_{i+1}}{D_{i+1}} = \frac{V_i * R_i}{D_i} = \sum_{i=1}^{max} T_i$$

On peut ainsi déterminer facilement successivement les différents R_i avec :

$$R_{i+1} = \frac{D_{i+1}}{D_i} * \frac{V_i}{V_{i+1}} * R_i \text{ et } R_1 = 100\%$$

$$\text{En posant } k_i = \frac{V_1}{V_i}, \text{ on a } V_i = \frac{V_1}{k_i}$$

$$\text{Egalité 1: } R_{i+1} = \frac{D_{i+1}}{D_i} * \frac{k_{i+1}}{k_i} * R_i \text{ et } R_1 = 100\%$$

Pour calculer les différents R_i , il est nécessaire de déterminer les différentes valeurs k_i , liées aux ventes de smartphones en France.

Le graphe bleu clair indiqué par le Credoc comprend aussi bien le cas des smartphones reconditionnés, que d'occasion sans intervention technique au moment de leurs cessions. Ces différents deux types de terminaux ayant des comportements différents, il est difficile d'exploiter mathématiquement directement ce graphe. Néanmoins, il est possible d'intégrer ces deux types de smartphones dans l'étude comme l'expliquent les deux sections suivantes.

Cas des smartphones reconditionnés

Le document de l'Arcep sur le renouvellement des terminaux (voir [ARCEP – 2021]) indique une part du reconditionné dans le total des smartphones vendus de 13% en 2020.

Happydemics a trouvé un nombre très proche dans le cadre d'une étude en ligne réalisée pour YesYes (voir [YESYES-2021]) indiquant une part du reconditionné de 14% en 2020.

Le document de l'Arcep (voir [ARCEP – 2021]) indique également que :

- Concernant les terminaux reconditionnés vendus, les acteurs rencontrés par l'Arcep ont souligné que le marché se concentrait autour d'un nombre réduit de terminaux, principalement des terminaux haut de gamme et principalement produits par les marques Apple et Samsung. Ces terminaux conserveraient une valeur élevée plus longtemps. A titre d'illustration, et d'après les échanges réalisés et les données collectées, l'iPhone 8 reconditionné serait le terminal reconditionné qui se serait le mieux vendu en 2020.

Il faut souligner que l'iPhone 8 supporte la voix/LTE, et qu'en allant sur des plates-formes de vente de smartphones conditionnés on constate la tendance décrite par l'Arcep avec des smartphones de marques Apple⁶⁴ et Samsung⁶⁵ essentiellement vendus, et qui supportent la voix/LTE.

On devrait retrouver ainsi pour les smartphones reconditionnés la même tendance que pour les smartphones vendus neufs : la très grande majorité de ces smartphones les deux dernières années avant la date T_a supportent la voix sur LTE, et les smartphones reconditionnés ne devraient pas

⁶⁴ La base de données Gambod du GSA (Global mobile Suppliers Association) montre que les iPhone ont supporté la voix/LTE dès l'iPhone 6.

⁶⁵ La base de données Gambod du GSA fait apparaître 280 modèles de smartphones Samsung supportant la voix/LTE, avec déjà des Galaxy S4 et de nombreux Galaxy S5.

modifier les conclusions sur l'évaluation de l'impact des smartphones sur cette étude, quant au support de la voix sur LTE.

On va considérer un smartphone reconditionné, comme un smartphone neuf, y compris dans sa durée de vie maximum de 8 ans, ce qui est un pire cas pour l'évaluation carbone des téléphones, mais sachant que le graphe bleu clair du Credoc qui concerne surtout les téléphones reconditionnés, semble montrer un cycle de vie des téléphones reconditionnés assez proche de smartphones neufs.

Cas des smartphones d'occasion (hors reconditionnement)

Le document du CREDOC (voir **[CREDOC-2021]**) dans le graphe 194 indique pour la période de 2020 une part d'occasion ou reconditionné de 17%.

Ce cas représentait donc environ 4%⁶⁶ des téléphones acquis en 2020, soit un nombre assez réduit.

Il faut remarquer que les acheteurs de smartphones neufs les conservent intégralement les deux premières années, et que donc des smartphones d'occasion ont plus de 2 ans d'ancienneté au moment de l'achat d'occasion, et une durée de vie maximum totale de 8 ans inchangée (puisque aucune n'intervention technique n'a été réalisée lors de la revente).

Le changement de propriétaire du terminal après plus de 2 ans sans intervention technique sur le terminal, n'a pas de raison de modifier la table Ri, dont les valeurs i d'ancienneté sont liées au terminal uniquement. Le calcul général sur les smartphone neufs intègre donc bien le cas des smartphones d'occasion (hors reconditionnement).

Détermination des différents ki (vente de smartphones)

Sur la base des considérations précédentes, il faut évaluer les smartphones vendus en France, qu'ils soient neufs ou reconditionnés.

Les données combinées de vente de smartphones neufs en France, ainsi que données de vente de smartphones dans le monde⁶⁷ permettent d'avoir une bonne estimation des ventes de smartphones neufs depuis 2007.

D'autre part l'étude d'Happydemics (voir **[YESYES-2021]**) indique que 2,6 millions de smartphones reconditionnés ont été vendus en 2020 représentant une hausse annuelle de 20%.

De plus l'article publié par « Les numériques »⁶⁸ indique : « D'après le cabinet Gfk, ce ne sont pas moins de 3,1 millions de smartphones reconditionnés qui se sont vendus sur l'année 2021. Une

⁶⁶ 24% de 17% sur la base des chiffres de l'ARCEP (**[ARCEP – 2021]**) et du CREDOC (**[CREDOC – 2021]**)

⁶⁷ Source : « Nombre de smartphones vendus aux utilisateurs finaux dans le monde entre 2007 et 2021 (en millions d'unités) » de Gartner publié en février 2021 ; rapport GFK pour la France, couvrant la période de décembre 2021 jusqu'à juillet 2022. Par proportion, les différents chiffres ont été déterminés pour la France, sauf pour 2020 où le nombre a été corrigé à la hausse pour tenir compte de l'impact moindre proportionnellement du Covid. Le nombre en 2022 a été choisi comme 95% de 2021, sachant que différents articles de presse ont indiqué une diminution des ventes de smartphones (diminution mondiale d'environ 11%, ramenée à 5%, toujours avec une approche similaire).

⁶⁸ « Le reconditionné, un marché en pleine progression auprès des Français » : article publié le 13/09/2022 dans « Les numériques » : <https://www.lesnumeriques.com/telephone-portable/le-reconditionne-un-marche-en-pleine-progression-aupres-des-francais-n191579.html>

progression de 20 % par rapport à l'année précédente, signe que l'achat d'un smartphone ayant déjà servi se démocratise. »

Il faut noter que les deux études donnent des résultats cohérents car 3,1/1,2 # 2,6

Détermination des différents Ri

Les différents Ri sont déterminés avec l'égalité 1 ci-dessus.

Les durées totales de détention de plus de 5 ans (3%) ont été interprétées par les valeurs indiquées en vert de façon à ce que la valeur absolue du TCAM pour le smartphone croît.

Tableau 21 - Détermination des tables des Restants pour le cas des Smartphones

Nombre années (REF 2020) i	% durée détention Smart Phone: Di	Ki= V1/Vi	%Restant Smart phone Ri	Smart phone = %disparus par année	TCAM Smartphone par année
1	31.00%	100.00%	100.00%	0.00%	0.00%
2	32.00%	96.31%	99.42%	0.58%	-0.29%
3	21.00%	97.40%	65.98%	33.44%	-12.94%
4	9.00%	100.24%	29.10%	36.88%	-26.55%
5	4.00%	104.26%	13.45%	15.65%	-33.05%
6	2.10%	110.58%	7.49%	5.96%	-35.07%
7	0.80%	126.89%	3.27%	4.22%	-38.64%
8	0.10%	162.16%	0.52%	2.75%	-48.14%
9	0.00%	228.29%	0.00%	0.52%	-100.00%
TOTAL	100.00%			100.00%	

Détermination des différents Di l'année avant Ta

Le graphe du Credoc a permis de déterminer les différents Di pour l'année 2020.

Or nous avons besoin des différents Di pour l'année précédant la date Ta de l'arrêt de la 2G-3G, sachant que nous disposons de la table des Ri, avec l'hypothèse que cette table est indépendante de l'année.

L'égalité suivante est réutilisée (voir chapitre précédent) :

$$\text{Egalité 1: } R_{i+1} = \frac{D_{i+1}}{D_i} * \frac{V_i}{V_{i+1}} * R_i \text{ et } R_1 = 100\%$$

On en déduit l'égalité suivante qui va permettre de déterminer la durée de détention des téléphones par année :

$$\text{Egalité 2: } D_{i+1} = \frac{R_{i+1}}{R_i} * \frac{V_{i+1}}{V_i} * D_i \text{ et } R_1 = 100\%$$

De plus on sait également que :

$$\text{Egalité 3: } \sum_{i=1}^{\max} D_i = 100\% \text{ avec max étant la durée de vie du téléphone considéré.}$$

Dans un premier temps, on va déterminer D1. De l'égalité 2, on en déduit que :

$$D_2 = \frac{R_2}{R_1} * \frac{V_2}{V_1} * D_1 = R_2 * \frac{V_2}{V_1} * D_1 \text{ car } R_1 = 100\%$$

$$D_3 = \frac{R_3}{R_2} * \frac{V_3}{V_2} * D_2 = \frac{R_3}{R_2} * \frac{V_3}{V_2} * R_2 * \frac{V_2}{V_1} * D_1 = R_3 * \frac{V_3}{V_1} * D_1$$

De même on a :

$$D_8 = R_8 * \frac{V_8}{V_1} * D_1 \text{ (démontrable par récurrence : voir à la fin de ce chapitre)}$$

$$D_1 + D_2 + \dots + D_8 = 1$$

Des égalités précédentes on en déduit que :

$$D_1 + R_2 * \frac{V_2}{V_1} * D_1 + \dots + R_8 * \frac{V_8}{V_1} * D_1 = 1$$

$$D_1 = \frac{1}{(1 + R_2 * \frac{V_2}{V_1} + \dots + R_8 * \frac{V_8}{V_1})}$$

$$\text{En posant } k_i = \frac{V_1}{V_i}, \text{ on a } V_i = \frac{V_1}{k_i}$$

$$\text{Egalité 4: } D_1 = \frac{1}{(1 + R_2/k_2 + \dots + R_8/k_8)}$$

D1 peut être calculé car les différents Ri sont déjà connus, et les différents ki sont connus aux ventes de téléphones jusqu'à l'année précédant la date Ta. La date de Ta=2022 a servi de base pour la détermination des ki.

Puis on détermine successivement les autres Di, pour i=2, 3 ... 8

$$D_i = R_i * \frac{V_i}{V_1} * D_1$$

$$\text{Egalité 5: } D_i = R_i/k_i * D_1$$

Tableau 22 – Détermination des Di des smartphones avant la date Ta, puis vérification des Ri

i (année avant Ta)	Ki=V1/Vi	Ri (table)	Ri /Ki	Di	Vérification Ri
1.00	100.00%	100.00%	100.00%	32.02%	100%
2.00	99.13%	99.42%	100.29%	32.11%	99.42%
3.00	108.07%	65.98%	61.05%	19.55%	65.98%
4.00	104.08%	29.10%	27.96%	8.95%	29.10%
5.00	105.26%	13.45%	12.78%	4.09%	13.45%
6.00	108.32%	7.49%	6.92%	2.21%	7.49%
7.00	112.68%	3.27%	2.91%	0.93%	3.27%
8.00	119.50%	0.52%	0.44%	0.14%	0.52%
TOTAL			312.35%	100.00%	

La somme 312,35% est égale à $(1 + R_2/k_2 + \dots + R_8/k_8)$ et D_1 est égal à son inverse

Puis on trouve les autres différents D_i sachant que $D_i = R_i/k_i * D_1$ avec $D_1 = 32,02\%$

Afin de vérifier la cohérence, les différents Ri sont recalculés en fonction des Di que l'on a trouvés et les Ki en utilisant l'égalité 1.

A titre de vérification de cohérence, on recalcule les différents Ri sur la base de l'égalité 1.

Comme sur la base de l'hypothèse de l'étude, on a bien de des Ri constants quelle que soit l'année, mais les différents ki et Di évoluent d'une année à l'autre, car les ventes de smartphones (neufs + reconditionnés) ne sont pas constantes d'une année à l'autre.

Démonstration par récurrence :

Démontrable par récurrence que : $D_i = R_i * \frac{V_i}{V_1} * D_1$

$D_1 = R_1 * \frac{V_1}{V_1} * D_1$; donc l'égalité est vraie au rang 1

Si vrai au rang n (hypothèse de récurrence) : $D_n = R_n * \frac{V_n}{V_1} * D_1$

Alors :

$$D_{n+1} = \frac{R_{n+1}}{R_n} * \frac{V_{n+1}}{V_n} * D_n \text{ d'après l'égalité 2}$$

$$D_{n+1} = \frac{R_{n+1}}{R_n} * \frac{V_{n+1}}{V_n} * R_n * \frac{V_n}{V_1} * D_1 \text{ d'après l'hypothèse de récurrence}$$

$$D_{n+1} = \frac{R_{n+1}}{R_n} * \frac{V_{n+1}}{V_n} * R_n * \frac{V_n}{V_1} * D_1 = R_{n+1} * \frac{V_{n+1}}{V_1} * D_1$$

Et l'égalité est encore vraie au rang n+1.

4.4.2. Détermination de la distribution des feature phones et de ces téléphones restants sur la base de leur cycle de vie

On va commencer par déterminer les différents Ri pour un feature phone. Puis les ki, et les Di l'année précédent Ta sont calculés.

Détermination des différents Ri

On dispose de la table de durée de détention des smartphones grâce à l'étude du CREDOC [CREDOC-2021], et les pourcentages de smartphones restants par année en ont été déduits (voir chapitre précédent). Mais on ne dispose pas directement de ces informations pour les feature phones.

L'étude du CREDOC [CREDOC-2021] fournit également les causes de renouvellement d'un smartphone, montrant 25% d'achat « plaisir ».

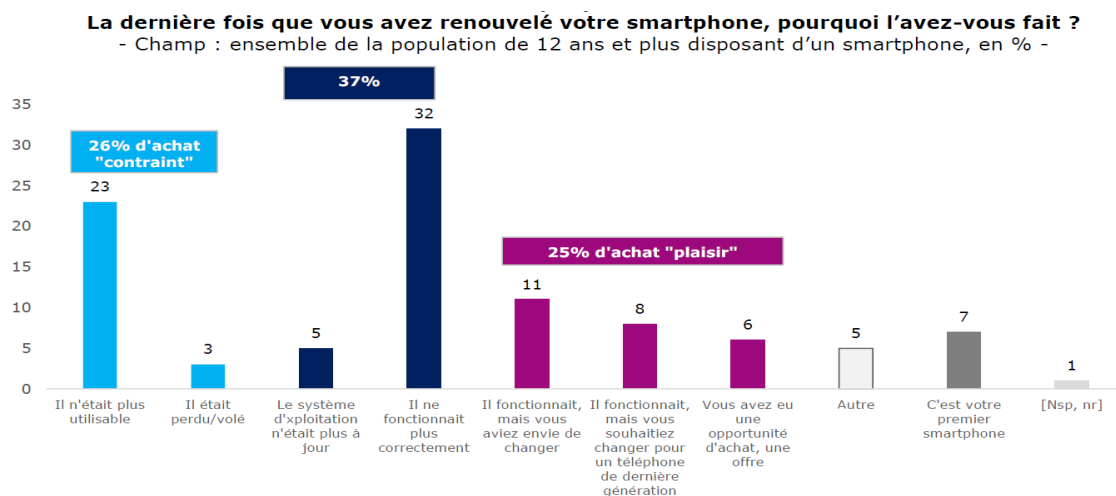


Figure 13 - Statistique sur les causes de renouvellement d'un smartphone en France d'après le CREDOC

L'hypothèse est que ces achats « plaisir » n'existent pas pour les feature phones : ces 25% de terminaux ont été répartis assez régulièrement sur les dernières années du cycle des feature phones sur une hypothèse d'une durée maximale de vie de 10 ans et de façon à ce que la valeur absolue du TCAM équivalent croît par année, comme pour les smartphones.

On en déduit les feature phones disparaissant par année (à chaque début d'année), et le pourcentage restant chaque année (après disparition en début d'année).

Tableau 23 - Détermination de la table des Restants Ri pour le cas des Feature Phones

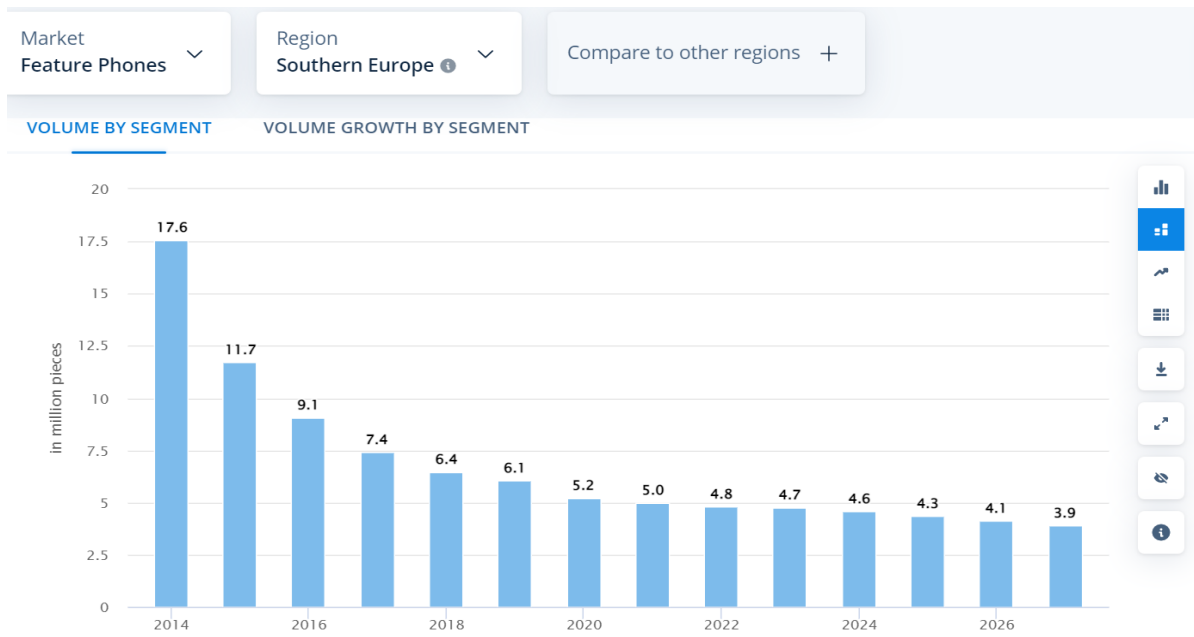
Nombre années (REF 2020) i	% durée détention Smart Phone: Di	Ki= V1/Vi	%Restant Smart phone Ri	Smart phone = %disparus par année	TCAM Smart phone par année	Feature phone = %Delta smart phones disparus par année	Feature phone = %disparus par année	%Restant Feature phone Ri	TCAM feature phone par année
1	31.00%	100.00%	100.00%	0.00%	0.00%	0.0%	0.00%	100.00%	0.00%
2	32.00%	96.31%	99.42%	0.58%	-0.29%	0.0%	0.58%	99.42%	-0.29%
3	21.00%	97.40%	65.98%	33.44%	-12.94%	-11.0%	22.44%	76.98%	-8.35%
4	9.00%	100.24%	29.10%	36.88%	-26.55%	-9.0%	27.88%	49.10%	-16.29%
5	4.00%	104.26%	13.45%	15.65%	-33.05%	-5.0%	10.65%	38.45%	-17.40%
6	2.10%	110.58%	7.49%	5.96%	-35.07%	4.0%	9.96%	28.49%	-18.88%
7	0.80%	126.89%	3.27%	4.22%	-38.64%	4.0%	8.22%	20.27%	-20.39%
8	0.10%	162.16%	0.52%	2.75%	-48.14%	4.0%	6.75%	13.52%	-22.13%
9	0.00%	228.29%	0.00%	0.52%	-100.00%	4.0%	4.52%	9.00%	-23.47%
10	0.00%	323.77%		0.00%	-100.00%	5.0%	5.00%	4.00%	-27.52%
11	0.00%			0.00%	-100.00%	4.0%	4.00%	0.00%	-100.00%
TOTAL	100.00%			100.00%		0.00%	100.00%	439.24%	

Détermination des différents ki et Di

Pour déterminer les différents ki, la courbe⁶⁹ suivante va être utilisée :

⁶⁹ <https://www.statista.com/outlook/cmo/consumer-electronics/telephony/feature-phones/southern-europe#volume>

Tableau 24 - Statistiques des ventes de feature phones en Europe de l'Ouest (Extrait Statista)



Il reste ensuite à déterminer les pourcentages de durée de détention des feature phones l'année précédant T_a , choisie à 2022 pour les calculs.

L'égalité 4 est utilisée pour déterminer D_1 , puis l'égalité 5 est utilisée pour déterminer les autres D_i ($D_2, D_3 \dots D_{10}$) comme dans le chapitre précédent. A titre de vérification de cohérence, on recalcule les différents R_i sur la base de l'égalité 1.

Les différents V_i proviennent de la courbe d'Europe du sud montrée avant et sont exprimés en millions de terminaux.

Les différents K_i sont ensuite calculés en faisant l'hypothèse que la courbe des K_i est aussi applicable au réseau de référence pour cette étude.

Tableau 25 – Détermination des différents K_i et D_i (feature phone), puis vérification des R_i

i	V_i	$K_i = V_1/V_i$	R_i (table)	R_i / K_i	D_i	Vérif R_i
1.00	4.80	100.00%	100.00%	100.00%	17.55%	100%
2.00	5.00	96.00%	99.42%	103.56%	18.18%	99.42%
3.00	5.20	92.31%	76.98%	83.40%	14.64%	76.98%
4.00	6.10	78.69%	49.10%	62.40%	10.95%	49.10%
5.00	6.40	75.00%	38.45%	51.27%	9.00%	38.45%
6.00	7.40	64.86%	28.49%	43.92%	7.71%	28.49%
7.00	9.10	52.75%	20.27%	38.44%	6.75%	20.27%
8.00	11.70	41.03%	13.52%	32.96%	5.79%	13.52%
9.00	17.60	27.27%	9.00%	33.00%	5.79%	9.00%
10.00	25.00	19.20%	4.00%	20.83%	3.66%	4.00%
TOTAL				569.78%	100.00%	

La somme 569,78% est égale à $(1 + R_2/k_2 + \dots + R_8/k_{10})$ et D_1 est égal à son inverse

Puis on trouve les autres différents D_i sachant que $D_i = R_i/k_i * D_1$ avec $D_1 = 17,55\%$

Afin de vérifier la cohérence, les différents R_i sont recalculés en fonction des D_i et K_i que l'on a trouvés en utilisant l'égalité 1.

4.4.3. Cas de l'IoT

L'approche est d'utiliser pour l'IoT une méthodologie analogue à celle des téléphones mobiles (smartphone, feature phone), c'est-à-dire reposant sur les éléments clés suivants :

- Distribution (pourcentage) par ancienneté des différents objets dans la frontière des TIC dans le réseau de l'opérateur de référence dont le module de communication ne supporte ni la 4G, ni la 5G, et pas la voix sur LTE pour les objets utilisant la voix à la date T_a de l'annonce de l'opérateur de l'arrêt des technologies 2G-3G de façon à évaluer les modules de communication à remplacer dans le cas du scénario de migration. Ces différents nombres à la date T_a sont représentés par différentes valeurs D_i (pourcentages), avec i étant l'ancienneté ;
- De façon à extrapoler le nombre de ces objets IoT juste avant la date T_m , il est nécessaire de connaître le pourcentage d'objets IoT restants dans le réseau après i années. Ces différents nombres sont représentés par différentes valeurs R_i , avec i étant l'ancienneté ;
- On utilise un calcul d'amortissement analogue à celui des terminaux mobiles.

Parmi les différents objets IoT dans le secteur des TIC, les objets très largement majoritaires sont les suivants :

- Terminaux de paiement : il est considéré que ces terminaux ont une durée de vie maximum de 10 ans.
- Télérelève : l'hypothèse est que ces terminaux ont une durée de vie maximum de 15 ans.
- Interphones : il est considéré que ces terminaux ont une durée de vie maximum de 20 ans.

La table R_i des feature phones est reprise pour les objets ayant une durée de vie maximum de 10 ans.

Les tables Ri pour les objets ayant une durée de vie de 15 ans et 20 ans sont extrapolées depuis la table Ri des objets ayant une durée de vie maximum de 10 ans de la façon suivante :

- Différents points sont extrapolés par dilatation horizontale⁷⁰ quand c'est réalisable avec des valeurs entières : ces points sont surlignés en couleur dans le tableau ci-dessous
 - Par exemple, pour l'IoT à durée de vie max 15 ans ($10 = 15 * 1/1,5$), on a $R_{15ans}(3)=R_{10ans}(3/1,5)=R_{10ans}(2)=99,42$ (valeur surlignée en marron)
 - Pour l'IoT à durée de vie max 20 ans ($10=20 * 1/2$), $R_{20ans}(12)=R_{10ans}(20*1/2)=R_{10ans}(6)$ (valeur surlignée en marron clair)
- Les autres Ri sont déduits par extrapolation linéaire entre les Ri précédemment déduits par dilatation horizontale.

Tableau 26 - Détermination de la table des Restants Ri pour le cas des objets IoT

Nombre années i	%Restant Feature phone= IoT durée vie max 10 ans Ri	TCAM feature phone par année= IoT durée vie max 10 ans	%Restant IoT durée vie max 15 ans Ri	%Disparaisant IoT durée vie max 15 ans	TCAM IoT durée vie max 15 ans	%Restant IoT durée vie max 20 ans Ri	%Disparaisant IoT durée vie max 20 ans	TCAM IoT durée vie max 20 ans
1	100.00%	0.00%	100.00%	0.00%	0.00%	100.00%	0.00%	0.00%
2	99.42%	-0.29%	100.00%	0.00%	0.00%	100.00%	0.00%	0.00%
3	76.98%	-8.35%	99.42%	0.58%	-0.19%	99.71%	0.29%	-0.10%
4	49.10%	-16.29%	82.65%	16.77%	-4.65%	99.42%	0.29%	-0.15%
5	38.45%	-17.40%	65.87%	16.77%	-8.01%	88.20%	11.22%	-2.48%
6	28.49%	-18.88%	49.10%	16.77%	-11.18%	76.98%	11.22%	-4.27%
7	20.27%	-20.39%	42.23%	6.87%	-11.59%	63.04%	13.94%	-6.38%
8	13.52%	-22.13%	35.36%	6.87%	-12.19%	49.10%	13.94%	-8.51%
9	9.00%	-23.47%	28.49%	6.87%	-13.02%	43.78%	5.32%	-8.77%
10	4.00%	-27.52%	23.50%	4.99%	-13.48%	38.45%	5.32%	-9.11%
11	0.00%	-100.00%	18.51%	4.99%	-14.22%	33.47%	4.98%	-9.47%
12	0.00%	-100.00%	13.52%	4.99%	-15.36%	28.49%	4.98%	-9.93%
13	0.00%	-100.00%	10.35%	3.17%	-16.01%	24.38%	4.11%	-10.29%
14	0.00%	-100.00%	7.17%	3.17%	-17.15%	20.27%	4.11%	-10.77%
15	0.00%	-100.00%	4.00%	3.17%	-19.31%	16.90%	3.38%	-11.18%
16	0.00%	-100.00%	0.00%	4.00%	-100.00%	13.52%	3.38%	-11.75%
17	0.00%	-100.00%	0.00%	0.00%	-100.00%	11.26%	2.26%	-12.05%
18	0.00%	-100.00%	0.00%	0.00%	-100.00%	9.00%	2.26%	-12.52%
19	0.00%	-100.00%	0.00%	0.00%	-100.00%	6.50%	2.50%	-13.40%
20	0.00%	-100.00%	0.00%	0.00%	-100.00%	4.00%	2.50%	-14.87%
21	0.00%	-100.00%	0.00%	0.00%	-100.00%	0.00%	4.00%	
TOTAL				100.00%			100.00%	

Pour déterminer les tables de répartition Di des trois sous-ensembles d'objets TIC de différentes durées de vie maximum, la même méthode que pour les feature phones est utilisée.

⁷⁰ Transformation mathématique qui consiste à déterminer une fonction F à partir de la déformation horizontale de f en posant : $y=F(x)=f(a*x)$; on parle de dilatation horizontale quand $|a| < 1$. Avec les durées maximum de 15 et 20 ans, le coefficient a est respectivement égal à 1/1,5 et 1/2 ; dans le cas d'une durée de 15 ans on a par exemple : $F(3)=f(3/1.5)=f(2)$; $F(6)=f(6/1.5)=f(4)$

Pour cela, il est nécessaire de faire une hypothèse supplémentaire sur la vente des objets ne supportant que les technologies 2G-3G avant la date Ta. Ceci sera fait à l'aide d'une étude de sensibilité (voir chapitre suivant).

4.5. Etude de sensibilité

Le premier cas correspond au cas de base étudié, et les autres cas correspondent aux autres cas étudiés pour l'étude de sensibilité. Les paramètres ayant été modifiés par rapport au cas de base sont indiqués en jaune. L'approche est de n'introduire qu'une seule variante par rapport au cas de base (cas n°1).

Le tableau suivant résume les différents cas étudiés avec leurs paramètres et résultats.

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

RAPPORT DETAILLE

Tableau 27 - Table des paramètres et différents résultats des cas étudiés pour l'étude de sensibilité

Type de cas	Cas de base	Nombre Téléphones	Nombre Téléphones	Valeurs Dx Smartphone	Valeurs disparus Feature Phones	Nombre IoT	Nombre IoT	Ventes IoT avant Ta	Ventes IoT avant Ta	Ventes IoT après Ta	Vente Smartphone avant Ta	a & b	a & b	a & b	a & b	Réseau	Réseau	Carbone feature phone	Carbone IoT	Intensité carbone élect	
Numéro de Cas	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
Valeur de l'intensité carbone (gCO2eq/KWh)	44.40	44.40	44.40	44.40	44.40	44.40	44.40	44.40	44.40	44.40	44.40	44.40	44.40	44.40	44.40	44.40	44.40	44.40	44.40	44.40	43.81
D6 smartphones	2.10%	2.10%	2.10%	1.66%	2.10%	2.10%	2.10%	2.10%	2.10%	2.10%	2.10%	2.10%	2.10%	2.10%	2.10%	2.10%	2.10%	2.10%	2.10%	2.10%	2.10%
D7 smartphones	0.80%	0.80%	0.80%	0.90%	0.80%	0.80%	0.80%	0.80%	0.80%	0.80%	0.80%	0.80%	0.80%	0.80%	0.80%	0.80%	0.80%	0.80%	0.80%	0.80%	0.80%
D8 smartphones	0.10%	0.10%	0.10%	0.44%	0.10%	0.10%	0.10%	0.10%	0.10%	0.10%	0.10%	0.10%	0.10%	0.10%	0.10%	0.10%	0.10%	0.10%	0.10%	0.10%	0.10%
D1 smartphones	31.00%	31.00%	31.00%	31.00%	31.00%	31.00%	31.00%	31.00%	31.00%	31.00%	31.00%	31.50%	31.00%	31.00%	31.00%	31.00%	31.00%	31.00%	31.00%	31.00%	31.00%
D2 smartphones	32.00%	32.00%	32.00%	32.00%	32.00%	32.00%	32.00%	32.00%	32.00%	32.00%	32.00%	31.50%	32.00%	32.00%	32.00%	32.00%	32.00%	32.00%	32.00%	32.00%	32.00%
Ventes constantes smartphones	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	YES	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO
Feature Phone disparu (6)	4.0%	4.0%	4.0%	4.0%	7.00%	4.0%	4.0%	4.0%	4.0%	4.0%	4.0%	4.0%	4.0%	4.0%	4.0%	4.0%	4.0%	4.0%	4.0%	4.0%	4.0%
Feature Phone disparu (7)	4.0%	4.0%	4.0%	4.0%	5.50%	4.0%	4.0%	4.0%	4.0%	4.0%	4.0%	4.0%	4.0%	4.0%	4.0%	4.0%	4.0%	4.0%	4.0%	4.0%	4.0%
Feature Phone disparu (8)	4.0%	4.0%	4.0%	4.0%	4.50%	4.0%	4.0%	4.0%	4.0%	4.0%	4.0%	4.0%	4.0%	4.0%	4.0%	4.0%	4.0%	4.0%	4.0%	4.0%	4.0%
Feature Phone disparu (9)	4.0%	4.0%	4.0%	4.0%	4.00%	4.0%	4.0%	4.0%	4.0%	4.0%	4.0%	4.0%	4.0%	4.0%	4.0%	4.0%	4.0%	4.0%	4.0%	4.0%	4.0%
Feature Phone disparu (10)	5.0%	5.0%	5.0%	5.0%	3.00%	5.0%	5.0%	5.0%	5.0%	5.0%	5.0%	5.0%	5.0%	5.0%	5.0%	5.0%	5.0%	5.0%	5.0%	5.0%	5.0%
Feature Phone disparu (11)	4.0%	4.0%	4.0%	4.0%	1.00%	4.0%	4.0%	4.0%	4.0%	4.0%	4.0%	4.0%	4.0%	4.0%	4.0%	4.0%	4.0%	4.0%	4.0%	4.0%	4.0%
Vérification somme	25.0%	25.0%	25.0%	25.0%	25.0%	25.0%	25.0%	25.0%	25.0%	25.0%	25.0%	25.0%	25.0%	25.0%	25.0%	25.0%	25.0%	25.0%	25.0%	25.0%	25.0%
Nombre Smartphones (kU) année Ta	18000	16000	16000	18000	18000	18000	18000	18000	18000	18000	18000	18000	18000	18000	18000	18000	18000	18000	18000	18000	18000
Nombre Feature phones (kU) année Ta	2000	4000	4000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000
Ratio Feature phone voix/LTE année avant Ta	0%	80%	100%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Ratio Feature phone voix/LTE année avant Ta-1	0%	0%	80%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Nombre IoT(kU) année Ta	4000	4000	4000	4000	4000	1000	5500	4000	4000	4000	4000	4000	4000	4000	4000	4000	4000	4000	4000	4000	4000
Ventes IoT objets durée vie 20 ans entre Ta et Tm	NON	NON	NON	NON	NON	NON	NON	NON	NON	OUI	NON	NON	NON	NON	NON	NON	NON	NON	NON	NON	NON
TACM Vente IoT objets durée vie 20 ans entre Ta et Tm	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	-5%	5%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
N°cas étudié pour les valeurs a et b	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	3	4	5	1	1	1	1	1	1
N°cas étudié pour la partie réseau	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	3	1	1	1	1
Feature phone: %sup carbone embarqué	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	25%	0%	0%	0%
IoT: %sup carbone embarqué	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	25%	0%	0%
Nombre unités carbone Smartphones (kU)	1.7	1.5	1.5	4.4	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.2	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7
Nombre unités carbone Feature Phones (kU)	51.9	58.3	23.2	54.2	39.0	51.9	51.9	51.9	51.9	51.9	51.0	51.9	51.9	51.9	51.9	51.9	51.9	51.9	51.9	51.9	51.9
Nombre unités carbone IoT (kU)	380.2	380.2	380.2	381.6	350.6	95.1	522.8	334.0	420.2	565.0	375.0	380.2	380.2	380.2	380.2	380.2	380.2	380.2	380.2	380.2	380.2
Gain réseau 4G-5G: référence 2G-3G	99.4%	99.4%	99.4%	99.4%	99.4%	99.4%	99.4%	99.4%	99.4%	99.4%	99.4%	99.2%	99.3%	99.6%	99.6%	95.7%	99.0%	99.4%	99.4%	99.4%	99.4%
Nombre mois impact Smart Phones	0.2	0.2	0.2	0.6	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
Nombre mois impact Feature Phones	1.4	1.6	0.6	1.5	1.0	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.1	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4
Nombre mois impact TOTAL TELEPHONES	1.6	1.8	0.8	2.1	1.3	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.5	1.6	1.6	1.6	1.3	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.7
Nombre mois IoT	3.4	3.4	3.4	3.4	3.1	0.8	4.6	2.9	3.7	5.0	3.3	3.4	4.5	3.4	2.7	3.4	3.4	3.4	4.2	3.4	3.4
Nombre mois TOTAL Telephones + IoT	5.0	5.1	4.2	5.4	4.4	2.5	6.2	4.6	6.3	6.6	4.8	5.0	6.7	5.0	4.0	5.0	5.0	5.3	5.8	5.1	5.1
%Delta cas de base: Total Téléphones	0.0%	8.9%	-48.9%	26.7%	-21.2%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	-6.1%	0.2%	33.6%	-0.1%	-20.1%	0.8%	0.5%	21.4%	0.0%	1.3%	1.3%
%Delta cas de base: Total IoT	0.0%	0.0%	0.0%	0.3%	-7.8%	-75.0%	37.5%	-12.2%	10.5%	48.6%	-1.4%	0.2%	33.6%	-0.1%	-20.1%	0.8%	0.5%	0.0%	25.0%	1.3%	1.3%
%Delta cas de base: Total Telephones + IoT	0.0%	2.9%	-16.0%	9.0%	-12.2%	-50.5%	25.2%	-8.2%	7.1%	32.7%	-2.9%	0.2%	33.6%	-0.1%	-20.1%	0.8%	0.5%	7.0%	16.8%	1.3%	1.3%
Valeur absolue de l'écart maximum	0.0%	8.9%	48.9%	26.7%	21.2%	75.0%	37.5%	12.2%	10.5%	48.6%	6.1%	0.2%	33.6%	0.1%	20.1%	0.8%	0.5%	21.4%	25.0%	1.3%	1.3%

4.5.1. Description des cas de l'étude de sensibilité

Cas n°2

Le nombre de feature phones a été doublé (4000 kU au lieu de 2000 kU), et le pourcentage de ces feature phones Voix/LTE l'année avant Ta (année 1) est de 80% (au lieu de 0%).

Tableau 28 - Nombre d'unité carbone pour les feature phone dans le cadre de l'analyse de sensibilité (Cas n°2)

Année i	RESTANTS Ri (table)	Distribution Di (table)	Nombre terminaux année Ta (kU)	Ratio terminaux Voix/LTE à année i	Ancien terminaux juste après Tm	Table RESTANTS Décalée	Nombre terminaux non Voix/LTE à Tm (kU)	Nombre années S du cycle de vie restants à Tm	Nombre Unités de carbone pour scénario migration (kU)	% impact carbone sur total
1	100.00%	17.55%	702	80%	7	20.27%	28	4	11.39	19.53%
2	99.42%	18.18%	727	0%	8	13.52%	99	3	29.67	50.88%
3	76.98%	14.64%	585	0%	9	9.00%	68	2	13.69	23.48%
4	49.10%	10.95%	438	0%	10	4.00%	36	1	3.57	6.12%
5	38.45%	9.00%	360	0%	11	0.00%	0	0	0.00	0.00%
6	28.49%	7.71%	308	0%	12	0.00%	0	0	0.00	0.00%
7	20.27%	6.75%	270	0%	13	0.00%	0	0	0.00	0.00%
8	13.52%	5.79%	231	0%	14	0.00%	0	0	0.00	0.00%
9	9.00%	5.79%	232	0%	15	0.00%	0	0	0.00	0.00%
10	4.00%	3.66%	146	0%	16	0.00%	0	0	0.00	0.00%
TOTAL		100.00%	4000				231		58.31	100.00%

Pour rappel, l'impact carbone des feature phone dans le cas de base (car N°1) est redonné ci-dessous :

Tableau 29 - Nombre d'unité carbone pour les feature phones pour le cas de base (Cas n°1)

Année i	RESTANTS Ri (table)	Distribution Di (table)	Nombre terminaux année Ta (kU)	Ratio terminaux Voix/LTE à année i	Ancien terminaux juste après Tm	Table RESTANTS Décalée	Nombre terminaux non Voix/LTE à Tm (kU)	Nombre années S du cycle de vie restants à Tm	Nombre Unités de carbone pour scénario migration (kU)	% impact carbone sur total
1	100.00%	17.55%	351	0%	7	20.27%	71	4	28.47	54.82%
2	99.42%	18.18%	364	0%	8	13.52%	49	3	14.83	28.57%
3	76.98%	14.64%	293	0%	9	9.00%	34	2	6.84	13.18%
4	49.10%	10.95%	219	0%	10	4.00%	18	1	1.78	3.44%
5	38.45%	9.00%	180	0%	11	0.00%	0	0	0.00	0.00%
6	28.49%	7.71%	154	0%	12	0.00%	0	0	0.00	0.00%
7	20.27%	6.75%	135	0%	13	0.00%	0	0	0.00	0.00%
8	13.52%	5.79%	116	0%	14	0.00%	0	0	0.00	0.00%
9	9.00%	5.79%	116	0%	15	0.00%	0	0	0.00	0.00%
10	4.00%	3.66%	73	0%	16	0.00%	0	0	0.00	0.00%
TOTAL		100.00%	2000				173		51.93	100.00%

Dans le cas n°2, l'impact carbone double logiquement toutes les années, sauf sur la première ligne de la table, où on trouve un impact de : $28,47 \times 2 \times (1-0,8) = 28,47 \times 0,4 = 11,39$ comme indiqué.

L'impact carbone du cas n°2 est plus important que dans le cas n°1, mais l'augmentation n'est que 12% environ par rapport au cas n°1 car l'impact carbone dans la première ligne de la table dans le cas n°1 est proportionnellement très importante (près de 55% ; soit 45% pour les autres lignes).

Cas n°3

Le nombre de feature phones est de 4000 kU (au lieu de 2000 kU dans le cas n°1 dit de base), et les pourcentages de ces feature phones Voix/LTE les deux années avant Ta (années 1 et 2) sont respectivement de 100% et 80% (au lieu de 0%).

Tableau 30 - Table de distribution des feature phones dans le cadre de l'analyse de sensibilité (cas n°3)

Année i	RESTANTS Ri (table)	Distribution Di (table)	Nombre terminaux année Ta (kU)	Ratio terminaux Voix/LTE à année i	Ancien nombre terminaux juste après Tm	Table RESTANTS Décalée	Nombre terminaux à Tm (kU) non Voix/LTE	Nombre années S du cycle de vie restants à Tm	Nombre Unités de carbone pour scénario migration (kU)	% impact carbone sur total
1	100.00%	17.55%	702	100%	7	20.27%	0	4	0.00	0.00%
2	99.42%	18.18%	727	80%	8	13.52%	20	3	5.93	25.58%
3	76.98%	14.64%	585	0%	9	9.00%	68	2	13.69	59.03%
4	49.10%	10.95%	438	0%	10	4.00%	36	1	3.57	15.39%
5	38.45%	9.00%	360	0%	11	0.00%	0	0	0.00	0.00%
6	28.49%	7.71%	308	0%	12	0.00%	0	0	0.00	0.00%
7	20.27%	6.75%	270	0%	13	0.00%	0	0	0.00	0.00%
8	13.52%	5.79%	231	0%	14	0.00%	0	0	0.00	0.00%
9	9.00%	5.79%	232	0%	15	0.00%	0	0	0.00	0.00%
10	4.00%	3.66%	146	0%	16	0.00%	0	0	0.00	0.00%
TOTAL		100.00%	4000				124		23.19	100.00%

L'impact carbone est alors nettement moins important que dans le cas n°2, et même le cas cas n°1.

Cela vient notamment du fait que l'impact carbone des deux premières lignes de la table du cas n°1 représentent plus de 80% du total.

Cas n°4

La table du CREDOC [CREDOC -2021] pour les smartphones neufs indique que pour les années au-delà de cinq ans, la part des smartphones neufs ayant une durée de détention supérieure à 5 ans est estimée à 3%. Se pose alors la question de la répartition de ces 3% pour 6, 7 et 8 ans, sachant que l'on souhaite des valeurs absolues des TACM croissantes, et que l'empreinte carbone des smartphones sera augmentée si on arrive à augmenter les valeurs Restants (7) et Restants (8).

Ce cas limite est atteint dans le cas suivant avec les 3 derniers TACM égaux⁷¹.

Tableau 31 - Table de distribution des smartphones dans le cadre de l'analyse de sensibilité (cas n°4)

Nombre années (REF 2020) i	% duree detention Smart Phone: Di	Ki= V1/Vi	%Restant Smart phone Ri	Smart phone = %disparus par année	TCAM Smartpho ne par année
1	31.00%	100.00%	100.00%	0.00%	0.00%
2	32.00%	96.31%	99.42%	0.58%	-0.29%
3	21.00%	97.40%	65.98%	33.44%	-12.94%
4	9.00%	100.24%	29.10%	36.88%	-26.55%
5	4.00%	104.26%	13.45%	15.65%	-33.05%
6	1.66%	110.58%	5.92%	7.54%	-37.58%
7	0.90%	126.89%	3.69%	2.23%	-37.59%
8	0.44%	162.16%	2.30%	1.39%	-37.59%
9	0.00%	228.29%	0.00%	2.30%	-100.00%
TOTAL	100.00%			100.00%	

Pour rappel, la table est redonnée pour le cas n°1

⁷¹ Il faut en fait résoudre une équation du troisième degré pour déterminer la valeur de 1+ TACM, dont les détails ne sont pas donnés. On voit qu'en faisant baisser la valeur de R(6) du cas n°1 (5.92% au lieu de 7.49%), on arrive à augmenter les 2 valeurs R(7) et R(8) qui sont respectivement de 3,69% et 2,30% au lieu de 3,27% et 0,52%.

Tableau 32 - Table de distribution des smartphones dans le cadre de base (Cas n°1)

Nombre années (REF 2020) i	% duree détention Smart Phone: Di	Ki= V1/Vi	%Restant Smart phone Ri	Smart phone = %disparus par année	TCAM Smartpho ne par année
1	31.00%	100.00%	100.00%	0.00%	0.00%
2	32.00%	96.31%	99.42%	0.58%	-0.29%
3	21.00%	97.40%	65.98%	33.44%	-12.94%
4	9.00%	100.24%	29.10%	36.88%	-26.55%
5	4.00%	104.26%	13.45%	15.65%	-33.05%
6	2.10%	110.58%	7.49%	5.96%	-35.07%
7	0.80%	126.89%	3.27%	4.22%	-38.64%
8	0.10%	162.16%	0.52%	2.75%	-48.14%
9	0.00%	228.29%	0.00%	0.52%	-100.00%
TOTAL	100.00%			100.00%	

Cas n°5

Les différentes valeurs bleues du cas n°1, dont la somme doit faire 25% (achats « plaisir » des smartphones selon l'enquête du Credoc [CREDOC -2021]) ont été réparties en créant en fait un pire cas pour les feature phones en termes d'impact carbone, générant des valeurs R(9) et R(10) importantes (respectivement de 9% et 4%) et en répartissant presque uniformément sur ces valeurs bleues. Dans le cas de l'étude de sensibilité, les valeurs bleues sont choisies décroissantes, tout en veillant à des valeurs R(9) et R(10) plus faibles et sans doute plus réalistes (respectivement de 4% et 1%).

Tableau 33 - Table de distribution des feature phones dans le cadre de l'analyse de sensibilité (cas n°5)

Nombre années (REF 2020) i	% duree détention Smart Phone: Di	Ki= V1/Vi	%Restant Smart phone Ri	Smart phone = %disparus par année	TCAM Smartpho ne par année	Feature phone = %Delta smart phones disparus par année	Feature phone = %disparus par année	%Restant Feature phone Ri	TCAM feature phone par année
1	31.00%	100.00%	100.00%	0.00%	0.00%	0.0%	0.00%	100.00%	0.00%
2	32.00%	96.31%	99.42%	0.58%	-0.29%	0.0%	0.58%	99.42%	-0.29%
3	21.00%	97.40%	65.98%	33.44%	-12.94%	-11.0%	22.44%	76.98%	-8.35%
4	9.00%	100.24%	29.10%	36.88%	-26.55%	-9.0%	27.88%	49.10%	-16.29%
5	4.00%	104.26%	13.45%	15.65%	-33.05%	-5.0%	10.65%	38.45%	-17.40%
6	2.10%	110.58%	7.49%	5.96%	-35.07%	7.0%	12.96%	25.49%	-20.37%
7	0.80%	126.89%	3.27%	4.22%	-38.64%	5.5%	9.72%	15.77%	-23.19%
8	0.10%	162.16%	0.52%	2.75%	-48.14%	4.5%	7.25%	8.52%	-26.49%
9	0.00%	228.29%	0.00%	0.52%	-100.00%	4.0%	4.52%	4.00%	-30.07%
10	0.00%	323.77%		0.00%	-100.00%	3.0%	3.00%	1.00%	-36.90%
11	0.00%			0.00%	-100.00%	1.0%	1.00%	0.00%	-97.03%
TOTAL	100.00%			100.00%		0.00%	100.00%	418.74%	

Pour rappel, ci-dessous le cas n°1 :

Tableau 34 - Table de distribution des feature phones dans le cadre du cas de base (cas n°1)

Nombre années (REF 2020) i	% duree détention Smart Phone: Di	Ki= V1/Mi	%Restant Smart phone Ri	Smart phone = %disparus par année	TCAM Smartphone par année	Feature phone = %Delta smart phones disparus par année	Feature phone = %disparus par année	%Restant Feature phone Ri	TCAM feature phone par année
1	31.00%	100.00%	100.00%	0.00%	0.00%	0.0%	0.00%	100.00%	0.00%
2	32.00%	96.31%	99.42%	0.58%	-0.29%	0.0%	0.58%	99.42%	-0.29%
3	21.00%	97.40%	65.98%	33.44%	-12.94%	-11.0%	22.44%	76.98%	-8.35%
4	9.00%	100.24%	29.10%	36.88%	-26.55%	-9.0%	27.88%	49.10%	-16.29%
5	4.00%	104.26%	13.45%	15.65%	-33.05%	-5.0%	10.65%	38.45%	-17.40%
6	2.10%	110.58%	7.49%	5.96%	-35.07%	4.0%	9.96%	28.49%	-18.88%
7	0.80%	126.89%	3.27%	4.22%	-38.64%	4.0%	8.22%	20.27%	-20.39%
8	0.10%	162.16%	0.52%	2.75%	-48.14%	4.0%	6.75%	13.52%	-22.13%
9	0.00%	228.29%	0.00%	0.52%	-100.00%	4.0%	4.52%	9.00%	-23.47%
10	0.00%	323.77%		0.00%	-100.00%	5.0%	5.00%	4.00%	-27.52%
11	0.00%			0.00%	-100.00%	4.0%	4.00%	0.00%	-100.00%
TOTAL	100.00%			100.00%		0.00%	100.00%	439.24%	

Ceci réduit significativement l'empreinte carbone des feature phones, et réduit également l'empreinte de l'IoT.

Cas n°6 et n°7

Le nombre total d'objets TIC varie du nombre minimum tel qu'évalué dans l'étude (cas n°6) à son nombre maximum (cas n°7).

Cas n°8 et n°9

Dans les cas n°8 et n°9, les valeurs des TACM de ventes d'IoT 2G-3G sont respectivement ajustées à -5% et +5%, avant la date Ta, sachant que le cas n°1 prend comme hypothèse 0%.

Une augmentation du TACM (-5% < 0% < +5%) amène une augmentation de l'empreinte carbone de l'IoT car sachant que le nombre d'objets à la date Ta est constant, on vient ainsi « rajeunir » la distribution des objets à la date Ta.

Cas 8 (TACM=-5%)

Tableau 35 - Etude de sensibilité sur l'IoT (cas n°8)

i	IoT durée		
	max 10 ans	max 15 ans	max 20 ans
1.00	20.08%	11.90%	7.99%
2.00	21.01%	12.52%	8.41%
3.00	17.12%	13.11%	8.83%
4.00	11.50%	11.47%	9.27%
5.00	9.48%	9.62%	8.66%
6.00	7.39%	7.55%	7.95%
7.00	5.54%	6.84%	6.85%
8.00	3.89%	6.02%	5.62%
9.00	2.72%	5.11%	5.27%
10.00	1.27%	4.44%	4.88%
11.00		3.68%	4.47%
12.00		2.83%	4.00%
13.00		2.28%	3.61%
14.00		1.66%	3.16%
15.00		0.98%	2.77%
16.00			2.33%
17.00			2.05%
18.00			1.72%
19.00			1.31%
20.00			0.85%
TOTAL	100.00%	100.00%	100.00%

Cas 1 (TACM= 0%)

Tableau 36 - Etude de sensibilité sur l'IoT (cas n°1)

	IoT durée max 10 ans	IoT durée max 15 ans	IoT durée max 20 ans
i	Di	Di	Di
1.00	22.77%	14.70%	10.79%
2.00	22.63%	14.70%	10.79%
3.00	17.53%	14.62%	10.76%
4.00	11.18%	12.15%	10.73%
5.00	8.75%	9.68%	9.52%
6.00	6.49%	7.22%	8.31%
7.00	4.62%	6.21%	6.80%
8.00	3.08%	5.20%	5.30%
9.00	2.05%	4.19%	4.73%
10.00	0.91%	3.46%	4.15%
11.00		2.72%	3.61%
12.00		1.99%	3.08%
13.00		1.52%	2.63%
14.00		1.05%	2.19%
15.00		0.59%	1.82%
16.00			1.46%
17.00			1.22%
18.00			0.97%
19.00			0.70%
20.00			0.43%
TOTAL	100.00%	100.00%	100.00%

Cas 9 (TACM=+5%)

Tableau 37 - Etude de sensibilité sur l'IoT (cas n°9)

	IoT durée max 10 ans	IoT durée max 15 ans	IoT durée max 20 ans
i	Di	Di	Di
1.00	25.36%	17.50%	13.68%
2.00	24.01%	16.67%	13.03%
3.00	17.71%	15.78%	12.38%
4.00	10.76%	12.49%	11.75%
5.00	8.02%	9.48%	9.93%
6.00	5.66%	6.73%	8.25%
7.00	3.84%	5.52%	6.44%
8.00	2.44%	4.40%	4.78%
9.00	1.54%	3.37%	4.05%
10.00	0.65%	2.65%	3.39%
11.00		1.99%	2.81%
12.00		1.38%	2.28%
13.00		1.01%	1.86%
14.00		0.67%	1.47%
15.00		0.35%	1.17%
16.00			0.89%
17.00			0.71%
18.00			0.54%
19.00			0.37%
20.00			0.22%
TOTAL	100.00%	100.00%	100.00%

Cas n°10

Dans le cas des objets ayant une durée de vie de 20 ans, on considère que les ventes de ces objets 2G-3G continuent entre Ta et Tm avec des ventes décroissant⁷² dans le temps au rythme défini par les pourcentages dans la troisième colonne.

⁷² Il s'agit notamment des interphones achetés par une variété de types d'utilisateurs qui pourraient poser plus de difficultés quant à l'arrêt des ventes 2G-3G/non Voix sur LTE.

La valeur de 108 kU correspond à la valeur D(1) déjà déterminée à la date Ta (2022 dans l'exemple donné).

Tableau 38 - Etude de sensibilité sur l'IoT (cas n°10)

Année i (année 0 = année Ta)	Année comme exemple	% par rapport à Année Ta	Ventes IoT (kU)	RESTAN TS Ri (table)	Table desTi année 2029	Nombre années S du cycle de vie restants à Tm	Nombre Unités de carbone pour scénario migration (kU)
6	2028	10%	11	100.00%	11	20	11
5	2027	15%	16	100.00%	16	19	15
4	2026	25%	27	99.71%	27	18	24
3	2025	35%	38	99.42%	38	17	32
2	2024	65%	70	88.20%	62	16	50
1	2023	85%	92	76.98%	71	15	53
0	2022	100%	108				
TOTAL					224		185

Tableau 39 : Nombre d'unités carbone total pour l'IoT (cas n°10)

	Cas standard	Nombre suppléme ntaire cas pire pris en compte	TOTAL
Impact carbone (kU)	380	185	565

Cas n°11

Ce cas correspondrait à une vente constante des smartphones jusqu'à la date Ta.

Cela ferait baisser l'empreinte carbone des smartphones en faisant passer de 1,7 kU de carbone dans le cas de base à 1,2 kU, car comme le nombre des smartphones est fixé à la date Ta, on vient « vieillir » les smartphones à la date Ta.

Ce cas est donné pour information afin de montrer l'impact de diminuer la pente des ventes de smartphones.

Ceci montre l'intérêt d'avoir rechercher une courbe de ventes de smartphones réaliste, même si cela n'est pas le paramètre le plus sensible de l'étude, comme le montrent les résultats.

Cas n°12, n°13, n°14 et n°15

Ces différents cas concernent une étude de sensibilité réalisée sur les différentes valeurs **a** et **b** du modèle affine pour la consommation électrique d'une station de base 2G-3G et 4G/5G.

Les différents sous-cas d'études de ces valeurs **a** et **b** sont indiqués par leurs valeurs (n°2, n°3, n°4 et n°5) qui correspondent respectivement aux cas n°12, n°13, n°14 et n°15 dans l'étude principale de sensibilité, et sont décrits dans la table ci-dessous : les valeurs de base **a** et **b** (cas n°1) ont été multipliées par un coefficient de façon à faire varier les valeurs 2G-3G et 4G/5G.

Tableau 40 - Etude de sensibilité sur les paramètres du réseau (Cas n° 12, 13, 14, 15)

Table des valeurs a et b suivant Sous cas a&b analysés		2G/3G		4G/5G		2G/3G		4G/5G		Commentaires
	Valeurs des Sous Cas a&b	BS: a	BS:b	BS: a	BS:b	Coef multipli:a	Coef multipli:b	Coef multipli:a	Coef multipli:b	
Valeurs de base	1	540.0	585.0	440.0	560.0	1.00	1.00	1.00	1.00	
valeurs 4G-5G augmentées	2	540.0	585.0	880.0	700.0	1.00	1.00	2.00	1.25	Va diminuer les gains environnementaux apportés par la migration 4G-5G par rapport au cas de base
valeurs 2G-3G diminuées	3	405.0	438.8	440.0	560.0	0.75	0.75	1.00	1.00	Va diminuer les gains environnementaux apportés par la migration 4G-5G par rapport au cas de base
valeurs 4G-5G diminuées	4	540.0	585.0	330.0	420.0	1.00	1.00	0.75	0.75	Va augmenter les gains environnementaux apportés par la migration 4G-5G par rapport au cas de base
valeurs 2G-3G augmentées	5	675.0	731.3	440.0	560.0	1.25	1.25	1.00	1.00	Va augmenter les gains environnementaux apportés par la migration 4G-5G par rapport au cas de base

Cas n°16 et n°17

Ce sont les deux cas déjà mentionnés dans la partie réseau.

Cas n°18 et n°19

Les valeurs de carbone embarqué par les feature phones et l'IoT sont augmentées du pourcentage (25%) indiqué dans la table des différents cas.

Cas n°20

Voir dans l'annexe B, le chapitre sur l'intensité carbone / mix énergétique qui explique comment le facteur d'émission est calculé à la date Tm. Cela donne les valeurs suivantes :

- Cas de base (n°1) : **44,40 gCO₂e/kWh**
- Ce cas (n°20) : **43,81 gCO₂e/kWh**

4.5.2. Quelques conclusions intéressantes sur l'étude sensibilité réalisée

Smartphones :

- L'impact en absolu des smartphones est négligeable sur cette étude ; le triplement en relatif du cas n°4 ne change pas cette conclusion. Les résultats pour la frontière de référence (réseau + téléphones) sont essentiellement liés aux feature phones

Feature phones/ total impact des téléphones / frontière de référence :

- Le point d'équilibre pour la frontière de référence est obtenu avec environ seulement 2 mois d'économie réseau, montrant tout l'intérêt de la migration vers la 4G/5G.
- Les cas n°2 et n°3 sont intéressants, car ils montrent qu'un opérateur qui aurait un nombre beaucoup plus important de feature phones à ce jour pourrait attendre entre 1 et 2 ans pour retrouver un impact voisin, voir plus faible.

IoT/ frontière de référence étendue

- Les cas n°6 et n°7 montrent que le nombre d'objets IoT considéré influe logiquement sur le résultat. Le nombre d'objets IoT dans le cas n°7 est considéré comme un majorant de ce nombre d'objets, et le point d'équilibre est d'environ 6 mois.
- Le cas n°7 décrit le cas où des ventes d'objets d'IoT continueraient après la date d'annonce de l'arrêt 2G-3G avec un point d'équilibre à 7 mois. C'est sans doute un point important qui montre l'importance de la communication vers l'ensemble de l'ensemble de l'écosystème afin de limiter ces ventes.

Autres cas étudiés avec un impact sur les deux points d'équilibre

- Les variations des valeurs **a** et **b** dans les cas n°12 et n°14 ont très peu d'impact : ceci correspond aux variations des valeurs 4G et 5G, car le trafic qui est porté par les services 2G-3G et transféré vers 4G/5G, est faible.
- Les variations des valeurs **a** et **b** dans les cas n°13 et n°15 correspondent aux variations des valeurs 2G-3G, qui ont plus d'impact. C'est en considérant des valeurs plus faibles (cas n°13) que l'on vient retarder le point d'équilibre à une valeur d'environ 7 mois : comme expliqué précédemment dans la note, les valeurs de consommation électrique ne prennent pas en compte les canaux communs 3G, et donc ce cas n°13 est sans doute extrême.
- Les deux cas de variations de paramètres réseau (cas n°16 et n°17) ont un impact négligeable sur les points d'équilibre, confirmant l'analyse de sensibilité spécifique réseau faite dans un chapitre précédent.
- En augmentant respectivement les valeurs du carbone embarqué des feature phones et IoT dans les cas n°18 et n°19, on vient retarder logiquement les points d'équilibre par rapport au cas de base, mais on reste avec une valeur de moins de 2 mois pour la frontière de référence, et moins de 6 mois pour la frontière de référence étendue.
- Facteur d'émission (cas n°20) : ce cas n'a quasi aucun impact sur les points d'équilibre (+0,1 mois environ).

4.6. Prise en compte de la recommandation ITU-T L.1410

4.6.1. Considération de conformité relative à l'étude comparative entre services ICT

La deuxième partie de la recommandation ITU-T L 1410⁷³ a servi de fil conducteur pour la comparaison des scénarios étudiés dans cette note.

La Recommandation ITU L.1410 propose dans son Appendice XII un tableau synthétisant les exigences contenues dans le corps de la Recommandation. L'étude est alignée avec les exigences de la

⁷³ Part II – Comparative analysis/LCA between ICT and reference product system (baseline scenario): framework and guidance.

Recommandation à l'**exception de certaines spécifications non obligatoires** relatives à la clause 6.3 de la Recommandation (inclusion et exclusion de certaines activités/processus par phase de cycle de vie).

La Recommandation ITU L.1410 liste (dans sa Table 2) pour chaque phase du cycle de vie l'ensemble des processus et activités obligatoires et optionnelles à considérer quand on réalise une étude ACV d'un bien, d'un réseau ou d'un service TIC (clause 6.3 de la Recommandation) ; cette liste s'applique également dans le cadre d'une analyse comparative entre deux services TIC.

Le tableau de l'annexe Y de la Recommandation est repris ci-dessous pour expliciter à quel point l'étude a respecté ou non les processus/activités requis :

Tableau 41 – Cartographie des processus et activités par cycle de vie d'un service TIC selon la Recommandation ITU L.1410

Activité par phase de cycle de vie		Processus	Exigence de la Recommandation selon la vision « Service TIC »	Prise en compte dans l'étude et commentaires
A	Acquisition de matières premières			
A1	Extraction de matières premières		Obligatoire	Pris en compte dans l'impact embarqué des biens TIC inclus dans la frontière de référence et celle étendue de l'étude
A2	Traitement de matières premières		Obligatoire	Pris en compte dans l'impact embarqué des biens TIC inclus dans la frontière de référence et celle étendue de l'étude
B	Production ⁷⁴			
B1	Production de biens TIC			
B1.1		Production des composants	Obligatoire	Pris en compte dans l'impact embarqué des biens TIC inclus dans la frontière de référence et celle étendue de l'étude
B1.2		Assemblage	Obligatoire	Pris en compte dans l'impact embarqué des biens TIC inclus dans la frontière de référence et celle étendue de l'étude
B1.3		Activités support de l'équipementier des biens TIC	Recommandé	Non pris en compte. Il s'agit des activités de support de l'équipementier pour le maintien et la mise à jour des équipements de réseaux 2G-3G (scénario de référence) et 4G/5G (dans le scénario de migration). Ces activités récurrentes (par conséquent pouvant avoir lieu y compris en absence de déploiement d'équipements réseau) ne sont pas prises en compte. La migration vers les réseaux 4G/5G, permet d'économiser l'impact des activités de support 2G-3G (les activités support 4G/5G sont déjà existantes avant la date Tm et il n'y pas de raison qu'elles augmentent spécialement lors de la migration)
B2	Production des biens support			
B2.1		Production de biens support	Obligatoire	Pris en compte Dans les deux scénarios, il n'y a pas lieu de production de biens supports.
B3	Construction de sites spécifiques TIC			

⁷⁴ Cette phase inclue les activités de transport/logistique du producteur jusqu'au lieu d'installation du bien TIC : la distribution de nouveaux terminaux compatibles VoLTE et nouveaux IoT est donc incluse dans cette phase (carbone embarqué du bien TIC).

B3.1			Construction de sites spécifiques TIC	Recommandé	Pris en compte Dans les deux scénarios, pas d'activité de construction de sites spécifiques TIC (que ce soit pour accueillir des biens TIC ou des biens support)
C	Utilisation				
C1		Utilisation des biens TIC		Obligatoire	Pris en compte
C2		Utilisation des biens support		Obligatoire	Pris en compte L'usage des biens supports est identique entre les deux scénarios
C3		Activités de support opérateur		Recommandé	Non pris en compte La migration vers les réseaux 4G/5G, permet d'économiser l'impact des activités de support 2G-3G, les activités en question incluent : la mise à jour logiciels des équipements réseau 2G-3G, les interventions sur les sites, les taches de paramétrage réseau 2G-3G, le maintien de l'expertise 2G-3G. Cette catégorie n'inclue pas les activités relatives à la livraison de cartes SIM ou celles associés au changement de terminal (téléphones, IoT), ces activités sont incluses dans la phase D.
C4		Activité support de fournisseur de service		Recommandé	Non pris en compte L'étude n'a pas pris en compte l'impact incrémental due à la migration. En effet, les activités opérationnelles courantes du fournisseur de service sur l'ensemble de l'équipement (par rapport à celles spécifiques au module de connectivité) est une question qui reste ouverte d'un point de vue méthodologique (une règle d'allocation est potentiellement à prévoir).
D	Traitement de fin de vie du bien ⁷⁵				
D1		Préparation du bien TIC pour réutilisation		Obligatoire	Pris en compte Pris en compte (notamment dans le cas des smartphones reconditionnés) Pas d'éléments différenciants sur cette activité entre les deux scénarios
D2		Fin de vie spécifique TIC			

⁷⁵ Le transport et la logistique des terminaux (téléphones et IoT) qui vont entrer en fin de vie due à leur changement prématuré à Tm est inclus ici (processus générique inclus dans D2). Les impacts de ces activités sont déjà factorisés dans l'impact carbone embarqué du nouveau terminal.

D2.1			Stockage, de- assemblage, démontage ...	Obligatoire	Pris en compte mais exclus de l'évaluation pour les produits hors smartphone. Pas de différence entre les deux scénarios
D.2.2			Recyclage	Obligatoire	Pris en compte mais exclu de l'évaluation pour les produits hors smartphone. Pas de différence entre les deux scénarios
D3		Autres activités de la fin de vie		Obligatoire	Pris en compte mais exclus de l'évaluation pour les produits hors smartphone. Pas de différence entre les deux scénarios

4.6.2. Analyse de la transparence et la qualification des données

Les données mobilisées dans l'étude – issues de l'expertise des membres du Comité ou de références pertinentes citées dans la note – jouent un rôle structurant sur la robustesse des conclusions. Afin d'apprécier la transparence et la qualité des données d'activité et d'impact utilisées, cette annexe se réfère à la définition de cette transparence et à une grille d'indicateurs de qualité telles que préconisées dans la recommandation L.1410 de l'ITU-T⁷⁶.

La grille d'indicateurs de qualité porte sur une appréciation de la consistance méthodologique, la complétude de la modélisation, l'incertitude, l'acquisition et la collecte de données, l'indépendance du fournisseur de données, la représentativité des données, l'âge des données utilisées, la corrélation géographique, la corrélation technologique et les critères considérés pour l'exclusion ou l'inclusion.

La grille d'indicateurs de qualité est explicitée dans Tableau 42.

L'appréciation de la qualité des données est un exercice qualitatif et la quantification via un score supporte cet exercice à titre indicatif.

D'autre part l'appendice IX⁷⁷ de la Recommandation ITU-T L.1410 précise que :

- Une ACV ne permet pas de prévoir un impact environnemental absolu ou précis en raison de l'expression relative des impacts potentiels par rapport à une unité de référence, de l'intégration des données environnementales dans l'espace et dans le temps, de l'incertitude inhérente à la modélisation de l'impact environnemental et du fait que certains impacts environnementaux possibles sont manifestation des impacts futurs
- Dans la pratique, il est pratiquement impossible de collecter suffisamment de données pour qu'une évaluation puisse donner la performance absolue d'un système de produits. Même dans ce cas, les résultats comporteraient encore des incertitudes liées au modèle et au scénario.
- Par conséquent, tout résultat d'ACV n'est valable que dans le cadre des hypothèses de l'étude et reste associé à une incertitude substantielle, qui doit être prise en compte pour que le résultat de l'évaluation soit interprété correctement.

D'autre part, cette Recommandation précise dans son chapitre 8.2 sur l'analyse de l'incertitude que « L'incertitude des résultats d'une étude ACV doit être évaluée conformément à la norme **[ISO 14044]** dans la limite de ce qui est nécessaire pour comprendre les résultats de l'étude. »

Elle indique dans son chapitre 8.3 sur l'analyse de sensibilité que « Les résultats des phases de l'ICV⁷⁸ ou de l'AICV⁷⁹ doivent être interprétés en fonction de l'objectif et de la portée de l'étude. **L'interprétation doit inclure une vérification de la sensibilité des entrées, sorties et choix méthodologiques significatifs, ainsi que des scénarios d'utilisation définis, afin de comprendre l'incertitude des résultats.** ». De ce fait, l'incertitude sur un paramètre donné est évaluée en relation

⁷⁶ Bien que l'étude n'ait pas vocation à réaliser une analyse par cycle de vie proprement dite, la Recommandation ITU-T L.1410 est utilisée afin de rendre l'analyse la plus exhaustive et objective possible. Pour la transparence, la recommandation précise dans son chapitre 9 que: *"For LCA results to be credible, a level of transparency in the reporting of how the data has been collected, to an extent that does not conflict with confidentiality considerations, is recommended."*

Voir la table « Table I.2 » de l'appendice I et ainsi que la table « Table VII.1 » de l'appendice VII de la recommandation de l'ITU-T L.1410 pour plus de détails sur la grille d'indicateurs.

⁷⁷ Appendice IX « Opportunities and limitations in the use of LCAs for ICT goods, networks and services.

⁷⁸ ICV : Inventaire du cycle de vie

⁷⁹ AICV : Analyse des impacts du cycle de vie

avec le résultat de l'étude, notamment grâce à l'étude de sensibilité, plutôt qu'une appréciation de l'incertitude du paramètre en tant que tel.

Cette étude n'échappe pas à ces différentes précisions importantes, et la qualité des données et incertitudes des résultats doivent être interprétés dans le cadre des objectifs de cette étude : évaluer l'intérêt carbone de la migration des technologies 2G-3G vers les technologies 4G/5G pour la frontière de référence et la frontière de référence étendue, dans le cadre de la comparaison de 2 scénarios et de différentes hypothèses et modélisations utilisées.

Ainsi, cette étude évalue les durées nécessaires en nombre de mois depuis la date T_m 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 T_m .

Sur la base des différentes hypothèses de la note, ces durées en nombre de mois pour les deux frontières (référence / référence étendue) vont permettre d'évaluer l'intérêt environnemental en terme d'impact carbone de la migration 2G-3G vers les technologies 4G/5G dans chacun des deux cas.

Dans le cas de la frontière de référence (cas réseau + terminaux mobiles), l'étude montre le point d'équilibre est atteint en moins de deux mois.

Dans le cas de la frontière de référence étendue à l'IoT, l'étude montre point d'équilibre est atteint en moins de six mois (soient environ 4 mois supplémentaires avec l'IoT).

Ces durées sont relativement courtes semblant indiquer l'intérêt carbone de la migration étudiée: la question importante pour ce chapitre est de déterminer ce qui pourrait radicalement augmenter ces durées quant à la qualité de ces données et l'incertitude des résultats, mais sur la base de la méthodologie utilisée et des différents modèles associés, et en prenant en compte l'ensemble de l'étude de sensibilité (19 cas analysés).

Le tableau suivant qui s'inspire deux exemples⁸⁰ fournis dans la recommandation ITU-T L.1410, décrit les différents indicateurs de qualité des données qui sont utilisés dans cette étude.

⁸⁰ L'appendice VII de la recommandation qui n'en fait pas partie intégrante, donne un premier exemple d'indicateurs de qualité. Un autre exemple est montré dans l'appendice I, qui applique la Recommandation dans le cas d'un téléphone mobile.

Tableau 42 - Indicateurs de qualité des données utilisés dans cette étude.

Indicateur	Fourchette possible de qualification				
	1	2	3	4	5
Score (code couleur)					
Consistance méthodologique⁸¹	Très bien	Bien	Correct	Médiocre	Très médiocre
Complétude	Très bien	Bien	Correct	Médiocre	Très médiocre
Incertitude	Très bien	Bien	Correct	Médiocre	Très médiocre
Méthode de collecte de données	Données directement mesurées ou provenant de bases de données, d'enquêtes ou rapports fiables ⁸² .	Données calculées sur la base de mesures ou sur la base de données provenant de bases de données, d'enquêtes ou rapports fiables.	Données calculées sur la base d'hypothèses	Estimations d'experts	Estimations non qualifiées
Indépendance du fournisseur de données	Données vérifiées auprès d'une source indépendante	Données vérifiées auprès d'une entreprise partie prenante de l'étude	Source indépendante mais basée sur des données non vérifiées	Données non vérifiées de l'industrie	Données non vérifiées auprès d'une entreprise partie prenante de l'étude
Représentativité des données	Données représentatives d'un échantillon suffisant de sites sur une période adéquate y compris les fluctuations anormales.	Données représentatives d'un faible échantillon de sites mais sur une période adéquate.	Données représentatives d'un échantillon adéquat de sites mais sur une période courte.	Données représentatives d'un faible échantillon de sites et sur une période courte, ou données incomplètes d'un échantillon adéquat de site et de période.	Représentativité inconnue ou données incomplètes sur un échantillon restreint de sites et/ou sur des courtes périodes.
Age des données	<3 ans	<6 ans	<10 ans	<15 ans	Âge inconnu
Corrélation géographique	Données de la région exacte	Données moyennes d'une région plus grande	Données d'une région avec des conditions de production similaires	Données d'une région avec des conditions de production légèrement similaires	Région inconnue
Corrélation technologique	Données du processus	Donnée du processus étudié	Données du processus étudié	Données d'un processus relatif à	Données d'un processus relatif

⁸¹ Selon le guide ILCD Handbook du JRC (2010) (voir [ILCD - 2012]) ce critère vise à apprécier à quel point les méthodes d'inventaire de cycle de vie et les choix méthodologiques de modélisation (ex. approche de modélisation conséquentielle ou attributive, les règles d'allocation et de substitution, etc.) sont adaptés à l'objectif de l'étude et leur application est cohérente tout au long de l'étude. Par conséquent, ce critère s'applique lorsque l'on regarde au niveau du système de produits dans son ensemble sur tout son cycle de vie (c à d à l'échelle de toute l'étude). C'est la raison pour laquelle ce critère n'est pas apprécié pour chaque catégorie de produits prise séparément (réseau, smartphone, feature phone, IoT).

⁸² Comme des données dans les Observatoires de l'ANFR ou l'Arcep, provenant de rapports d'Institutions reconnues comme le CREDOC, le JRC ou des données statistiques de sociétés comme GfK.

	étudié issues exactement de l'entreprise	issues d'une entreprise avec une technologie similaire	issues d'une entreprise avec une technologie différente	une entreprise avec une technologie similaire	à une entreprise avec une technologie différente
Critères d'exclusion/inclusion	Transparents, justifiés et une application homogène	Transparents, justifiés une application non homogène	Transparents, non justifiés, une application non homogène	Non transparents sur les exclusions mais spécifiques sur les inclusions	Non connus
Score total par périmètre	<i>Somme des scores par indicateur + (score le plus faible x 4) / (10+4)⁸³</i>				

L'analyse est réalisée par sous-système de données (Réseau, Téléphones, IoT) pour les différents indicateurs.

Puis les minimums, maximums et moyennes pour chaque indicateur est calculée par sous-système.

Pour chaque périmètre (référence, étendu), et pour chaque indicateur, le minimum, maximum, et la valeur maximum de la moyenne des indicateurs sous-systèmes inclus dans le périmètre sont pris en compte.

⁸³ Conformément aux indicateurs de qualité des données définis par le ILCD handbook : voir [ILCD – 2012] chapitre 12.3 *Data quality indicators*. Ceci est également repris dans l'exemple des terminaux de la Recommandation ITU-T L.1410 dans son appendice I.

Tableau 43 - Analyse des données Réseau de l'étude

Paramètres	Type	Consistance méthodologique (évalués globalement)	Compléto de (évaluée par sous-système)	Incertitude	Méthode de collecte de données	Indépendance du fournisseur de données	Représentativité des données	Age des données	Corrélation géographique	Corrélation technologique	Critères d'exclusion/inclusion (évalué globalement)	Commentaires
Consommation électrique des stations de base 2G-3G et 4G-5G	Réseau	1	1	1	2	1	1	1	2	2	1	Données du JRC. Etude de sensibilité menée sur ces valeurs montrant qu'elles ne sont pas très sensibles. Un fournisseur membre du Comité a reproduit le cas de base avec ses stations de base et a trouvé des résultats proches, très largement dans la fourchette de l'étude de sensibilité Corrélation technologique notée à 2 car les valeurs se réfèrent à des stations de base 2G ou 3G et non 2G+3G qui ont des puissances plus grandes.
Calcul trafic Erlang à date	Réseau	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	Données ARCEP
Profile normalisé Voix	Réseau	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	Source d'un opérateur mobile du Comité
%voix 2G-3G à date Tm et facteur multiplicatif du nombre moyen de Erlang	Réseau	1	1	1	3	2	1	1	1	1	1	Hypothèse du comité sur la base du retour des opérateurs. Valeur peu sensible
Nombre de station de base à la date Tm	Réseau	1	1	2	2	2	1	1	1	1	1	Le nombre de stations de base à date provient des observatoires de l'ANFR. L'extrapolation à la date Tm a été validée par l'ensemble des opérateurs membres du Comité
Charge max dont data d'une station de base aux heures les plus chargées	Réseau	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	Valeur par défaut ETSI (50%). L'étude de sensibilité montre que le paramètre est peu sensible
Intensité électrique	Réseau	1	1	2	2	1	1	1	1	1	1	Extrapolée depuis les informations de l'ADEME (voir note détaillée).

Tableau 44 - Analyse des données Téléphones de l'étude

Paramètres	Type	Consistance méthodologique (évalués globalement)	Compléto de (évaluée par sous-système)	Incertitude	Méthode de collecte de données	Indépendance du fournisseur de données	Représentativité des données	Age des données	Corrélation géographique	Corrélation technologique	Critères d'exclusion/inclusion (évalué globalement)	Commentaires
Ventes smartphones	Smartphone	1	1	1	2	1	1	1	2	1	1	Source Gartner (nombres mondiaux) pour smartphones neufs Source Gfk: ventes France smartphones neufs Reconditionnés: Source lesnumériques (reprise de GFK) et Yes Yes Quelques hypothèses supplémentaires (TCAM reconditionnés; correction d'une valeur en 2020 pour covid)
Dure de vie Smartphone	Smartphone	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	Un opérateur membre du Comité constate cette valeur dans son réseau.
Restants Smartphones	Smartphone	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	Calculés directement depuis les valeurs de détention de Smartphones (données primaires du Credoc sauf certains Di qui sont déduits) et les ventes de smartphones
Détention smartphone (2022)	Smartphone	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	Calcul direct depuis restants
Nombre de smartphones à la date Ta et % Voix/LTE par année	Smartphone	1	1	1	2	2	2	1	1	1	1	Nombre de smartphones pour l'opérateur de REF: majorant du 1/4 du nombre de smartphones en France (vérification faite sur la base du nombre de cartes SIM en FR et chiffres des ventes et valeurs Ri) %Voix/LTE années Ta et Ta-1: majorants choisis par rapport aux valeurs d'un opérateur membre du Comité.
Empreinte Carbone d'un smartphone	Smartphone	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	Valeur calculée issues de NegaOctet reprise dans base de donnée ADEME.
Restants Feature phones	FeaturePhone	1	1	2	2	1	1	1	1	1	1	Extrapolés depuis les Restants Smartphones en utilisant des données primaires du Credoc (achats plaisir de smartphones) Etude de sensibilité sur extrapolation montrant que le cas de base est en fait un cas pire
Dure de vie Feature phone	FeaturePhone	1	1	1	2	2	1	1	1	1	1	Un opérateur membre du Comité constate cette valeur dans son réseau.
Détention feature phone (2022)	FeaturePhone	1	1	1	2	1	1	1	2	1	1	Calculés directement depuis les ventes et Restants. La courbe des ventes provient de données de Statista pour l'Europe du Sud.
Nombre de feature phones à la date Ta et % Voix/LTE par année	FeaturePhone	1	1	2	2	2	1	1	1	1	1	Nombre de feature phones: Le nombre pris pour l'opérateur de référence et le nombre pris dans l'étude de sensibilité recouvrent les
Ventes Feature phones	FeaturePhone	1	1	2	2	1	1	1	2	1	1	La courbe des ventes provient de données de Statista pour l'Europe du Sud.
Empreinte Carbone d'un feature phone	FeaturePhone	1	1	3	2	1	1	1	1	1	1	Valeur provenant de la base de données ADEME, mais sans étude critique réalisée. Etude de sensibilité réalisée sur cette valeur.

Tableau 45 - Analyse des données IoT de l'étude

Paramètres	Type	Consistance méthodologique (évalués globalement)	Compléte de (évaluée par sous-système)	Incertitude	Méthode de collecte de données	Indépendance du fournisseur de données	Représentativité des données	Age des données	Corrélation géographique	Corrélation technologique	Critères d'exclusion/inclusion (évalué globalement)	Commentaires
Ventes IoT 2G-3G avant Ta	IoT	1	3	1	5	5	1	1	1	1	1	Pure hypothèse avec étude de sensibilité, montrant que ce paramètre est peu sensible
Restants IoT	IoT	1	3	2	3	3	1	1	1	1	1	Extrapolés depuis les Restants Feature Phones en tenant compte de la durée de vie et extrapolation linéaire. Pure approche mathématique sans autre paramétrage.
Nombre de modules IoT TICs	IoT	1	3	2	3	2	1	1	1	1	1	Compréhension du Comité sur la base d'informations recueillies auprès des opérateurs par l'ARCEP qui ont permis de définir un minorant et majorant du nombre de modules IoT. La valeur du cas de base a été choisie dans cette fourchette, mais plus proche du majorant.
Valeur des durées de vie (10/15/20 ans) et leurs Répartitions	IoT	1	3	2	3	2	1	1	1	1	1	Compréhension du Comité sur la base d'informations publiques recueillies et de la constatation que la grande majorité des modules IoT TICs proviennent des terminaux de paiement, des smart meters et interphones. Pas d'étude de sensibilité directement réalisée sur ces deux paramètres, mais l'extrapolation de l'étude de sensibilité sur le nombre de modules IoT doit permettre de couvrir également ce cas.
Vente supplémentaire IoT entre Ta et Tm	IoT	1	3	3	3	5	1	1	1	1	1	Hypothèse du comité; l'étude montre que ces paramètres sont relativement sensibles.
Empreinte Carbone d'un module IoT	IoT	1	3	2	3	3	3	1	2	1	1	Ces données proviennent d'une modélisation BU basées sur des hypothèses de calcul issues d'échanges avec l'auteur de l'étude (Pirson).

Tableau 46 - MIN, MAX, MOYENNE par sous-système étudié

Paramètres	Type	Consistance méthodologique (évalués globalement)	Compléto de (évaluée par sous-système)	Incertitude	Méthode de collecte de données	Indépendance du fournisseur de données	Représentativité des données	Age des données	Corrélation géographique	Corrélation technologique	Critères d'exclusion/inclusion (évalué globalement)
RESEAUX: MIN		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
RESEAUX: MAX		1	1	2	3	2	1	1	2	2	1
RESEAUX: Moyenne		1.0	1.0	1.3	1.7	1.4	1.0	1.0	1.3	1.1	1.0
TELEPHONES : MIN		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
TELEPHONES : MAX		1	1	3	2	2	2	1	2	1	1
TELEPHONES: Moyenne		1.0	1.0	1.4	1.9	1.3	1.1	1.0	1.3	1.0	1.0
IoT: MIN		1	3	1	3	2	1	1	1	1	1
IoT: MAX		1	3	3	5	5	3	1	2	1	1
IoT: Moyenne		1.0	3.0	2.0	3.3	3.3	1.3	1.0	1.2	1.0	1.0

Tableau 47 - Valeurs d'indicateurs pour les 2 périmètres : MIN, MAX, MAX des moyennes des sous-systèmes

Paramètres	Consistance méthodologique (évalués globalement)	Compléto de (évaluée par sous-système)	Incertitude	Méthode de collecte de données	Indépendance du fournisseur de données	Représentativité des données	Age des données	Corrélation géographique	Corrélation technologique	Critères d'exclusion/inclusion (évalué globalement)	MAX
PERIMETRE DE REF : MIN	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
PERIMETRE DE REF : MAX	1	1	3	3	2	2	1	2	2	1	
PERIMETRE DE REF: MAX des moyennes sous-sytèmes	1.0	1.0	1.4	1.9	1.4	1.1	1.0	1.3	1.1	1.0	1.9
POIDS MOYENNE PONDEREE	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	4
PERIMETRE ETENDU : MIN	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
PERIMETRE ETENDU : MAX	1	3	3	5	5	3	1	2	2	1	
PERIMETRE ETENDU : MAX des moyennes sous-sytèmes	1.0	3.0	2.0	3.3	3.3	1.3	1.0	1.3	1.1	1.0	3.3
POIDS MOYENNE PONDEREE	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	4

Le Tableau 46 décrit le MIN, le MAX et la moyenne des différents indicateurs par sous-système (Réseaux, Téléphones, IoT).

Puis, avec le Tableau 47, on en déduit le MIN, MAX, et un score global pour chaque indicateur dans les deux périmètres (référence, étendu) de la façon suivante :

- Les MIN, et MAX sont respectivement les MIN et MAX des sous-systèmes qui sont inclus dans chaque périmètre
- On définit un score global pour chaque indicateur du périmètre en sélectionnant la plus grande moyenne des sous-systèmes inclus. Autrement dit, la plus mauvaise moyenne est systématiquement sélectionnée.

Tableau 48 - Moyenne pondérée de tous les indicateurs

	Moyenne Pondérée de tous les indicateurs	Niveau de qualité (ILCD Handbook du JRC)
PERIMETRE DE REF	1.4	Qualité élevée ("High Quality") ($\leq 1,6$)
PERIMETRE ETENDU	2.3	Qualité moyenne ("Basic Quality") ($> 1,6$ et < 3)

- Puis la moyenne pondérée de tous les indicateurs est déterminée conformément au ILCD Handbook (voir [ILCD – 2012]).

Toujours sur la base du même document qui définit les niveaux de qualité, on en déduit dans Tableau 48 une qualité élevée des données utilisées pour le périmètre de référence et une qualité moyenne pour le périmètre étendu.

4.7. Eléments explicatifs de la règle d'allocation pour la consommation de la 4G/5G

L'objectif de ce chapitre est de mieux appréhender la règle d'allocation utilisée pour la 4G/5G, grâce à des explications complémentaires et une illustration simple.

L'hypothèse est que la consommation électrique instantanée exprimée en Watt d'une station de base 2G-3G ou 4G, 5G peut être approximée par une fonction affine de la forme $a*x + b$ (ou x est la charge de la station de base).

Dans le cas qui nous intéresse, c'est l'évaluation du service de voix qui a été réalisée, car l'hypothèse est que la 2G-3G à la date T_m ne sera pas utilisée pour le service de données et que le trafic de type M2M/IoT est négligeable.

Pour connaître la consommation totale de la station de base sur l'ensemble de la journée exprimée en kWh (hors méthode d'allocation), il faudra donc intégrer sa consommation instantanée sur les 24 heures de la journée, et on obtient alors⁸⁴:

Consommation-BS (kWh) = 24 (a * M * Charge-Max-voix + b)

Pour la 4G/5G se pose la question de la définition d'une règle d'allocation car une même station de base 4G/5G est utilisée pour de la voix (et trafic M2M/IoT considéré comme négligeable), mais aussi pour des données :

- Le terme « **24 (a * M * Charge-Max-voix)** » représentant la consommation due au trafic voix, a une valeur proportionnelle au trafic voix portée par la 2G-3G avant migration et doit être entièrement conservé.
- Par contre, le terme « **24 b** », représentant la consommation à vide, est la partie fixe liée aux canaux communs et BBU et doit être réparti entre les services voix et données. Cette répartition est réalisée proportionnellement aux charges de la façon suivante :

Consommation-BS (kWh) pour 4G/5G = 24 (a * M * Charge-Max-voix + K * b)

Avec $K = \text{Charge-Max-voix} / \text{Charge-Max}$, où Charge-Max est la charge de la station de base à l'heure chargée tous services confondus.

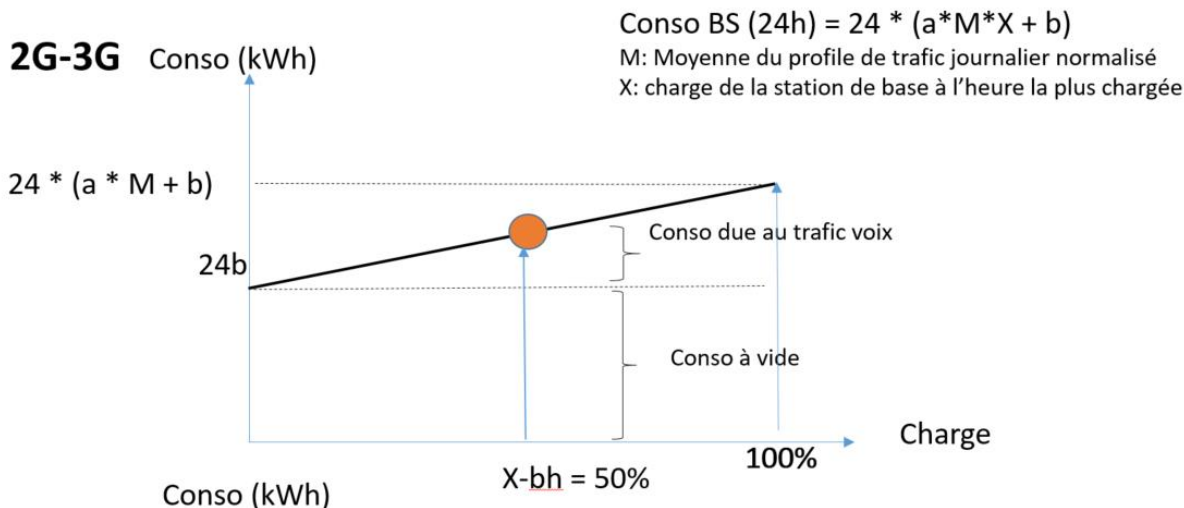
Tout ceci est montré ci-dessous avec des valeurs numériques à titre d'exemples : ces valeurs sont différentes de celles de l'étude, et ont été choisies afin de permettre une illustration simple.

⁸⁴ Voir chapitre [Détermination de la différence des consommations électriques d'une station de base 2G-3G avec une station de base 4G/5G](#)

Les valeurs suivantes sont prises **dans l'exemple** pour l'ensemble de la station de base 2G-3G:

- Trafic heure chargée = 75 Erlang
- Capacité-voix-2G3G = 150 Erlang

La charge « X-bh » de la station de base 2G-3G à l'heure chargée dans cet exemple est alors égale à $75/150 = 50\%$



Les valeurs suivantes sont prises dans l'exemple pour l'ensemble de la station de base 4G/5G :

- Trafic heure chargée = 75 Erlang (même valeur que pour 2G-3G)
- Capacité-voix-4G/5G = 600 Erlang
- Charge-Max tous services confondus à l'heure la plus chargée : 50%

La charge « X-bh » de la station de base 4G/5G à l'heure chargée est alors égale à $75/600 = 12,5\%$

K est le coefficient pour la règle d'allocation, est alors égal à $X\text{-bh}/\text{Charge-max} = 12,5/50 = 1/4$

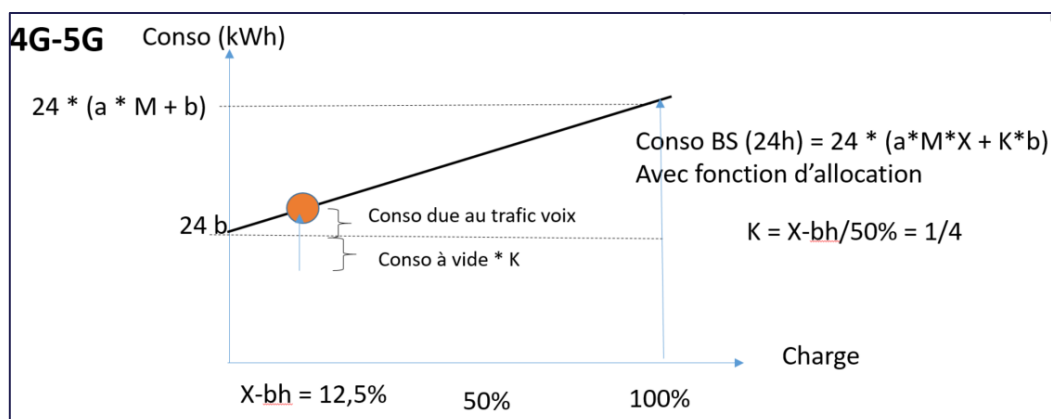


Figure 14 - Illustration du modèle de consommation de la station de base avec fonction d'allocation

Dans le cadre de l'étude, les points suivants doivent être soulignés :

- Le trafic voix 2G-3G à la date T_m étant très faible, c'est quasiment toute la consommation électrique 2G-3G qui est gagnée.
- Ceci se traduit par exemple dans les nombres suivants qui proviennent de l'étude de sensibilité qui a été réalisée sur la partie réseau (Cas n°2 dans [Tableau 5](#); voir Chapitre [Evaluation numérique de la différence des consommations électriques des stations de base 2G-3G avec les stations de base 4G/5G dans la bande 900 MHz](#))
 - Trafic heure chargée par station de base= 12 Erlang
 - $X_{bh} = 12/600 = 2\%$
 - $M * X_{bh} = 44\% * 2\% = 0,88\%$
 - $K = 2/50 = 4\%$
- Dans le cas de base (Cas n°1 dans [Tableau 5](#); voir Chapitre [Evaluation numérique de la différence des consommations électriques des stations de base 2G-3G avec les stations de base 4G/5G dans la bande 900 MHz](#)), on a :
 - Trafic heure chargée par station de base= 1,5 Erlang
 - $X_{bh} = 1,5/600 = 0,25\%$
 - $M * X_{bh} = 44\% * 0,25\% = 0,11\%$
 - $K = 0,25/50 = 0,5\%$

5. Annexe C : Glossaire

- **MIMO** : Multiple Input Multiple Output. C'est une technologie de transmission radio qui consiste à utiliser plusieurs éléments antennaires à l'émission et à la réception afin d'augmenter la capacité ou améliorer le débit de l'utilisateur en tirant bénéfice du gain multi-trajets du signal.
- **BBU** : Base Band Unit. Il s'agit du module de la station de base en charge du traitement du flux en bande de base et implémentant les protocoles de communication de l'accès radio.
- **GES** : Gaz à Effet de Serre. Les GES sont des gaz naturels présents dans l'atmosphère terrestre et qui emprisonnent les rayons du soleil, stabilisant la température à la surface de la planète à un niveau raisonnable.
- **Analyse par cycle de vie (ACV)** : Compilation et évaluation des intrants, des extrants et des impacts environnementaux potentiels d'un système de produits au cours de son cycle de vie⁸⁵.
- **Carbone embarqué** : Toutes les émissions carbone autres que celles de la phase d'usage de l'équipement⁸⁶.
- **Feature phone (téléphone mobile basique)** : Un téléphone mobile qui conserve le facteur de forme des générations précédentes de téléphones mobiles, ayant généralement un bouton-poussoir, un petit écran LCD non tactile, un microphone, une caméra arrière et des services GPS. Pour les comparer aux smartphones, on parle parfois de téléphones basiques. Les Feature phones offrent des fonctionnalités d'appels vocaux, de messagerie texte et certaines

⁸⁵ ISO 14040:2006: Management environnemental — Analyse du cycle de vie — Principes et cadre : <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:14040:ed-2:v1:fr>

⁸⁶ GHG Protocol ICT Guidance : <https://www.gesi.org/research/ict-sector-guidance-built-on-the-ghg-protocol-product-life-cycle-accounting-and-reporting-standard>

applications mobiles de base : calendrier, calculatrice, applications multimédias et navigateur Web mobile de base⁸⁷.

- **Internet des objets (IoT)** : Les objets qui deviennent compatibles avec Internet (appareils IoT) interagissent généralement via des systèmes intégrés, une forme de communication réseau, ainsi qu'une combinaison d'informatique de pointe et de *cloud computing*. Les données des appareils connectés à l'IoT sont souvent (mais pas exclusivement) utilisées pour créer de nouvelles applications pour les utilisateurs finaux⁸⁷.
- **Machine to Machine (M2M)** : Les technologies utilisées par les machines afin de communiquer entre elles, sans intervention humaine directe. Dans l'étude, IoT et M2M sont traités indistinctement.
- **Smartphone** : Un téléphone mobile qui exécute de nombreuses fonctionnalités d'un ordinateur, ayant généralement une interface à écran tactile, un accès Internet à partir des réseaux Wi-Fi et mobiles, une connexion GPS et un système d'exploitation (OS) capable d'exécuter des applications téléchargées⁸⁷.
- **Technologies de l'information et des Communications (TIC)** : Les secteurs d'activité économique qui concourent à la visualisation, au traitement, au stockage et à la transmission de l'information par des moyens électroniques⁸⁸.
- **VoLTE: Voix sur le réseau LTE (4G)** : Un service d'appels voix transmis sur IP via le réseau d'accès mobile LTE (4G)⁸⁹.

6. Annexe D : Références et bibliographie

[ARCEP – 2022] : Les services de communications électroniques en France- 4^{ème} trimestre 2021 - Observatoire des marchés de communications électroniques du 07 avril 2022 – ARCEP

https://www.arcep.fr/fileadmin/cru-1650011811/reprise/observatoire/4-2021/obs-marches-T4-2021_070422.pdf

[ARCEP – 2021] : Renouvellement des terminaux mobiles et pratiques commerciales de distribution-Eléments de réflexion-3 juin 2021 ARCEP

[CREDOC – 2021] : Baromètre du numérique Edition 2021 Enquête sur la diffusion des technologies de l'information et de la communication dans la société française CREDOC

[BASE CARBONE – 2022] : Base Carbone- Documentation des facteurs d'émission de la Base Carbone-Version 22.0.0 –mardi 2 août 2022 - Ademe⁹⁰

[ARCEP/ADEME – 2022] : E. Lees Perasso, C. Vateau, F. Dormon, Y. Aiouch, A. Chanoine, L. Corbet, P. Drapeau, L. Ollion, V. Vigneron, D. Prunel, G. Ouffoué, R. Mahasenga, J. Orgelet, F. Bordage, P. Esquerre. « Evaluation de l'impact environnemental du numérique en France et analyse prospective – 2^{ème} volet de l'étude », ARCEP/ADEME, 2022

⁸⁷ E. Lees Perasso *et al.* « Evaluation environnementale des équipements et infrastructures numériques en France », https://www.arcep.fr/uploads/tx_gspublication/etude-numerique-environnement-ademe-arcep-volet02_janv2022.pdf

⁸⁸ Définition de l'OCDE : <https://www.oecd.org/digital/ieconomy/2771153.pdf>

⁸⁹ Source: GSMA: <https://www.gsma.com/futurenetworks/volte-2-2/>

⁹⁰ <https://bilans-ges.ademe.fr/docutheque/docs/%5BBase%20Carbone%5D%20Documentation%20g%C3%A9n%C3%A9rale%20v22.0.pdf>

[YESYES – 2021] : Étude en ligne Happydemics réalisée pour YesYes⁹¹ du 24 au 31 août 2021 auprès de 1122 répondants représentatifs en genre et en âge de la population française.

[LESNUMERIQUES – 2022] : « Le reconditionné, un marché en pleine progression auprès des Français » : article publié le 13/09/2022 dans « Les numériques »⁹².

[JRC – 2023] : JRC⁹³ Science for policy report – Code of Conduct on Energy Consumption of Broadband Equipment Version 8.0 –European Commission

<https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC125961>

[ETSI – 2018] : ETSI ES 202 706-1 v.1.6.1 Environmental Engineering (EE); Metrics and measurement method for energy efficiency of wireless access network equipment; Part 1: Power consumption - static measurement method

https://www.etsi.org/deliver/etsi_es/202700_202799/20270601/01.06.01_60/es_20270601v010601p.pdf

[ITU – 2022]: Recommendation L.1390 (08/2022) Energy saving technologies and best practices for 5G radio access network (RAN) equipment⁹⁴

[ILCD – 2012]: ILCD handbook International Reference Life Cycle Data System-General guide for Life Cycle Assessment-Detailed guidance JRC European Commission.

<https://eplca.jrc.ec.europa.eu/ilcd.html>

[GSMA – 2021]: GSMA, 2G-3G Sunset Guidelines Version 1.0 03 June 2021:

<https://www.gsma.com/newsroom/wp-content/uploads/NG.121-v1.0-2.pdf>

[Comité - 2022]: Comité d'experts techniques sur les réseaux mobiles (2022) : « Evaluation de la consommation énergétique d'un déploiement 4G vs 5G »

https://www.arcep.fr/fileadmin/user_upload/grands_dossiers/environnement/etude-environnement-4Gvs5G-note-detaillee-comite-expert-mobile_janv2022.pdf

[ARCEP – 2023] : Les services de communications électroniques en France- 4^{ème} trimestre 2022 - Observatoire des marchés de communications électroniques du 06 avril 2023 – ARCEP

https://www.arcep.fr/fileadmin/reprise/observatoire/4-2022/obs-marches-T4-2022_avril2023.pdf

[ANFR - 2023] <https://www.anfr.fr/gestion-des-frequences-sites/lobservatoire/>

[ISO 14044] Management environnemental — Analyse du cycle de vie — Exigences et lignes directrices

<https://www.iso.org/standard/38498.html>

⁹¹ <https://www.yes-yes.com/blog/les-produits-reconditionnes-que-pensent-les-francais-WO83kJfVTzCID96KTHsPQ>

⁹² <https://www.lesnumeriques.com/telephone-portable/le-reconditionne-un-marche-en-pleine-progression-aupres-des-francais-n191579.html>

⁹³ Joint Research Center. Le JRC fournit des connaissances et des données scientifiques indépendantes et fondées sur des preuves, soutenant les politiques de l'UE afin d'avoir un impact positif sur la société. Voir https://commission.europa.eu/about-european-commission/departments-and-executive-agencies/joint-research-centre_en

⁹⁴ Voir notamment le chapitre 6.2 « Baseline and variable power consumption » qui décrit le modèle affine utilisé dans cette note.

7. Annexe E : Composition du Comité d'experts

- **Présidence du Comité** : Catherine Mancini
- **Secrétariat et pilotage** : Arcep (Ahmed Haddad)
- **ANFR** : Didier Chauveau
- **Bouygues Télécom** : Vincent Lemoine, Vincent Merat, Franck Bliah
- **Ericsson** : Zied Malouche, Arnauld Taffin
- **Free Mobile** : Bertand Fiévet, Damien Genouville, Abdenour Medjkane
- **Huawei** : Michael Jolly, Jérôme Danneel
- **Orange**: Sabrina Saudai, Franck Payoux, Catherine Cano-Menda, Sara Bertoglio
- **Nokia** : Edouard Pereira, Mirela Andouard
- **SFR** : Benoit Thuillier, Pierre Lescuyer
- **Telecom ParisTech** : Marceau Coupechoux