

Evaluation de la consommation énergétique d'un déploiement 4G vs 5G

Comité d'experts techniques sur les réseaux mobiles

Note détaillée de l'étude

1 Objectif et cadrage de l'étude

L'introduction de la technologie 5G pour répondre à la croissance du trafic et la multiplicité des usages interroge sur la capacité de cette technologie à concilier, par rapport à un contrefactuel (scénario *business as usual* basé sur la 4G et ses évolutions c'est-à-dire sans déploiement de la 5G), l'objectif de performance recherchée d'une part et l'exigence de maîtrise de la consommation énergétique et l'impact carbone d'autre part.

Le premier prérequis important quand on compare les deux situations (4G vs 5G), est de définir correctement aussi bien l'objet de la comparaison que d'intégrer le type de déploiement réalisé jusqu'à présent et susceptible de l'être dans le futur en France pour ces deux technologies :

- Pour la 4G, l'exercice considère les différentes bandes de fréquences déployées en France et leur évolution technologique ;
- Pour la 5G, la bande 3,5 GHz ou la réutilisation de fréquences utilisées précédemment par la 4G sont considérées.

Un autre prérequis essentiel est de tenir compte des modalités de mise en œuvre (fonctionnalités activées type *beamforming*, type d'antennes, capacité des équipements etc.), de l'environnement de déploiement, du niveau de maturité de la technologie ainsi que de la stratégie de rénovation des sites dans les bandes existantes au fur et à mesure de la bascule du trafic sur la 5G selon une vision pluriannuelle. L'exercice réalisé intègre des hypothèses en la matière, précisées plus bas.

Le comité d'experts techniques mobile, installé par l'Arcep en octobre 2018, a initié des travaux techniques pour apprécier l'impact de la technologie 5G sur la consommation énergétique et l'impact carbone. 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 F de ce document.

La présente étude constitue une première contribution issue de ces travaux. Elle dresse une comparaison à travers une projection jusqu'en 2028 de la consommation électrique (en kWh) et les émissions de GES correspondantes¹ sur une même zone géographique de stations de base 4G vs 4G+5G où la 5G dans la bande 3,5 GHz est envisagée à date d'être déployée pour les services très haut débit

¹ L'étude ne prend en compte que les émissions GES relatives à la phase d'usage des équipements mobilisés.

mobile. Dans cette étude, la 5G dans la bande 3,5 GHz est donc évaluée quand déployée pour des raisons essentiellement capacitaires, pour couvrir des poches de trafic ainsi que notamment pour se conformer à des considérations règlementaires. Dans l'avenir, il faut noter que les opérateurs pourront également déployer la 5G pour d'autres objectifs, comme fournir de nouveaux services à des verticaux, et que ces nouveaux services ne sont pas évalués dans le cadre de cette étude qui compare la 4G et 4G+5G sur un même niveau de service.

Cette comparaison au niveau de différents types de zones de déploiement du réseau ne peut en aucun cas permettre une extrapolation directe à l'ensemble du réseau. Une analyse à cette échelle nécessiterait à la fois d'analyser plus de typologies de sites différents, d'intégrer la dynamique du maillage des sites et de prendre en compte la densification et le rajout de couverture inhérents à l'évolution d'un réseau mobile.

La présente note détaille la méthodologie et les hypothèses de cette étude comparative et restitue ses principales conclusions. Les développements techniques de l'exercice de modélisation sont explicités en annexes de cette note.

Tous commentaires sur cette note sont bienvenus à l'adresse mail ComiteExpertsMobile@arcep.fr d'ici 31/03/2022.

L'objectif en partageant cette étude est de contribuer – à date et dans un cadre d'hypothèses bien définies – à une meilleure compréhension des impacts de l'introduction de la 5G en matière de consommation énergétique.

2 Méthodologie et hypothèses d'analyse

2.1 Approche méthodologique

L'approche méthodologique suivie dans cette étude repose sur 3 briques principales :

- Une première brique consiste à **modéliser les consommations électriques d'une station de base macro en fonction des débits** générés dans le sens descendant et des évolutions technologiques en termes de générations de matériel et de standard utilisé (technologie 4G vs 5G, duplexage TDD (Time Division Duplexing) vs FDD (Frequency Division Duplexing)). Le développement de cette brique est détaillé dans l'annexe A de la note.
- Une seconde brique consiste à **calculer l'évolution du contenu en carbone équivalent (CO2 éq.) émis par un équipement durant sa phase d'usage** en fonction de l'énergie consommée (c à d par kWh consommé). Le développement de cette brique est détaillé en Annexe B de la note.
- Une troisième brique consiste – sur la base des deux premières briques – à rajouter des hypothèses supplémentaires sur l'évolution du trafic entre 2020 et 2028 et un profil de charge journalier d'un site radio afin de **modéliser une évolution de la consommation énergétique (en kWh) et émissions GES à horizon 2028** sur une même zone géographique de stations de base 4G vs 4G+5G où la 5G dans la bande 3,5 GHz est envisagée à date d'être déployée pour les services très haut débit mobile. Le développement de cette brique est détaillé dans l'annexe C de la note.

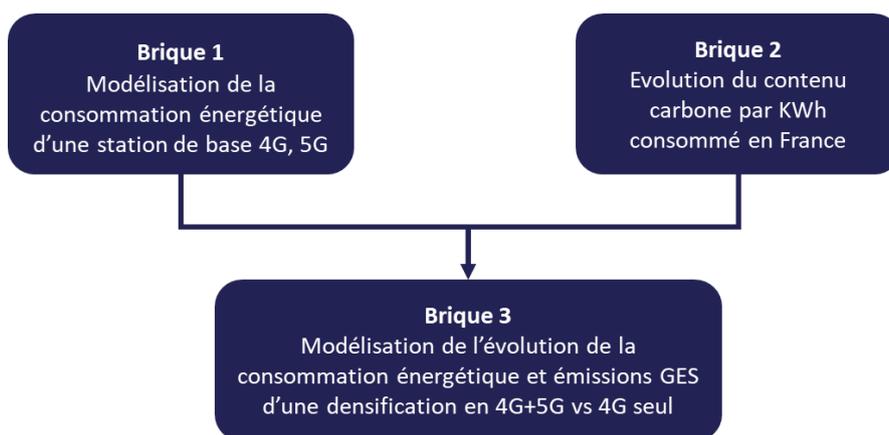


Figure 1 – Illustration de l'articulation des différentes briques de l'approche méthodologique

La méthodologie repose sur une évaluation en différentiel sur la base de deux scénarios :

- **Scénario « 4G seul »** : toutes les extensions et nouvelles stations de base nécessaires pour répondre à l'augmentation du trafic sont réalisées en 4G. Ce scénario sert de référence dans chaque type de déploiement décrit ci-après.
- **Scénario « 4G+5G »** : la 5G en bande 3.5GHz est ajoutée pour répondre à l'augmentation de trafic. Suivant les types de déploiements, le matériel utilisé pour la 4G peut être renouvelé.

Les deux scénarios sont comparés sur une même zone géographique représentée par la couverture d'un site macro en 2020, sur une durée de 8 ans (de 2021 à 2028). La comparaison est réalisée sur un même niveau de services de très haut débit mobile, essentiellement à visée grand public.

Différents types de déploiement de sites macros où la bande 3,5 GHz sera déployée, sont étudiés pour la zone considérée permettant de dégager des tendances et conclusions sur la comparaison des deux scénarios. Ces différents types de déploiement ont été sélectionnés depuis les zones les plus denses jusqu'aux zones les moins denses où la 5G dans la bande 3,5 GHz pour les services très hauts débit mobile eMBB (enhanced Mobile Broadband) est envisagée à date d'être déployée. Pour chaque scénario et chaque type de déploiement, le choix des équipements retenus (notamment entre des équipements 64T64R, 32T32R² 5G) correspond à un compromis entre les performances énergétiques, les performances de couverture, les performances de capacité et les choix opérationnels de l'opérateur.

Les évolutions de la consommation électrique, des émissions de gaz à effet de serre et de l'efficacité énergétique³ des stations de base de chaque scénario sont respectivement rapportées sur une base 100 à la consommation électrique, émission de GES et efficacité énergétique de la station de base 4G en 2020.

² Cf. Glossaire

³ L'efficacité énergétique d'une station de base est définie comme le ratio entre le volume de données délivrées par la station de base (en *bits*) pendant une période donnée et l'énergie consommée par la station de base durant cette période (source : ETSI TS 203 228 (2020))

2.2 Typologie de déploiement

- Les deux scénarios ont été déclinés sur les différents types de déploiement sélectionnés (voir plus de détails sur les considérations techniques sont développés en Annexe). **Type de déploiement A** (qu'on dénommera « forte capacité ») : où le point de départ est une station de base 4G ayant évolué en configuration maximale de 2x65 MHz⁴ en FDD. Dans ce scénario, la 5G est introduite à partir de 2021 en faisant le choix d'un équipement AAS (Active Antenna System) 64T64R.

Tableau 1 - Tableau chronologique décrivant le type de déploiement A

Type de déploiement A « forte capacité »	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028
Scénario 4G seule	4G FDD 2x65MHz + 4T4R			Ajout d'un 2 nd site 4G			Ajout d'un 3 ^e site 4G	Ajout d'un 4 ^e site 4G	Ajout d'un 5 ^e site 4G
Scénario 4G+5G		Ajout 5G TDD 64T64R							

- **Type de déploiement B** (qu'on dénommera « capacité moyenne »): où le point de départ est une station de base 4G tri-bande à capacité moyenne initiale (2x45MHz en FDD) puis bénéficiant d'extensions (rajout d'une bande basse, upgrade avec des antennes MIMO 4T4R sur bandes hautes) avant de rajouter de nouveaux sites dans la situation « 4G seul », alors que dans la situation « 4G+5G », la 5G est introduite à partir de 2023 en faisant le choix d'un équipement AAS 32T32R.
- Pour rendre compte de l'impact du timing du renouvellement du matériel, deux variantes du type B sont considérées : une variante considérant un renouvellement déjà anticipé des stations de base 4G (type B1 : capacité moyenne/matériel renouvelé⁵) ; et une variante considérant un renouvellement reporté à partir de 2023 des stations de base 4G (type B2 : capacité moyenne/matériel à rénover).

Tableau 2 - Tableau chronologique décrivant le type de déploiement B1

Type de déploiement B1 « capacité moyenne/matériel renouvelé »	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028

⁴ Valeur moyenne en agrégeant les quantités de spectre disponibles en 2020 pour les opérateurs mobiles en France dans les bandes de fréquences FDD suivantes : 700/800/1800/2100/2600 MHz.

⁵ En général, une station de base est renouvelée périodiquement en renouvelant une partie de son matériel car en fin de vie et/ou pour introduire de nouvelles fonctionnalités dont notamment le rajout de capacité.

Scénario 4G seule	4G FDD 2x45MHz + 2T2R			Ajout 700 (2x50MHz) + rénovation 4G 4T4R		Ajout 2600 (2x65 MHz)	Ajout d'un 2 nd site 4G		Ajout d'un 3 ^e site 4G
Scénario 4G+5G				Ajout 5G TDD 32T32R					

Tableau 3 - Tableau chronologique décrivant le type de déploiement B2

Type de déploiement B2 « capacité moyenne/matériel à rénover »	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028
Scénario 4G seule	4G FDD 2x45MHz + 2T2R			Ajout 700 (2x50MHz) + rénovation 4G 4T4R		Ajout 2600 (2x65MHz)	Ajout d'un 2 nd site 4G		Ajout d'un 3 ^e site 4G
Scénario 4G+5G				Ajout 700 (2x50MHz) + rénovation 4G 4T4R + Ajout 5G TDD 32T32R					

Pour prendre en compte la diversité des déploiements urbains en France, et notamment la distance inter-sites qui peut influencer sur la mise en œuvre du MIMO et donc sur la capacité du système 5G TDD⁶, deux cas de la variante B1 sont considérés :

- le cas qui permet de tirer pleinement partie du Multi-User MIMO (cas a) ;
 - le cas d'une distance inter-sites plus importante qui ne permet pas de tirer pleinement partie du Multi-User MIMO et dans lequel la capacité de la station de base 5G TDD est plus faible (cas b : distance inter-sites plus importante).
- **Type de déploiement C** : Ce type de déploiement représente la zone la moins dense où des déploiements 5G en bande 3,5 GHz sont envisagés à date par l'opérateur pour les services très haut débit mobile pour couvrir des poches de trafic, ainsi que notamment pour se conformer à des considérations réglementaires (par exemple sur des communes qui devront représenter 25% de l'ensemble des déploiements 5G en bande 3,5 GHz à l'horizon 2025)

Pour ce type de déploiement C, les hypothèses suivantes sont considérées :

- Le point de départ est un site faible capacité à deux bandes 4G (800 et 1800 MHz) avec un total de 30 MHz de spectre en 2020.
- Le matériel 4G est considéré comme déjà rénové et donc ne nécessite pas de rénovation avant la fin de la période d'observation de l'étude.

⁶ Par exemple, en zone de très haute densité d'utilisateurs (donc plus d'opportunités de transmission simultanée entre utilisateurs) et avec une grille cellulaire plus dense (distance inter-sites plus réduite), le gain du MU-MIMO est mis à profit grâce à un bon environnement de propagation multi-trajet, une meilleure qualité de la liaison radio et des opportunités d'appariement avec le terminal.

- Le volume de trafic augmente de 30% par an comme dans les autres types de déploiements.
- En l'absence de besoin de capacité, la 5G en bande 3,5 GHz sera introduite en 2025 au plus tard notamment en cohérence avec les obligations des licences.
- La 5G bande 3,5 GHz sera introduite avec une AAS 32T32R avec capacité réduite due à une grande distance inter-sites (capacité égale au type B1b).
- Pour le scénario 4G seule comme pour le scénario 4G+5G, on ajoutera obligatoirement du 700 MHz au plus tard en 2027 pour prendre en compte les obligations réglementaires de déploiement de cette bande.

Pour prendre en compte les zones moins denses, ce type de déploiement sera décliné en deux variantes :

- C1 avec point de charge aux heures chargées en 2020 à 50%, un taux d'absorption de la bande 3,5 GHz de 80%⁷ et la possibilité de déployer du 2600 MHz pour des raisons capacitaires.
- C2 avec point de charge aux heures chargées en 2020 à 30%, un taux d'absorption 5G de 60%. Pour le scénario 4G seule, on considèrera que le 2600 MHz n'apporte pas une couverture suffisante de la zone, et donc on s'interdira son déploiement pour raisons capacitaires.

Tableau 4 - Tableau chronologique décrivant le type de déploiement C1

Scénario de déploiement	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028
Scénario 4G seule	4G FDD 2x30MHz + 2T2R			Ajout 2100MHz 2T2R (2x45MHz)		Ajout 700 + upgrade 4T4R 1800/2100 (2x50MHz)	Ajout 2600MHz 4T4R (2x65MHz)	Ajout d'un 2 ^e site 4G 700/800/ 1800/2100	
Scénario 4G+5G				Ajout 5G TDD 32T32R				Ajout 700MHz 2T2R (2x35MHz)	

Tableau 5 - Tableau chronologique décrivant le type de déploiement C2

Scénario de déploiement	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028
Scénario 4G seule	4G FDD 2x30MHz + 2T2R					Ajout 2100MHz 2T2R (2x45MHz)		Ajout 700 + upgrade 4T4R 1800/2100 (2x50MHz)	Ajout d'un 2 ^e site 4G 700/800/ 1800/2100
Scénario 4G+5G						Ajout 5G TDD 32T32R		Ajout 700MHz 2T2R (2x35MHz)	

⁷ Le taux d'absorption renvoie à la capacité d'absorption du trafic par la bande 3,5 GHz, autrement dit le pourcentage du trafic sur cette bande que l'on aurait si la pénétration des terminaux était à 100%, le complément restant sur les bandes FDD. Cette capacité est inférieure à 100% pour diverses raisons (ingénierie des sites, type d'environnement etc.) ; voir Annexe C pour plus de détails.

Ces types de déploiement et leur chronologie sont résumés à travers Figure 2.



Figure 2 - Illustration des différents types de déploiement et leur chronologie

2.3 Hypothèses de l'étude

Afin de modéliser l'évolution de la consommation énergétique à horizon 2028 d'une station de base 4G/5G plusieurs considérations structurantes ont été faites :

- Le patrimoine spectral concerne un opérateur représentatif⁸ en France pour cette étude, en considérant les bandes basses (700 et 800 MHz) et les bandes moyennes (1800, 2100 et 2600 MHz) en FDD pour la 4G et la fréquence 3,5 GHz en TDD pour la 5G. Les hypothèses sur le débit des stations de base en fonction de technologie et les configurations sont détaillées en Annexe A.
- La réutilisation en 5G des fréquences 4G n'est pas considérée dans l'étude. Il faut d'ailleurs noter que l'efficacité énergétique de la 5G avec des systèmes non AAS utilisée seule dans ces fréquences FDD chargées ou en partage avec la 4G ne diffère pas significativement de la 4G utilisée seule dans ces fréquences. Par conséquent, la consommation d'un site 4G (bandes FDD) + 5G (bande 3,5 GHz) diffère très peu de la consommation d'un site [4G+5G] (mêmes bandes FDD) + 5G (bande 3,5 GHz).
- Par ailleurs, l'étude n'a pas considéré non plus le scénario de la réutilisation des fréquences 900 MHz en 2G/3G en 5G. Seules les fréquences autorisées à date ont été considérées dans l'étude (sont exclues donc les fréquences en bande 1,4 GHz et 26 GHz).
- Les deux scénarios sont comparés sur un même niveau de services de type très haut débit mobile, essentiellement à visée grand public. En particulier, des nouveaux usages et services pour les entreprises / verticaux potentiellement permis par des caractéristiques de la 5G dans le futur (faible latence, IoT) ne sont pas évalués. Ainsi, les effets environnementaux du deuxième ordre (émissions GES évitées par ces services) ou d'autres effets (sociétaux, économiques, effets rebonds⁹) ne sont pas étudiés pour la comparaison des deux scénarios.
- Le volume de trafic croît avec un rythme de 30% par an à horizon 2028 par site ; la même croissance de trafic est appliquée aux deux scénarios car le même niveau de services est considéré dans cette étude¹⁰.

⁸ Opérateur représentatif pour l'étude qui aurait la quantité moyenne arrondie de spectre des 4 opérateurs en France dans les fréquences basses (700 et 800 MHz) soit 15 MHz, dans les fréquences intermédiaires FDD (1800, 2100 et 2600 MHz) soit 50 MHz ainsi que la bande 3,5 GHz en TDD soit 80 MHz.

⁹ La méthode d'évaluation des émissions évitées consiste à comparer un scénario de référence avec un scénario utilisant une nouvelle solution afin d'en évaluer les éventuels gains. Mais cette nouvelle solution peut entraîner des effets inattendus, ou non intentionnels générant des émissions de GES qui sont souvent liés à des changements de comportement humain : ce sont les effets rebonds qui doivent être pris en compte dans la mesure du possible lors du calcul des émissions évitées, sachant qu'ils sont difficiles à prévoir et quantifier.

Émissions évitées nettes de la nouvelle solution = Emissions évitées - Emissions directes – Emissions rebond

Référence : The Avoided Emissions Framework (AEF)- Novembre 2019

A travers certains services numériques, par exemple tels que le télétravail ou la visioconférence, le temps libre dégagé par un utilisateur de ces services peut être exploité par ce même utilisateur pour consommer plus de services numériques ou d'autres activités générant ainsi un impact environnemental additionnel. Un autre effet rebond du télétravail peut résider dans le surcroît de chauffage l'hiver.

¹⁰ Conformément à la recommandation ITU L.1410 qui préconise qu'une comparaison entre produits/services est possible uniquement à conditions et hypothèses équivalentes.

- L'étude n'intègre pas le rajout de sites radios dans le cadre de la densification des différents types de zones étudiées autres que le besoin de nouveaux sites pour faire face à l'augmentation de trafic de données sur la base des hypothèses de l'étude ;
- Dans cette version de l'étude, seule la partie usage des équipements est prise en compte dans la comparaison des deux scénarios. Les phases de production, transport et installation des équipements pourront être intégrées dans une version ultérieure de cette étude. Même si cette affirmation demanderait à être démontrée par une quantification, il est déjà possible de penser que dans le cas des scénarios 4G impliquant de nouveaux sites radios (nouveaux équipements, sites radio à construire) le bilan carbone serait plus alourdi que dans le cas 4G+5G qui permet de maintenir un seul site radio.
- La prise en compte d'une évolution de la pénétration 5G (avec un taux de 14% en moyenne par an¹¹) et de son trafic associé en prenant en compte la capacité d'absorption du trafic par la bande 3,5 GHz dans le cas d'un déploiement 4G+5G ;
- Les fonctions de veille jouent un rôle important pour réduire la consommation électrique des réseaux mobiles quand ils sont moins chargés en réduisant les ressources radio utilisées par les stations de base (désactivation d'amplificateurs de stations de base pour certaines fréquences, désactivation de certaines voies radio, extinction d'amplificateurs dans des intervalles de temps sans transmissions). Comme la charge sera moins importante particulièrement au début du déploiement, ces fonctions de veille devraient notamment permettre de réduire la consommation électrique de la 5G pendant les premières années. Mais parce que ces différentes fonctions de veille ne sont pas à date modélisées dans une recommandation ou norme bien que définies au niveau fonctionnel (3GPP), et ont des caractéristiques et performances différentes d'un équipement à l'autre, elles n'ont pas été prises en compte dans cette étude.
- Par ailleurs, des évolutions logicielles et matérielles et innovations apparaissant dans les années à venir qui pourraient permettre d'augmenter l'efficacité énergétique de la 4G et de la 5G ne sont pas intégrées d'une façon prospective à cette étude.
- L'étude s'appuie sur un modèle affine de station de base selon le principe défini par la norme ETSI ES 202 706-1 (V1.6.1 (2021-01)) et le concept d'efficacité énergétique spécifié dans la norme ETSI ES 203 228 V.1.3.1 (2020-10). Le modèle affine pour les stations de base est également décrit dans la recommandation ITU-T L.1410 (12/2014).

La croissance de trafic étant considérée parmi les éléments les plus structurants sur la dynamique des scénarii ; une analyse de sensibilité est réalisée sur ce paramètre afin d'apprécier la validité des conclusions de l'étude en testant autour de la valeur de base (30%) un scénario de basse croissance de trafic (25% de croissance par an) et un scénario de haute de croissance de trafic (35% de croissance par an), voir Annexe D. Par ailleurs, afin de tester la sensibilité du modèle par rapport à la performance énergétique des équipements 5G considérés dans l'étude, une analyse de sensibilité est conduite en faisant varier (+/- 10%) les paramètres du modèle affine de consommation énergétique des stations de base 5G, voir Annexe D.

Il faut noter que l'étude des différents types de déploiement depuis les zones les plus denses jusqu'aux zones les moins denses où la 5G dans la bande 3,5 GHz pour les services très hauts débit mobile est

¹¹ Hypothèse de taux de croissance en moyenne sur 8 ans de la pénétration du trafic 5G sur la bande 3,5 GHz en se basant sur le rapport du Ericsson Mobility Report (2020) considérant une évolution de la pénétration du trafic 5G en bande 3,5 GHz de 10% en 2021 à 69% en 2025 ; voir Annexe C pour plus de détails.

envisagée à date d'être déployée constitue également une étude de sensibilité pour la comparaison des deux scénarios.

3 Résultats et conclusions de l'étude

Les calculs et les résultats détaillés des différents types de déploiement de sites macros où la bande 3,5 GHz sera déployée, sont explicités en Annexe C.

Le choix des différents types de déploiement sélectionnés depuis les zones les plus denses jusqu'aux zones les moins denses où la 5G dans la bande 3,5 GHz est envisagée à date d'être déployée, permettent de dégager des tendances et conclusions sur la comparaison des deux scénarios. En effet, le gain énergétique du scénario 4G+5G par rapport au scénario 4G seule est plus important dans les types de déploiement à forte densité de trafic (type de déploiement A, B1 et B2) alors qu'il est plus faible voire nul pour les types de déploiement à faible densité de trafic (type de déploiement C1 et C2). Cette conclusion peut être visualisée à travers les 4 figures ci-dessous.

Afin d'apprécier l'impact de l'introduction de la 5G en termes d'efficacité énergétique pour chaque type de déploiement, le ratio de l'efficacité énergétique du scénario 4G+5G par rapport au scénario 4G seule a été calculé par année et type de déploiement et son évolution est illustrée en Figure 3. Celle-ci démontre qu'après une dégradation momentanée de l'efficacité énergétique à la suite de l'introduction de la 5G, le ratio d'efficacité énergétique revient à l'équilibre et l'efficacité du scénario 4G+5G dépasse au fur et à mesure de l'augmentation du trafic celle du scénario 4G seule. Le retour à l'équilibre du ratio d'efficacité énergétique entre les deux scénarii est plus rapide avec les types de déploiement à forte densité (A et B) que les types de déploiement à faible densité (C). En complément, Figure 4 illustre l'évolution du ratio par année et type de déploiement de l'efficacité énergétique de la technologie 5G uniquement dans le scénario 4G+5G par rapport à l'efficacité énergétique totale du scénario 4G seule et démontre à travers sa magnitude le potentiel de la bande 3,5 GHz pour améliorer l'efficacité énergétique.

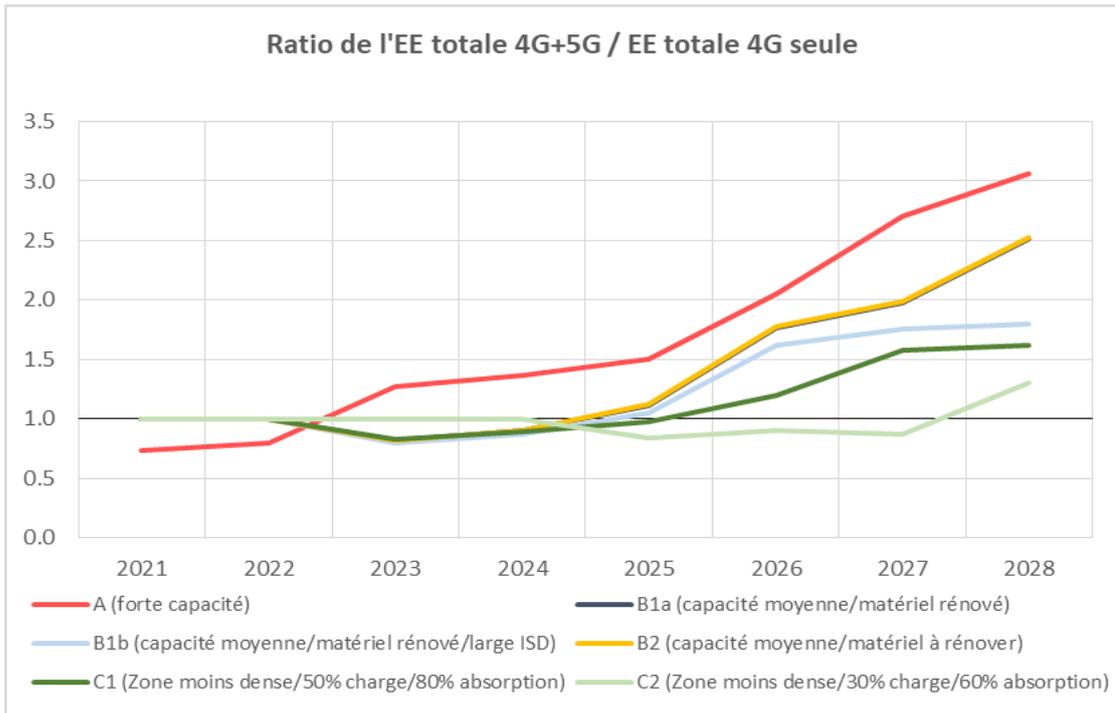


Figure 3 - Evolution du ratio de l'efficacité énergétique totale 4G+5G (du scénario 4G+5G) et celle de la 4G (du scénario 4G seule) pour les différents types de déploiement

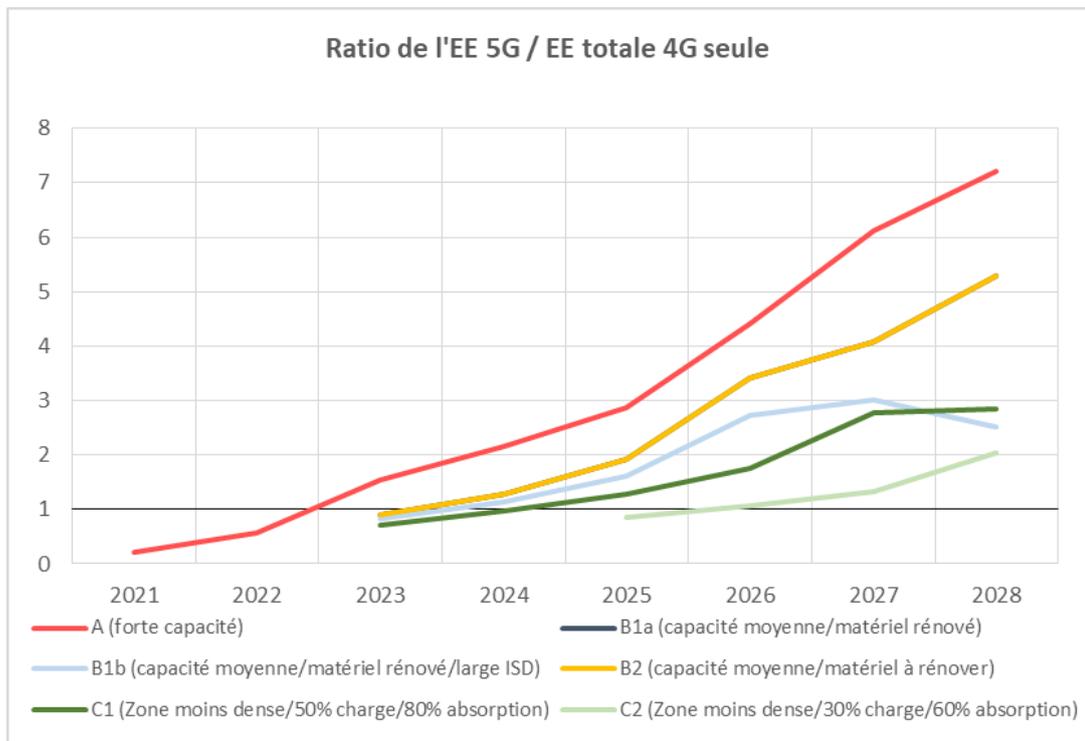


Figure 4 - Evolution de l'efficacité énergétique totale de la 5G (du scénario 4G+5G) et celle de la 4G (du scénario 4G seule) pour les différents types de déploiement

Sur la base des résultats des différents types de déploiement, la consommation énergétique évitée et les émissions GES évitées que permet un scénario 4G+5G par rapport à un scénario 4G seule ont été déduites pour chaque année dans les figures ci-dessous. Les économies en termes de consommation énergétique (respectivement d'émissions GES) entre les deux scénarios sont exprimées en multiples de la consommation énergétique (respectivement d'émissions GES) calculée en 2020.

Consommation évitée par 4G + 5G vs 4G = [Q(annéeX) – C(annéeX)]/Q(2020)
avec Q consommation de la 4G en kWh et C consommation de la 4G + 5G en kWh

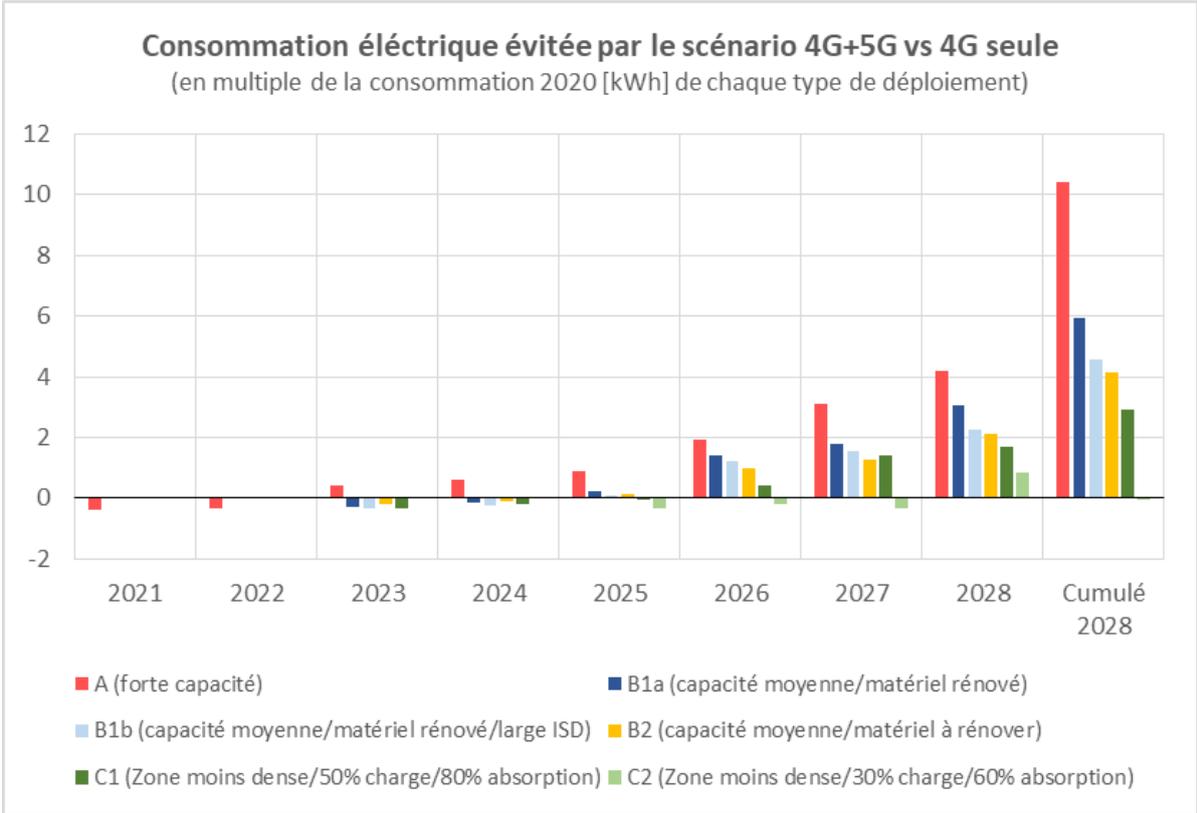


Figure 5 - Consommation électrique évitée entre un déploiement 4G+5G vs 4G seule (référence 2020)

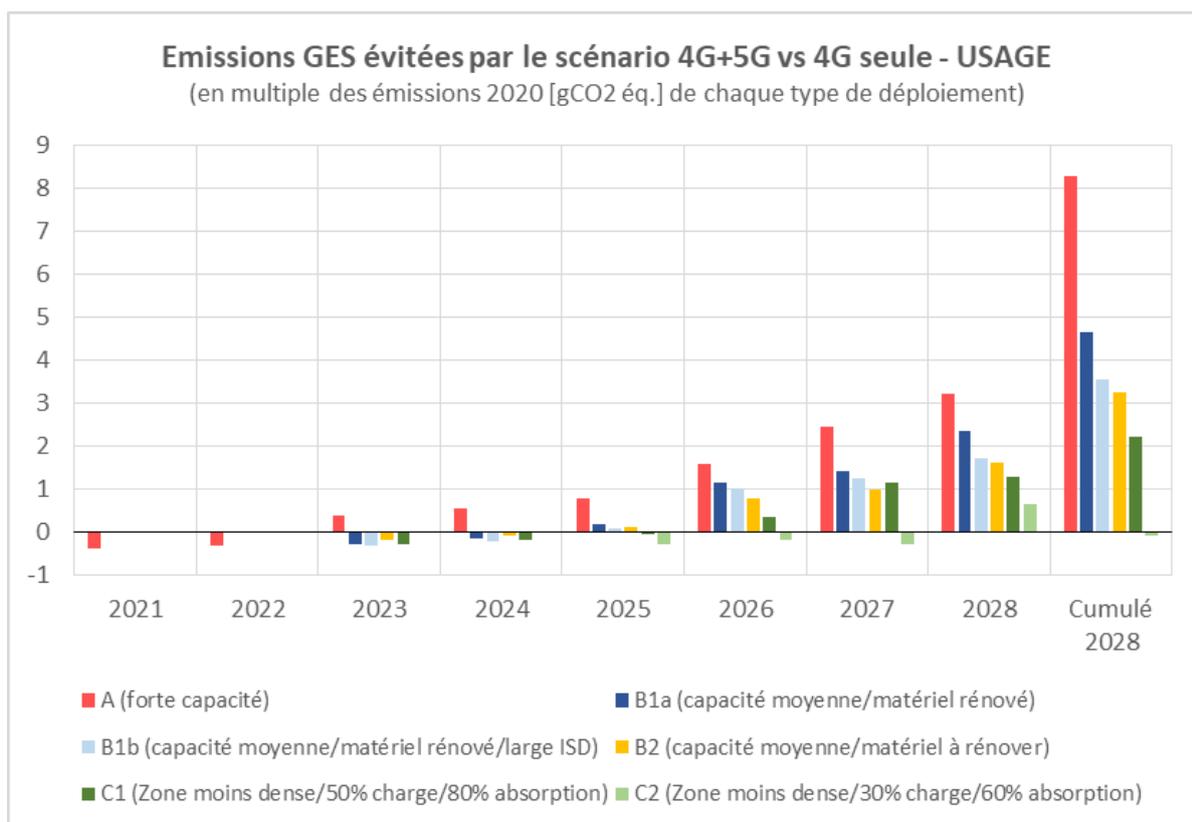


Figure 6 - Emissions GES évitées entre les scénarios 4G+5G vs 4G seule (référence 2020)

Cette étude suggère la valeur ajoutée de la 5G, et que son introduction - dans les conditions simulées de l'étude - est nécessaire pour maîtriser la consommation électrique et les émissions de GES associées. Selon les différents scénarios de son introduction, une densification via la 5G, bien qu'elle engendre une augmentation de la consommation énergétique sur le court terme (les premières années de son déploiement¹²), elle permet pour tous les types de déploiement hormis le type C2 d'économiser en cumul¹³ à horizon 2028 entre 3 et plus de 10 fois la consommation énergétique réalisée en 2020 par rapport à une densification via la 4G seule. De même qu'en terme d'impact carbone, une densification via la 5G permet d'éviter pour tous les types de déploiement hormis le type C2 en cumul à horizon 2028 entre 2 et plus de 8 fois le volume d'émissions GES de 2020 par rapport à une densification 4G seule.

En revanche, pour le type de déploiement C2, le bilan en termes de consommation énergétique n'atteindrait l'équilibre qu'à partir de 2028 alors qu'il reste légèrement négatif en termes d'émissions de GES correspondantes à cet horizon.

Différents leviers supplémentaires non pris en compte dans cette étude devraient permettre de maîtriser davantage la consommation énergétique dans un scénario de déploiement 5G par rapport à un déploiement 4G seule. Parmi ces leviers, figurent notamment l'activation de fonctionnalités

¹² Le point d'équilibre étant atteint pour 2022-2023 pour le type de déploiement A et pour 2024-2026 pour les autres types (hormis le type C2).

¹³ Le cumul des économies en termes de consommation énergétique et d'émissions GES est calculé comme l'agrégat des économies déterminées chaque année tout au long de la période 2020 -2028 sans actualisation.

avancées de mise en veille des réseaux ainsi que les leviers qui permettent d'améliorer l'efficacité énergétique en augmentant les performances en débit (largeur de bande, systèmes AAS avec un ordre MIMO important). Par ailleurs, bien que cette étude puisse apporter un éclairage renseigné sur la valeur ajoutée de la 5G sur le plan de l'efficacité énergétique dans différents types de déploiement, ses enseignements se limitent uniquement à la phase d'usage de la technologie et n'ont pas vocation à renseigner de manière exhaustive sur son impact qui devra être adressé via une approche d'analyse par cycle de vie.

Par ailleurs, une étude de sensibilité de la croissance du trafic ainsi que des paramètres du modèle affine de consommation énergétique des stations de base 5G sur la comparaison à horizon 2028 de la consommation énergétique et émissions GES des scénarios « 4G seul » et « 4G + 5G » a été réalisée (voir annexe D).

Ses enseignements principaux sont :

- Les résultats des simulations montrent une sensibilité par rapport au taux de croissance du volume de trafic et confirment le caractère structurant de ce paramètre pour l'introduction de la 5G dans le cadre des hypothèses de cette étude surtout pour les zones moins denses (type de déploiement C).
- Une variation à la hausse du taux de croissance de trafic de +5% par rapport au cas de base (c'est-à-dire 35% au lieu de 30%) entraîne une hausse des gains (consommations évitées) de l'ordre de 23% à 54% pour les types A et B ; le bilan type de déploiement C2 redevient même positif alors qu'il affichait un bilan quasi-équilibré dans le cas de base. On identifie par ailleurs la même variation en ce qui concerne le gain en termes d'émission de GES en phase d'usage.
- Une variation à la baisse du taux de croissance du trafic de -5% par rapport au cas de base (c'est-à-dire 25% au lieu de 30%) entraîne une baisse des gains (consommations évitées) de l'ordre de 38% et 48% pour les types A, B ; en revanche, le bilan du type de déploiement C1 bascule et devient légèrement négatif (l'introduction de la 5G entraîne une augmentation de la consommation de 0,25 fois la consommation d'un site 4G (2020) par rapport à un scénario sans 5G) et dans le type de déploiement C2 l'introduction de la 5G induit un incrément de consommation de l'ordre de 1,7 fois la consommation d'un site 4G (2020).
- Une faible sensibilité des résultats de l'étude (tant en termes d'émissions/consommations énergétiques évitées qu'en termes de ratio d'efficacité énergétique) sur les paramètres du modèle de consommation énergétique des stations de base 5G démontre que le rythme de croissance de trafic ainsi que les différents types de déploiement constituent les éléments les plus structurants sur les résultats et les conclusions de l'étude.

4 Annexe A : Modélisation de la consommation énergétique d'une station de base 4G et 5G

Une station de base 4G ou 5G est composée de 3 secteurs, d'un BBU (Base Band Unit) et des modules RF nécessaires pour gérer les 3 secteurs et les différentes bandes de fréquences considérées.

Les hypothèses suivantes ont été prises pour les débits moyens maximum par cellule dans le sens descendant¹⁴ :

- Pour une cellule LTE FDD de largeur de bande de 20 MHz: 2T2R → 35 Mbit/s ; 4T4R → 52,5 Mbit/s¹⁵.
- Pour une cellule LTE en FDD de largeur de bande inférieure à 20 MHz: débits proportionnels aux largeurs de bandes par rapport aux valeurs ci-dessus à 20 MHz.
- Pour une cellule LTE FDD en bande basse (700 ou 800 MHz) : le débit est réduit de 20% pour prendre en compte le fait que les terminaux utilisant ces fréquences sont généralement en plus mauvaises conditions radio¹⁶ que pour les fréquences hautes.
- Pour une cellule 5G TDD de largeur de bande 80 MHz, le débit moyen est de 643 Mbit/s en 64T64R et 463 Mbit/s en 32T32R¹⁷.

Il faut noter que les valeurs indiquées pour la 5G concernent un réseau chargé et pourront être revues à la lumière des retours terrain, et sont notamment liées aux performances du MU-MIMO (Multi User MIMO).

Le débit moyen d'une station de base pour une technologie et bande de fréquences données a été obtenu en multipliant par trois les valeurs correspondantes par cellule.

Les consommations électriques des différentes stations de base ont été évaluées de la façon suivante :

- La Consommation électrique du BBU (Base Band Unit) déterminée en fonction du nombre de cartes nécessaires pour gérer les différents modules RF. Pour une configuration donnée, la consommation du BBU est considérée comme fixe.
- La Consommation d'un module RF (en W) est une fonction affine (i.e. de type $a'x + b'$) de sa charge x , x étant le rapport du débit moyen du module RF par son débit moyen maximum¹⁸
- Charge identique de l'ensemble des modules RF de la station de base (il est supposé que le trafic est réparti uniformément entre les cellules de la station de base¹⁹).

Il faut noter qu'une conséquence des hypothèses précédentes est que l'ensemble de la consommation électrique d'une station de base 4G ou 5G est également une fonction affine (i.e. de type $ax + b$ ²⁰) de sa

¹⁴ Ces valeurs de débit sont estimées dans une configuration sans partage dynamique de la bande (DSS) entre la 4G et la 5G.

¹⁵ Suppose une pénétration significative des terminaux compatibles

¹⁶ En effet, les utilisateurs associés sont généralement situés en bordure de cellule ou en environnement indoor.

¹⁷ Il s'agit d'hypothèses sous réserve du retour d'expérience sur les performances réelles de la technologie.

¹⁸ Conformément à la Recommandation de l'ITU-T L.1410 (12/2014).

¹⁹ En réalité, certains secteurs sont plus chargés que d'autres dans une station de base, le dimensionnement de l'étude aurait donné les mêmes conclusions.

²⁰ $a = 3 \cdot a'$ somme des a' des différents types de modules RF

charge x , x étant le rapport du débit moyen de l'ensemble de la station de base par son débit moyen maximum.

Il faut noter que l'étude a été réalisée sur les valeurs a et b modélisées des consommations électriques de stations de base déployées en France fournies par un seul équipementier ²¹ pour que les comparaisons soient cohérentes. Les deux autres équipementiers confirment que les tendances sont représentatives et que des conclusions analogues des différents scénarios étudiés seraient tirées avec leurs propres équipements qui sont également déployés en France. Cette méthode permet de répondre à l'objectif de comparaison des consommations énergétiques de la 4G avec la 5G sur la base de différents scénarios. L'annexe E fournit une analyse de la transparence et de la qualification des données de consommation électrique qui ont été utilisées dans l'étude. Bien que l'étude n'ait pas vocation à réaliser une analyse par cycle de vie proprement dite, la Recommandation ITU-T L.1410 a été utilisée afin de rendre l'analyse la plus exhaustive et objective possible.

5 Annexe B : Evolution du contenu CO2 du kWh consommé

Afin d'évaluer le « contenu CO2 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'ADEME²² montre également l'intérêt de considérer le contenu du CO2 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 CO2. Cette fiche décrit les principales méthodes de calcul par usage (méthode saisonnalisée, moyennes par pas de temps temporel, ou à but prospectif intégrant notamment l'analyse des conséquences de la fixation du contenu CO2 à une certaine valeur).

L'annexe 3 de la fiche indique différents contenus du CO2 du kWh consommé par usage au moment de sa rédaction :

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 gCO2/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 :

- Les valeurs du contenu moyen depuis 2015 sont comprises entre 55 et 60 gCO2/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.

b = consommation du BBU + 3* somme des b' des différents types de modules RF

²¹ L'équipementier est représenté dans le Comité. Les consommations électriques sont mesurées en laboratoire par cet équipementier.

²² Fiche Technique – Positionnement de l'ADEME sur le calcul du contenu CO2 de l'électricité, cas du chauffage électrique-Juillet 2020.

- 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 gCO₂/kWh en émissions directes et 34 gCO₂/kWh en calcul avec ACV.

Dans le cadre cette note, l'étude retient la valeur de **60 gCO₂/kWh** en **2020** et de **34 gCO₂/kWh** en **2035** avec une extrapolation linéaire entre ces dates.

Ces valeurs pourront être remises à jour en fonction de données supplémentaires reçues.

6 Annexe C : Comparaison à horizon 2028 de la consommation énergétique et émissions GES des scénarios « 4G seule » et « 4G + 5G » dans une même zone

6.1.1 Introduction

L'objectif de cette annexe technique est de comparer la consommation électrique (exprimée en kWh) et leurs émissions de GES correspondantes entre 2020 et 2028 d'un scénario « 4G seule » et d'un scénario « 4G + 5G » où la 5G en bande 3,5 GHz est ajoutée pour répondre à l'augmentation de trafic.

Les deux scénarios sont comparés sur une même zone géographique représentée par la couverture d'un site macro en 2020.

Différents types de déploiement de sites macros où la bande 3,5 GHz sera déployée, sont étudiés pour la zone considérée permettant de dégager des tendances et conclusions sur la comparaison des deux scénarios. Ces différents types de déploiement ont été sélectionnés depuis les zones les plus denses jusqu'aux zones les moins denses où la 5G dans la bande 3,5 GHz pour les services très hauts débit mobile est envisagée à date d'être déployée.

Dans un but de simplification, il est supposé que la charge est identique sur les 3 secteurs de la station de base. Dans les 2 scénarii, le rajout de site lors de la densification est réalisé lorsque la charge aux heures chargées du site dépasse **100%** de la capacité maximale de la station de base.

6.1.2 Hypothèses

Pour réaliser la comparaison 4G/5G, 3 types de déploiement (A, B et C) ont été sélectionnés, chacun étant caractérisé par des points de départ différents mais commun aux deux scénarios « 4G seule » et « 4G+5G » :

- A. Le point de départ pour ce type de déploiement A est une station de base macro 4G ayant évolué en configuration maximale de 2*65 MHz en FDD²³ représentative des déploiements urbains en France en 2020 (3 secteurs, 5 bandes de fréquences FDD 4G, 2T2R sur les bandes basses 700/800 MHz et 4T4R sur les bandes moyennes 1800/2100/2600 MHz) qui serait chargée à fin 2020, c'est-à-dire que sa charge pendant les heures chargées de la journée atteint **50%** de sa capacité maximale. De nouveaux sites de cette configuration sont rajoutés à chaque fois que le besoin se fait ressentir dans la situation « 4G seule », alors que dans le scénario « 4G+5G », la 5G est introduite à partir de 2021 en faisant le choix d'antennes actives 64T64R avec une largeur de bande de 80 MHz.

²³ Valeur moyenne des quantités de spectre disponibles en 2020 pour les opérateurs mobiles en France dans les bandes de fréquences FDD suivantes : 700/800/1800/2100/2600 MHz

- B. Le point de départ pour ce type de déploiement B est une station de base de capacité moyenne initiale de 2*45 MHz en FDD (3 secteurs, 3 bandes de fréquences FDD 800/1800/2100 MHz en 2T2R; charge initiale de 50%) qui bénéficie, dans le scénario « 4G seule », en fonction des besoins capacitaires d'extension en FDD 700 MHz, extension en FDD 2600 MHz, extensions 4T4R sur 1800/2100 MHz avant de rajouter de nouveaux sites 4G ; alors que dans le scénario « 4G+5G » la 5G en bande 3,5 GHz est rajoutée à partir de 2023 avec une largeur de bande de 80 MHz en faisant le choix d'antennes actives 32T32R (+ éventuellement un rajout de la bande 700 MHz et une rénovation du site et upgrade en MIMO 4T4R pour les bandes hautes). Deux variantes pour ce type ont été considérées :
1. Cas d'un renouvellement déjà anticipé (opérateur ayant déjà modernisé son parc). On utilise ici une station de base 4G utilisant des équipements de type RRU qui auront été déployés après 2017, et qui donc pourraient être conservés sur site jusqu'à la fin de l'étude, soit 2028.
 2. Cas d'un renouvellement reporté par exemple intervenant à partir de 2023. Ce renouvellement porte sur les émetteurs RF des stations de base dans les bandes RF, ainsi que les ateliers d'énergie. On utilise ici une station de base 4G utilisant des équipements plus anciens de type larges baies macro avec modules RF intégrés, et qui nécessiteront d'être remplacés avant la fin de l'étude dans tous les scénarios. Les ateliers d'énergie 48V DC alimentant les stations anciennes ont une efficacité de 92%. Les ateliers d'énergie 48V DC alimentant les stations de base 4G renouvelées ou 5G ont une efficacité de 98%.
- C. Ce type de déploiement représente une zone moins dense où des déploiements 5G en bande 3,5 GHz sont envisagés à date par l'opérateur pour les services très haut débit mobile pour couvrir des poches de trafic, ainsi que notamment pour se conformer à des considérations réglementaires. Le point de départ pour ce type C est une station de base 4G à faible capacité initiale (2*30 MHz en FDD, bi-bande 800/1800 MHz en 2T2R) et utilisant un matériel déjà renouvelé. Dans le scénario « 4G+5G », la 5G en bande 3,5 GHz sera introduite avec des antennes actives 32T32R avec capacité réduite due à une grande distance inter-sites. Pour le scénario « 4G seule » comme pour le scénario « 4G+5G », on ajoutera obligatoirement du 700 MHz au plus tard en 2027 pour prendre en compte les obligations réglementaires de déploiement de cette bande. Deux variantes pour ce type ont été considérées :
1. Cette variante considère au point de départ une station de base chargée aux heures chargées en 2020 à 50%. La 5G en bande 3,5 GHz (avec des antennes actives 32T32R et une largeur de bande 80 MHz) est introduite en 2023 avec un taux d'absorption de 80% (cf. plus bas) pour le scénario « 4G+5G » et la possibilité de mobiliser la bande 2600 MHz pour des raisons capacitaires dans le scénario « 4G seule ».
 2. Cette variante considère au point de départ une station de base chargée aux heures chargées en 2020 à 30%. La 5G en bande 3,5 GHz (avec des antennes actives 32T32R et une largeur de bande 80 MHz) est introduite en 2025 avec un taux d'absorption de 60% pour le scénario « 4G+5G ». En revanche pour le scénario « 4G seule », il ne sera pas possible de mobiliser la bande 2600 MHz pour satisfaire les besoins en capacité au vu de sa faible couverture.

Les 3 tableaux suivants donnent les détails des répartitions de départ (2020) dans les bandes de fréquences FDD et configurations MIMO pour les 3 types de déploiement :

Tableau 6 - Patrimoine fréquentiel mobilisé et configurations MIMO pour le type A

Bandes de fréquences : type A (MHz)	700	800	1 800	2 100	2 600	Total
Largeur de bande dans sens descendant (MHz)	5	10	20	15	15	65
MIMO	2T2R	2T2R	4T4R	4T4R	4T4R	

Tableau 7 - Patrimoine fréquentiel mobilisé et configurations MIMO pour le type B

Bandes de fréquences : type B (MHz)	700	800	1 800	2 100	2 600	Total
Largeur de bande dans sens descendant (MHz)		10	20	15		45
MIMO		2T2R	2T2R	2T2R		

Tableau 8 - Patrimoine fréquentiel mobilisé et configurations MIMO pour le type C

Bandes de fréquences : type C (MHz)	700	800	1 800	2 100	2 600	Total
Largeur de bande dans sens descendant (MHz)		10	20			30
MIMO		2T2R	2T2R			

La 5G est évaluée dans la bande 3,5 GHz, avec une largeur de bande de 80 MHz et un système AAS 64T64R ou 32T32R suivant le type de déploiement.

Pour modéliser l'augmentation du trafic total, on considère que le volume total de données sur l'ensemble des stations de base considérées dans chaque scénario augmente de **30%** par an entre 2020 et 2028.

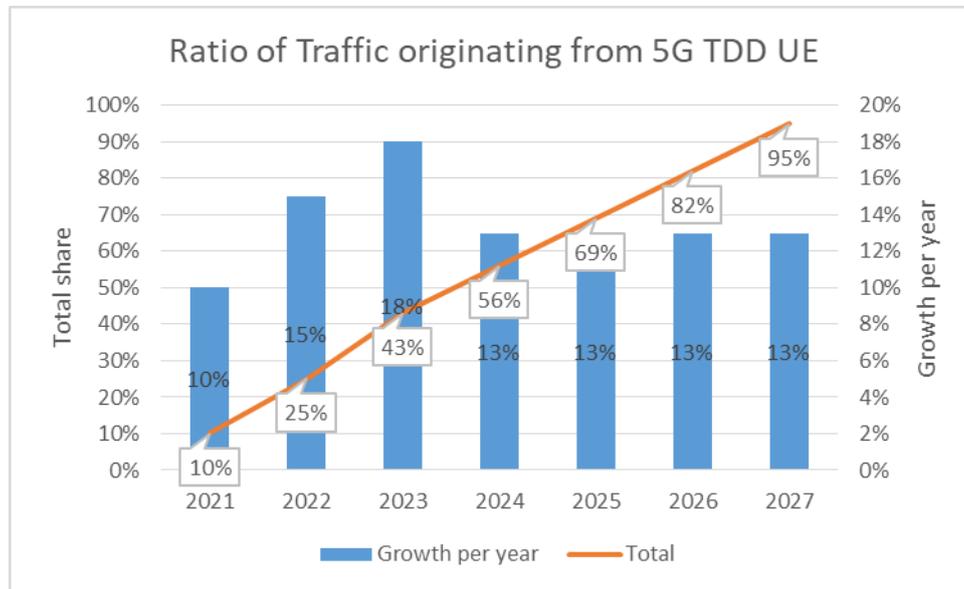
La trajectoire de la pénétration de la 5G avec sa part de trafic associée a été modélisée sur la base des hypothèses suivantes :

- Pénétration de 10% en 2021, et pénétration de 69% en 2025 dans la zone considérée couverte en 5G correspondant à un taux d'abonnement moyen de 55% en Europe de l'ouest (voir document²⁴) et une population couverte à 80% en France à cette même date (69% = 55% * 1/0,8).
- Scénario de rythme d'évolution de la pénétration de 14% en moyenne.
- En fonction de l'expérience 4G, rythme de pénétration plus rapide les premières années.
- Sur une base du trafic des smartphones 4G+5G de 100%, la part 5G ne dépasse pas 95% de ce trafic. Il est à noter que sur la base de l'expérience du passage de la 3G à la 4G, plus de 5% des

²⁴ Ericsson Mobility Report June 2020

smartphones resteront dans l'ancienne technologie (à horizon 2028). Mais comme ces smartphones restant dans l'ancienne technologie génèrent proportionnellement moins de trafic, il apparaît réaliste de considérer une part de trafic 5G maximum de 95%. Les téléphones et l'IoT/M2M 2G et 3G ne sont pas intégrés à l'étude car leur apport en volume de données est négligeable et la bande 900 MHz n'est pas considérée.

Voir ci-dessous l'hypothèse de trajectoire de pénétration 5G en termes de part de trafic associée :



Dans le cas des scénarios 4G+5G, un autre paramètre important est la capacité d'absorption de trafic par la bande 3,5 GHz, autrement dit le pourcentage du trafic sur la bande 3,5 GHz que l'on aurait si la pénétration des terminaux était de 100%, le complément restant sur les bandes FDD.

Dans le cadre de cette étude basée sur des sites, une valeur de 80% est retenue pour les types de déploiement A, B et C1 sachant qu'après échange dans le comité il est convenu qu'un taux d'absorption de 90% est la valeur maximum que l'on peut espérer, mais que l'ingénierie de différents sites pourra également montrer une valeur inférieure pour différentes raisons (lancement de 5G avec une couverture 3,5 GHz non continue au départ, distance intersites plus importante, ...). Il est à noter que pour le type de déploiement C2, une valeur du taux d'absorption de 60% est retenue plus cohérente avec le caractère peu dense de l'environnement associé à ce type.

Dans l'étude, la part de trafic 5G sur la bande 3,5 GHz est déterminée de la façon suivante :

$(\% \text{pénétration } 5G) * (\text{Taux d'absorption}) * (\text{trafic total})$ avec « %pénétration 5G » tel que défini aux paragraphes précédents et taux d'absorption = 80% ou 60% selon les types de déploiement.

Différents éléments importants sont à prendre en considération dans l'interprétation des résultats :

- Des évolutions logicielles et matérielles et innovations apparaissant dans les années à venir qui pourraient permettre d'augmenter l'efficacité énergétique notamment de la 5G ne sont pas intégrées d'une façon prospective à cette étude.
- L'utilisation de fonctions de veille n'est pas prise en compte. Comme la charge sera moins importante, ces fonctions de veille devraient notamment permettre de réduire la consommation électrique de la 5G pendant les premières années.

- L'étude n'a pas non plus analysé le scénario du réutilisation (« refarming ») des fréquences 900 MHz en 2G/3G en 5G qui devrait apporter des économies d'énergie et gains d'émission de GES.
- La réutilisation en 5G des fréquences 4G n'est pas considérée dans l'étude.
- L'exercice n'intègre pas le rajout de sites radios dans le cadre de la densification des différents types de zones étudiées autres que le besoin de nouveaux sites pour faire face à l'augmentation de trafic de données sur la base des hypothèses de l'étude.

L'hypothèse de l'annexe A que la consommation électrique instantanée exprimée en Watt d'une station de base 4G ou 5G peut être approximée par une fonction affine de la forme $a*x + b$ (ou x est la charge) est reprise dans cette annexe.

La charge maximale aux heures chargées de la journée permet de connaître la charge à chaque heure la journée à partir de la courbe suivante typique²⁵ de station de base macro 4G en Europe. On supposera ici que le profil de charge journalier normalisé par rapport à la charge de BH est également valable pour les stations de base macro 5G.

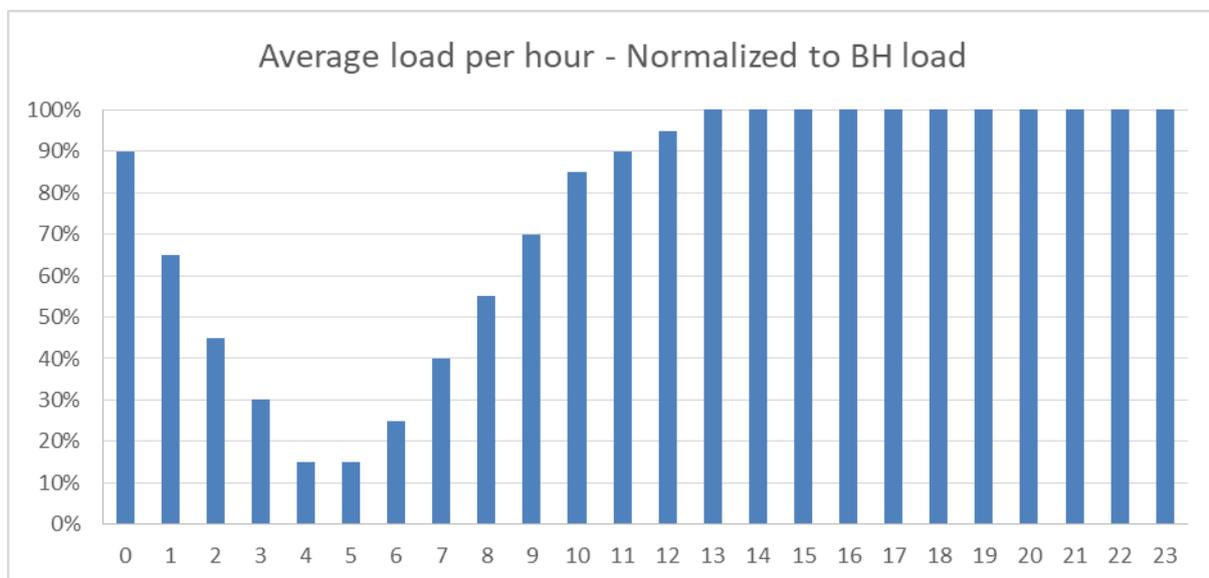


Figure 7 - Profil journalier de la charge de la station de base considérée dans l'étude

²⁵ De l'avis des membres du comité d'experts, cette courbe à un minimum local est représentative de la charge normalisée des stations de base en France.

6.1.3 Méthodologie

La consommation électrique instantanée (en W) 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 bleue normalisée ci-dessus en la multipliant par la charge maximum (Charge BH) au moment des heures les plus chargées (par exemple 50% dans le cas de la station de base 4G initiale pour le type de déploiement A).

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 * Moyenne (courbe normalisée bleue).

Comme la courbe normalisée bleue a une moyenne de 76%, la consommation sur une durée de 24 heures se calcule comme suit :

$$\text{Consommation-BS (kWh)} = \mathbf{24 (a * 0,76 * \text{Charge-Max} + b)}$$

La charge max de chaque station de base (4G ou 5G) est déterminée à partir du scénario d'évolution (voir tableau ci-dessous) avec une charge max identique pour les différentes stations de base dans le scénario 4G. Dans le cadre d'un site 4G+5G, le trafic est réparti entre la 4G et la 5G de la façon suivante : trafic 5G = %pénétration 5G * %Taux d'absorption * trafic total.

La consommation totale (kWh) dans un scénario une année donnée est la somme de toutes les consommations des stations de bases du scénario de l'année considérée.

Les émissions GES sont ensuite déterminées sur la base des hypothèses explicitées dans l'annexe B, soient un contenu CO2 du kWh consommé de 60 gCO2/kWh en 2020 et 34 gCO2/kWh en 2035.

On supposera ici que la réduction est constante entre 2020 et 2035 à raison de **-1.733gCO2e/kWh** par an.

Il faut également noter que le profile journalier permet de déterminer le volume total de données descendant géré par la partie 4G ou 5G de la station de base sur une durée de 24h :

$$\text{Volume données (Octets)} = \int_{t=0}^{24} (\text{Trafic}(t)) dt = \int_{t=0}^{24} (\text{Capacitémax} * L(t)) dt$$

En exprimant les fonctions Trafic et la valeur Capacité max en Octets par heure (une valeur en Mbps sera transformée en octets par heure en la multipliant par $\frac{3600}{8}$)

$$= \text{Capacitémax} * \int_{t=0}^{24} L(t) dt = \mathbf{24 \text{ Capacitémax} * \text{Moyenne (L)}}$$

Avec Moyenne (L) = Charge-Max * Moyenne (courbe normalisée bleue).

$$\text{Volume données (Octets)} = \mathbf{24 * 0,76 * \text{Charge-Max} * \text{Capacitémax}}$$

En exprimant la valeur « Capacitémax » en Octets par heure

6.1.4 Résultats

a) Type de déploiement A – Site à forte capacité

Le tableau suivant présente l'évolution du site étudié pour absorber le trafic dans les deux scénarios de déploiement.

Tableau 9 - Chronologie de l'évolution du site étudié pour le type A

Scénario de déploiement	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028
Scénario 4G seule	4G FDD 2x65MHz + 4T4R			Ajout d'un 2 nd site 4G			Ajout d'un 3 ^e site 4G	Ajout d'un 4 ^e site 4G	Ajout d'un 5 ^e site 4G
Scénario 4G+5G		Ajout 5G TDD 64T64R							

Dans le scénario 4G seule, **un second site devra être déployé dès 2023** pour faire face à l'augmentation du trafic, puis un troisième en 2026, un quatrième en 2027 et encore **un cinquième en 2028**.

Dans le scénario 4G+5G, **un seul site 5G TDD 64T64R** est déployé en 2021 et **suffit pour absorber le trafic jusqu'en 2028**.

La figure suivante montre l'évolution du trafic et de la charge aux heures chargées pour le scénario 4G seule et pour le scénario 4G+5G. Les histogrammes représentent la part du trafic du scénario 4G+5G portée par la 4G FDD (en jaune) et par la 5G TDD (en bleu). La courbe orange représente le trafic annuel total commun aux deux scénarios. Les autres courbes en pointillés représentent la charge des sites (marrons pour le scénario 4G seule, jaunes les sites 4G du scénario 4G+5G et bleus les sites 5G du scénario 4G+5G).

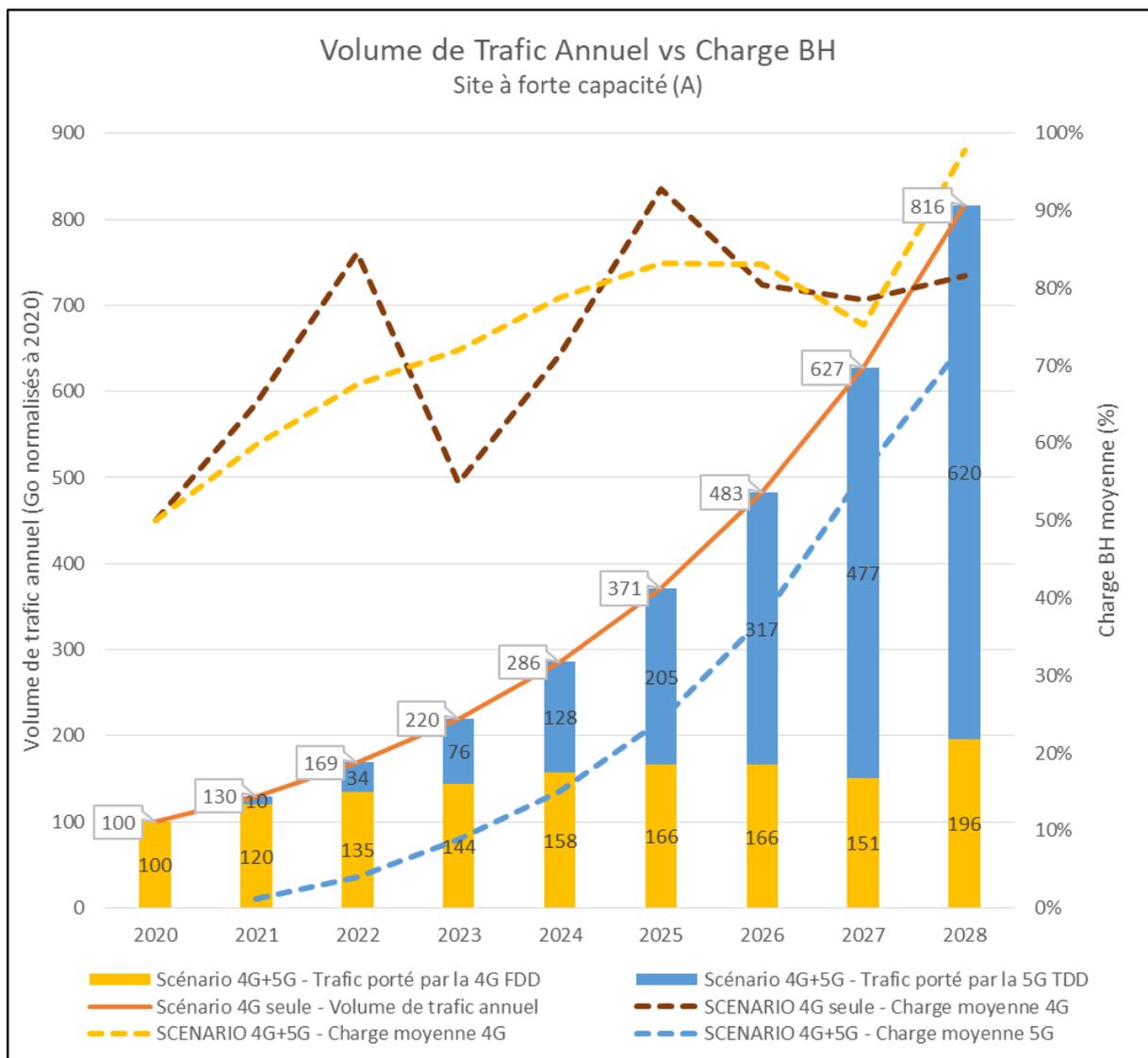


Figure 8 - Volume du trafic vs Charge BH par scénario - type de déploiement A

Dans le scénario 4G seule, la charge (courbe pointillés marrons) augmente fortement d'année en année. Seul l'ajout de nouveaux sites en 2023/2026/2027/2028 permet de faire redescendre la charge au-dessous des 100%.

Dans le scénario 4G+5G, la charge du site 5G (courbe pointillés bleus) augmente très progressivement d'année en année au fur et à mesure que la pénétration des terminaux 5G augmente. L'augmentation de la charge du site 4G (courbe pointillés jaunes) est plus lente jusqu'en 2027 car une part de plus en plus grande du trafic est absorbée par la 5G.

Dans le scénario 4G+5G, on constate que l'augmentation du trafic total est principalement absorbée par la 5G dès 2022 si bien que le trafic porté par la 4G (histogramme jaune) est relativement constant entre 2024 et 2027 et n'aura que doublé entre 2020 et 2028 alors que le trafic aura été multiplié par plus de 8 sur la même période. **En 2028, plus de 75% du trafic est porté par la 5G (histogramme bleu).**

La figure suivante montre l'évolution de la consommation annuelle des sites 4G et 5G pour les deux scénarios, normalisée à la consommation de 2020. Les courbes montrent la consommation totale annuelle des sites du scénario 4G seule (courbe orange) et la consommation totale des sites 4G et 5G du scénario 4G+5G (courbe bleu marine). Les histogrammes montrent la contribution de la station de base 4G (en jaune) et de la station de base 5G (en bleu) au scénario 4G+5G.

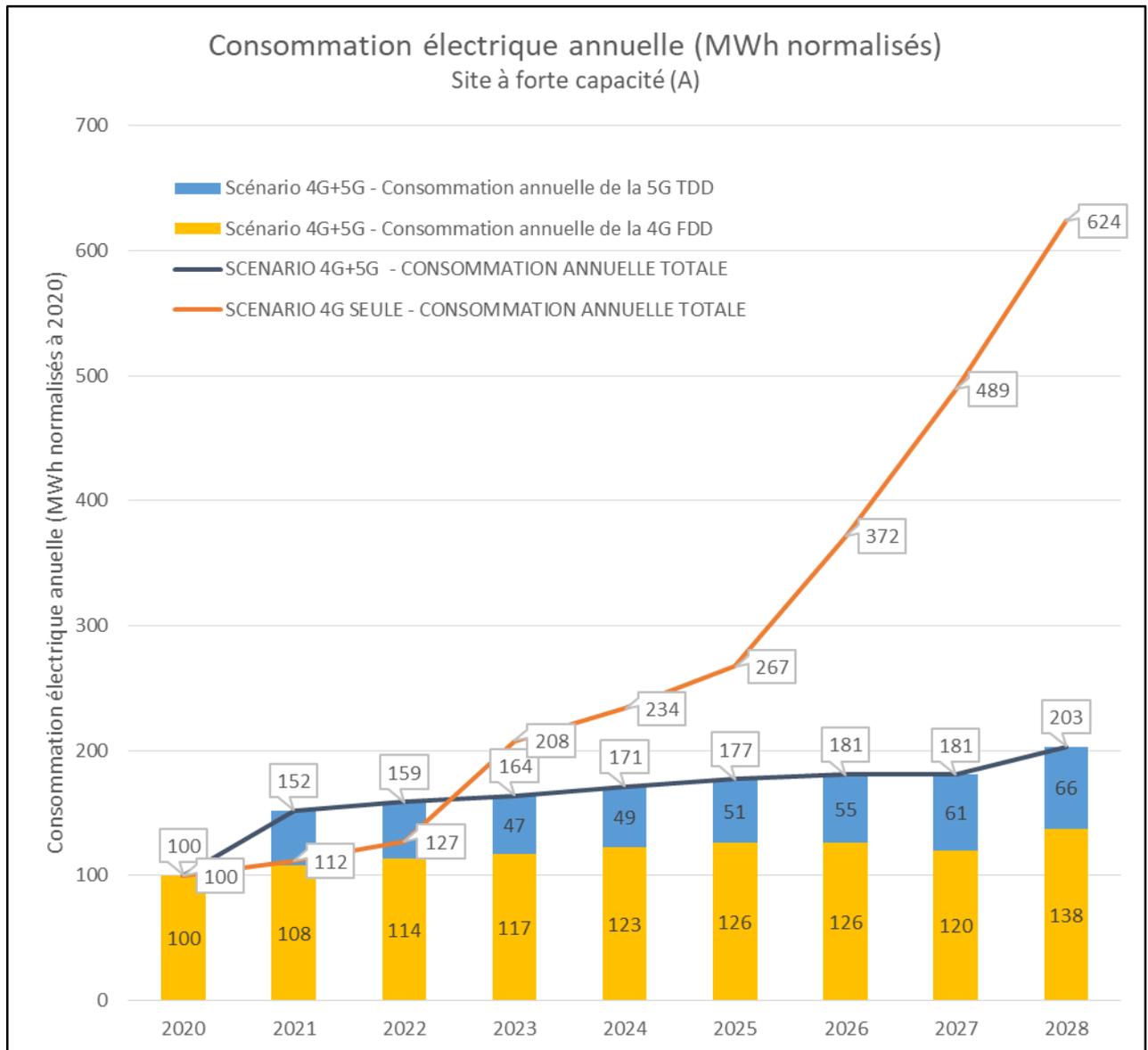


Figure 9 - Consommation électrique annuelle par scénario - type de déploiement A

Dans le scénario 4G seule, on constate que la consommation annuelle a été multipliée par plus de 6 entre 2020 et 2028 du fait de l'ajout de nouveaux sites nécessaires pour écouler le trafic (qui a été multiplié par plus de 8 dans le même temps).

En revanche, dans le scénario 4G+5G, la consommation 4G+5G aura augmenté plus fortement en 2021 lors du déploiement de la 5G (+52%), mais beaucoup plus lentement ensuite (+33% de 2021 à 2028),

de sorte qu'en 2028 la consommation totale 4G+5G n'aura été multipliée **par seulement 2** par rapport à 2020. En conséquence, **en 2028 la consommation annuelle du scénario 4G seule est 3 fois supérieure à celle du scénario 4G+5G.**

On constatera aussi que même en 2028, alors que **la 5G absorbe 75% du trafic total**, la consommation de la station de base 5G est **égale à la moitié** de celle de la station de base 4G.

La figure suivante montre les émissions annuelles de gaz à effet de serre (GES) pour les deux scénarios, normalisées aux émissions de 2020. Les courbes montrent les émissions totales cumulées du scénario 4G seule (courbe orange) et les émissions totales cumulées du scénario 4G+5G (courbe bleu marine). Les histogrammes montrent la contribution de la station de base 4G (en jaune) et de la station de base 5G (en bleu) au scénario 4G+5G.

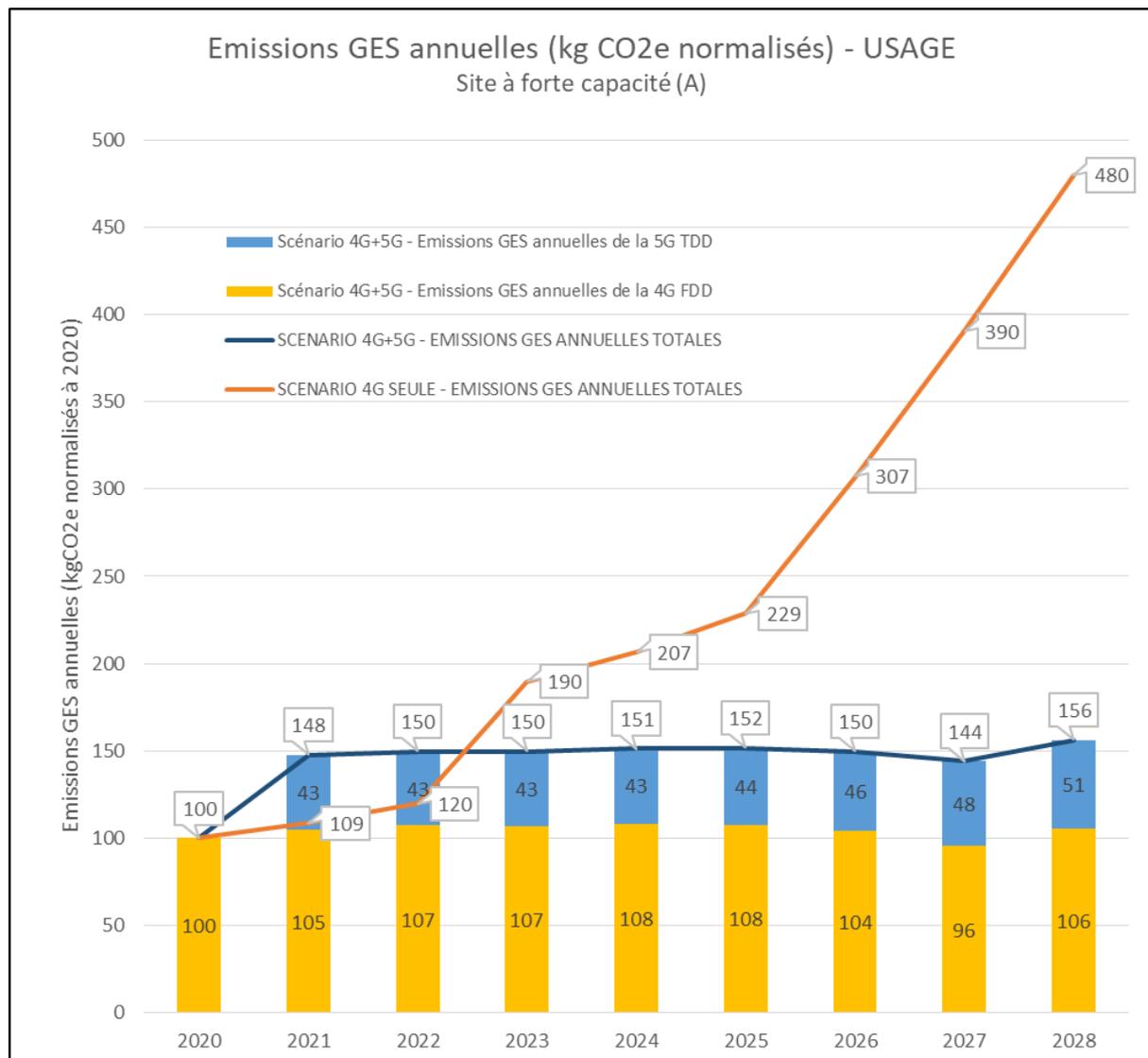


Figure 10 - Emissions GES annuelles par scénario - type de déploiement A

On constate que dans le scénario 4G seule, les émissions de GES augmentent lentement dans les premières années puis accélèrent à partir de 2023 quand de nouveaux sites sont ajoutés.

En revanche, les émissions de GES du scénario 4G+5G augmentent fortement en 2021 avec le déploiement de la 5G (+48%), puis restent quasiment stable jusqu'en 2028. Ainsi **en 2028, les émissions de GES du scénario 4G seule sont 3 fois supérieures à celles du scénario 4G+5G.**

La figure suivante montre l'efficacité énergétique (volume de données divisé par la consommation normalisée) pour les deux scénarios chaque année. L'efficacité énergétique du scénario 4G seule est représentée sur la courbe orange et l'efficacité énergétique globale du scénario 4G+5G sur la courbe bleu marine. Les courbes jaune et bleu montrent l'efficacité énergétique respective des stations de base 4G et 5G dans le scénario 4G+5G.

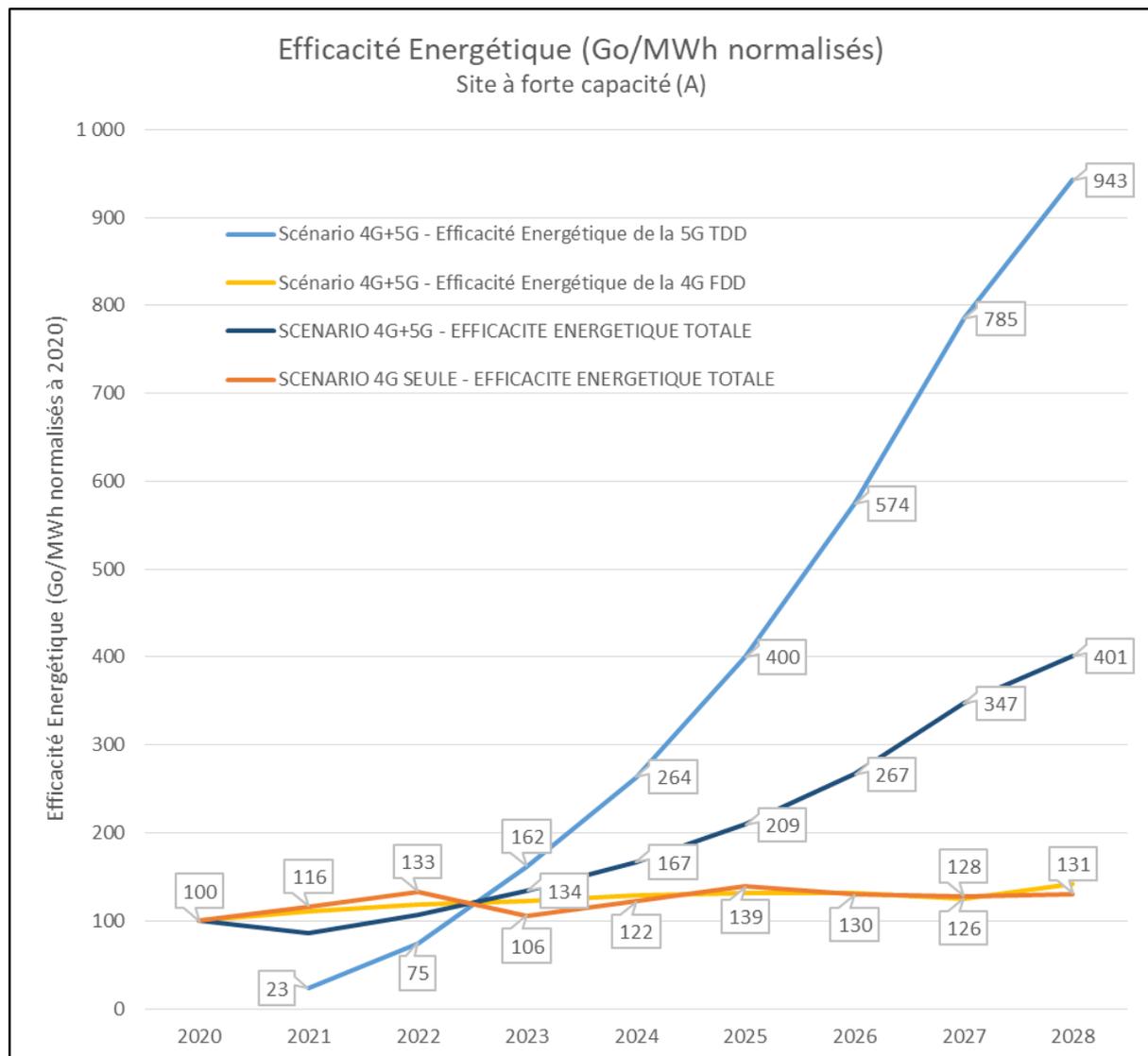


Figure 11 - Efficacité énergétique par scénario - type de déploiement A

L'efficacité énergétique (Go/MWh) du scénario 4G seule (courbe orange) s'améliore (augmente) quand la charge des stations de base 4G augmente, et se dégrade (diminue) quand la charge diminue lors de l'ajout de nouveaux sites. Dans les années 2025 à 2028, où la charge des stations de base 4G étaient de l'ordre de 80% à 90%, l'efficacité énergétique reste au-dessous de 140% de la valeur de 2020. La courbe d'efficacité énergétique de la station de base 4G dans le scénario 4G+5G (jaune) est similaire puisque les niveaux de charge 4G sont également similaires.

En revanche, l'efficacité énergétique de la station de base 5G (courbe bleue) est plus faible lors du déploiement car très peu de trafic (<10%) est porté par la 5G en 2021 du fait de la faible pénétration des terminaux 5G. Mais dès 2023, l'efficacité énergétique de la 5G devient nettement meilleure que celle de la 4G et atteint en 2028 près de 7 fois l'efficacité de la 4G FDD.

En 2028, l'efficacité énergétique combinée de la 4G+5G dans le scénario 4G+5G (courbe bleue marine) est 3 fois meilleure que celle du scénario 4G seule.

b) Type de déploiement B – Site à capacité initiale moyenne

Variante B1 – Capacité moyenne/matériel rénové

Cas B1a – Capacité moyenne/matériel rénové

Le tableau suivant présente l'évolution du site étudié pour absorber le trafic dans les deux scénarios de déploiement.

Tableau 10 - Chronologie de l'évolution du site étudié pour le type B1a

Scénario de déploiement	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028
Scénario 4G seule	4G FDD 2x45MHz + 2T2R			Ajout 700 (2x50MHz) + rénovation 4G 4T4R		Ajout 2600 (2x65MHz)	Ajout d'un 2 nd site 4G		Ajout d'un 3 ^e site 4G
Scénario 4G+5G				Ajout 5G TDD 32T32R					

Dans le scénario 4G seule, **la première étape d'upgrade (c-à-d mise à niveau du site) sera nécessaire dès 2023** (ajout 700MHz + 4T4R sur 1800+2100MHz avec rénovation des modules RF 4G et de l'atelier d'énergie) pour faire face à l'augmentation du trafic. Puis en 2025 il sera nécessaire de procéder à la **deuxième étape d'upgrade** (ajout 2600MHz), amenant le site 4G à la même configuration que le scénario A (2x65MHz, 4T4R sur les bandes 1800/2100/2600, équipements neufs). En 2026 il sera nécessaire de déployer un **second site 4G et un troisième en 2028**.

Dans le scénario 4G+5G, il sera nécessaire de déployer **un site 5G TDD 32T32R en 2023**, mais celui-ci suffira pour absorber le trafic jusqu'en 2028 **sans avoir besoin d'upgrader le site 4G, aussi bien dans le cas général (a) que dans le cas de distance inter-sites importante (b)**.

La figure suivante montre l'évolution du trafic et de la charge aux heures chargées pour le scénario 4G seule et pour le scénario 4G+5G. Les histogrammes représentent la part du trafic du scénario 4G+5G portée par les sites 4G (en jaune) et par les sites 5G (en bleu). La courbe orange représente le trafic annuel total commun aux deux scénarios. Les autres courbes pointillées représentent la charge des sites (marrons pour le scénario 4G seule, jaunes les sites 4G du scénario 4G+5G et bleus les sites 5G du scénario 4G+5G).

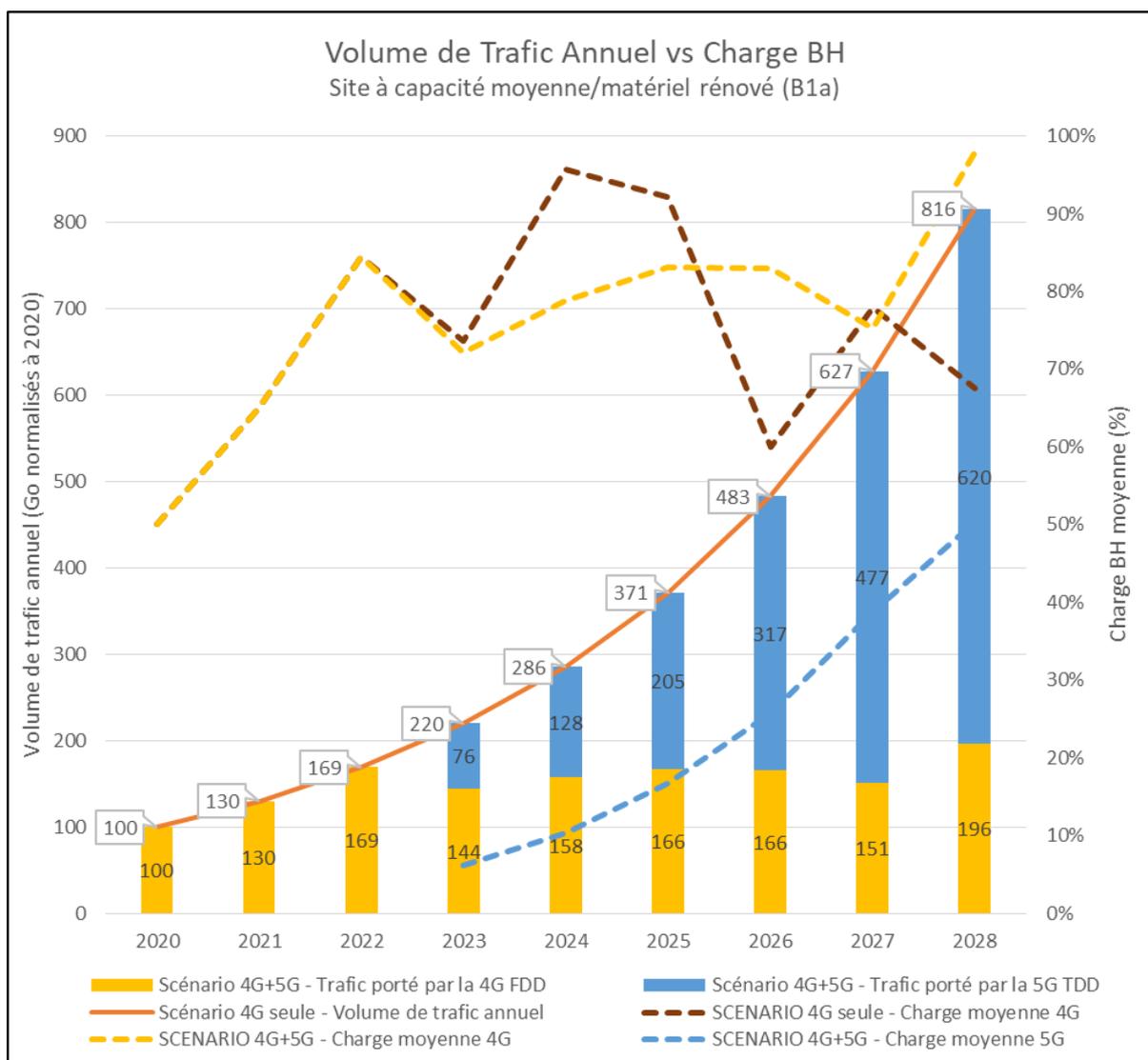


Figure 12 - Trafic annuel et Charge BH par scénario - type de déploiement B1a

Dans le scénario 4G seule, la charge augmente fortement d'année en année et diminue à chaque opération d'upgrade (2023, 2025) ou ajout d'un nouveau site (2026 et 2028).

Dans le scénario 4G+5G, la charge du site 5G augmente très progressivement d'année en année au fur et à mesure que la pénétration des terminaux 5G augmente. L'augmentation de la charge du site 4G, très rapide avant 2023, est plus lente après 2023 car une part de plus en plus grande du trafic est absorbée par la 5G.

Dans le scénario 4G+5G, on constate que l'augmentation du trafic total est principalement absorbée par la 5G dès son déploiement en 2023 si bien que le trafic porté par la 4G (histogramme jaune) ne progresse pas entre 2022 et 2027. En 2028, plus de 75% du trafic est porté par la 5G (histogramme bleu).

La figure suivante montre l'évolution de la consommation annuelle des sites 4G et 5G pour les deux scénarios, normalisée à la consommation de 2020. Les courbes montrent la consommation totale des sites du scénario 4G seule (courbe orange) et la consommation totale des sites 4G et 5G du scénario 4G+5G (courbe bleu marine). Les histogrammes montrent la contribution de la station de base 4G (en jaune) et de la station de base 5G (en bleu) au scénario 4G+5G.

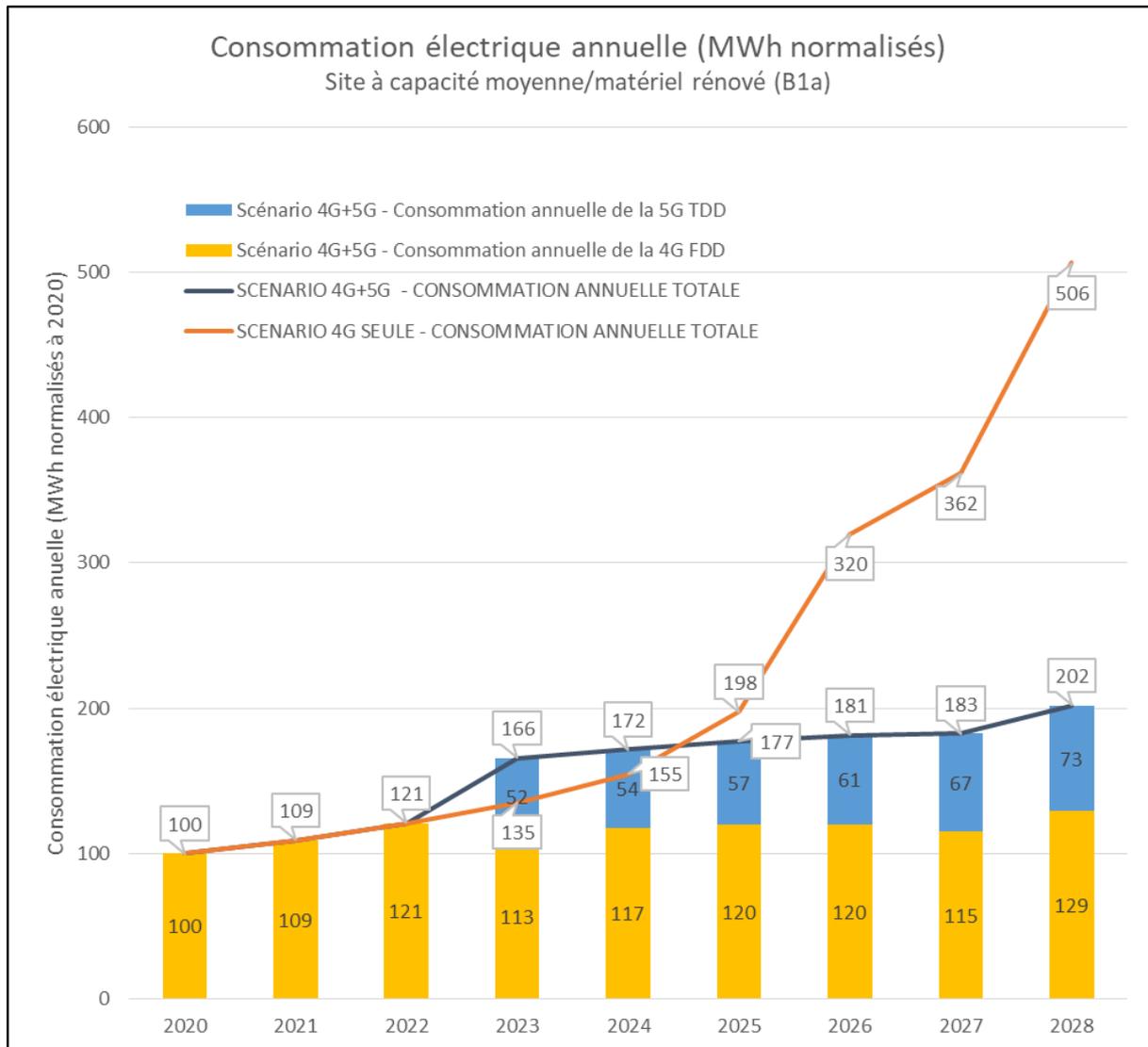


Figure 13 - Consommation énergétique annuelle par scénario - type de déploiement B1a

Dans le scénario 4G seule, on constate que la consommation annuelle a été multipliée par 5 entre 2020 et 2028 (courbe orange). Dans les premières années, l'augmentation reste modérée, notamment grâce à la rénovation des équipements existants en 2023, mais dès 2025 elle accélère avec l'ajout de nouvelle bande et surtout le déploiement du second site en 2026 et du troisième en 2028.

En revanche, dans le scénario 4G+5G, la consommation totale aura augmenté plus fortement en 2023 lors du déploiement de la 5G (+37% par rapport à 2022), mais elle se stabilise ensuite avec une progression d'à peine 10% entre 2023 et 2027, de sorte qu'en 2028 la consommation totale 4G+5G n'aura été multipliée **que par 2** par rapport à 2020. En conséquence, **en 2028 la consommation annuelle du scénario 4G seule est 2.5 fois supérieure à celle du scénario 4G+5G.**

On constatera aussi que même en 2028, alors que **la 5G absorbe 75% du trafic total**, la consommation de la station de base 5G est environ **57%** de celle de la station de base 4G.

La figure suivante montre les émissions annuelles de gaz à effet de serre (GES) pour les deux scénarios, normalisée aux émissions de 2020. Les courbes montrent les émissions totales cumulées du scénario 4G seule (courbe orange) et les émissions totales cumulées du scénario 4G+5G (courbe bleu marine). Les histogrammes montrent la contribution de la station de base 4G (en jaune) et de la station de base 5G (en bleu) au scénario 4G+5G.

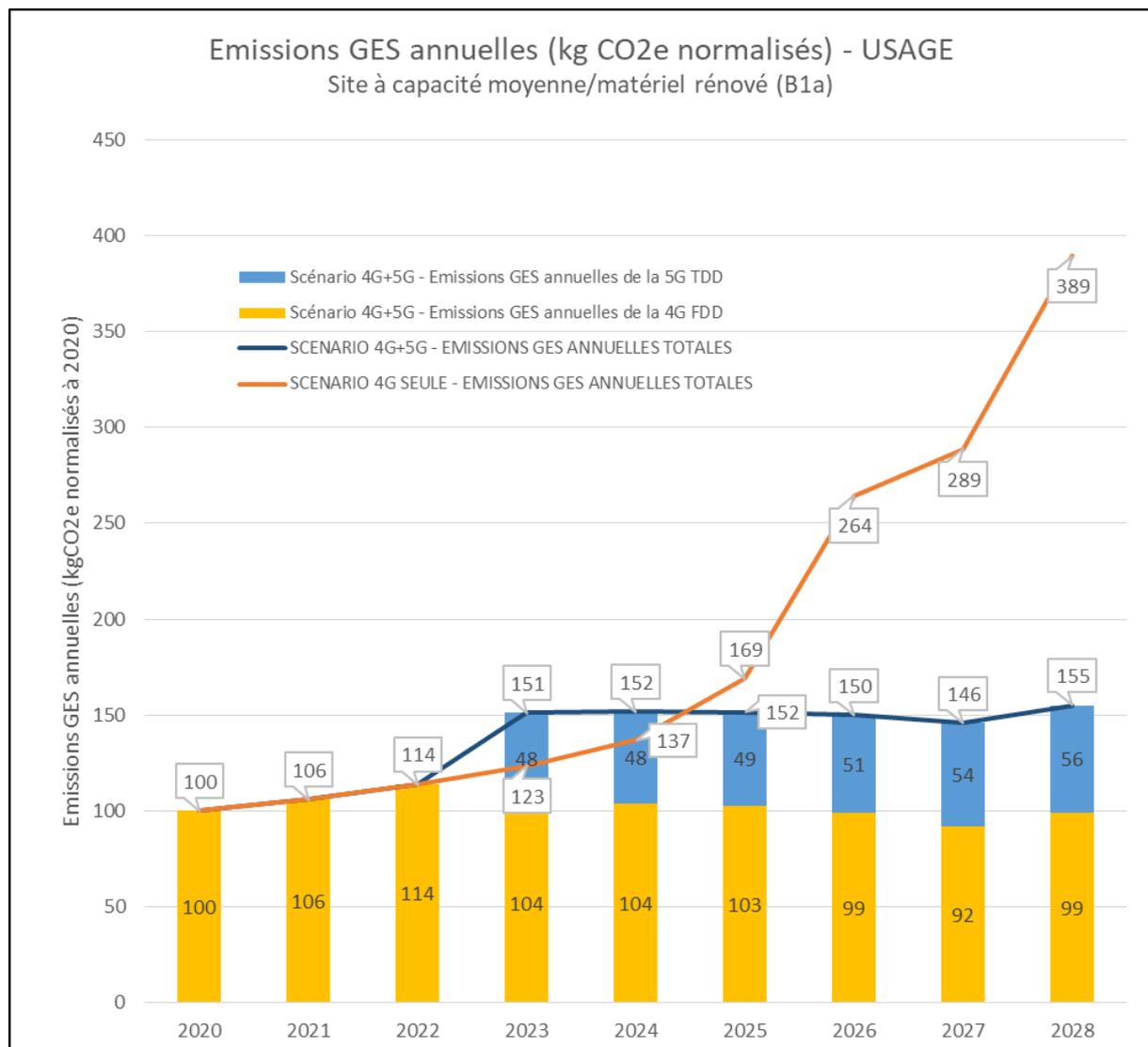


Figure 14 - Emissions GES annuelles par scénario - type de déploiement B1a

On constate que dans le scénario 4G seule, les émissions de GES augmentent lentement dans les premières années puis accélèrent à partir de 2025 quand de nouveaux équipements ou sites sont ajoutés.

En revanche, les émissions de GES du scénario 4G+5G augmente fortement en 2023 avec le déploiement de la 5G (+32%), puis décroissent jusqu'en 2027, la faible augmentation de la consommation électrique étant plus que compensée par la réduction de la teneur en CO2 du kWh. Ainsi **en 2028, les émissions de GES du scénario 4G+5G n'ont augmenté que de 55% par rapport à 2020 et celles du scénario 4G seule sont 2,5 fois supérieures à celles du scénario 4G+5G.**

La figure suivante montre l'efficacité énergétique (consommation normalisée divisée par volume de trafic normalisé) pour les deux scénarios chaque année. L'efficacité énergétique du scénario 4G seule est représentée sur la courbe orange et l'efficacité énergétique globale du scénario 4G+5G sur la courbe bleu marine. Les courbes jaune et bleu montrent l'efficacité énergétique respective des stations de base 4G et 5G dans le scénario 4G+5G.

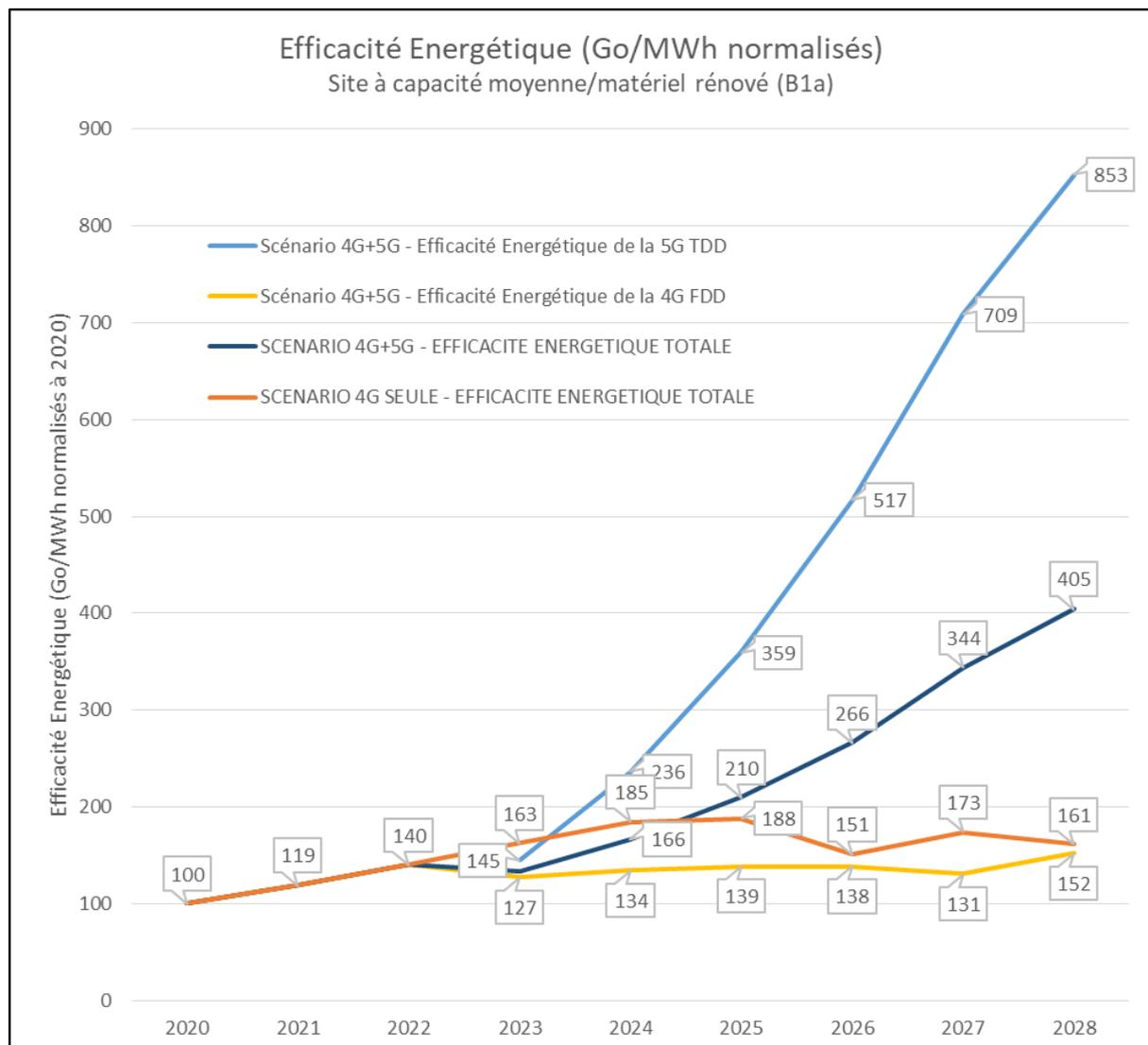


Figure 15 - Efficacité énergétique par scénario - type de déploiement B1a

L'efficacité énergétique (Go/MWh) du scénario 4G seule (courbe orange) s'améliore (augmente) quand la charge des stations de base 4G augmente, et se dégrade (diminue) quand la charge diminue lors de l'ajout de nouveaux sites en 2026. Grâce à la rénovation des équipements 4G en 2023, la courbe d'efficacité augmente en 2024/2025 de presque 90% par rapport à 2020.

En revanche, dans le scénario 4G+5G, la courbe d'efficacité énergétique de la station de base 4G (jaune) reste plus faible (<140%) car elle ne bénéficie pas de la rénovation des équipements. L'efficacité énergétique de la station de base 5G (courbe bleue) est comparable à celle de la 4G en 2023 car la 5G absorbe une part significative du trafic (35%) dès son déploiement du fait d'une bonne pénétration des terminaux 5G à cette date. Mais dès 2024, l'efficacité énergétique de la 5G devient nettement meilleure que celle de la 4G et atteint en 2028 8,5 fois la valeur de 2020.

En 2028, l'efficacité énergétique combinée de la 4G+5G dans le scénario 4G+5G (courbe bleue marine) est **2,5 fois meilleure** que celle du scénario 4G seule.

Cas B1b – Capacité moyenne/matériel rénové/distance inter-sites plus importante

Le tableau suivant présente l'évolution du site étudié pour absorber le trafic dans les deux scénarios de déploiement.

Tableau 11 - Chronologie de l'évolution du site étudié pour le type B1b

Scénario de déploiement	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028
Scénario 4G seule	4G FDD 2x45MHz + 2T2R			Ajout 700 (2x50MHz) + rénovation 4G 4T4R		Ajout 2600 (2x65MHz)	Ajout d'un 2 nd site 4G		Ajout d'un 3 ^e site 4G
Scénario 4G+5G				Ajout 5G TDD 32T32R					Ajout d'un 2 nd site 5G TDD 32T32R

La chronologie du scénario 4G seule est identique au cas B1b avec upgrades capacitaires en 2023 et 2025 puis ajout de sites 4G en 2026 et 2028.

Dans le scénario 4G+5G, il sera nécessaire de déployer un premier site 5G TDD 32T32R en 2023, mais contrairement au cas B1a, il sera nécessaire d'ajouter **un deuxième site 5G TDD 32T32R en 2028** pour absorber l'augmentation du trafic 5G du fait de la capacité réduite du site 5G.

La figure suivante montre l'évolution du trafic et de la charge aux heures chargées pour le scénario 4G seule et pour le scénario 4G+5G. Les histogrammes représentent la part du trafic du scénario 4G+5G portée par les sites 4G (en jaune) et par les sites 5G (en bleu). La courbe orange représente le trafic annuel total commun aux deux scénarios. Les autres courbes en pointillés représentent la charge des sites (marrons pour le scénario 4G seule, jaunes les sites 4G du scénario 4G+5G et bleus les sites 5G du scénario 4G+5G).

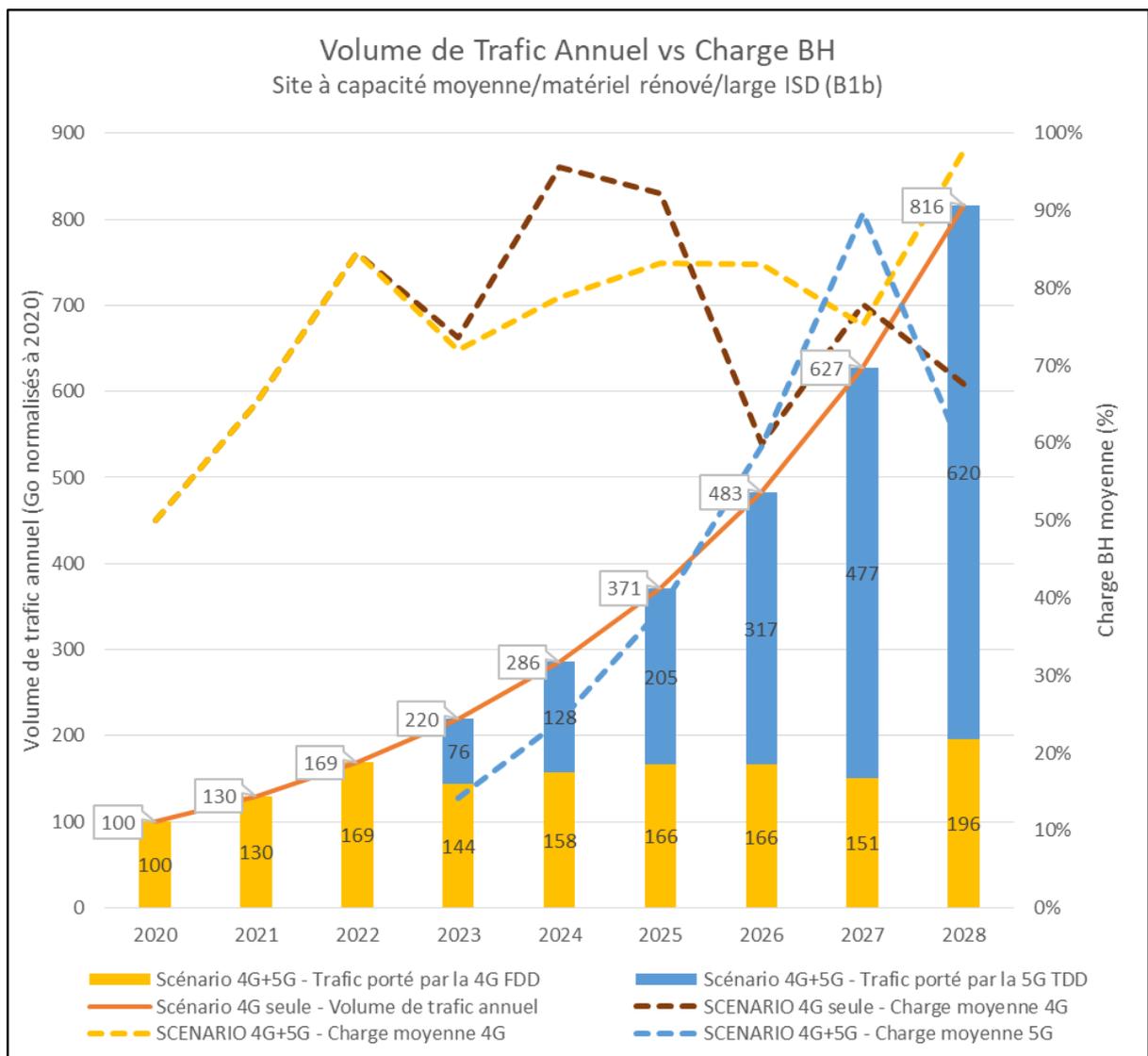


Figure 16 – Volume de trafic et Charge à la BH par scénario – type de déploiement B1b

Par rapport au cas B1a, la différence réside uniquement dans la charge de la station de base 5G TDD qui augmente beaucoup plus vite que dans le cas B1a puisque sa capacité est réduite dans le cas B1b. En 2028, avec l'ajout du second site 5G, la charge 5G redescend. Néanmoins la 5G porte toujours environ 75% du trafic total en 2028.

La figure suivante montre l'évolution de la consommation annuelle des sites 4G et 5G pour les deux scénarios, normalisée à la consommation de 2020.

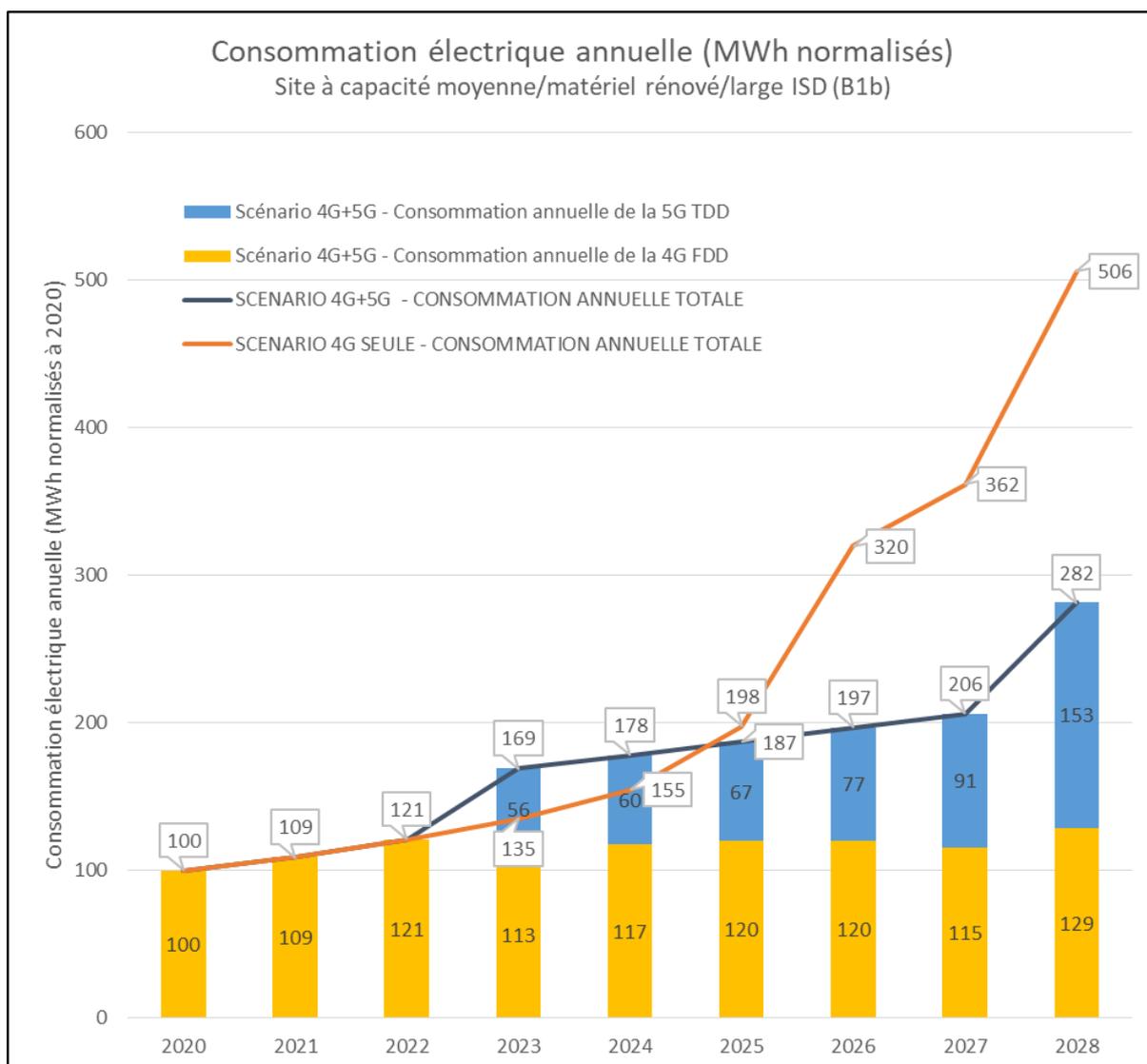


Figure 17 – Consommation électrique annuelle par scénario – type de déploiement B1b

Par rapport au cas B1a, la seule différence réside dans le fait que la consommation de la 5G TDD est plus élevée puisque la station de base 5G fonctionne à un niveau de charge plus élevé pour le même trafic écoulé. De plus, l'ajout du second site 5G en 2028 entraîne une augmentation brutale de la consommation du scénario 4G+5G. Néanmoins, on constate que la consommation du scénario 4G seule en 2028 est encore 1,8 fois supérieure à celle du scénario 4G+5G. De même, dans le scénario 4G+5G, la consommation des 2 stations de base 5G excède d'à peine 20% la consommation de l'unique station de base 4G.

La figure suivante montre les émissions annuelles de gaz à effet de serre (GES) pour les deux scénarios, normalisée aux émissions de 2020.

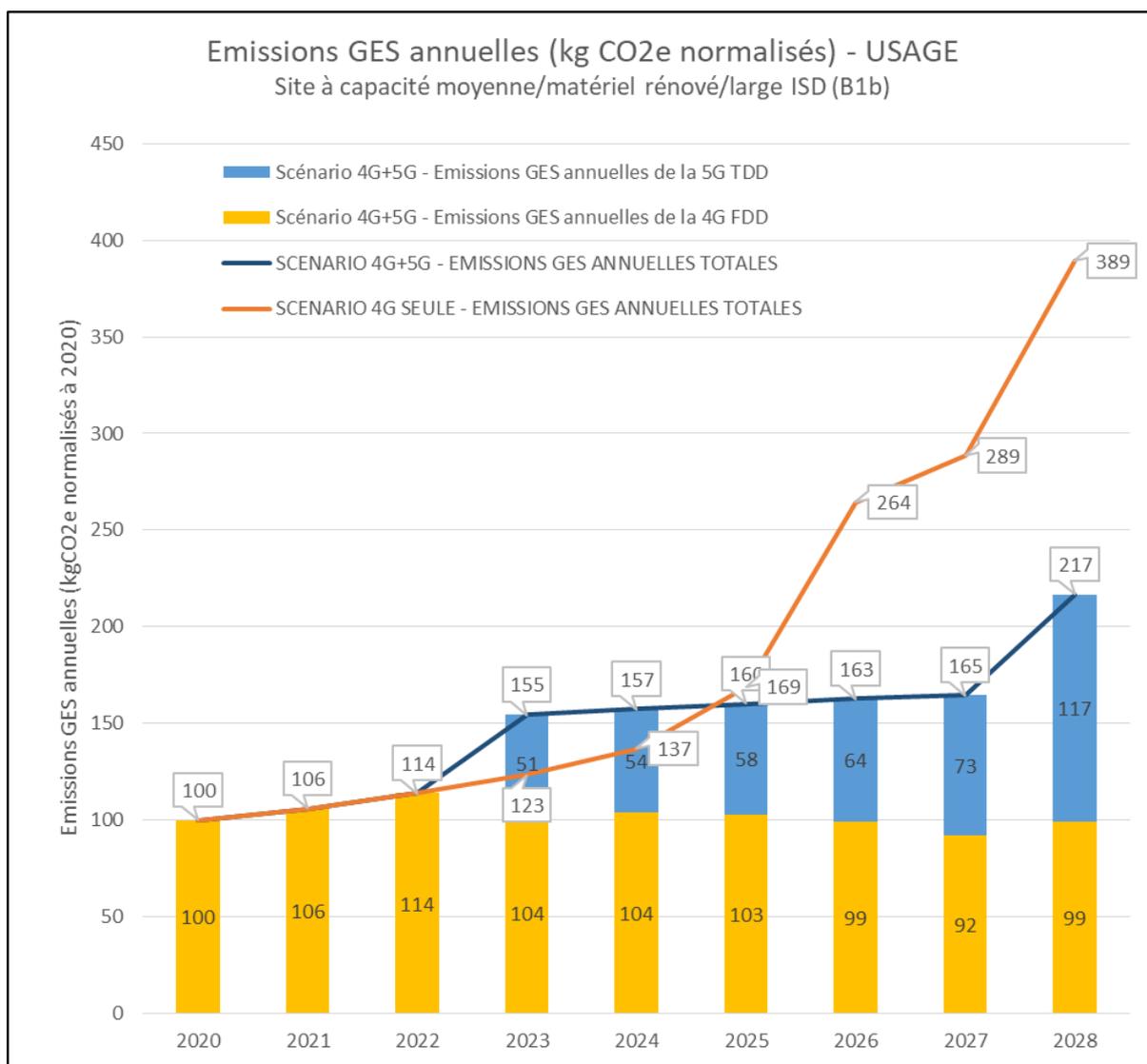


Figure 18 - Emissions GES annuelles par scénario - type de déploiement B1b

Comme pour la consommation, la différence par rapport au cas B1a réside dans les émissions du scénario 4G+5G qui sont supérieures à celles du cas B1a et qui augmentent brutalement en 2028 avec l'ajout du second site 5G. Néanmoins, les émissions du scénario 4G seule sont toujours 1,8 fois supérieures à celle du scénario 4G+5G.

La figure suivante montre l'efficacité énergétique (consommation normalisée divisée par volume de trafic normalisé) pour les deux scénarios chaque année.

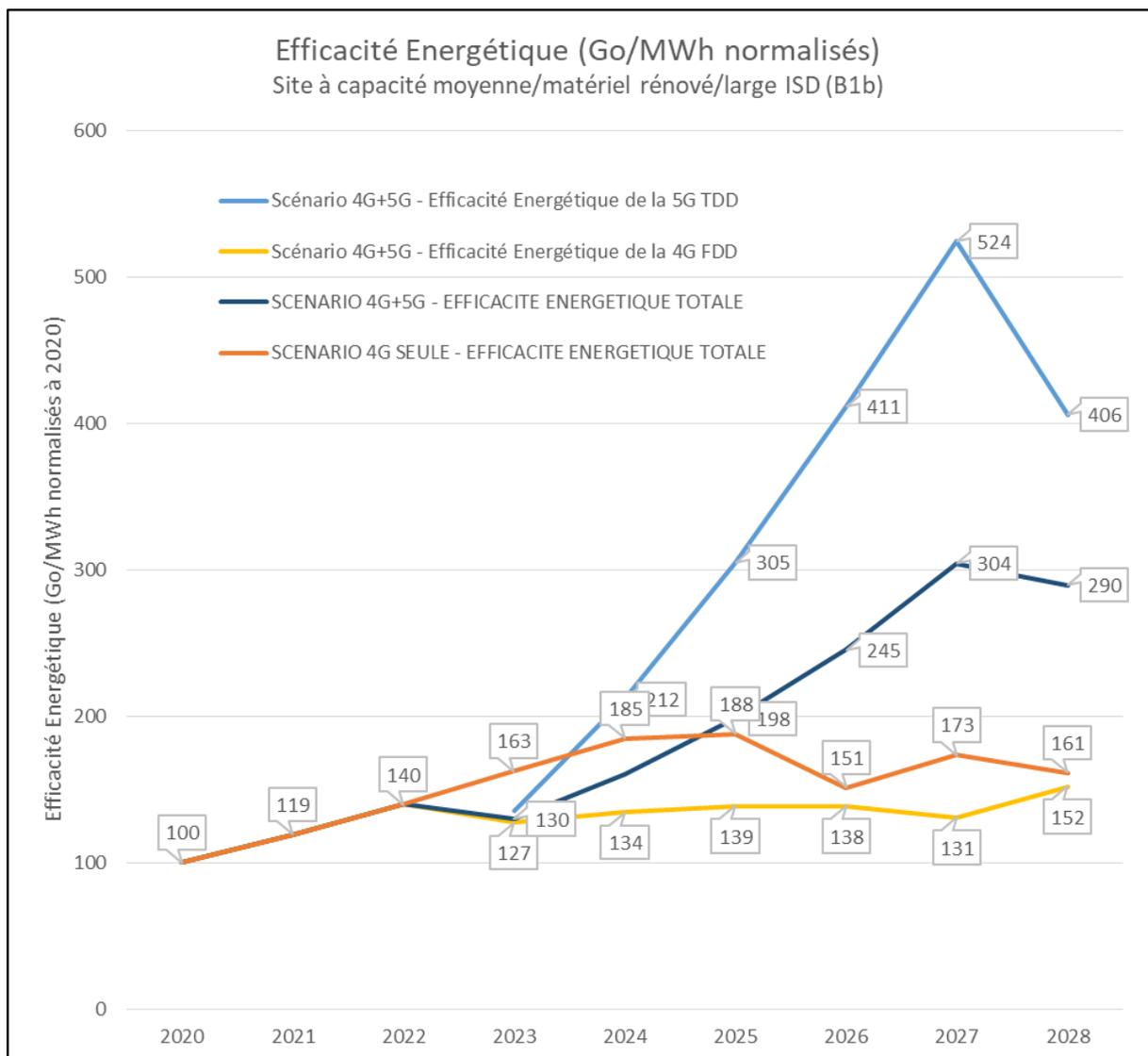


Figure 19 - Efficacité énergétique par scénario - type de déploiement B1b

Une fois encore, par rapport au cas B1a, la différence réside dans l'efficacité énergétique de la 5G TDD qui est réduite par rapport au cas B1a du fait d'une consommation supérieure pour un même trafic. L'ajout du second site 5G en 2028 entraîne une diminution rapide de l'efficacité énergétique de la 5G TDD puisque le niveau de charge est redescendu. Néanmoins en 2028, l'efficacité énergétique combinée du scénario 4G+5G est **1,8 fois meilleure** que celle du scénario 4G seule.

Variante B2 – Capacité moyenne/matériel à rénover

Le tableau suivant présente l'évolution du site étudié pour absorber le trafic dans les deux scénarios de déploiement.

Tableau 12 - Chronologie d'évolution du site étudié pour le type B2

Scénario de déploiement	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028
Scénario 4G seule	4G FDD 2x45 MHz + 2T2R			Ajout 700 (2x50MHz) + rénovation 4G 4T4R		Ajout 2600 (2x65MHz)	Ajout d'un 2 nd site 4G		Ajout d'un 3 ^e site 4G
Scénario 4G+5G				Ajout 700 (2x50MHz) + rénovation 4G 4T4R + Ajout 5G TDD 32T32R					

Dans le scénario 4G seule, **la première étape d'upgrade sera nécessaire dès 2023** (ajout 700 MHz + 4T4R sur 1800+2100 MHz avec rénovation des équipements 4G) pour faire face à l'augmentation du trafic. Puis en **2025** il sera nécessaire de procéder à la **deuxième étape d'upgrade** (ajout 2600 MHz). En **2026** il sera nécessaire de déployer un **second site 4G** ainsi qu'un **troisième en 2028**.

Dans le scénario 4G+5G, il sera nécessaire de déployer **un site 5G TDD 32T en 2023**, et du fait de l'ancienneté des équipements 4G on réalisera la première étape d'upgrade simultanément (rénovation des équipements, ajout du 700 MHz et du 4T4R sur 1800+2100 MHz). Ainsi cette configuration **suffira pour absorber le trafic jusqu'en 2028**.

La figure suivante montre l'évolution du trafic et de la charge aux heures chargées pour le scénario 4G seule et pour le scénario 4G+5G. Les histogrammes représentent la part du trafic du scénario 4G+5G portée par les sites 4G (en jaune) et par les sites 5G (en bleu). La courbe orange représente le trafic annuel total commun aux deux scénarios. Les autres courbes en pointillés représentent la charge des sites (marrons pour le scénario 4G seule, jaunes les sites 4G du scénario 4G+5G et bleus les sites 5G du scénario 4G+5G).

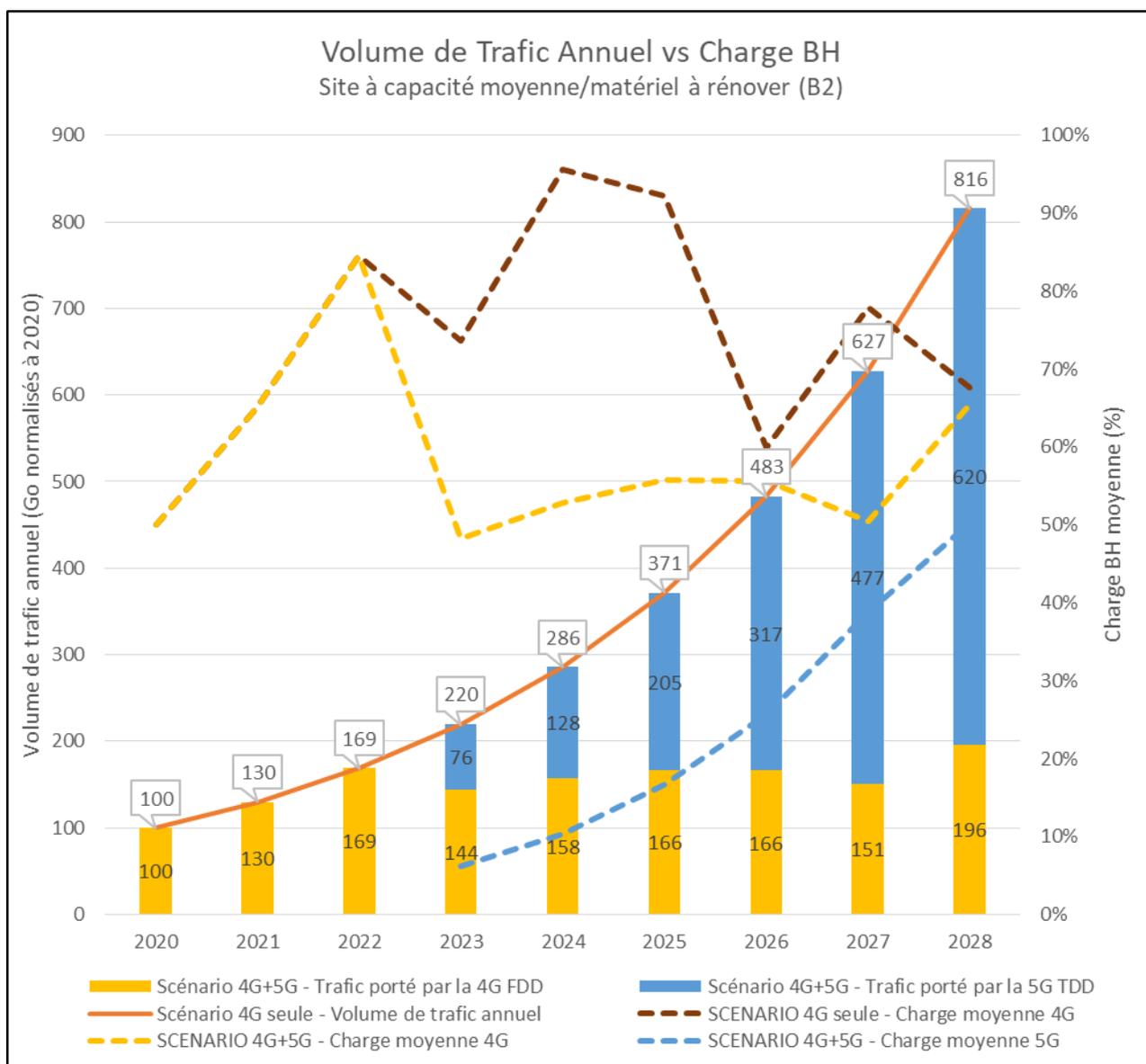


Figure 20 - Volume de trafic vs Charge à la BH par scénario - type de déploiement B1b

Dans le scénario 4G seule, la charge augmente fortement d'année en année et diminue à chaque opération d'upgrade (2023, 2025) ou ajout d'un nouveau site (2026, 2028), comme dans le scénario B1.

Dans le scénario 4G+5G, la charge du site 5G augmente très progressivement d'année en année au fur et à mesure que la pénétration des terminaux 5G augmente. Par rapport au scénario B1, la charge 4G dans le scénario 4G+5G est très fortement réduite en 2023 du fait de la rénovation du matériel 4G (et de l'augmentation de capacité 4G) concomitante avec le déploiement de la 5G. Ainsi la charge 4G revient vers 50% et ne dépassera plus les 55% avant 2028 car l'augmentation de trafic sera absorbée par la 5G. En 2028, plus de 75% du trafic est porté par la 5G (histogramme bleu).

La figure suivante montre l'évolution de la consommation annuelle des sites 4G et 5G pour les deux scénarios, normalisée à la consommation de 2020. Les courbes montrent la consommation totale des sites du scénario 4G seule (courbe orange) et la consommation totale des sites 4G et 5G du scénario 4G+5G (courbe bleu marine). Les histogrammes montrent la contribution de la station de base 4G (en jaune) et de la station de base 5G (en bleu) au scénario 4G+5G.

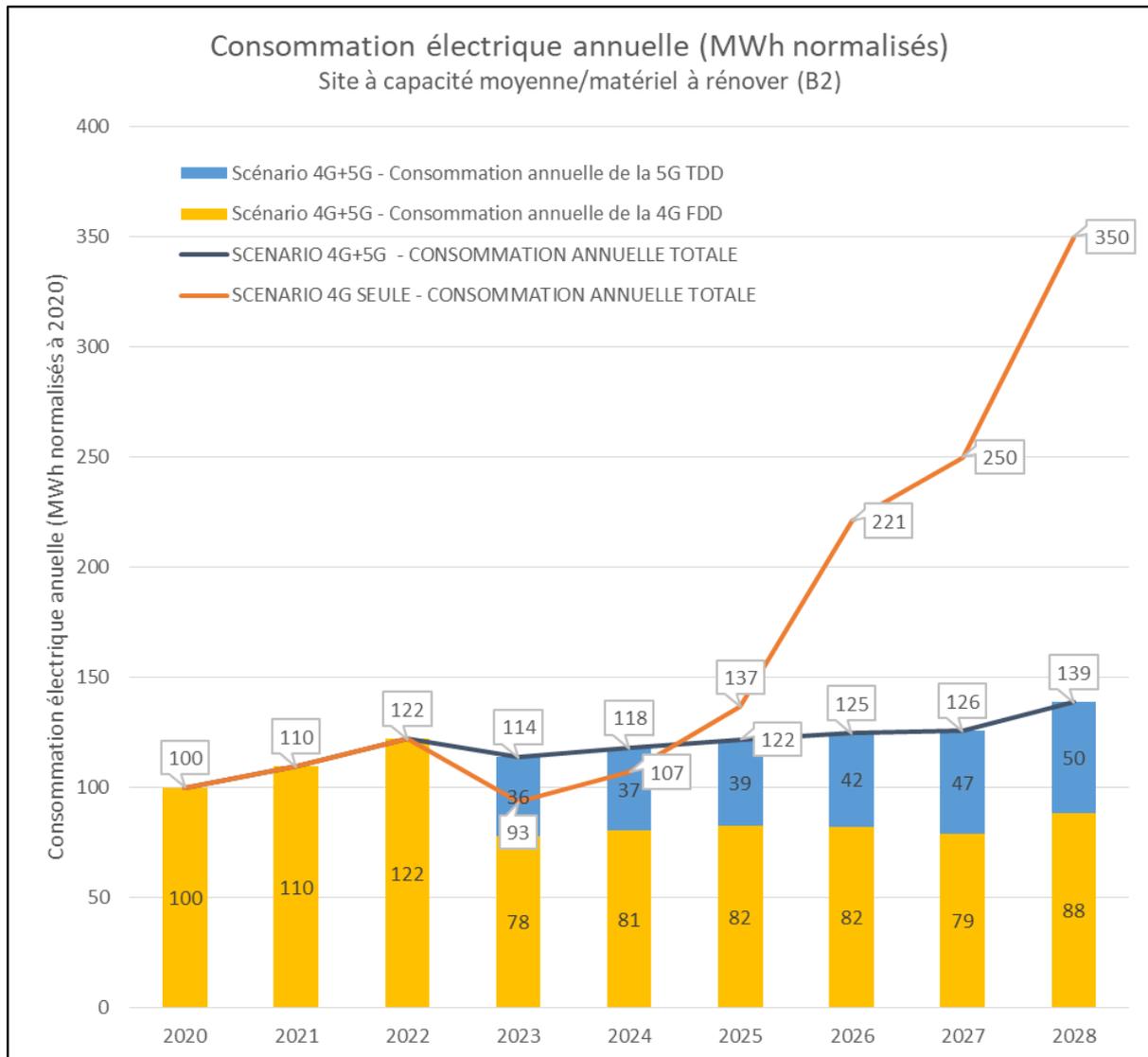


Figure 21 - Consommation électrique annuelle par scénario - type de déploiement B2

Dans le scénario 4G seule (courbe orange), la rénovation du matériel 4G en 2023 a permis de réduire la consommation électrique de 7% par rapport à 2020 malgré le doublement du trafic sur 3 ans. Mais après 2023, la consommation repart à la hausse, en particulier avec l'ajout du 2600 en 2025 et surtout l'ajout du second site 4G en 2026 et du troisième en 2028. Ainsi dans le **scénario 4G seule, on constate que la consommation annuelle a été multipliée par 3,5 entre 2020 et 2028.**

Dans le scénario 4G+5G, la rénovation de la station de base 4G et le déploiement de la 5G simultanément en 2023 auront permis d'absorber le nouveau trafic tout en réduisant la consommation

par rapport à 2022 (courbe bleue marine, -9%). De 2023 à 2027, grâce à l'apport de capacité de la 5G, la consommation totale 4G+5G augmente très faiblement (+10%) malgré un triplement du trafic sur cette période, de sorte qu'en 2028 la consommation totale 4G+5G n'aura été multipliée **que par à peine 1,4** par rapport à 2020. En conséquence, **en 2028 la consommation annuelle du scénario 4G seule est 2,5 fois supérieure à celle du scénario 4G+5G.**

On constatera aussi que même en 2027, alors que **la 5G absorbe 75% du trafic total**, la consommation de la station de base 5G représente **57%** de celle de la station de base 4G.

La figure suivante montre les émissions annuelles de gaz à effet de serre (GES) pour les deux scénarios, normalisée aux émissions de 2020. Les courbes montrent les émissions totales cumulées du scénario 4G seule (courbe orange) et les émissions totales cumulées du scénario 4G+5G (courbe bleue marine). Les histogrammes montrent la contribution de la station de base 4G (en jaune) et de la station de base 5G (en bleu) au scénario 4G+5G.

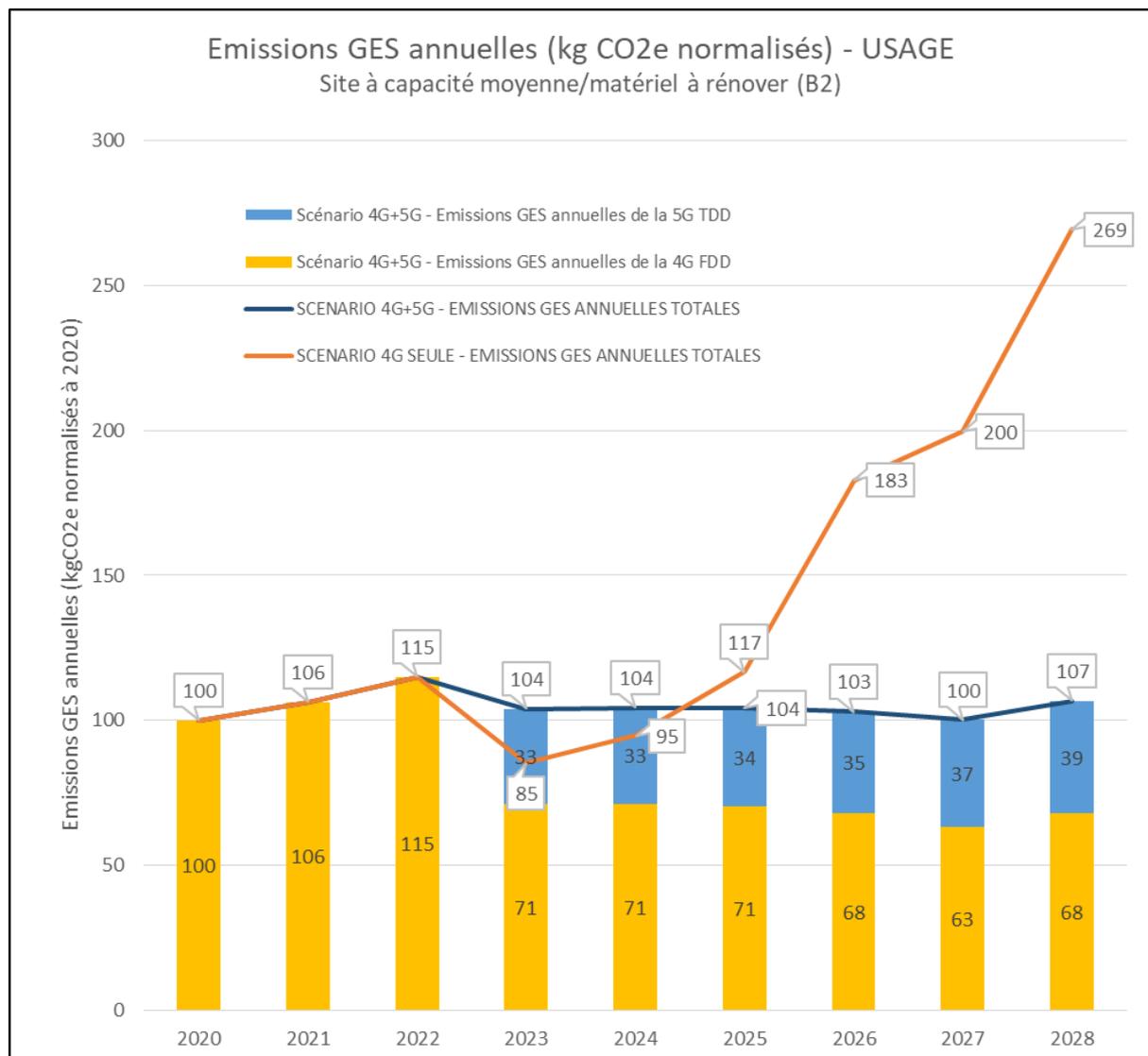


Figure 22 - Emissions GES annuelles par scénario - type de déploiement B2

On constate que dans le scénario 4G seule, les émissions de GES subissent une forte décroissance en 2023 (-26% par rapport à 2022) lors de la rénovation des équipements (4G et atelier d'énergie), si bien que les émissions de 2023 sont nettement inférieures à celles de 2020 (-15%). Puis les émissions repartent fortement à la hausse en particulier à partir de 2025 avec l'ajout de la fréquence 2600 MHz puis l'ajout des deuxièmes et troisièmes sites.

Dans le scénario 4G+5G, en revanche, les émissions de GES sont réduites de 10% en 2023 sous l'effet combiné de la rénovation des équipements existants (4G et atelier d'énergie) et du déploiement de la 5G, puis elles continuent de décroître année après année jusqu'en 2027, l'augmentation de la consommation étant compensée par la réduction de la teneur en CO₂ du kWh. Ainsi **en 2028, les émissions de GES du scénario 4G+5G sont à peine 7% supérieures au niveau 2020 et celles du scénario 4G seule sont 2,5 fois supérieures à celles du scénario 4G+5G.**

La figure suivante montre l'efficacité énergétique (consommation normalisée divisée par volume de trafic normalisé) pour les deux scénarios chaque année. L'efficacité énergétique du scénario 4G seule est représentée sur la courbe orange et l'efficacité énergétique globale du scénario 4G+5G sur la courbe bleue marine. Les courbes jaune et bleue montrent l'efficacité énergétique respective des stations de base 4G et 5G dans le scénario 4G+5G.

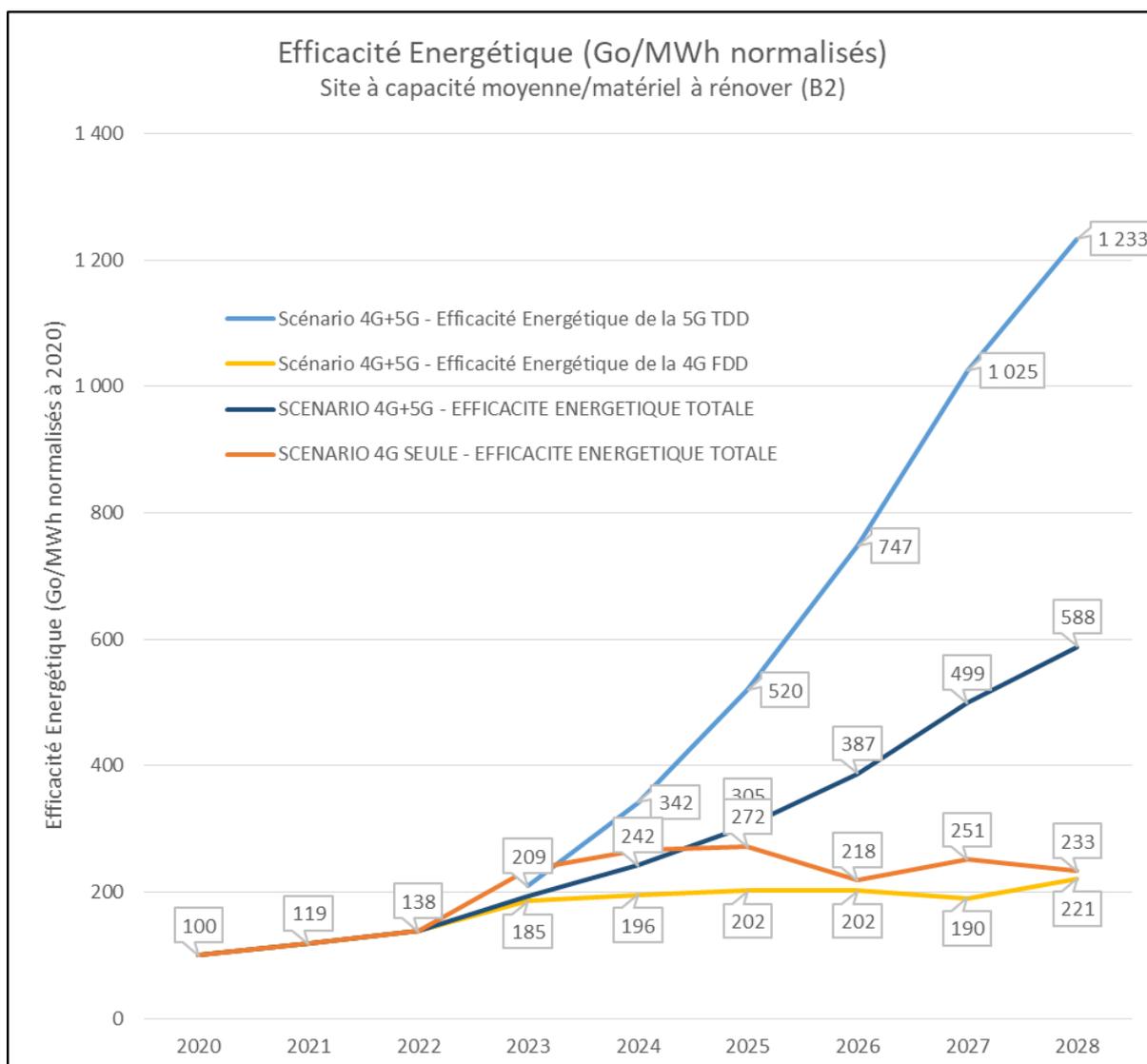


Figure 23 - Efficacité énergétique par scénario - type de déploiement B2

L'efficacité énergétique (Go/MWh) du scénario 4G seule (courbe orange) s'améliore (augmente) quand la charge des stations de base 4G augmente, et se dégrade (diminue) quand la charge diminue lors de l'ajout de nouveaux sites en 2026 et 2028. Grâce à la rénovation des équipements 4G en 2023, l'efficacité énergétique fait plus que doubler par rapport à 2020. La courbe d'efficacité énergétique de la station de base 4G dans le scénario 4G+5G (jaune) s'améliore significativement en 2023 lors de la rénovation des équipements mais reste ensuite aux alentours du double de 2020 car la charge 4G reste modérée.

L'efficacité énergétique de la station de base 5G (courbe bleue) est comparable à celle de la 4G dès 2023 car la 5G absorbe une part significative du trafic (35%) dès son déploiement du fait d'une bonne pénétration des terminaux 5G à cette date. Mais dès 2024, l'efficacité énergétique de la 5G devient meilleure que celle de la 4G et devient en 2028 12 fois supérieure à celle de 2020.

En 2028, l'efficacité énergétique combinée de la 4G+5G dans le scénario 4G+5G est, dans ce cas de figure, **2,5 fois meilleure** que celle du scénario 4G seule.

c) **Type de déploiement C – Site à faible capacité initiale**

Variante C1 – 50% de charge en 2020/80% taux d'absorption

Le tableau suivant présente l'évolution du site étudié pour absorber le trafic dans les deux scénarios de déploiement.

Tableau 13 - Chronologie d'évolution du site étudié pour le type C1

Scénario de déploiement	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028
Scénario 4G seule	4G FDD 2x30MHz + 2T2R			Ajout 2100MHz 2T2R (2x45MHz)		Ajout 700 + réno 4T4R 1800/2100 (2x50MHz)	Ajout 2600MHz 4T4R (2x65MHz)	Ajout d'un 2 ^e site 4G 700/800/ 1800/2100	
Scénario 4G+5G				Ajout 5G TDD 32T32R				Ajout 700MHz 2T2R (2x35MHz)	

Dans le scénario 4G seule, **les ajouts capacitaires sont nécessaires dès 2023** pour faire face à l'augmentation du trafic, puis **un second site est ajouté en 2027**.

Dans le scénario 4G+5G, **un seul site 5G TDD 32T32R** est déployé en 2023 et **suffit pour absorber le trafic jusqu'en 2027 (2028)**. Néanmoins le 700 MHz est ajouté en 2027 pour des raisons réglementaires.

Les résultats de ce type C1 sont décrits dans les 4 graphes suivants.

La figure suivante montre l'évolution du trafic et de la charge aux heures chargées pour le scénario 4G seule et pour le scénario 4G+5G. Les histogrammes représentent la part du trafic du scénario 4G+5G portée par les sites 4G (en jaune) et par les sites 5G (en bleu). La courbe orange représente le trafic annuel total commun aux deux scénarios. Les autres courbes pointillés représentent la charge des

sites(marrons pour le scénario 4G seule, jaunes les sites 4G du scénario 4G+5G et bleus les sites 5G du scénario 4G+5G).

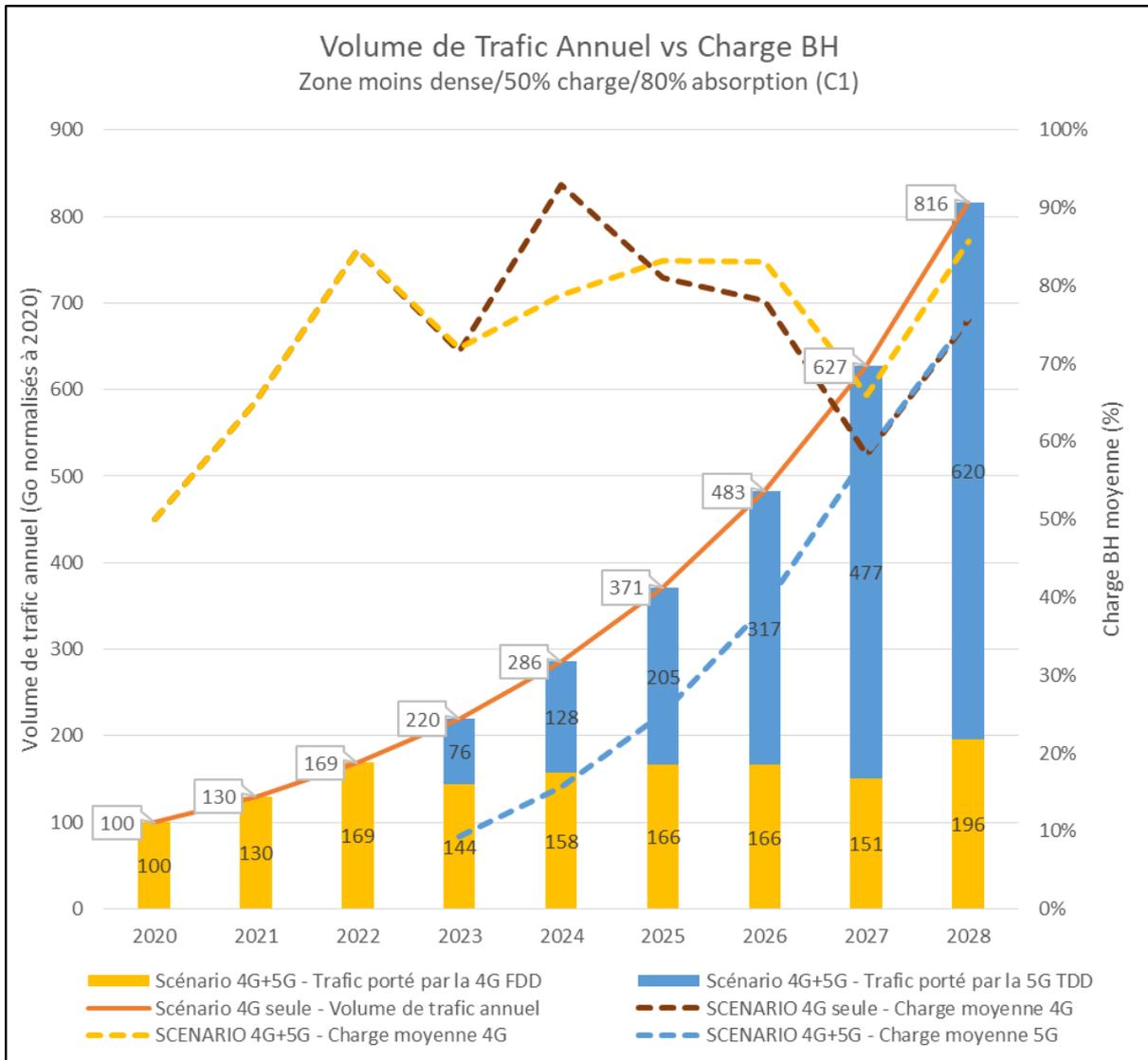


Figure 24 - Volume de trafic annuel et charge à la BH par scénario - type de déploiement C1

Comme dans les autres types de déploiements, la charge 4G diminue avec les upgrades capacitaires et les ajouts de site. En 2028, la 5G porte 75% du trafic dans le scénario 4G+5G.

La figure suivante montre l'évolution de la consommation annuelle des sites 4G et 5G pour les deux scénarios, normalisée à la consommation de 2020. Les courbes montrent la consommation totale des sites du scénario 4G seule (courbe orange) et la consommation totale des sites 4G et 5G du scénario 4G+5G (courbe bleu marine). Les histogrammes montrent la contribution de la station de base 4G (en jaune) et de la station de base 5G (en bleu) au scénario 4G+5G.

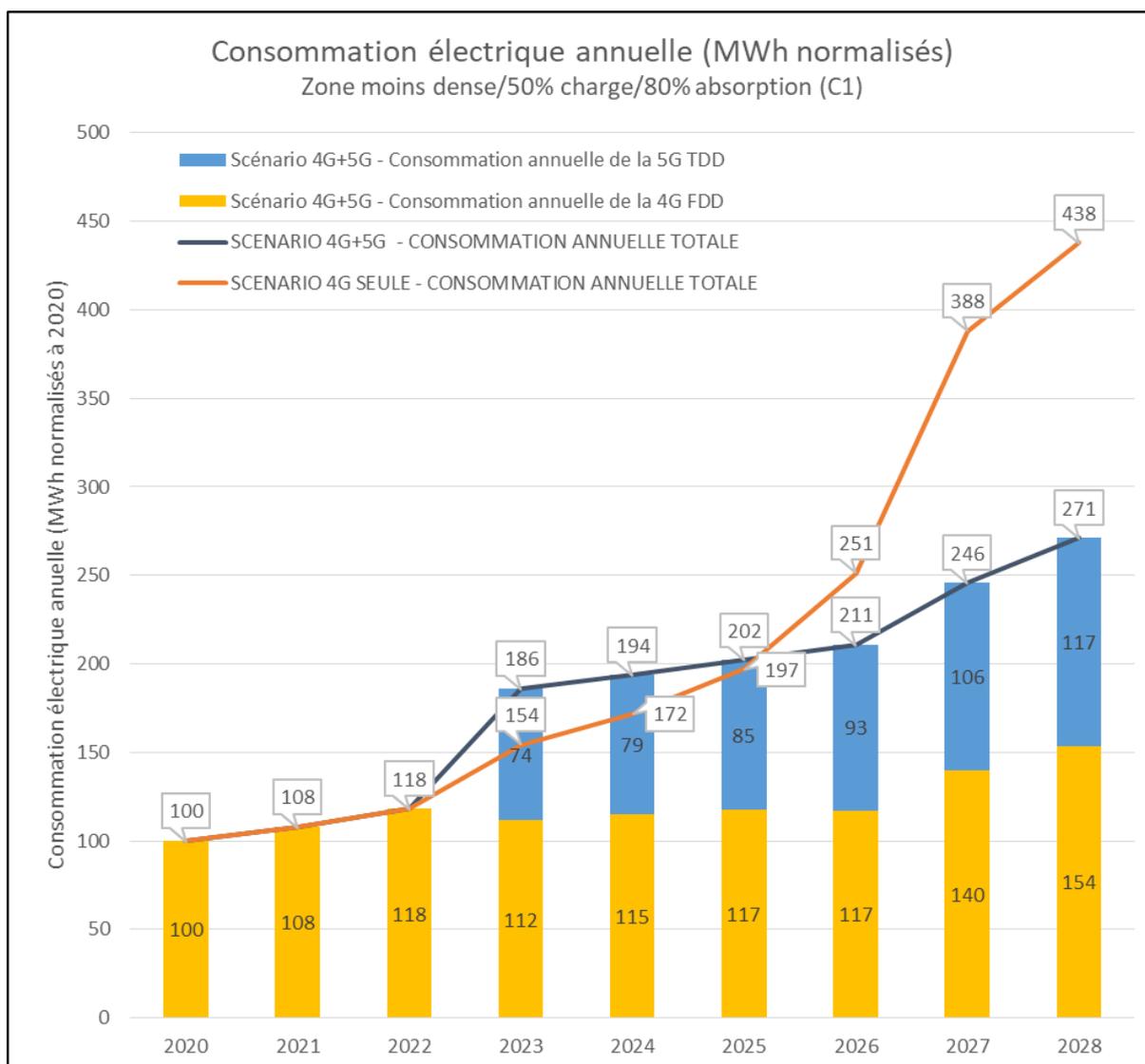


Figure 25 - Consommation électrique annuelle par scénario - type de déploiement C1

La consommation du scénario 4G seule revient au niveau de celle du scénario 4G+5G en 2025. En 2028, la consommation du scénario 4G seule est 1,6 fois supérieure à celle du scénario 4G+5G. Dans le scénario 4G+5G, la consommation de la station de base 5G représente 76% de celle de la station de base 4G alors qu'elle porte 3,1 fois plus de trafic.

La figure suivante montre les émissions annuelles de gaz à effet de serre (GES) pour les deux scénarios, normalisée aux émissions de 2020. Les courbes montrent les émissions totales cumulées du scénario 4G seule (courbe orange) et les émissions totales cumulées du scénario 4G+5G (courbe bleu marine). Les histogrammes montrent la contribution de la station de base 4G (en jaune) et de la station de base 5G (en bleu) au scénario 4G+5G.

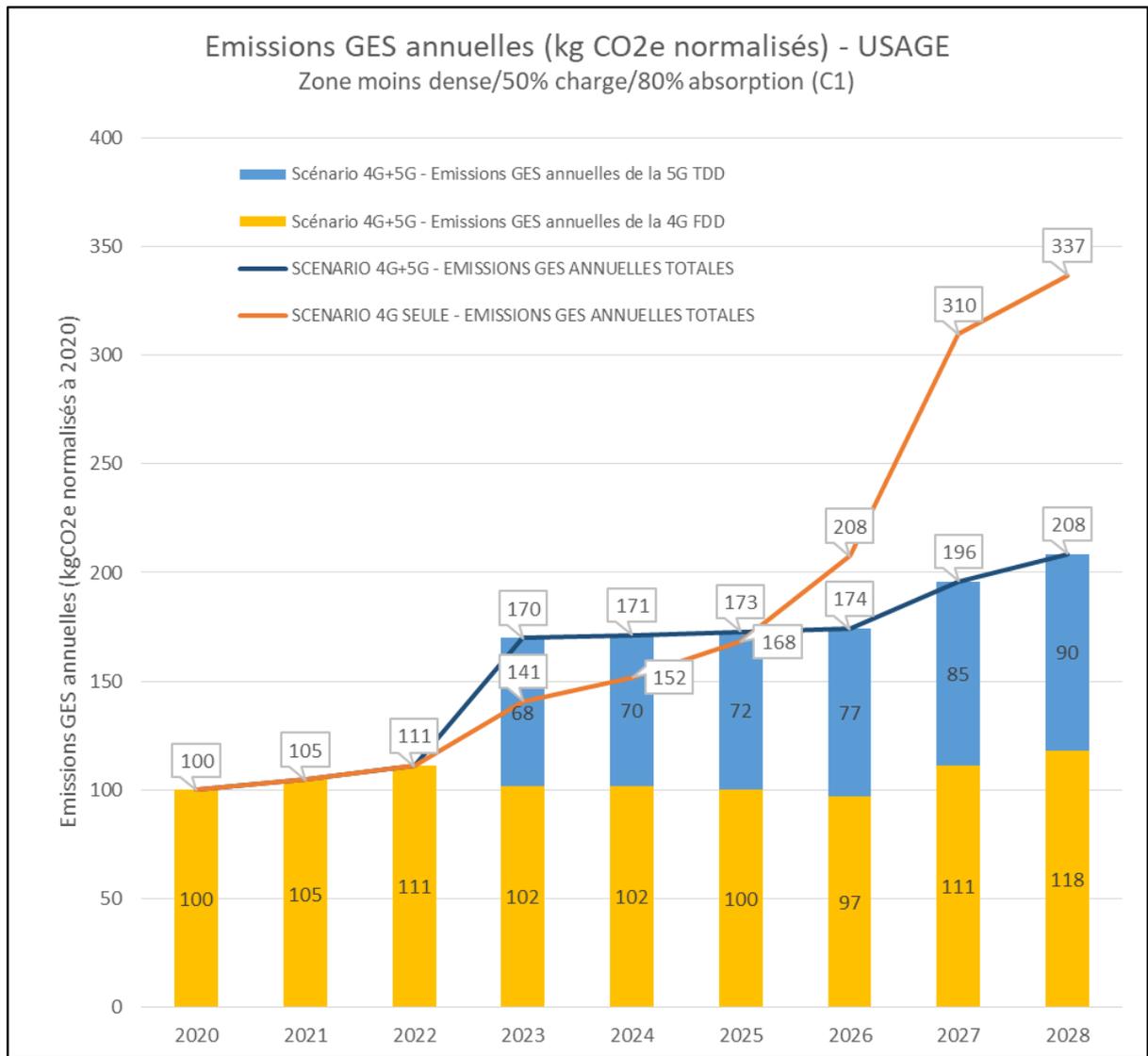


Figure 26 - Emissions GES annuelles par scénario - type de déploiement C1

En 2028, les émissions GES du scénario 4G seule sont 1,6 fois supérieures à celles du scénarios 4G+5G.

La figure suivante montre l'efficacité énergétique (consommation normalisée divisée par volume de trafic normalisé) pour les deux scénarios chaque année. L'efficacité énergétique du scénario 4G seule est représentée sur la courbe orange et l'efficacité énergétique globale du scénario 4G+5G sur la

courbe bleu marine. Les courbes jaune et bleu montrent l'efficacité énergétique respective des stations de base 4G et 5G dans le scénario 4G+5G.

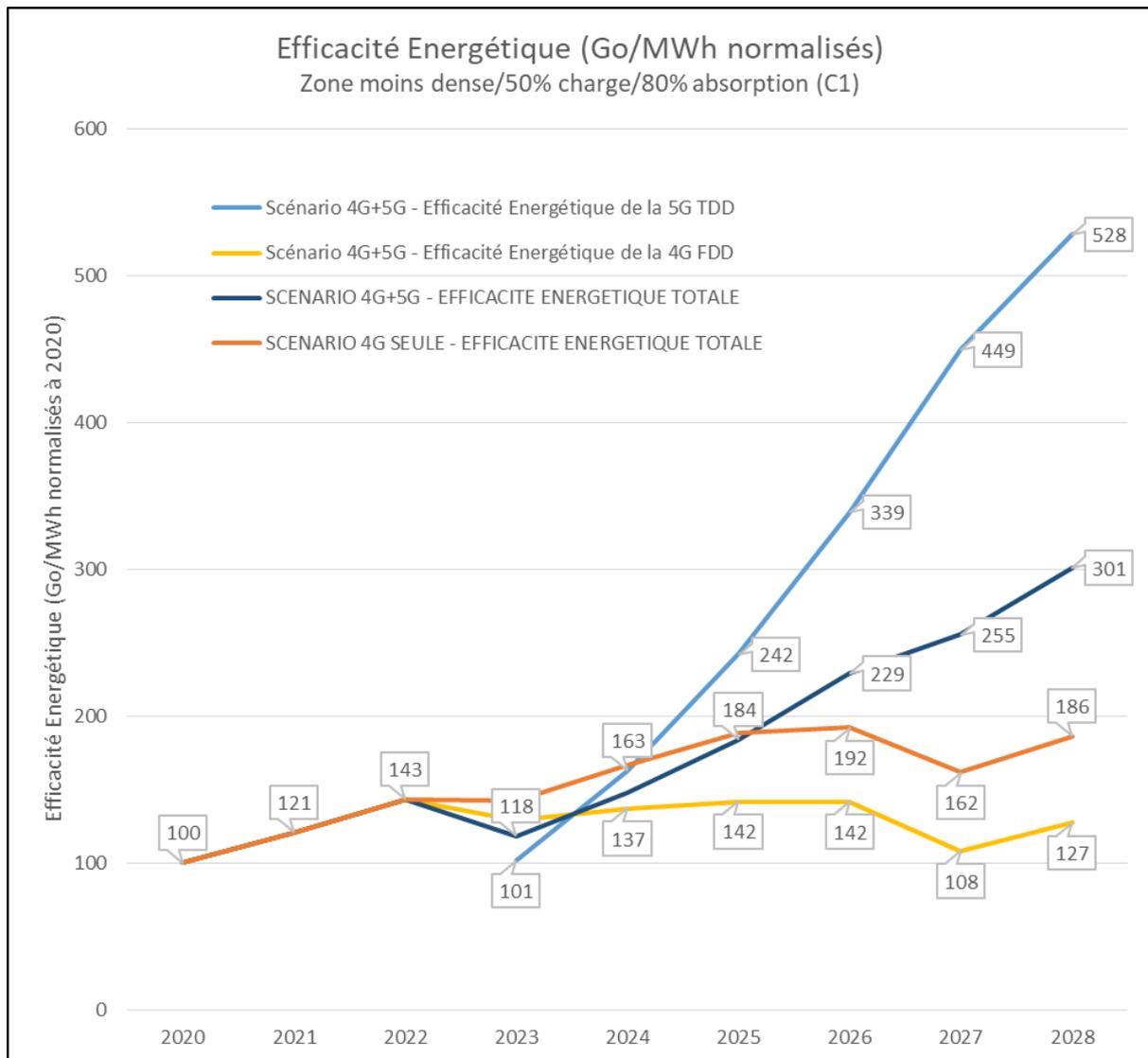


Figure 27 - Efficacité énergétique par scénario - type de déploiement C1

En 2028, l'efficacité énergétique combinée du scénario 4G+5G est 1,6 fois supérieure à celle du scénario 4G seule.

Variante C2 – 30% de charge en 2020/60% de taux d'absorption

Le tableau suivant présente l'évolution du site étudié pour absorber le trafic dans les deux scénarios de déploiement.

Tableau 14 - Chronologie d'évolution du site étudié du type C2

Scénario de déploiement	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028
Scénario 4G seule	4G FDD 2x30MHz + 2T2R					Ajout 2100MHz 2T2R (2x45MHz)		Ajout 700 + réno 4T4R 1800/2100 (2x50MHz)	Ajout d'un 2 ^e site 4G 700/800/ 1800/2100
Scénario 4G+5G						Ajout 5G TDD 32T32R		Ajout 700MHz 2T2R (2x35MHz)	

Dans le scénario 4G seule, **les ajouts capacitaires sont nécessaires à partir de 2025** pour faire face à l'augmentation du trafic, et **un deuxième site 4G sera nécessaire à partir de 2028**.

Dans le scénario 4G+5G, **un site 5G TDD 32T32R** est déployé en 2025, puis le 700 MHz sera ajouté en 2027 pour des raisons réglementaires.

Les résultats de ce type C2 sont décrits dans les 4 graphes suivants :

La figure suivante montre l'évolution du trafic et de la charge aux heures chargées pour le scénario 4G seule et pour le scénario 4G+5G. Les histogrammes représentent la part du trafic du scénario 4G+5G portée par les sites 4G (en jaune) et par les sites 5G (en bleu). La courbe orange représente le trafic annuel total commun aux deux scénarios. Les autres courbes pointillés représentent la charge des sites

(marrons pour le scénario 4G seule, jaunes les sites 4G du scénario 4G+5G et bleus les sites 5G du scénario 4G+5G).

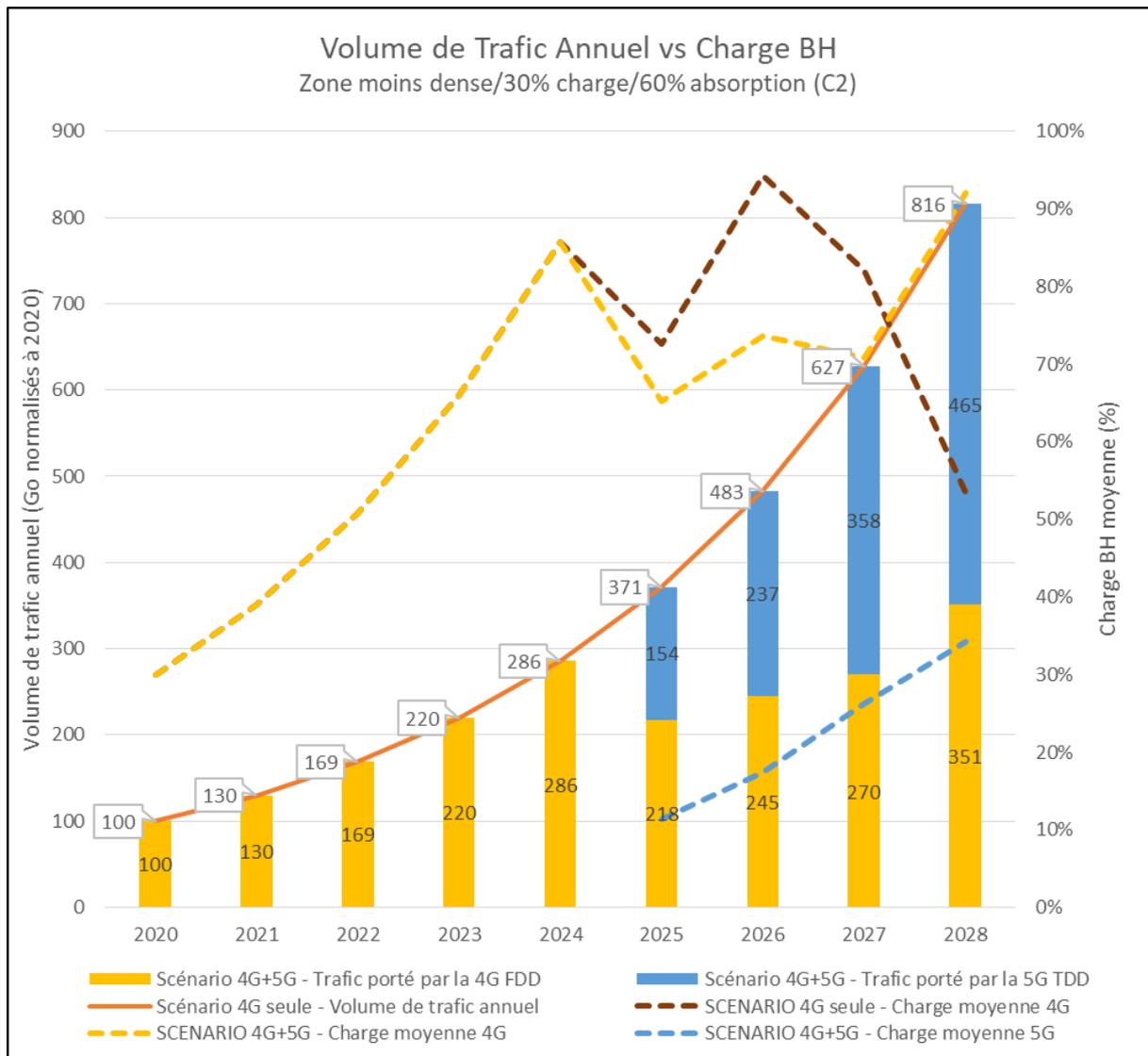


Figure 28 - Volume de trafic annuel et charge à la BH par scénario - type de déploiement C2

Du fait du faible trafic en 2020 de ce type de déploiement, les upgrades capacitaires ne sont requis qu'à partir de 2025. Dans le scénario 4G+5G, la 5G ayant un taux d'absorption relativement bas par rapport aux types de déploiements étudiés précédemment, la charge 5G augmente très lentement. Néanmoins, en 2028 la 5G absorbe déjà la majeure partie du trafic (57%).

La figure suivante montre l'évolution de la consommation annuelle des sites 4G et 5G pour les deux scénarios, normalisée à la consommation de 2020. Les courbes montrent la consommation totale des sites du scénario 4G seule (courbe orange) et la consommation totale des sites 4G et 5G du scénario 4G+5G (courbe bleu marine). Les histogrammes montrent la contribution de la station de base 4G (en jaune) et de la station de base 5G (en bleu) au scénario 4G+5G.

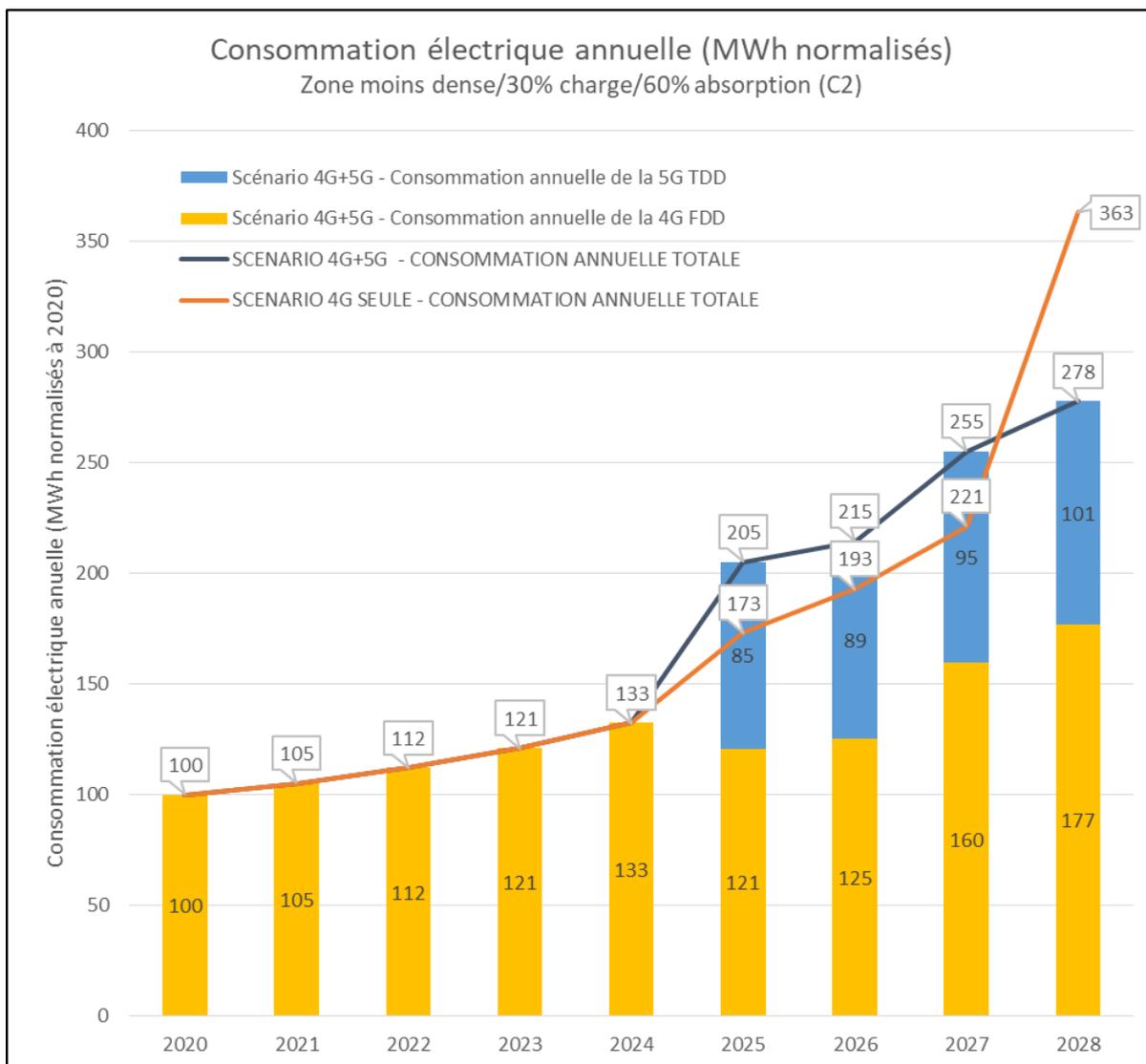


Figure 29 - Consommation électrique annuelle par scénario - type de déploiement C2

Entre 2025 et 2027, l'écart de consommation entre les deux scénarios reste inférieur à 15%. Mais à partir de 2028 avec l'ajout du second site 4G, la consommation du scénario 4G seule augmente fortement pour représenter 1,3 fois celle du scénario 4G+5G.

La figure suivante montre les émissions annuelles de gaz à effet de serre (GES) pour les deux scénarios, normalisée aux émissions de 2020. Les courbes montrent les émissions totales cumulées du scénario 4G seule (courbe orange) et les émissions totales cumulées du scénario 4G+5G (courbe bleue marine). Les histogrammes montrent la contribution de la station de base 4G (en jaune) et de la station de base 5G (en bleu) au scénario 4G+5G.

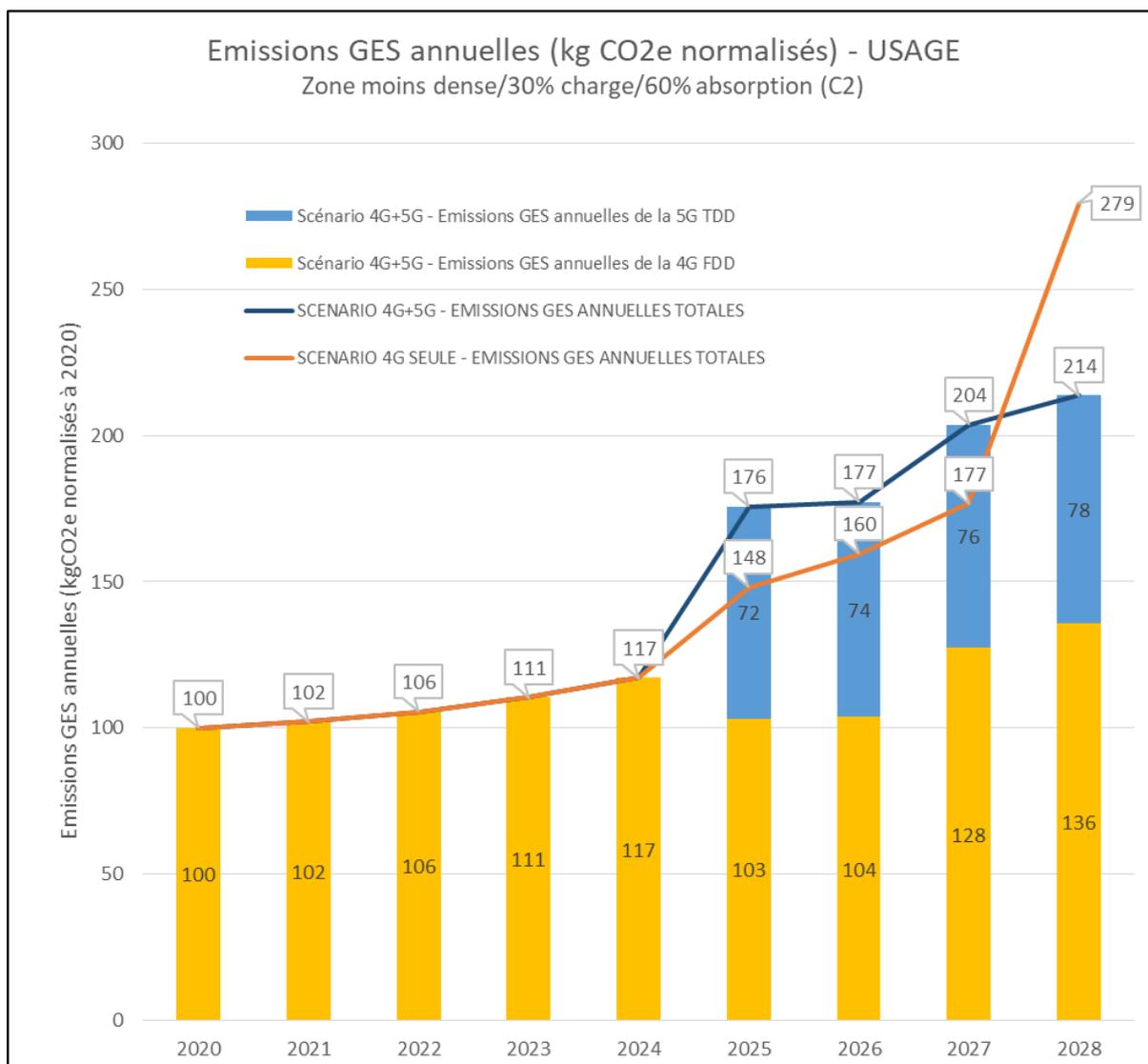


Figure 30 - Emissions GES annuelles par scénario - type de déploiement C2

Entre 2025 et 2027, l'écart d'émissions GES entre les deux scénarios reste relativement faible. Mais à partir de 2028 avec l'ajout du second site 4G, mes émissions du scénario 4G seule augmentent fortement pour représenter 1,3 fois celle du scénario 4G+5G.

La figure suivante montre l'efficacité énergétique (consommation normalisée divisée par volume de trafic normalisé) pour les deux scénarios chaque année. L'efficacité énergétique du scénario 4G seule est représentée sur la courbe orange et l'efficacité énergétique globale du scénario 4G+5G sur la

courbe bleu marine. Les courbes jaune et bleu montrent l'efficacité énergétique respective des stations de base 4G et 5G dans le scénario 4G+5G.

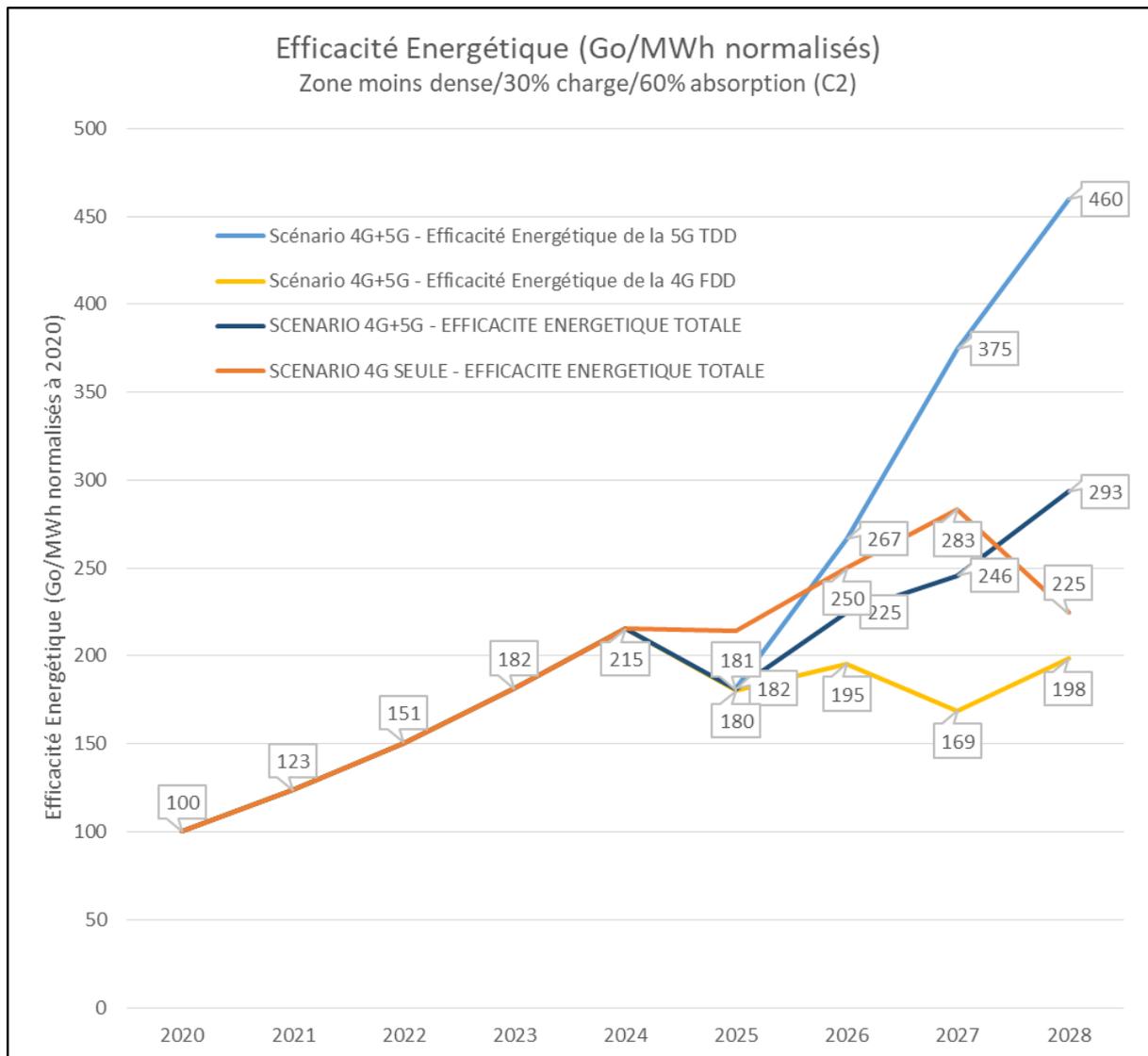


Figure 31 - Efficacité énergétique par scénario - type de déploiement C2

En 2028, l'efficacité énergétique combinée du scénario 4G+5G est 1,3 fois supérieure à celle du scénario 4G seule.

7 Annexe D : Etude de sensibilité

7.1 Etude de sensibilité sur la croissance du trafic

La croissance de trafic étant considérée parmi les éléments les plus structurants sur la dynamique des scénarii ; une analyse de sensibilité est réalisée sur ce paramètre afin d'apprécier la validité des conclusions de l'étude par rapport à la valeur de base (30% de croissance par an) en testant une valeur basse (25% de croissance par an) et une valeur haute (35% de croissance par an).

Les résultats des simulations illustrés dans Figure 32- Analyse de sensibilité en faisant varier le taux de croissance annuelle du trafic montrent une sensibilité par rapport au taux de croissance du volume de trafic et confirment le caractère structurant de ce paramètre sur l'introduction de la 5G dans le cadre des hypothèses de cette étude surtout pour les zones moins denses (type de déploiement C).

En effet, une variation à la baisse du taux de croissance du trafic de -5% par rapport au cas de base (c'est-à-dire 25% au lieu de 30%) entraîne une baisse des gains (consommations évitées) de l'ordre de 38% et 48% pour les types A, B ; en revanche, le bilan du type de déploiement C1 bascule et devient légèrement négatif (l'introduction de la 5G entraîne une augmentation de la consommation de 0,25 fois la consommation d'un site 4G (2020) par rapport à un scénario sans 5G) et dans le type de déploiement C2 l'introduction de la 5G induit un incrément de consommation de l'ordre de 1,7 fois la consommation d'un site 4G (2020).

Par ailleurs, une variation à la hausse du taux de croissance de trafic de +5% par rapport au cas de base (c'est-à-dire 35% au lieu de 30%) entraîne une hausse des gains (consommations évitées) de l'ordre de 23% à 54% pour les types A et B ; le bilan type de déploiement C2 redevient même positif alors qu'il affichait un bilan quasi-équilibré dans le cas de base. On identifie par ailleurs la même variation en ce qui concerne le gain en termes d'émission de GES en phase d'usage.

7.2 Etude de sensibilité sur les paramètres du modèle de consommation énergétique

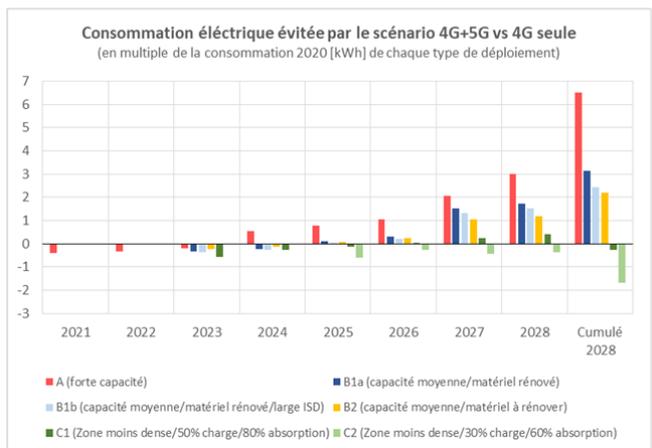
Une seconde analyse de sensibilité a été réalisée pour tester le modèle par rapport à une variation +/- 10% des paramètres (a,b) du modèle affine $(a.x+b)$ de la consommation énergétique d'une station de base 5G. A cet effet, les paramètres du modèle de consommation énergétique des stations de base 4G sont maintenues inchangés puisque les résultats des performances énergétiques du scénario « 4G+5G » sont calculés en relatif par rapport au scénario 4G. Les résultats de cette analyse de sensibilité en ce qui concerne l'impact sur les consommations et émissions évitées (respectivement sur le ratio d'efficacité énergétique totale du scénario 4G+5G sur l'efficacité énergétique totale du scénario 4G) sont illustrés en Figure 33 (respectivement Figure 34).

Une variation à la hausse des paramètres (a,b) c à d en considérant des équipements 5G plus énergivores entraîne une baisse assez faible des consommations évitées par le scénario 4G+5G vs 4G seule, cette baisse des émissions évitées cumulées en 2028 est de l'ordre de -5% à -10% pour les types A et B et jusqu'à -20% pour le type C1. En termes de ratio d'efficacité énergétique totale 4G+5G sur l'efficacité énergétique totale de la 4G seule en 2028, une baisse inférieure à 5% a été calculée pour tous les types.

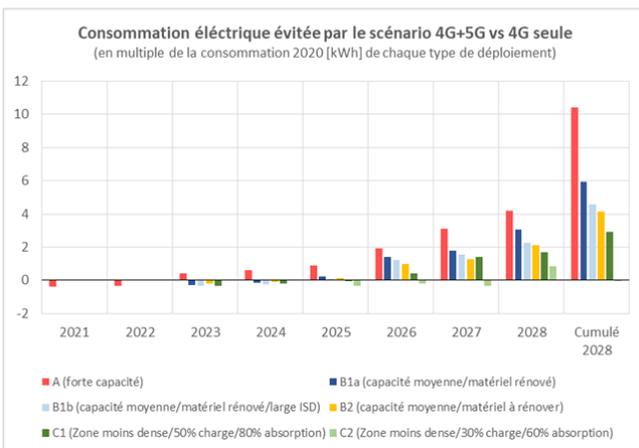
Une variation à la baisse des paramètres (a,b) c à d en considérant des équipements 5G plus économes énergétiquement entraîne une amélioration des consommations évitées cumulées en 2028 de l'ordre de 5% à 10% pour les types A et B et jusqu'à 20% pour les types C. En ce qui concerne le ratio d'efficacité énergétique totale 4G+5G sur l'efficacité énergétique totale de la 4G seule en 2028, les mêmes magnitudes d'amélioration sont également calculées.

Ces résultats indiquent la faible sensibilité du modèle par rapport aux paramètres du modèle de consommation énergétique considérés dans l'étude (surtout pour les types de déploiement à forte charge/densité d'utilisateurs c à d type A et B) et confirment que le rythme de croissance constitue l'élément le plus structurant susceptible de jouer sur la sensibilité des résultats et les conclusions de la note.

Croissance annuelle = 25%



Croissance annuelle = 30%



Croissance annuelle = 35%

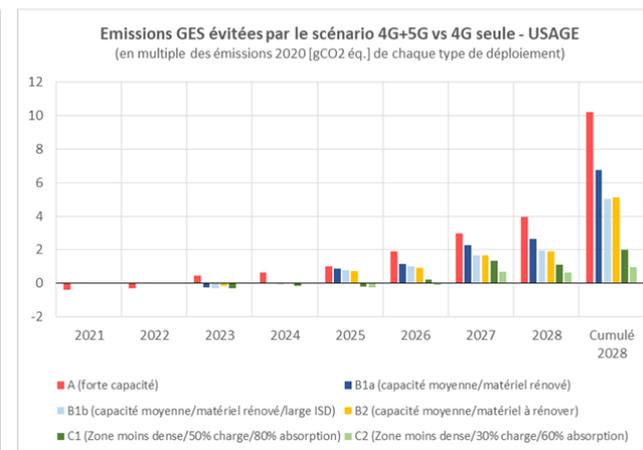
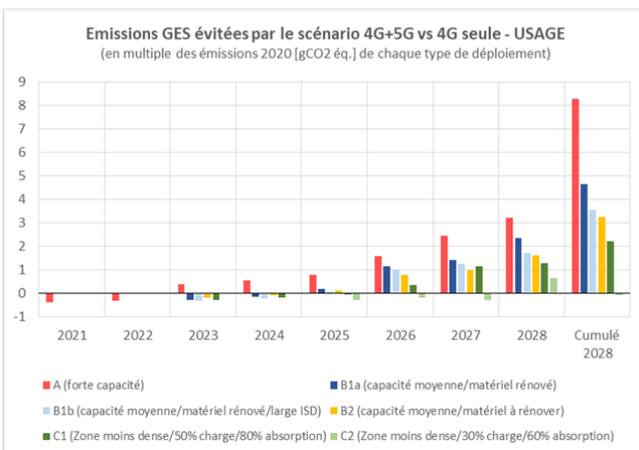
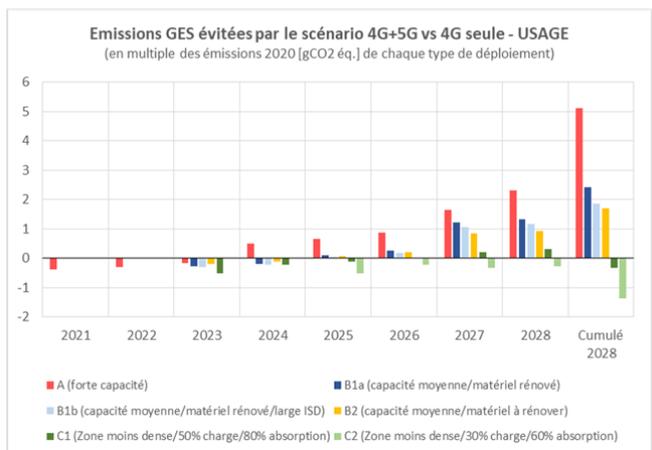
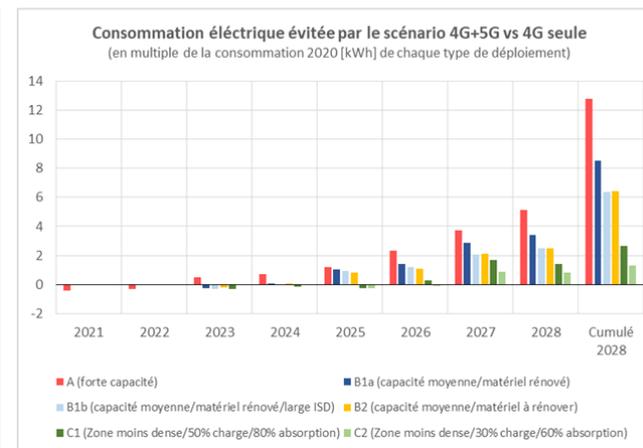
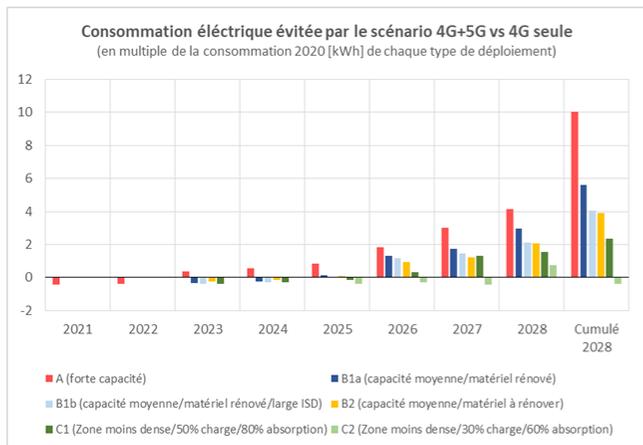
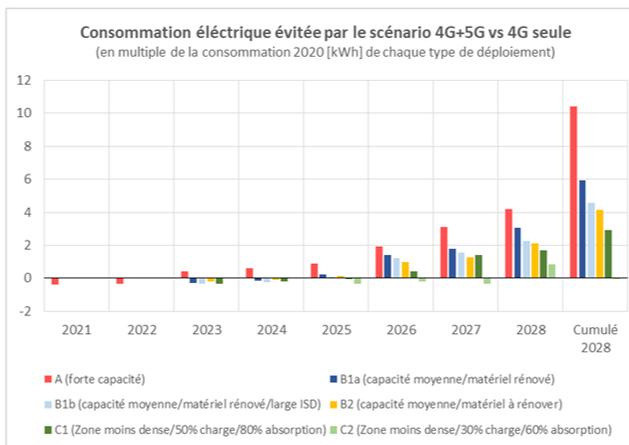


Figure 32 - Analyse de sensibilité en faisant varier le taux de croissance annuelle du trafic

5G (a;b) = +10%



5G (a;b) = valeurs nominales



5G (a;b) = -10%

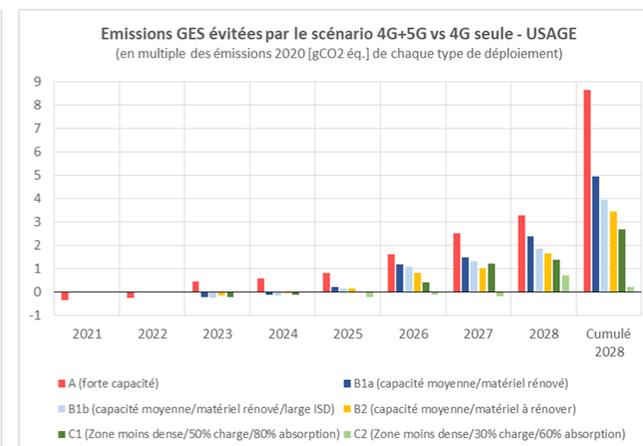
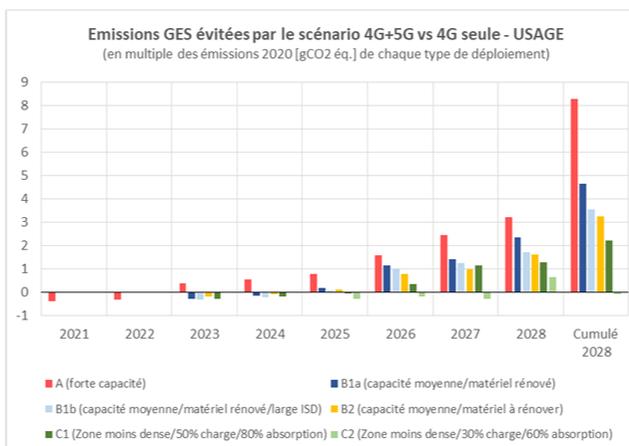
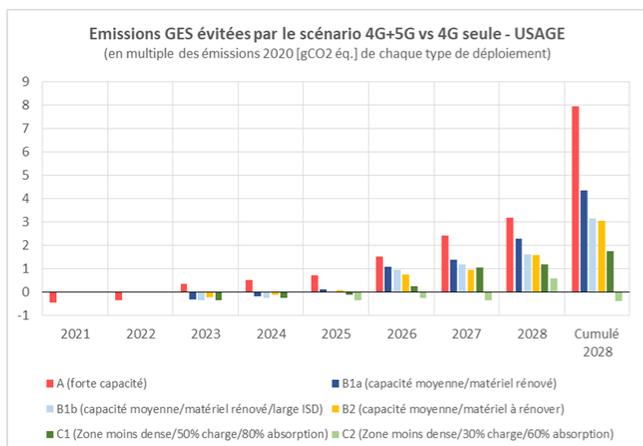
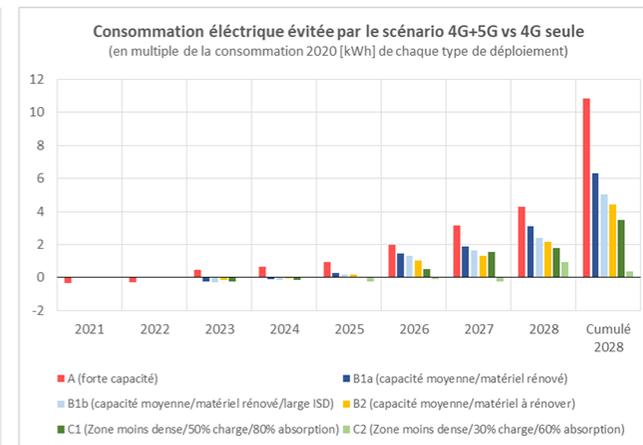


Figure 33- Analyse de sensibilité en faisant varier les paramètres du modèle de consommation énergétique des stations de base 5G

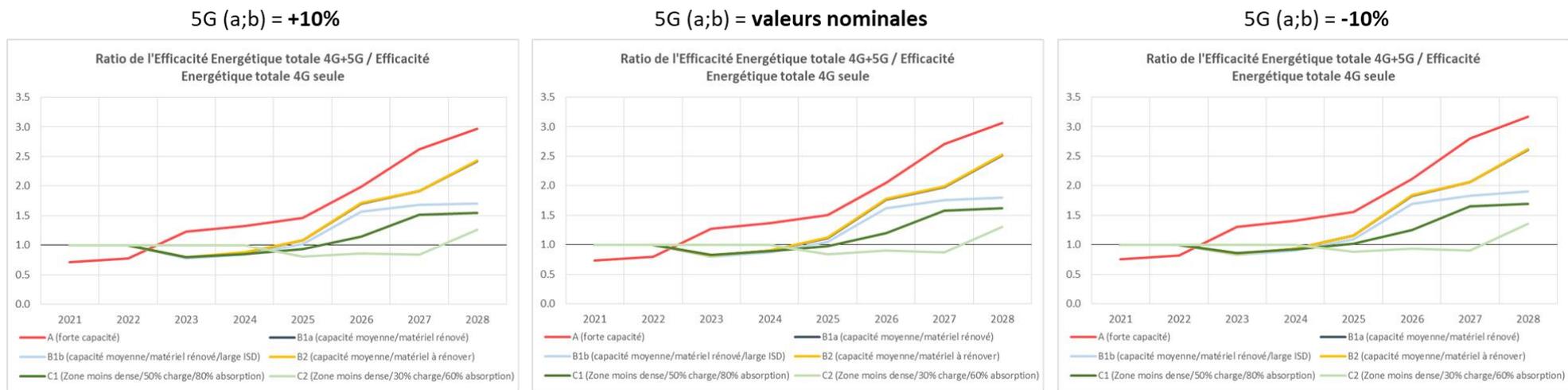


Figure 34 - Résultats d'analyse de sensibilité sur l'indicateur du ratio de l'efficacité énergétique totale 4G+5G / efficacité énergétique totale 4G seule en faisant varier les paramètres du modèle de consommation énergétique des stations de base 5G

8 Annexe E : Analyse de la transparence et qualification des données de consommation électrique utilisées dans l'étude

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 de consommation électrique 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-T²⁶.

La note est transparente sur la façon dont les données de consommation énergétique ont été collectées : elles proviennent d'une modélisation basée sur des consommations électriques mesurées en laboratoire par un équipementier qui est représenté dans le comité. Cette modélisation est décrite dans l'annexe A. 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 15.

Tableau 15 - Grille de qualification des données selon la recommandation L.1410 de l'ITU

Indicateur	Fourchette possible de qualification				
	Très bien	Bien	Correct	Médiocre	Très médiocre
Consistance méthodologique	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	Données calculées sur la base de mesures	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

²⁶ 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.

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 étudié issues exactement de l'entreprise	Donnée du processus étudié issues d'une entreprise avec une technologie similaire	Données du processus étudié issues d'une entreprise avec une technologie différente	Données d'un processus relatif à une entreprise avec une technologie similaire	Données d'un processus relatif 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

En se basant sur la grille de qualification ci-haut, une appréciation de la qualité des données utilisées dans l'étude est présentée dans Tableau 16 :

Tableau 16 - Appréciation de la qualité des données selon la grille de la recommandation L. 1410 de l'ITU

Indicateur de qualité	Appréciation et commentaires
Consistance méthodologique	Les différents types de données collectées (capacité des équipements radio et leurs consommations électriques) correspondant exactement à la méthodologie utilisée. Le Comité estime une cohérence totale sur une méthodologie unique appliquée sur l'ensemble de la note.
Complétude	L'étude s'est focalisée sur la partie usage uniquement sans traiter l'ensemble du cycle de vie, dont notamment l'extraction, le traitement des matières premières et la production des équipements et leur transport, la construction de sites radio et la fin de vie des équipements. Ceci est compris par le Comité, sans lien avec l'évaluation de la qualité des données de consommation électrique.
Incertitude	Dans cette étude, les paramètres sont mesurés et intégrés dans un modèle affine. Les scénarios utilisent ce modèle sans procédure d'allocation au sens de la Recommandation L.

	<p>1410. Pour le fournisseur concerné, et en fonction des connaissances à date, les incertitudes sont donc limitées au mieux de ce qui peut être fait.</p> <p>Les autres fournisseurs, membres du Comité, supportent aussi cette approche pour le modèle, et pour les conclusions de l'étude sur la comparaison des scénarios, réduisant ainsi également l'ensemble des incertitudes.</p> <p>Par ailleurs une analyse de sensibilité sur les paramètres du modèle de consommation énergétique des équipements contribue à limiter les incertitudes, puisque l'étude de sensibilité a démontré le peu de sensibilité à ces paramètres.</p>
Collecte des données	<p>Données mesurées et intégrées dans un modèle.</p> <p>Sur la base de Tableau 15, « Données calculées sur la base de mesure »</p>
Indépendance du fournisseur	<p>Cet indicateur est défini pour la vérifiabilité des données.</p> <p>Les équipementiers fournissent aux opérateurs mobiles, qui déploient leurs stations de bases les différentes valeurs de consommation électrique leurs permettant de dimensionner correctement l'alimentation électrique des sites radio (atelier d'énergie, disjoncteurs, câbles ...) ainsi que de réaliser des prévisionnels de consommation électrique. Par conséquent, il est de l'intérêt des équipementiers de fournir des informations de qualité.</p> <p>Les hypothèses de consommation électriques des équipements sont à basées sur celles de différentes configurations de stations de base d'un seul équipementier membre du comité, qui ont été modélisées.</p> <p>Un opérateur membre du Comité constate la cohérence des données dudit fournisseur avec les informations techniques de consommation électrique déjà reçues.</p> <p>Sur la base de Tableau 15, « Données vérifiées auprès d'une entreprise partie prenante de l'étude ». Il faut noter que cette appréciation n'apparaît pas améliorable à la publication de la note (appréciation « Données vérifiées auprès d'une source indépendante »), et que la publication des valeurs des paramètres modélisés ne changerait pas cette qualification.</p>
Représentativité des données	<p>L'approche avec les différents cas de déploiement basé sur du matériel déployé en France permet sur la base du Tableau 15 la qualification « Données représentatives d'un échantillon suffisant de sites sur une période adéquate y compris les fluctuations anormales »</p>
Age des données	< 3 ans
Corrélation géographique	Sur la base de Tableau 15, « Données de la région exacte »
Corrélation technologique	Sur la base de Tableau 15, « Données du processus étudié issues exactement de l'entreprise »
Règles d'inclusion ou d'exclusion	Sur la base de Tableau 15, « Transparents, justifiés et une application homogène »

9 Glossaire

- **TDD** : *Time Division Duplexing*: C'est un mode de duplexage qui permet de multiplexer sur la même bande de fréquence l'émission et la réception à des créneaux temporels distincts. C'est le mode qui est utilisé par la 5G sur la bande 3,5 GHz.

- **FDD** : *Frequency Division Duplexing* : C'est un mode de duplexage dans lequel l'émission et la réception se font simultanément mais sur deux bandes de fréquence distinctes. C'est le mode qui est utilisé par la 4G et éventuellement la 5G sur les bandes basses et moyennes.
- **(Massive) 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. On parle de massive MIMO en cas de déploiement d'un grand nombre d'éléments antennaires.
- **AAS** : *Active Antenna System* ²⁷: Selon la Recommandation UIT-R M.2101, un système mobile de télécommunications utilisant un AAS contrôlera activement tous les signaux individuels transmis aux éléments d'antenne individuels dans le réseau d'antennes afin de façonner et orienter le diagramme d'émission d'antenne vers une forme souhaitée, par ex. un faisceau étroit vers le récepteur du terminal d'un utilisateur. Dans cette étude, une station de base 5G AAS dans la bande 3,5 GHz est composée d'un module BBU et de 3 antennes actives (voir ci-après définitions).
- **Refarming** : C'est le procédé qui consiste à réutiliser une bande de fréquence d'une ancienne technologie vers une nouvelle technologie.
- **ISD** : *Inter-Site Distance* : Il s'agit de la distance séparant deux sites voisins d'un réseau
- **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.
- **Module RF ou Module radiofréquence**: Termes généraux synonymes pour un équipement de la station de base en charge du traitement du signal radio (amplification, filtrage etc.). Il peut s'agir ou bien d'un RRU, ou d'une antenne active d'un système AAS.
- **RRU** : *Radio Remote Unit* : Il s'agit d'un module radiofréquence (module RF) de la station de base rattaché à une antenne passive par des câbles coaxiaux et relié au module BBU par une fibre optique.
- **Antenne active d'un système AAS** : Différents éléments d'antenne individuels sont regroupés dans la même antenne physique pour former un faisceau pointant dans la direction du récepteur du terminal. Cette antenne active est reliée au module BBU par une fibre optique.
- **xTyR** : Caractéristique d'un module RF qui définit son nombre x d'émetteurs et son nombre y de récepteurs (x,y :2, 4 ... 32, 64).
- **DSS** : *Dynamic Spectrum Sharing* : Il s'agit d'une technique permettant un partage dynamique (en fonction de la charge de trafic) d'une bande de fréquence entre deux ou plusieurs technologies. Les opérateurs exploitent la technique DSS pour une introduction progressive de la technologie 5G en partageant le spectre existant avec de la 4G.

10 Bibliographie et références

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

²⁷ Voir également le chapitre 4.2.2 du Rapport 67 de la CEPT pour plus d'informations. Ce glossaire a utilisé la même démarche, en partant de la définition fonctionnelle d'un système AAS sur la base de la Recommandation UIT-R M.2101, et en précisant ensuite l'implémentation physique du système AAS pris en compte dans l'étude.

- Ericsson Mobility Report – Juin 2020
- The Avoided Emissions Framework (AEF)- Novembre 2019
- ITU L.1410 “Impact environnemental des produits, réseaux et services des technologies du numérique » - Décembre 2014
- ETSI ES 202 706-1 V1.6.1 « Métriques et méthodes de mesure pour l’efficacité énergétique des équipements de réseau d’accès sans fil » - Janvier 2021
- ETSI ES 203 228 V1.3.1 « Ingénierie Environnementale (EE) ; évaluation de l’efficacité énergétique d’un réseau mobile » - Octobre 2020
- CEPT Rapport 067 – Juillet 2018 accessible via : <https://docdb.cept.org/document/3357>

11 Annexe F : Composition du Comité d’experts technique

- Présidence du Comité : Catherine Mancini
- Secrétariat : ARCEP
- ANFR : Adrien Demarez/Didier Chauveau
- Bouygues Télécom : Cédric Levasseur, Vincent Lemoine, Vincent Merat
- Ericsson : Zied Malouche, Arnauld Taffin
- Free Mobile : Bertand Fiévet, Damien Genouville
- Huawei : Michael Jolly, Jérôme Danneel
- Orange : Jean-Philippe Desbat/Sabrina Saudai, Franck Payoux, Catherine Cano-Menda
- Nokia : Edouard Pereira
- SFR : Benoit Thuillier, Pierre Lescuyer
- Telecom ParisTech : Marceau Coupechoux