



RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE

*Liberté
Égalité
Fraternité*

ADEME



AGENCE DE LA
TRANSITION
ÉCOLOGIQUE

HORIZONS

TRANSITION(S) 2050

CHOISIR MAINTENANT
AGIR POUR LE CLIMAT

Feuilleton

Numérique

Quels impacts environnementaux
dans une France neutre en carbone
en 2050 ?



Ce document est édité par l'ADEME et l'Arcep

ADEME

20, avenue du Grésillé
BP 90406 | 49004 Angers Cedex 01

Arcep

14, avenue Gerty Archimède
75012 Paris

Retrouvez les scénarios ADEME en ligne sur www.ademe.fr/les-futurs-en-transition

Numéro de contrat : 2020MA000091

Étude réalisée pour le compte de l'ADEME et de l'Arcep par : LCIE Bureau Veritas, IDATE

Crédits photo : Shutterstock

Conception éditoriale et graphique : bearideas

Rédaction : Erwann Fangeat (ADEME) et Adrien Haïdar (Arcep)

Brochure réf. 012105

ISBN : 979-1-02-972118-2

Dépôt légal : © ADEME Éditions, mars 2024

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite selon le Code de la propriété intellectuelle (art. L. 122-4) et constitue une contrefaçon réprimée par le Code pénal. Seules sont autorisées (art. 122-5) les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé de copiste et non destinées à une utilisation collective, ainsi que les analyses et courtes citations justifiées par le caractère critique, pédagogique ou d'information de l'œuvre à laquelle elles sont incorporées, sous réserve, toutefois, du respect des dispositions des articles L. 122-10 à L. 122-12 du même Code, relatives à la reproduction par reprographie.

Rappel des conclusions des premiers travaux

Ce feuilletton s'inscrit dans le travail de prospective énergie ressources « **Transition(s) 2050. Choisir maintenant. Agir pour le climat** » présenté le 30 novembre 2021 qui comprend les travaux initiaux et 17 feuillets dont la publication s'étend de février 2022 à mars 2024. L'ensemble des documents publiés est disponible sur www.ademe.fr/les-futurs-en-transition.

Le Gouvernement a avancé sur la planification écologique, en mettant en consultation une trajectoire climatique et énergétique. Dans ce contexte, les scénarios de l'ADEME restent pertinents pour nourrir les réflexions et contribuer aux débats dans la mesure où ils ont été construits sur la base d'hypothèses volontairement fortes et contrastées qui, de par leur gradation entre sobriété et innovation, illustrent des chemins types. Ils sont donc toujours d'actualité pour faire réfléchir décideurs et citoyens sur le modèle de société qu'ils souhaitent promouvoir pour atteindre la neutralité carbone.

Les quatre scénarios aboutissent tous à la neutralité carbone mais avec des voies différentes. Avant tout, ils ont pour objectif de faire prendre conscience à

tout un chacun, quel que soit son niveau de responsabilité et d'implication dans la construction de ce cheminement, de la nature des transformations et des choix à faire.

Ils sont le résultat de plus de 4 ans de travaux mobilisant plus d'une centaine d'experts de l'ADEME ainsi que des partenaires extérieurs de différents milieux professionnels et académiques, mais également un comité scientifique, constitué de membres du conseil scientifique de l'Agence et complété de personnalités qualifiées.

Pour chaque scénario, l'ADEME a construit un récit cohérent, décliné dans chaque secteur technique, économique et social, au travers de variables structurantes. La description des scénarios couvre les secteurs du bâtiment, de la mobilité des voyageurs et du transport de marchandises, de l'alimentation, de l'agriculture, des forêts, de l'industrie, des déchets et des services énergétiques (fossiles, biocarburants, gaz, hydrogène, chaleur/froid et électricité). Les quatre scénarios et les mots clés qui les caractérisent sont les suivants :

 S1 GÉNÉRATION FRUGALE	 S2 COOPÉRATIONS TERRITORIALES	 S3 TECHNOLOGIES VERTES	 S4 PARI RÉPARATEUR
<ul style="list-style-type: none"> • Frugalité contrainte • Villes moyennes et zones rurales • Low-tech • Rénovation massive • Nouveaux indicateurs de prospérité • Localisme • Moins de viande 	<ul style="list-style-type: none"> • Modes de vie soutenables • Économie du partage • Gouvernance ouverte • Mobilité maîtrisée • Fiscalité environnementale • Coopérations entre territoires • Réindustrialisation ciblée 	<ul style="list-style-type: none"> • Technologies de décarbonation • Biomasse exploitée • Hydrogène • Consumérisme vert • Régulation minimale • Métropoles • Déconstruction/reconstruction 	<ul style="list-style-type: none"> • Consommation de masse • Étalement urbain • Technologies incertaines • Économie mondialisée • Intelligence artificielle • Captage du CO2 dans l'air • Agriculture intensive

Par ailleurs, au-delà des enseignements clés, **ce travail a fait émerger six problématiques à mettre en débat :**

- La sobriété : jusqu'où ?
- Peut-on s'appuyer uniquement sur les puits naturels de carbone pour atteindre la neutralité ?
- Qu'est-ce qu'un régime alimentaire durable ?

- Artificialisation, précarité, rénovation : une autre économie du bâtiment est-elle possible ?
- Vers un nouveau modèle industriel : la sobriété est-elle dommageable pour l'industrie française ?
- L'eau : enjeu majeur d'adaptation au changement climatique

RÉSUMÉ EXÉCUTIF

HORIZONS

Feuilleton Numérique des scénarios de Transition(s) 2050

Quels impacts environnementaux dans une France neutre en carbone en 2050 ?

À horizon 2050, l'étude s'appuie sur les quatre modèles de société conçus par l'ADEME dans le cadre de l'exercice « Transition(s) 2050 » qui aboutissent tous à la neutralité carbone du pays : S1 « Génération frugale », S2 « Coopérations territoriales », S3 « Technologies vertes » et S4 « Pari réparateur ». Ces quatre modèles de société sont déclinés à l'échelle du secteur numérique et sont comparés au scénario tendanciel dans une étude commandée par le gouvernement et réalisée pour le compte de l'ADEME et de l'Arcep [1] visant à mesurer l'impact environnemental du numérique en France à partir d'une analyse de cycle de vie.

Ce travail explore différentes places que le numérique pourrait représenter en France à l'horizon 2050 : du *low-tech* au développement massif de l'intelligence artificielle et des objets connectés. Ainsi, le numérique est développé en tant que levier pour appuyer la transition dans les différents secteurs (bâtiment, mobilité, agriculture, industrie...) de façon plus au moins intense et maîtrisée selon le contexte des quatre récits.

QUELS IMPACTS DU NUMÉRIQUE SUR LE CLIMAT ET LA CONSOMMATION D'ÉNERGIE ?

Il ressort de cette analyse que, **si rien n'est fait pour réduire son empreinte environnementale¹ (scénario tendanciel),**

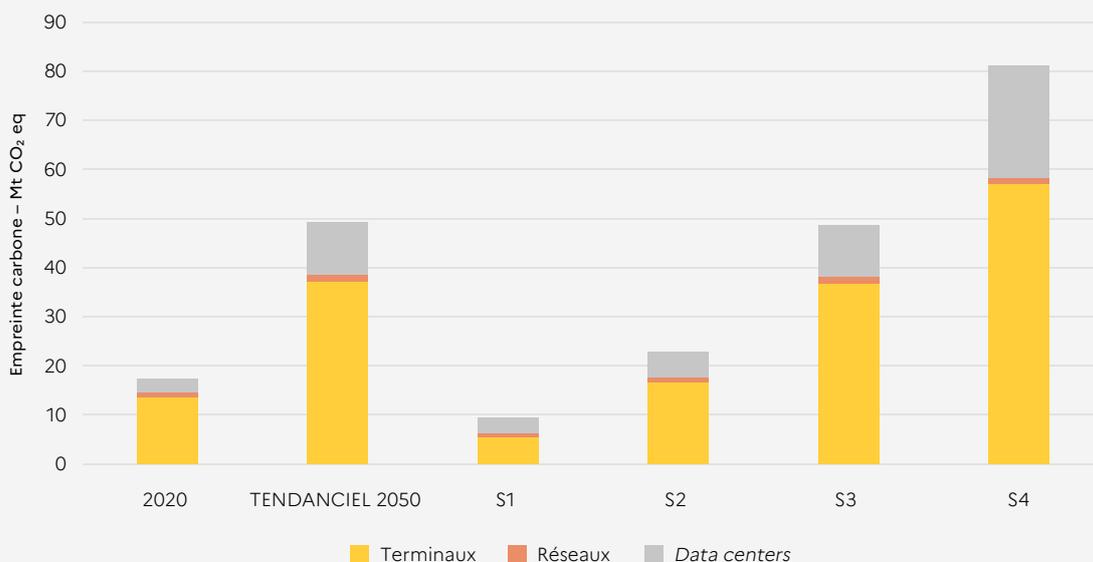
l'empreinte carbone du numérique français pourrait tripler entre 2020 et 2050 et représenter plus de 49 Mt CO₂eq (Graphique 1). La consommation électrique du numérique en France augmenterait quant à elle d'environ 80 % pour atteindre 93 TWh (dont 39 TWh dus aux centres de données), soit l'équivalent d'environ 20 % de la consommation d'électricité française actuelle (Graphique 2). Cependant, des scénarios alternatifs existent.

- Les émissions pourraient être divisées par deux par rapport à 2020 dans le cadre de S1 (soit 9,3 Mt CO₂eq) et la consommation électrique pourrait baisser de plus de 75 % (pour atteindre 12 TWh). C'est le scénario qui atténue le plus l'impact environnemental du numérique.
- À l'inverse, dans S4, l'empreinte carbone pourrait quintupler par rapport à 2020 (soit 81 Mt CO₂eq) et la consommation électrique pourrait presque tripler (x 2,6) par rapport à 2020 (et atteindre 137 TWh), du fait notamment de l'explosion des objets connectés et du développement des centres de données.

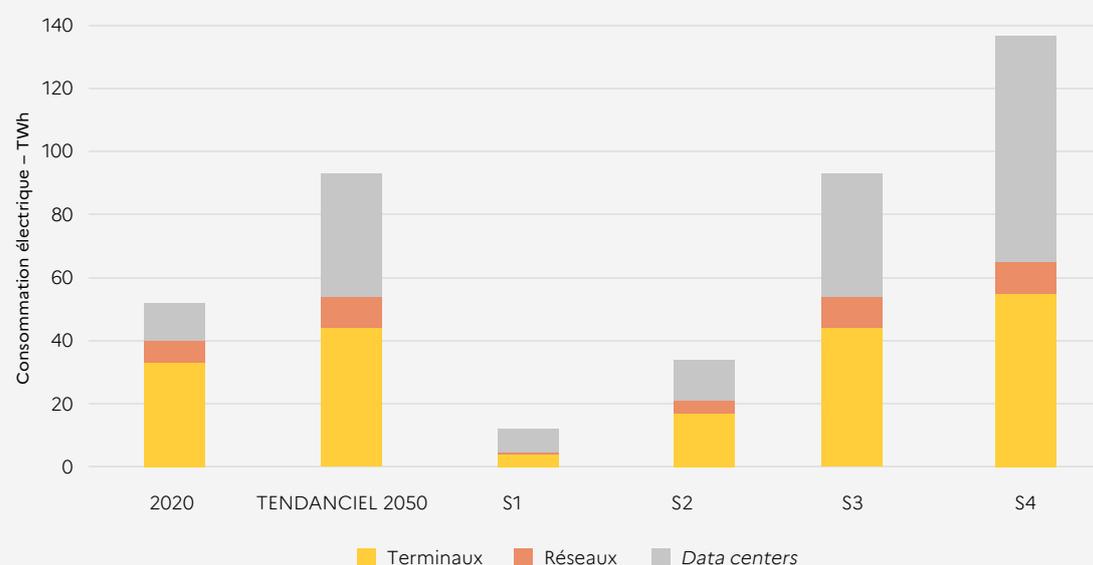
L'impact sur les besoins de matière des quatre scénarios est également très contrasté avec S4 qui doit mobiliser près de deux fois plus de matières que le scénario tendanciel, celui-ci mobilisant déjà trois fois plus de matières qu'en 2020 (Graphique 3).

¹ Empreinte environnementale sur tout le cycle de vie, incluant la fabrication des équipements numériques (qui peut être faite hors de France), la distribution, l'usage et la fin de vie.

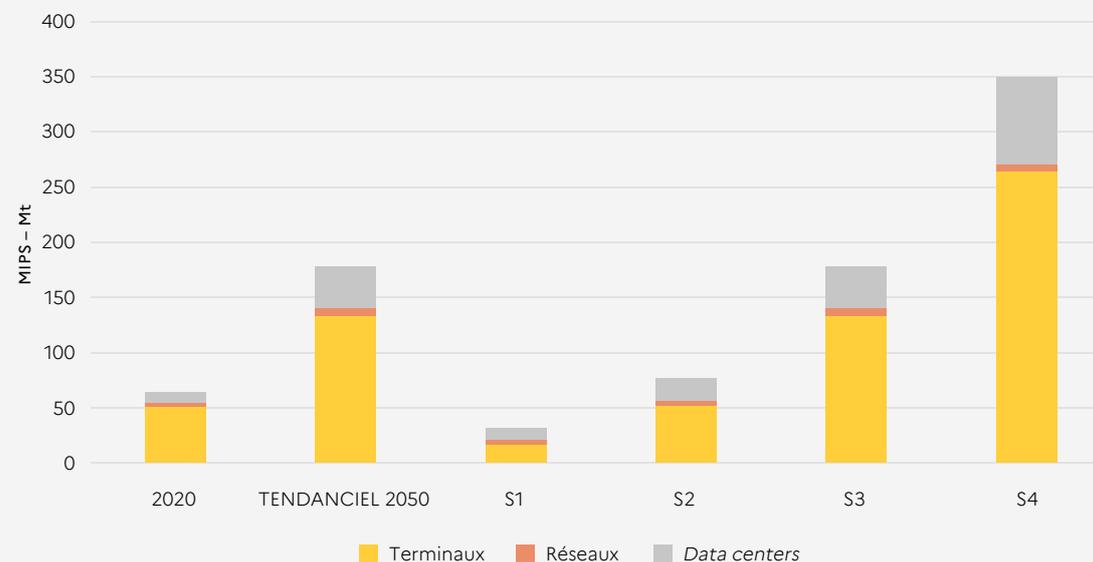
Graphique 1 Impact des biens et services numériques sur l'empreinte carbone en Mt CO₂eq



Graphique 2 Impact des biens et services numériques sur la consommation électrique en TWh



Graphique 3 Impact des biens et services numériques sur la mobilisation en ressources en Mt



LES TERMINAUX, À L'ORIGINE DE LA MAJORITÉ DES IMPACTS

- Dans tous les scénarios, **les terminaux représentent toujours la majorité de l'empreinte carbone. Les centres de données représentent ensuite l'essentiel de l'empreinte** en lien avec les besoins de stockage de données grandissants.
- Sur l'ensemble des autres critères, notamment l'épuisement des ressources abiotiques (minéraux & métaux), les terminaux représentent également la majorité de l'impact (entre 61 % et 86 % dans le scénario tendanciel). S4 implique un report d'impact particulièrement important, notamment sur les ressources abiotiques.

MESSAGES CLÉS : IMPACT SUR LES MÉTAUX STRATÉGIQUES, SOBRIÉTÉ ET ÉCOCONCEPTION

Si tous ces scénarios de Transition(s) 2050 permettent effectivement d'atteindre la neutralité carbone en émissions territoriales, cette étude montre qu'ils impliquent une part de l'empreinte carbone nationale allouée au numérique largement différente. S4, qui vise à maximiser l'utilisation du numérique pour la décarbonation d'autres secteurs, implique des reports d'impact sur d'autres critères environnementaux (notamment l'épuisement des ressources abiotiques) potentiellement très importants et pouvant questionner sa soutenabilité.

Les résultats de l'étude font prendre conscience de la trajectoire tendancielle que pourrait prendre le numérique si rien n'est fait. Les scénarios Transition(s) 2050 appliqués au secteur du numérique impliquent des changements importants de nos sociétés, notamment en matière de recherche

et développement, d'évolution des produits et services, dont certains sont encore inconnus, de modes de consommation, de modes de fabrication et de bonnes pratiques de la part des utilisateurs mais aussi des fabricants de terminaux, des opérateurs de réseaux et de centres de données.

L'étude met en évidence qu'un des enjeux environnementaux majeurs du numérique, outre son empreinte carbone, est la **disponibilité des métaux stratégiques et autres ressources utilisées pendant la phase de fabrication des terminaux**, principalement téléviseurs, ordinateurs, box internet et smartphones jusqu'en 2030, puis essor des objets connectés jusqu'en 2050, en lien notamment avec la mise en place de nouvelles technologies de réseaux mobiles.

Ainsi, il ressort que **le premier levier d'action pour limiter l'impact du numérique est la mise en œuvre de politiques de sobriété numérique qui commencent par une interrogation du besoin de nouveaux produits ou services et une réduction ou une stabilisation du nombre d'équipements.** L'allongement de la durée de vie des terminaux pour viser plus de sobriété est un axe majeur de travail, *via* la mise sur le marché d'équipements écoconçus, en développant davantage le reconditionnement et la réparation des équipements et en sensibilisant les consommateurs à ces impacts.

De la même manière, l'écoconception doit être systématisée au-delà de la seule question des terminaux et couvrir l'ensemble des équipements (réseaux et centres de données) mais également les services numériques afin de limiter le trafic nécessaire à isoservice et d'améliorer l'efficacité énergétique.

SOMMAIRE

Rappel des conclusions
des premiers travaux

3

Résumé exécutif

4

1. Contexte et
méthodologie

8

2. Méthode de l'analyse
prospective

10

3. Méthode de l'analyse
ACV

11

4. Les tendances
d'évolution du
numérique à moyen
et long terme

14

5. Description et impacts
du scénario tendanciel
2050

21

6. Déclinaison au
numérique des scénarios
ADEME de neutralité
carbone à 2050

24

7. Limites de l'étude

36

8. Bibliographie

40

1. Contexte et méthodologie

1.1. Contexte et objectif de l'évaluation

La transition numérique, initialement perçue comme vectrice d'emplois, de croissance et de nouveaux modèles économiques, modifie profondément l'ensemble des secteurs d'activités. Du domicile au travail, en passant par l'entreprise, la ville et les services publics, les services numériques sont au cœur de notre quotidien et ont bouleversé nos comportements et nos modes de consommation.

L'immatérialité des services proposés est de plus en plus remise en cause par la matérialité sous-jacente des équipements et infrastructures nécessaires au secteur numérique (énergie, ressources, etc.). Les parties prenantes (entreprises, grand public, institutions, États, administrations) demandent à présent plus de transparence sur le sujet. Celle-ci ne pourra cependant être mise en place que par la publication de données robustes et précises.

Les études et projets menés ces dix dernières années ont porté sur des thématiques précises, s'intéressant par exemple aux consommations d'énergie des centres de données, à l'obsolescence prématurée des terminaux ou encore à la gestion des déchets électroniques. D'autres études ont porté sur l'ensemble du cycle de vie des équipements du numérique, mais avec une approche monocritère ou avec peu de critères environnementaux. Depuis plusieurs années, des publications (Empreinte environnementale du numérique mondial [EENM] 2019 et Impacts du numérique en France [iNUM] 2020 de GreenIT.fr, Rapport du *Shift Project*, Étude commandée par le Sénat [2], Rapport du Haut conseil pour le climat sur la 5G [3], etc.) éclairent le débat.

Au vu de la connaissance accumulée sur le sujet des équipements et infrastructures numériques [4], est mise en évidence la nécessité d'adopter une approche plus globale, robuste et transparente qui soit à la fois :

- **multicritère**, car les impacts environnementaux du numérique ne se réduisent pas aux émissions de gaz à effet de serre ;
- **multiétape**, afin d'intégrer les impacts générés lors de toutes les étapes du cycle de vie (ACV) des équipements et sur les 3 catégories de biens et de services (les tiers) du numérique (terminal, réseau, centres de données) ;
- **multicomposant**, afin d'appréhender ce système complexe qu'est l'association des terminaux utilisateurs, centres de données et réseaux de télécommunications, tous composés d'une multitude d'équipements ayant chacun des cycles de vie propres.

Par rapport à cela, la partie logicielle qui permet le pilotage et le fonctionnement des services détermine le besoin d'équipements ainsi que les consommations électriques associées. Elle est donc considérée de manière implicite, à travers ses impacts sur le cycle de vie des équipements.

C'est là tout l'intérêt et la pertinence de la méthode standardisée que constitue l'analyse du cycle de vie.

Or, pour parvenir à un point de vue global permettant de faire des choix éclairés, il est nécessaire de s'accorder sur les données d'inventaires, les données d'impacts, les flux, les méthodes et les scénarios d'usage liés au déploiement des services du secteur numérique à un instant donné. Cette approche permet également, de manière dynamique, d'anticiper les évolutions à venir.

Le Gouvernement a confié, le 6 août 2020, la réalisation d'une étude conjointe à l'ADEME et à l'Arcep sur l'évaluation de l'impact environnemental du numérique en France [1]. Le 19 janvier 2022, l'ADEME et l'Arcep ont remis les deux premiers volets du rapport au Gouvernement :

Le premier volet sur les enjeux méthodologiques de la mesure souligne la nécessité de procéder à une évaluation complète basée sur une ACV multicritère, le besoin d'une cohérence entre les méthodologies et la disponibilité de données.

Le deuxième volet du rapport évalue, selon cette méthodologie, l'impact environnemental du numérique en France en 2020 d'où il ressort que :

- l'empreinte carbone générée par un an de consommation de biens et services numériques en France en 2020 représente 2,5 % de l'empreinte carbone nationale, soit 17,2 Mt CO₂eq ;
- les terminaux représentent 79 % de l'empreinte carbone du numérique, les centres de données 16 % et les réseaux 5 % ;
- l'épuisement des ressources abiotiques (minéraux & métaux) ressort comme un critère pertinent pour décrire l'impact environnemental du numérique ;

- la phase de fabrication concentre l'essentiel des impacts environnementaux. Elle représente 78 % de l'empreinte carbone et la phase d'utilisation 21 % (et 1 % pour la phase de distribution).

Le troisième volet propose une analyse prospective à 2030 et 2050 de l'impact environnemental du numérique en France en projetant un tendanciel et plusieurs scénarios alternatifs. Dans le présent document, seuls les résultats de 2050 et du scénario tendanciel de 2030 sont présentés car les scénarios 2030 de l'étude ne correspondent pas à ceux de Transition(s) 2050. Par ailleurs, les données de l'étude sur le numérique sont en empreinte et non pas en émissions territoriales² comme l'exercice initial de Transition(s) 2050. Pour une comparaison des données, se reporter au feuillet *Évaluation des empreintes carbone et matières* [5].

Cet exercice de prospective est par nature complexe ; il l'est d'autant plus pour un secteur en évolution très rapide caractérisé par de nombreux effets croisés internes et des externalités positives ou négatives sur les autres secteurs qui ne peuvent ici pas être pris en compte. Ce travail constitue néanmoins une première approche pour mesurer et évaluer les chemins à parcourir et les défis à relever pour le numérique. Pour ce faire, cet exercice prospectif repart de la méthodologie développée dans le deuxième volet de l'étude initiale qui décompose le numérique en trois briques (terminaux, réseaux et centres de données) selon une approche d'analyse de cycle de vie (ACV) multicritère.

Les analyses prospectives à horizon 2050 ont été réalisées en s'appuyant sur les évolutions technologiques attendues (évolution des équipements terminaux, réseaux et centres de données) et sur les évolutions d'usage. Le potentiel de réduction de consommation lié à l'émergence de nouvelles technologies et aux mesures d'efficacité énergétique a également été pris en considération. Afin d'étayer les analyses présentées dans ces travaux, des groupes de travail ont été constitués avec une sélection d'acteurs experts du domaine.

Dans le cadre de ces différents travaux, les analyses sont basées sur des recherches documentaires, des données chiffrées actuelles et de prospective. Par ailleurs, des analyses issues d'échanges, d'entretiens avec différents experts des domaines numériques ont également été réalisées afin de partager les orientations, visions et hypothèses. Pour autant, il demeure des incertitudes liées aux échéances lointaines de la réflexion (2030-2050). Enfin, des

limites sont clairement identifiées et présentées afin de préciser les périmètres de réalisation de ces travaux. En effet, les difficultés sont liées par exemple au changement technologique, aux nouvelles évolutions et technologies qui pourraient se faire jour dans le futur et qui ne peuvent à ce stade être documentées, évaluées, quantifiées à leur plus juste valeur. L'identification des limites de l'analyse (précisions sur les hypothèses, qualité des données, limitations méthodologiques relatives au besoin de raffinement de la modélisation) permettra par ailleurs de déterminer les pistes d'amélioration dans le cadre d'exercices futurs afin de contribuer à forger une estimation de plus en plus robuste et précise de l'évolution de l'impact environnemental du numérique en France.

1.2. Périmètre de l'étude

Cette étude permet de quantifier les impacts environnementaux des équipements et infrastructures numériques en France à horizon 2050, conformément aux trois catégories de biens et de services numériques (les tiers) présentées ci-dessous :

- les **terminaux** fixes et mobiles présents en France tels que les téléviseurs, ordinateurs, tablettes, objets connectés, smartphones, etc. ;
- les **réseaux** déployés ;
- les **centres de données** tels que définis par les normes ISO 30134 et EN 50 600 et tout ce qu'ils contiennent (notamment les équipements informatiques tels que les serveurs, les équipements réseaux et baies de stockage).

Elle couvre l'ensemble des infrastructures et équipements utilisés en France relatifs aux services numériques : ainsi, par exemple, sont uniquement pris en considération les centres de données localisés en France quelle que soit la provenance des données qu'ils hébergent. Les données qui pourraient être hébergées à l'étranger et les centres de données qui les hébergent ne sont donc pas comptabilisés. Néanmoins, dans une approche « cycle de vie », sont aussi pris en considération l'ensemble des impacts environnementaux au-delà des frontières tels que la fabrication des équipements à l'étranger. La partie logicielle (impacts liés aux ressources humaines tels que le transport, le chauffage ou la nourriture, mais aussi l'influence du code sur la consommation de ressources matérielles et énergétiques) n'est pas couverte par cette étude.

² Les inventaires territoriaux calculent la quantité de GES physiquement émise à l'intérieur du pays alors que l'empreinte inclut en plus les émissions des activités économiques étrangères dont la production est destinée aux importations et déduit les émissions territoriales liées à la fabrication des produits exportés.

2. Méthode de l'analyse prospective

2.1. Objectifs et méthode de l'analyse prospective

Les analyses prospectives à horizon 2050 ont été réalisées en s'appuyant sur les évolutions technologiques attendues (évolution des équipements terminaux, réseaux et centres de données) et sur les évolutions des modèles de gouvernance, des modèles économiques et territoriaux du numérique ainsi que des modes de consommation.

L'analyse repose sur une démarche pluridisciplinaire et suppose d'intégrer un processus d'intelligence collective. Afin de garantir une vision partagée, un groupe de travail a suivi les étapes d'élaboration de cette analyse prospective. Il était composé d'acteurs du numérique et d'experts du groupement, sur l'ensemble de la chaîne de valeur :

- opérateurs de réseaux fixes et mobiles (Orange, SFR, Iliad) ;
- équipementiers (Apple, Nokia, Ericsson, HPE) ;
- syndicats professionnels (FIEEC, AFNUM) ;
- acteurs du contenu et du logiciel (Ekimetrics) ;
- chercheurs et ingénieurs (Françoise Berthoud, Philippe Bihoux, Gauthier Roussilhe) ;
- association (INR) ;

- acteur public (DINUM) ;
- experts du groupement (Deloitte, Negaocet et IDATE) ;
- experts de l'ADEME et de l'Arcep.

2.2. Analyse prospective 2050

L'analyse prospective à 2050 vise à dégager des tendances d'évolution du numérique et n'a pas vocation à déterminer des trajectoires normatives/prescriptives en tant que telles à cet horizon. Elle s'appuie sur les tendances identifiées dans le cadre de la prospective à 2030 (voir étude complète [1]). Elle n'a donc pas vocation à identifier de nouvelles tendances. Le travail a été mené en 4 étapes :

- construction des hypothèses du scénario tendanciel 2050 à partir de la littérature, d'interviews d'experts et de la prolongation de tendance quand la donnée n'était pas disponible ;
- analyse des inducteurs présentés dans les 4 scénarios de Transition(s) 2050 ;
- construction des hypothèses des 4 scénarios ;
- injection des hypothèses dans la modélisation ACV conçue dans le volet 2.

3. Méthode de l'analyse ACV

3.1. Méthodologie de l'ACV

La méthodologie de l'ACV est décrite dans le rapport du volet 2 de l'étude ADEME-Arcep [1].

3.2. Périmètre ACV de l'étude prospective

Dans le cadre de ce travail, l'objectif est d'apporter les dernières connaissances (2019-2020) sur les impacts environnementaux des technologies numériques, en utilisant la méthode ACV décrite dans le cadre du volet 2, sur le périmètre français. Seuls les impacts directs sont comptabilisés. Les impacts indirects, positifs et négatifs (tels que les effets rebond directs ou indirects, la substitution, les changements structurels), ne sont pas pris en compte. Il s'agit ici d'une ACV attributionnelle³. Les paragraphes suivants fournissent des détails sur le périmètre de l'étude, c'est-à-dire :

- unité fonctionnelle ;
- limites du système : inclusion, exclusion ;
- représentativité géographique, temporelle et technologique ;
- phase du cycle de vie considérée.

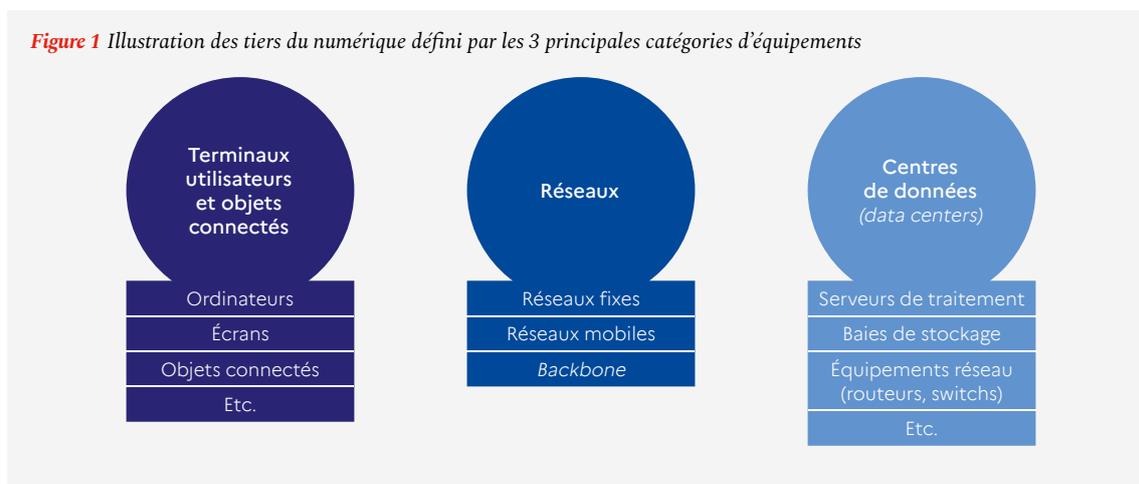
3.3. Système de produits à étudier

3.3.1. Frontières technologiques

Le périmètre des équipements et infrastructures numériques à l'échelle française couvre trois catégories d'équipements également appelés « tiers ».

- **Tiers 1 – Terminaux utilisateur final et IoT (*Internet of Things* ou objets connectés)** : comprend les terminaux utilisés par les utilisateurs finaux tels que les ordinateurs, téléphones, les écrans, les box TV, consoles de jeux et les objets connectés (notamment les capteurs, la domotique...).
- **Tiers 2 – Réseau** : comprend les infrastructures réseau pour les échanges de données entre les terminaux des utilisateurs finaux et les centres de données. Le réseau est composé d'un réseau fixe, d'un réseau mobile et d'un réseau dorsal (*backbone*).
- **Tiers 3 – Centres de données** : comprend les équipements liés à l'hébergement et au traitement des données (serveurs, disques, équipements réseau, etc.).

Figure 1 Illustration des tiers du numérique défini par les 3 principales catégories d'équipements



³ Quantification des impacts environnementaux associés à un produit, un service ou un système, en les rapportant à la fonction principale du système étudié.

3.3.2. Limites temporelles

Cette étude porte sur l'ensemble des équipements et infrastructures numériques en France à horizon 2050. Les données s'appuient sur les travaux du volet 2 pour 2020, auxquelles on applique des taux de croissance annuels moyens pour parvenir au scénario tendanciel 2050 et à chacun des quatre scénarios. Dans la mesure du possible, les données sélectionnées pour le scénario tendanciel sont sourcées.

3.3.3. Limites géographiques

Le périmètre géographique considéré dans cette étude est composé d'équipements informatiques situés en France. Les équipements et infrastructures informatiques situés à l'étranger sont exclus, quand bien même ils seraient associés à des usages français.

Cette approche est une des limites de l'étude, car certaines utilisations des services numériques font appel à des centres de données situés hors du territoire national ; de même, certains centres de données situés en France sont sollicités pour des usages hors France. Dans les deux situations, il est difficile d'identifier les ressources physiques (serveurs, kilowattheures, disques de stockage) associées à un usage France ou hors territoire. Par exemple, un centre de données d'un grand groupe français peut héberger les données des utilisateurs et des filiales situés en Europe et une vidéo peut transiter par plusieurs centres de données situés dans plusieurs pays avant d'être visionnée par un utilisateur en France.

3.3.4. Territoires et départements d'Outre-mer

Les territoires et départements d'Outre-mer ont des spécificités propres, en termes de mix électrique, de typologies de réseaux, d'équipements, de logistique, etc. Ils ont cependant été inclus dans le périmètre, mais leur spécificité est absorbée dans les impacts globaux sans distinction particulière : l'ensemble des équipements et leurs impacts associés sont considérés.

3.4. Périmètre et limites du système

3.4.1. Phase du cycle de vie considérée

Au cours de cette étude, nous considérons les phases de cycle de vie suivantes :

1. L'étape de fabrication : comprend l'extraction des matières premières, les transports en amont et les procédés de fabrication ;

2. L'étape de distribution : comprend la distribution entre le fabricant et le site d'installation ;

3. L'étape d'utilisation : comprend au minimum la production d'électricité consommée (incluant le cycle de vie de la production et de la distribution électrique) utilisée par les équipements informatiques ;

4. L'étape de fin de vie : comprend le traitement de fin de vie des équipements informatiques.

3.4.2. Exclusion

Les flux suivants ont été exclus de l'étude :

- centres de données exploitant des données consultées en France, mais situés à l'étranger ;
- l'éclairage, le chauffage, l'assainissement et le nettoyage des installations produisant les équipements, faute de données ;
- le transport des salariés, considéré en dehors des frontières de l'exercice ;
- la fabrication et la maintenance des outils de production, faute de données ;
- la construction et la maintenance des infrastructures liées à la production des équipements, faute de données ;
- les flux des services administratifs, de gestion et de R&D, considérés hors des frontières de l'exercice ;
- la commercialisation des produits, considérée hors des frontières de l'exercice ;
- la restauration du personnel, considérée hors périmètre de l'ACV ;
- les activités de maintenance, réparation, reconditionnement informatique, faute de données homogènes sur tous les tiers concernant les pièces et consommables utilisés pour la maintenance ;
- l'impact des salariés des secteurs informatiques et notamment de la conception, du développement, de la distribution et de la maintenance des logiciels : transport, bureau, déjeuner, etc. considérés comme hors champ de l'ACV (ces aspects sont généralement pris en compte dans les approches des sites ISO 14001) ;
- réseaux TV/radio, en raison du manque d'informations concernant les équipements constitutifs (données d'inventaire du cycle de vie et quantitatifs d'équipements) ;

- réseaux d'entreprise, en raison du manque d'information concernant les équipements constitutifs (données d'inventaire du cycle de vie et quantitatifs d'équipements) ;
- RTPC (Réseau Téléphonique Public Commuté), en raison du manque d'information sur les équipements constitutifs (données d'inventaire du cycle de vie et quantitatifs d'équipements) ;
- certains appareils électroniques grand public comme les lecteurs multimédia, les appareils photo, le GPS, la partie connectée des véhicules, sont considérés comme hors du champ de l'étude en raison du manque d'information concernant l'équipement constitutif.

INDICATEURS RETENUS

Dans cette étude, les indicateurs retenus sont ceux proposés par la Commission européenne dans le cadre du projet *Product Environmental Footprint* (PEF), en utilisant le PEF 3.0 [6].

Afin d'être le plus compréhensible possible et de concentrer l'analyse sur des sujets appropriés, il est largement admis de réduire le panel complet d'indicateurs à une sélection appropriée. Ces indicateurs ont été sélectionnés sur la base des résultats normalisés et pondérés.

Dans un objectif d'analyse multicritère de l'impact environnemental, les indicateurs sélectionnés pour cette étude concernent :

- épuisement des ressources abiotiques naturelles (minérales et métaux) ;
- épuisement des ressources abiotiques naturelles (fossiles) ;
- radiations ionisantes ;
- émissions de particules fines ;
- création de particules fines ;
- création d'ozone photochimique ;
- MIPS (*Material per Input Service unit*), impact sur l'environnement en tonnes de matières mobilisées par la fabrication ou les services d'un produit ;
- consommation d'énergie primaire ;
- consommation d'énergie finale.

4. Les tendances d'évolution du numérique à moyen et long terme

Selon une étude Cisco de 2018 [7], l'utilisation de l'internet et des services numériques par les utilisateurs finaux a engendré une augmentation du trafic de données de plus de 20 % chaque année sur la période 2016-2018 au niveau mondial. Dans ses prévisions, Cisco a retenu ce même pourcentage de croissance annuel sur la période 2018-2021. Dans le cadre des projections de l'étude, cette hypothèse de croissance annuelle a été étendue à la période 2022-2050.

Toujours selon la même source Cisco de 2018, la consommation de médias est de loin le plus grand moteur de la croissance des données, notamment la vidéo qui devait passer de 75 % du trafic de données en 2017 à 85 % en 2022.

Selon un rapport de 2019 de l'EDNA [8] qui reprend la source Cisco de 2018, d'ici 2022, 72 % des données

échangées dans le monde transiteront par les réseaux de diffusion de contenu (CDN⁴). L'EDNA précise que 71 % de ces données échangées à travers ces CDN transiteront vers les terminaux sans fil et mobiles. Ce rapport précise également que les domaines de croissance les plus rapides sur la période de 2019 à 2022 seront la réalité virtuelle/augmentée (avec un taux de croissance annuel moyen (TCAM) de 65 %), les jeux (avec un TCAM de 55 %) et l'IoT (avec un TCAM de 49 %). Ces taux de croissance élevés suggèrent que ces usages puissent devenir importants après 2022. Sans amélioration de l'efficacité énergétique, cette croissance des données devrait avoir un impact massif sur la consommation énergétique totale et la quantité de matières mobilisées.

Le groupe de travail mobilisé dans le cadre de l'étude a permis d'élaborer les grandes tendances suivantes à l'horizon 2050 :

Figure 2 Les grandes évolutions du secteur numérique telles qu'identifiées par le groupe de travail

Évolution des usages numériques	Évolution des technologies réseaux et data centers	Évolution des équipements	Évolution réglementaire
Explosion du volume data	Stockage optique	Augmentation de la taille des écrans	Réglementation env.
Vidéos (8 k)	Edge computing	Réduction de la taille des équipements selon usage	Réglementation pour allonger durée de vie
Cloud gaming	Connectivité : PoP** réseau décentralisé	Doublage des équipements au travail	Prix du carbone
Data IA	Softwerisation des réseaux	Duplication du matériel par le télétravail	Taxation carbone
IoT / IIoT / smart verticals	Automatisation réseaux	Télétravail / outils collaboratifs travail	Régulation data protection
Véhicules connectés	5G SA, 5G advanced, 6G		Contraintes géopolitiques
Robotique	Antennes actives à ordre + élevé & > 3.5G Hz		Tension sur l'énergie
Jumeaux numériques	Accroissement connectivité mobile indoor		Tension sur ressources
Cybersécurité	Sharing (spectre...)		Pénuries conjoncturelles sur ressources composant
Métavers / lieux hybrides	Split computing	Nouveaux équipements	Contraintes sociétales
Blockchain / cryptomonnaies / NFT*	Interopérabilité	Objets connectés	Santé
Quantique	Data centers	Impression 3D	Prise de conscience sociale
	Extinction technos	Drones	Inclusion numérique
Évolution comportementale	Satellites	Ordinateur quantique	
Sobriété et écoconception			
Reconditionnement			
Recyclage DEEE et batteries			
Low-tech			

* NFT : Non-fungible token ou jeton non fongible.
 ** PoP : Point Of Presence ou point de présence opérateur.

4 Content Delivery Network est un ensemble d'ordinateurs reliés entre eux via internet.

4.1. Une croissance des usages du numérique à court et moyen terme...

4.1.1. Croissance du nombre d'équipements

INTERNET ET CONNEXIONS AU RÉSEAU

Plusieurs études soulignent la hausse du nombre d'équipements par habitant au fil des années, liée notamment à une utilisation toujours plus massive des smartphones. Cette observation au niveau mondial peut cependant être nuancée dans le cas des pays plus équipés à l'heure actuelle, où l'augmentation du nombre d'équipements sera aussi portée en parallèle par d'autres produits que le smartphone, comme les smart TV ou les consoles de jeux. Cette tendance aura pour conséquence une augmentation significative du nombre de connexions à internet.

Dans ses prévisions de 2018 [7] en termes de croissance du nombre de dispositifs, Cisco indiquait un taux de croissance annuel moyen de 9 % (multiplié par 1,6) entre 2017 et 2022 pour les smartphones. Les téléviseurs connectés (qui comprennent les téléviseurs à écran plat, les décodeurs, les adaptateurs de médias numériques (DMA), les lecteurs de disques Blue-ray et les consoles de jeux) suivaient dans ces prévisions la deuxième plus forte croissance, avec un taux de croissance annuel moyen (TCAM) de 7 %, pour atteindre 3,2 milliards d'unités en 2022. Elles indiquaient également que le nombre de PC déclinait au cours de la même période (baisse de 2,5 %). Cependant, il y aura plus de PC que de tablettes tout au long de la période et d'ici la fin de 2022 (1,2 milliard de PC contre 790 millions de tablettes). Ces chiffres illustrent bien l'omniprésence des outils numériques et particulièrement des objets connectés dans la population mondiale. En 2022, il y a donc en réalité 4,8 milliards d'utilisateurs internet (60 % de la population mondiale estimée à 8 milliards), ce qui représente 28,5 milliards d'objets connectés contre 18 milliards en 2017.

Selon le Baromètre du numérique de l'Arcep [9], en France, les équipements numériques sont de plus en plus ancrés dans la vie des Français, avec en 2022, 95 % des Français qui possèdent un téléphone mobile et 87 % un smartphone. Cela représente une augmentation de 1 % et 3 % respectivement par rapport à 2021.

Cette croissance de l'utilisation d'équipements et les nouvelles connexions qui y sont associées vont donc être à l'origine de l'augmentation de l'impact environnemental en valeur absolue.

AUGMENTATION DU NOMBRE D'ÉQUIPEMENTS ET DURÉE DE VIE

L'étude du Baromètre du numérique 2022 montre une tendance toujours plus importante des Français à posséder leurs propres équipements et notamment un smartphone. C'est dans l'achat de ces équipements et l'allongement de leur durée de vie que réside l'enjeu de sobriété.

L'étude de marché Xerfi [10] sur les équipements numériques mentionne par exemple une augmentation de 10 % entre 2019 et 2020 de l'achat de matériels informatiques de bureau neufs (ordinateurs, composants...), principalement dû à la généralisation du télétravail.

D'après le Baromètre Recommerce [11], le matériel reconditionné n'est pas encore une option dominante dans le choix des Français, puisque 50 % d'entre eux ne sont pas prêts à remplacer l'achat d'un téléphone neuf par un équipement reconditionné (en partie par manque de confiance sur la qualité du produit et sa durée de vie).

Au niveau des pratiques de réparation et selon l'institut de sondage BVA [12], une large majorité des Français (entre les deux tiers et plus de 90 %) déclare prendre régulièrement en compte la capacité à durer, la possibilité de réparer les produits qu'ils achètent et l'impact écologique des composants des produits.

4.1.2. Croissance du nombre d'usages du numérique et du trafic de données induit

DES USAGES PLUS CONSOMMATEURS DE DONNÉES

Certains usages sont en pleine croissance, comme cela est notamment le cas pour les usages vidéo. Selon une étude d'Ericsson de 2021 [13], (EMR 11/2021), 69 % du trafic mobile est dédié à la vidéo à fin 2021. Cisco [14], indique quant à lui que 82 % de l'ensemble du trafic IP (internet protocole) est porté par des flux vidéo.

Parmi ces nouveaux usages, le rapport d'Ericsson [15] résume les raisons pour lesquelles le trafic vidéo mobile croît à un tel rythme :

- des écrans plus grands demandant des flux de meilleure qualité ; un contenu vidéo apparaissant de plus en plus dans le cadre d'autres applications (par exemple, les réseaux sociaux, les informations, la publicité) ;

- la croissance du streaming vidéo (YouTube représente 50 à 70 % du trafic vidéo de certains réseaux mobiles) ;
- la croissance de l'adoption de la vidéo à la demande ;
- les changements dans le lieu et l'endroit où la vidéo est consommée ;
- une infrastructure plus rapide facilitant la consommation.

Avec la définition d'images numériques dites 4K (3840 x 2160 pixels) ou ultraHD (4096 x 2160 pixels), la taille - en octets - d'une seule vidéo sera multipliée par 3 à 5 par rapport à une vidéo HD. Le poids des vidéos 8K sera encore multipliée par 3 à 5 par rapport à une vidéo 4K. Dans ce scénario, un utilisateur unique consommera non seulement un volume plus important, mais aussi plus rapidement, ce qui augmentera les besoins en bande passante en heure de pointe pour les opérateurs de réseau [16].

L'augmentation concerne également l'usage des **jeux vidéo**. Il devrait représenter 4 % du trafic global de données en 2022. Le trafic lié au **cloud gaming** (jeu en streaming via internet) serait multiplié par 9 entre 2017 et 2022. Le trafic lié à l'usage de la réalité virtuelle et de la réalité augmentée serait quant à lui multiplié par 12 durant la même période à l'échelle mondiale [14].

MULTITASKING, PARALLÉLISATION DES USAGES ET TEMPS ALLOUÉ

Un autre phénomène est l'**augmentation du temps consacré à la consommation** de données au quotidien. Le rapport de Conseil national du numérique portant sur l'économie de l'attention paru en janvier 2022, met en avant les éléments positifs et négatifs des « plateformes numériques [qui] ont pris une place croissante dans le quotidien et conditionnent la grande majorité des activités (activités professionnelles, activités culturelles ou de loisir, activités sociales, etc.) ». Deux phénomènes entrent ici en jeu :

- l'augmentation du temps alloué dans une journée à l'utilisation d'outils numériques, sur des plages horaires qui n'intégraient pas auparavant ce type d'usages ;
- la parallélisation des tâches associées à des usages numériques, qui permet de multiplier l'utilisation d'équipements et d'applications dans une même plage horaire.

D'après l'étude [16], le temps passé en ligne à utiliser des services numériques est en augmentation. En effet, en 2005, au Royaume-Uni, environ 9,9 heures étaient passées en ligne au cours d'une semaine « moyenne » à la maison et au travail. Fin 2014, cette moyenne était passée à 20,5 heures par semaine. Aux États-Unis, le temps moyen passé à utiliser les outils numériques est passé de 226 à 364 minutes (3 heures et 45 minutes à 6 heures) par jour entre 2011 et 2015. La possession de ces appareils, ainsi que la facilité à les transporter et à se connecter, permet aux usages numériques de s'étendre et même de combler les plages horaires auparavant non utilisées. En France, le Baromètre du numérique de l'Arcep [9] indique que la population de 12 ans et plus passe en moyenne 19 heures par semaine sur internet en 2021 (tout support et lieu de connexion) contre 13 heures en 2012.

D'autre part, l'étude fait aussi le constat que 53 % des adultes britanniques pratiquent le multitâche i.e. deux usages numériques en parallèle : regarder la télévision tout en utilisant son téléphone pour naviguer sur les réseaux sociaux par exemple. Ce multitâche est notamment encouragé par l'augmentation du nombre d'objets connectés du salon. Considérant que les achats d'objets connectés sont passés de 114 millions à 267 millions d'unités dans le monde entre 2015 et 2017, cette tendance est appelée à se renforcer. En appliquant des modèles de comportement à un échantillon représentatif de la population du Royaume-Uni, l'étude de Suski [17] a constaté que la parallélisation a été pratiquée pendant un tiers des jours de streaming déclarés.

4.2. ... accélérée par la croissance à moyen et long terme des marchés numériques...

La croissance du nombre de connexions et d'équipements est en partie corrélée avec la naissance de nouveaux usages des outils numériques. Dans cette partie, nous exposons les grandes tendances du numérique à venir à horizon 2030-2050 et les perspectives de marché des secteurs du numérique.

4.2.1. Internet des objets

Le marché de l'IoT est un marché en forte croissance qui se développe à travers les marchés dits « verticaux », de façon très hétérogène puisque le niveau d'adoption varie selon les cas d'usages.

Les secteurs verticaux clés actuels sont les utilités (gaz, électricité, eau, etc.) et l'automobile, favorisés par les réglementations et politiques publiques à travers le monde. Les prochains marchés vont apparaître dans les secteurs de la logistique et de la santé.

Selon les données de l'IDATE de 2021, la base mondiale installée de dispositifs connectés devrait atteindre 6,5 milliards d'unités d'ici 2025. Le principal marché restera celui des utilités avec 2,1 milliards d'unités en 2025, suivi de l'automobile. Le marché de la logistique est également attendu pour les technologies LPWAN (réseau sans fil grande distance à basse consommation) avec le suivi des objets. Plusieurs protocoles sont mobilisés par l'écosystème de l'internet des objets (Zigbee, LoRA, LTE-m, NB IoT, 5G RedCap, etc.).

4.2.2. E-santé

Le marché de l'e-santé représente un potentiel de croissance important, compte tenu du vieillissement de la population mondiale à l'horizon 2050. Les marchés du télésoin et de la télémédecine, les plus attractifs, devraient représenter d'ici cinq ans environ 78,1 millions de dispositifs installés et permettre de réduire les dépenses de santé.

Selon les données issues des observatoires de l'IDATE, à l'échelle mondiale, le nombre de dispositifs de télésoin devrait atteindre 72,4 millions d'unités à l'horizon 2025, avec une montée en puissance des dispositifs de téléassistance de nouvelle génération, représentant ainsi 8 % de la population mondiale de seniors équipée de ces dispositifs. Le nombre de dispositifs de télémédecine dédiés aux seniors (fragiles et dépendants), devrait quant à lui atteindre 5,7 millions d'unités à cette date (soit 1 % de la population mondiale de seniors équipée de ces dispositifs).

4.2.3. Industrie 4.0

L'implémentation de nouvelles technologies est un facteur de compétitivité et de productivité pour le secteur manufacturier. Très diversifié en termes d'activités, de taille d'entreprises et de maturité technologique, le secteur manufacturier est vaste et complexe, ce qui rend le rythme d'adoption de ces technologies très variable.

Selon les données issues des observatoires de l'IDATE, le potentiel de marché dans le secteur manufacturier en Europe est estimé à plus de 2 millions d'entreprises et 14 % du PIB. Les industries les plus matures sont l'industrie de l'automobile et l'aérospatial. Suivront les industries de transformation, telles que la chimie, la pharmacie et l'agroalimen-

taire, qui sont confrontées à des niveaux de complexité supplémentaires dans l'automatisation des processus.

La numérisation des processus dans le secteur manufacturier passera par la mise en place de réseaux de capteurs permettant de collecter un très grand nombre de données en temps réel. Exploitées par des algorithmes, ces données rendront possible une amélioration de la productivité par un usage plus efficace des ressources. Dans un premier temps, ces outils permettront l'optimisation de la consommation d'énergie et la mise en place de processus de maintenance prédictive. Dans un second temps, le développement de jumeaux numériques facilitera l'accélération des processus d'éco-conception.

4.2.4. Smart Building

Le secteur du bâtiment est considéré comme l'un des principaux secteurs s'appuyant sur la numérisation. L'utilisation des nouvelles technologies est très répandue et couvre les processus de construction, d'exploitation et de gestion immobilière. L'IDATE estime un marché en croissance qui passera en France de 98 millions d'équipements en 2019 à plus de 174 millions en 2023.

L'accent dans le *smart building* est mis sur les bâtiments tertiaires, notamment les commerces, l'immobilier commercial, les bâtiments publics et les lieux d'accueil. Les principaux sous-segments du marché sont les systèmes de chauffage, ventilation et climatisation (CVC), de sécurité et les ascenseurs connectés, qui bénéficient d'une large adoption. Aujourd'hui, la majorité des déploiements concernent principalement la démonstration de technologies destinées aux grands bâtiments – les bureaux commerciaux et les structures d'accueil – et les grands sites. Dans les années à venir, le bâtiment communicant va se généraliser, les prix baissant et les problèmes d'interopérabilité résolus.

4.2.5. Véhicules autonomes

Le marché des véhicules autonomes/connectés a un fort potentiel mais il doit relever de nombreux défis pour parvenir à l'autonomie complète. Aucune réelle adoption n'est prévue sur ce marché avant 2030. De nombreux tests restent encore à faire en conditions réelles. La cybersécurité, la capacité à gérer des conditions routières diverses, la réglementation, l'acceptation du public, le coût ou encore l'engagement de la responsabilité des constructeurs au-delà du niveau 3 d'autonomie, sont autant de freins supplémentaires à leur émergence.

L'IDATE estime qu'en 2040, les ventes de véhicules autonomes de niveaux 3 et 5 devraient atteindre respectivement 55 millions et 170 millions d'unités en Europe. Le développement de véhicules autonomes/connectés devrait contribuer à l'essor de données générées par ces véhicules dont une part devrait passer par le réseau de système ITS (système de transport intelligent) (données d'assistance pour le pilotage ou la coordination entre le véhicule et l'infrastructure) pendant qu'une autre part devrait transiter par les réseaux cellulaires/satellites (ex. données d'infotainment et de loisir).

4.2.6. Les réseaux mobiles xG

5G

À mi-2021, des services 5G étaient proposés dans près de soixante pays dont vingt-huit pays européens. Plus de vingt d'entre eux ont totalement basculé en 5G, dont la majeure partie en Europe. Il convient d'apporter tout de même une nuance. En effet, actuellement seules les antennes déployées sont basées sur la technologie 5G. Les équipements de cœur de réseau, restent quant à eux basés sur la génération 4G. Les opérateurs français envisagent l'évolution de leurs cœurs de réseau à partir de l'année 2023 pour une bascule vers la 5G StandAlone (SA ou autonome). Cette migration complète des réseaux garantira la mise en œuvre des véritables bénéfices de la technologie 5G avec un saut de performance en termes de débit (qui doit être multiplié par 10), de délai de transmission (qui doit être divisé par 10) et permettra ainsi de servir de nouveaux usages, dont ceux notamment de l'industrie 4.0.

Selon l'IDATE, 3,8 milliards de cartes SIM 5G devraient être enregistrées à la fin 2026 contre 800 millions à fin 2021. Le cap du premier milliard d'abonnés 5G a été franchi fin 2022 et celui du 2^e milliard le sera courant 2024.

6G ET AU-DELÀ

Alors que les premiers réseaux 5G démarrent tout juste, la course au développement du réseau mobile de prochaine génération a déjà commencé. Les contours de la 6G sont encore flous mais devraient, d'ici dix ans, mener aux premiers déploiements.

Le standard 6G, bien que devant résoudre d'importants défis technologiques, devrait se situer dans une logique de poursuite de la rupture entamée par la technologie 5G. Il s'agira donc d'accroître les performances en permettant des débits de l'ordre du Térabit/s et une latence de 0,1 ms avec une consommation d'énergie plus faible, tout en augmentant la fiabilité et en apportant

des capacités de localisation 3D de l'ordre du cm. Les défis sont importants car l'exploitation de bandes de fréquences jusqu'à 10THz va poser des problèmes, en raison de la portée plus que limitée de ces fréquences (une dizaine de mètres), qui nécessiteront de nouveaux modèles de déploiements et peut-être l'émergence de nouveaux acteurs économiques.

4.2.7. Virtualisation des réseaux

La virtualisation se présente comme un des éléments majeurs pour les opérateurs télécoms permettant de créer de nouvelles opportunités. La virtualisation introduit de la flexibilité et de l'agilité aux architectures réseaux nécessaires pour stimuler la création de nouveaux modèles économiques.

La virtualisation devrait connaître une forte croissance d'ici 5 ans. Les opérateurs télécoms sont de plus en plus nombreux à intégrer la virtualisation au sein de leur réseau, dans le cadre de leur stratégie de transformation. Selon les données issues des observatoires de l'IDATE, le marché du SDN (*Software Defined Network*) et du NFV (*Network Functions Virtualization*), les deux principales composantes de la virtualisation des réseaux, devrait atteindre 40 milliards d'euros d'ici 2023 en Europe, avec un taux de croissance annuel moyen de 17 % à partir de 2019. La majeure partie de ce marché est générée par les fournisseurs de cloud et les entreprises. La part des opérateurs va continuer à augmenter et, dans l'attente d'un engagement plus fort dans la virtualisation, cette part devrait atteindre 21 % d'ici 2023.

La virtualisation ouvre les portes à de nouveaux modèles économiques aux opérateurs, grâce à une infrastructure réseau orientée non plus matérielle mais logicielle, offrant notamment plus de flexibilité. Dans le cadre de la 5G, la virtualisation est un élément clé pour mettre en œuvre le *network slicing*, concept permettant d'allouer dynamiquement les ressources nécessaires à un type de services, en fonction de ses besoins de performance (latence, débit, capacité) via la création de réseaux virtuels sur un même réseau physique. Notamment tiré par les besoins de l'IoT, ce nouveau modèle économique est actuellement exploré par une vingtaine d'opérateurs, à travers de nombreuses expérimentations, sur des cas d'utilisation dans les secteurs de l'industrie et de l'automobile, en particulier.

4.2.8. Edge computing

En rapprochant le traitement des données de l'utilisateur final, l'intérêt initial de l'*edge computing* vient de sa capacité à réduire la latence et ainsi

améliorer la qualité de service, pour les contraintes liées aux applications immersives, des véhicules autonomes ou encore de distribution vidéo. Mais il présente également d'autres intérêts comme l'amélioration de la sécurité et la confidentialité des données, associées à sa capacité à traiter et stocker un large volume de données. L'*edge computing* allège par ailleurs les réseaux des transmissions de données vers le cloud. C'est ainsi qu'il a suscité un intérêt auprès des industriels, notamment dans le cadre de la maintenance prédictive, grâce à l'analyse des données réalisée sur un équipement implémenté au niveau local, limitant les envois dans le cloud aux alertes de dysfonctionnement.

En 2019, l'IDATE a recensé 119 mises en œuvre d'*edge computing* dans le monde dans une vingtaine de secteurs. Le marché, évalué à 2,5 milliards d'euros en 2019, devrait atteindre 13,8 milliards d'euros en 2024, soit 41 % de croissance par an. Cette croissance soutenue des revenus est tirée par le déploiement de logiciels et de services, avec en tête l'Amérique du Nord et l'Europe. La majeure partie de ce marché est aujourd'hui générée par les industriels, qui ont été les premiers à mettre en œuvre l'*edge computing* pour améliorer et optimiser leurs processus internes. Ils sont suivis par les fournisseurs de cloud, qui y voient un complément de leur activité traditionnelle et qui y prendront une importante part de marché (50 % en 2024). Les opérateurs télécoms contribuent également à ce marché, avec une part estimée à 8 % en 2024.

4.2.9. Intelligence Artificielle (IA)

La croissance du marché de l'IA est due à l'adoption croissante de l'automatisation dans les processus industriels et à l'utilisation d'applications et de services basés sur le cloud. L'IA est la technologie qui cristallise toutes les attentions à cause de ses impacts à grande échelle dans toutes les industries; elle mobilise tous les gouvernements.

Selon les données issues des observatoires de l'IDATE, les revenus mondiaux liés à l'IA devraient atteindre 31,2 milliards USD d'ici 2025. Elle est devenue partie intégrante de toute stratégie numérique d'entreprise et est déjà utilisée dans une grande variété d'applications. Dans des environnements industriels comme l'automobile et l'assemblage, elle est déjà très répandue. L'IA est une discipline ancienne qui profite d'un regain d'intérêt depuis quatre à cinq ans grâce aux nouvelles technologies : reconnaissance vocale et faciale, traitement du langage naturel, apprentissage automatique et apprentissage approfondi (*deep learning*). Ce der-

nier suscite en particulier un grand intérêt grâce à ses applications complexes basées sur des formats multimédia (texte, image, son). Selon McKinsey & Company [18], environ 70 % des entreprises devraient adopter l'IA d'ici 2030.

4.2.10. Blockchain

L'impact de la *blockchain*⁵, technologie gourmande en énergie et capacité de calcul, promet de transformer le secteur financier et plusieurs autres industries. À court terme, la valeur stratégique de la *blockchain* réside principalement dans la rationalisation des processus et la réduction des coûts, permises à grâce à ce système de preuve distribué, sans tiers de confiance.

Selon les données issues des observatoires de l'IDATE, via des mises en œuvre qui commencent à se développer à grande échelle, le marché mondial de la *blockchain* devrait atteindre 17 milliards d'euros en 2025 (+ 48 % par an en moyenne entre 2019 et 2025), grâce principalement à l'intérêt croissant du secteur bancaire et des assurances, ainsi qu'à l'utilisation accrue des cryptomonnaies par les particuliers et les commerçants. Pour les banques, la *blockchain* facilite les processus de financement du commerce et propose des paiements transfrontaliers plus fiables et plus économiques. D'autres secteurs (télécommunications, médias, santé, services publics, etc.) exploitent également la *blockchain*, en raison des faibles coûts marginaux et de la nature universelle des registres distribués. Elle est ainsi utilisée pour automatiser les accords d'itinérance des opérateurs télécoms, tracer les produits dans la chaîne d'approvisionnement, effectuer des micro-paiements dans l'industrie de la musique et des jeux vidéo.

4.2.11. Réalité augmentée (AR) et réalité virtuelle (VR)

Les solutions d'AR/VR ne cessent de progresser. Des services sont lancés dans de nombreuses industries, mais une phase de structuration de l'offre est nécessaire pour que le potentiel de ces solutions se concrétise. Le relais des réseaux fixes THD, des réseaux WiFi (notamment WiFi 7) et de la 5G seront nécessaires pour permettre de profiter à plein des progrès poussés par l'AR/VR.

Les applications AR/VR sont exploitées dans de nombreux secteurs d'activité, comme le divertissement, l'industrie 4.0, le tourisme, la formation, la santé, le commerce ou le BTP. La VR est aujourd'hui

⁵ Une *blockchain* est un registre, une grande base de données qui a la particularité d'être partagée simultanément avec tous ses utilisateurs, tous également détenteurs de ce registre et qui ont tous la capacité d'y inscrire des données, selon des règles spécifiques fixées par un protocole informatique très sécurisé grâce à la cryptographie.

le segment le plus développé, avec les premiers casques de nouvelle génération commercialisés en 2016. L'AR, qui repose encore principalement sur la tablette et le smartphone, connaît des succès dans le divertissement, mais aussi dans le monde de l'entreprise, dans un contexte de transformation numérique de l'industrie, ou dans le commerce. En termes de valeur du marché, le jeu vidéo est l'application numéro un dans les loisirs – individuels ou collectifs – de réalité virtuelle.

De plus, selon les analyses de l'IDATE, la standardisation des technologies AR et VR, l'arrivée de la 5G et le développement des casques de deuxième génération seront le socle du développement de services pour de nombreuses industries ou pour le commerce.

5. Description et impacts du scénario tendanciel 2050

5.1. Description du scénario tendanciel en 2050

Le scénario tendanciel est élaboré à partir de différents rapports, notamment ceux du Sénat [3], de la Commission européenne [19] ou encore le rapport 2019 de l'EDNA⁶ sur les objets connectés [20], afin d'estimer le taux de croissance des parcs des différents terminaux. Les hypothèses caractérisant ce scénario sont les suivantes :

- le réseau fibre se substitue progressivement au réseau de cuivre d'ici 2030 (ceci étant valable pour l'ensemble des scénarios). Les réseaux mobiles continuent d'être déployés avec la 5G, de sorte que le nombre de supports (pylônes et toits-terrasse) suit la tendance actuelle ;
- les caractéristiques techniques propres à chaque équipement et leur empreinte environnementale sont modélisées à l'aide de la base de données Négaoctet et sont considérées comme constantes (pour ce qui relève des phases de fabrication, distribution et fin de vie). Les consommations électriques unitaires de la plupart des terminaux diminuent progressivement de - 1 % à - 5 % par an, selon le type de terminal considéré mais leur durée de vie reste globalement inchangée par rapport à 2020. Le nombre d'objets connectés est multiplié par 15 par rapport à 2020. Sur les réseaux, les consommations électriques unitaires (i.e. par équipement) sont constantes ;
- la croissance du trafic internet est estimée à partir des projections de l'Agence Internationale de l'Énergie (environ + 20 % par an, soit une multiplication du trafic par 200 entre 2020 et 2050) ;
- concernant les centres de données, il a été pris comme hypothèse que l'ensemble des données étaient hébergées en 2050 sur des centres de données cloud, HPC ou *edge computing*.

5.2. Principaux enseignements du scénario tendanciel 2050

Les résultats du scénario tendanciel 2050 sont la conséquence d'un mode de consommation du numérique sans réelle remise en cause des modes

de production et de consommation des biens et services numériques. De fait, les impacts du numérique se traduiraient d'une certaine façon.

- L'empreinte carbone du numérique en France, qui s'établit à 17 Mt CO₂eq en 2020 (i.e. environ 2,5 % de l'empreinte carbone nationale), est estimée à 25 Mt CO₂eq en 2030 et pourrait être de plus de 49 Mt CO₂eq en 2050. Ainsi le numérique voit-il son empreinte carbone suivre une augmentation de près de 60 % sur la période 2020 à 2030 et tripler de 2020 à 2050. L'analyse du scénario tendanciel montre donc que le secteur du numérique ne s'inscrirait pas dans une dynamique de décarbonation et de réduction des impacts environnementaux en opposition aux engagements pris par la France. Alors que l'objectif de la France est de diminuer drastiquement les émissions de GES à l'horizon 2050, l'évolution tendancielle de l'empreinte carbone du numérique va être multipliée par 3, faisant ainsi reporter les efforts sur les autres secteurs ou sur la capacité des puits de carbone.
 - Cette évolution resterait très largement dominée par les terminaux et les centres de données qui représenteraient respectivement 80 % et 17 % de l'empreinte carbone du secteur en 2030 et 75 % et 22 % en 2050. L'augmentation de la part des centres de données s'explique notamment en partie par une évolution importante de leur nombre pour répondre à l'accroissement des usages et du volume de données et donc du nombre d'équipements techniques et des serveurs qui y seront hébergés.
 - Ces évolutions nécessitent également toujours plus de ressources pour les produire, les piloter, les superviser.
 - À noter une stabilisation de l'impact des réseaux dans l'empreinte carbone passant de 0,94 Mt CO₂eq en 2020 à 0,87 Mt CO₂eq en 2030 pour augmenter ensuite entre 2030 et 2050 passant à 1,36 Mt CO₂eq en 2050. La part des réseaux dans le global est en revanche en diminution, passant de 5 % en 2020 à 3 % en 2030 et 2050

6 *Electronic Devices & Networks Annex.*

grâce à des technologies et un fonctionnement plus optimisé. En effet, par exemple « l'empilement » des équipements des réseaux mobiles 2G, 3G, 4G et 5G serait rationalisé à l'horizon 2050 avec au maximum 2 technologies radios (5G et 6G). Pour les réseaux fixes, la disparition des réseaux en cuivre (réseaux de distribution) au profit des seuls réseaux en fibres optiques (collecte et transport) de bout en bout (FttH/Fttx) devrait également réduire l'empreinte carbone associée. Cette optimisation est largement compensée par l'augmentation notamment du volume, de données transitant par les réseaux ainsi que par la généralisation de l'IoT entraînant des reports très importants en termes d'impacts environnementaux sur les briques équipements et centres de données.

- La consommation électrique de l'ensemble du numérique est estimée à environ 52 TWh en 2020. Elle serait de 54 TWh en 2030 et pourrait quasiment doubler à l'horizon 2050 (plus de 80 % d'augmentation) pour atteindre environ 93 TWh, dans des conditions d'utilisation du numérique sans réelles remises en question.
- Ce sont surtout les centres de données qui devraient connaître la plus forte progression de consommation énergétique sur la période 2020-2050 : d'environ 23 % de la consommation électrique du numérique, elle devrait passer à plus de 42 % et pourrait même être multipliée par 2,4. Une analyse temporelle plus précise montre une accélération de cette consommation sur la période 2030-2050 avec un taux de croissance moyen de 4,4 % par an contre 3,5 % par an sur la période 2020-2030.

- Concernant les technologies réseaux, il y aurait une augmentation moyenne de 40 % de leur consommation électrique en 30 ans. La part des réseaux télécoms devrait en outre diminuer dans la consommation électrique, passant de 13 % à 10 %, mais dépendra du type de réseau :

- Les réseaux fixes sont ceux qui devraient connaître la plus faible évolution, soit une augmentation de 8 % liée à la migration vers la fibre optique qui assure une relative bonne maîtrise énergétique par rapport aux autres réseaux.
- Quant aux réseaux mobiles, leur consommation électrique serait multipliée par 1,4 en raison de l'évolution du nombre d'équipements mobiles opérationnels mais avec une maîtrise de la consommation unitaire.
- Enfin les terminaux, qui représentent 64 % de la consommation électrique en 2020, ne devraient plus peser que 47 % de la consommation électrique en 2050.
- La consommation de ressources va également croître de manière importante, passant par exemple pour l'indicateur MIPS de 63,7 Mt mobilisées en 2020 à 88 Mt en 2030 et 178 Mt en 2050. L'indicateur épuisement des ressources abiotiques minérales, marqueur notamment de la dépendance du numérique aux métaux, suit également la même progression, accentuant la pression sur les ressources.

Les résultats environnementaux du scénario tendanciel pour un an de services numériques en France sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau 1 Impacts environnementaux du scénario tendanciel pour 1 an de services numériques en France

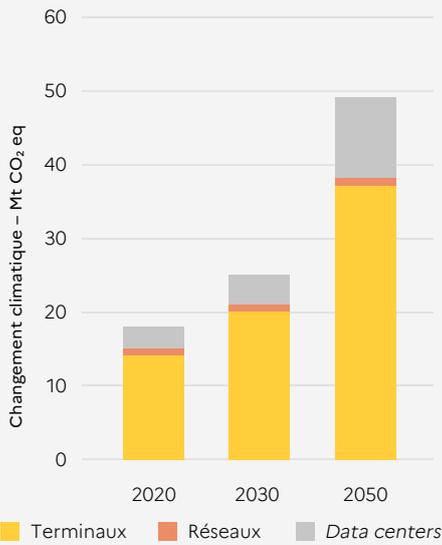
ANNÉE	Épuisement des ressources abiotiques naturelles – éléments – tonnes Sb eq	Épuisement des ressources abiotiques naturelles – fossiles – MJ	Changement climatique – Mt CO ₂ eq	Radiations ionisantes – kBq U235 eq	MIPS – millions de tonnes	Production de déchets – millions de tonnes	Consommation d'énergie primaire – MJ	Consommation électrique – TWh
2020	952	8,38E+11	17,2	1,04E+11	63,7	20,2	8,63E+11	52,0
2030	1 080	9,26E+11	25,0	1,02E+11	88,0	25,2	1,02E+12	54,4
2050	1 510	1,15E+12	49,4	9,98E+10	178,0	48,9	1,54E+12	92,9

Les plus fortes croissances annuelles entre 2020 et 2050 peuvent être constatées sur les émissions de GES, le MIPS et la production de déchets avec des taux de croissance annuels moyens de l'ordre de 3 %. L'épuisement des ressources abiotiques et la consommation d'énergie primaire croissent à un

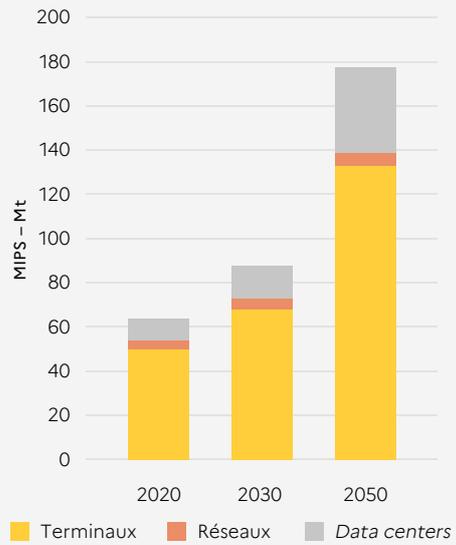
rythme plus modéré entre 1 et 2 % par an. Enfin, le seul résultat affichant une décroissance sur la période 2020-2050 sont les radiations ionisantes qui présentent une baisse de 0,27 % par an durant la période en raison de la diminution de la part du nucléaire dans le mix énergétique.

7 Équivalent antimoine : unité utilisée en ACV pour regrouper l'impact sur la consommation de métaux.

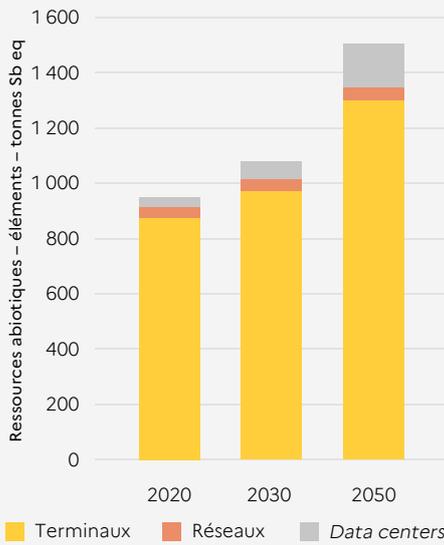
Graphique 4 Impact des biens et services numériques sur le changement climatique en Mt CO₂ eq



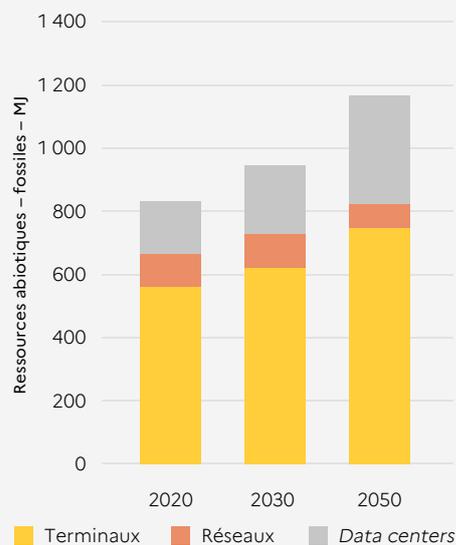
Graphique 5 Impact des biens et services numériques sur la mobilisation en ressources en Mt



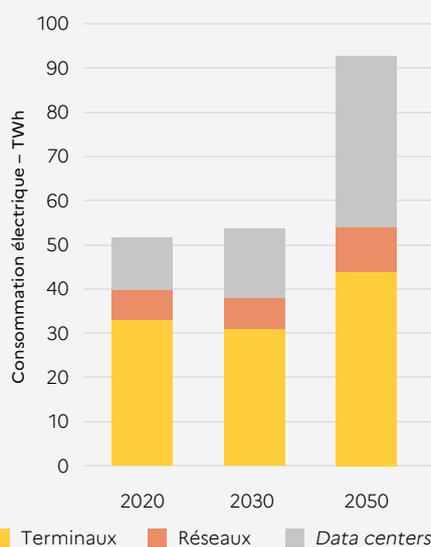
Graphique 6 Impact des biens et services numériques sur les ressources abiotiques minérales en tonnes Sb eq



Graphique 7 Impact des biens et services numériques sur les ressources abiotiques fossiles en MJ



Graphique 8 Impact des biens et services numériques sur la consommation électrique en TWh



6. Déclinaison au numérique des scénarios ADEME de neutralité carbone à 2050

6.1. Principes et méthodologie

L'exercice de déclinaison au numérique des scénarios de Transition(s) 2050 élabore un ensemble d'hypothèses intervenant directement sur les paramètres du modèle ACV afin d'estimer ce que deviendrait l'impact environnemental du numérique en 2050. **En conséquence, si l'empreinte carbone du numérique varie d'un scénario à l'autre, les quatre scénarios impliquent bien une neutralité carbone à l'échelle nationale sur l'ensemble de l'économie française contrairement au scénario tendanciel.**

Cet exercice est par nature imparfait mais il constitue une première ébauche pour mesurer et évaluer les chemins à parcourir et les défis à relever afin d'engager la société du numérique comme un contributeur positif à l'évolution de notre société. Ces travaux ne prennent pas en considération d'éventuels effets indirects

(positifs ou négatifs) ou des interactions entre différents tiers du numérique ou en lien à d'autres secteurs économiques, voire d'autres externalités (concurrentielles, économiques, etc.) qui sont à ce stade difficiles à identifier et à évaluer.

Ces scénarios affectent la modélisation ACV en modifiant les hypothèses relatives au nombre d'équipements, à leur durée de vie, à leur consommation électrique unitaire (concernant les centres de données en particulier, la surface et la densité de puissance sont également des paramètres affectés). Chaque scénario induit un niveau de consommation d'électricité différent, dont l'impact environnemental a été évalué selon la composition du mix électrique propre à chaque scénario et décrite dans le feuilleton mix électrique de l'ADEME [21].

Dans une vision du numérique, le scénario 1, **Génération frugale**, pourrait se traduire de la façon suivante :

Principes généraux du numérique pour S1

- Scénario reprenant des principes d'**une sobriété numérique dans la construction et la mise en œuvre des biens et services numériques**. Les principes de sobriété numérique et d'écoresponsabilité sont la norme généralisée.
- Il s'agit de proposer des transformations profondes dans la façon de penser les équipements, leurs durées d'usage, leurs modes de consommation (achat, usage, etc.), mais également pour les services, la façon de les concevoir, d'intégrer les principes de leur exploitation et de leur consommation par les usagers (grand public, entreprises et administrations). Ces orientations passent donc par **des changements de comportements très importants vers plus de sobriété qui peuvent être imposés par des situations de pénuries en matières premières et notamment en métaux stratégiques et autres ressources indispensables à la transition écologique et numérique**.
- Les citoyens, administrations et entreprises ont pris conscience, naturellement ou par la contrainte, de la nécessité de mutualisation des équipements numériques. Les industriels du numérique ont mis en œuvre des modes de production et d'exploitation des services totalement innovants avec **une rupture franche par rapport aux modes actuels, notamment avec l'essor de produits low-tech**.
- La révolution numérique se fait, mais en ayant conscience des impacts environnementaux, amenant à systématiser l'éco-conception logicielle à toutes les couches de fonctionnement des écosystèmes : fonctionnement des serveurs, accès aux données, cloud, fonctionnement des terminaux fixes et mobiles. La formation à l'écoconception numérique est systématisée dans les écoles d'ingénieurs. **Les industries freinent leurs usages du tout connecté en interrogeant les remontées de données nécessaires**.
- Une **communication** importante sur les usages sobres pour les utilisateurs est mise en place.
- Le matériel est optimisé grâce à des efforts de conception, permettant un **allongement de la durée de vie des équipements** (serveurs, terminaux), **leur réparabilité et sans obsolescence logicielle** - en partie grâce à une optimisation des systèmes d'exploitation, leurs mises à jour étant assurées sur des temps longs pour tous les appareils (IoT compris).
- **Les loisirs numériques sont limités** à un usage « sobre », sans excès sur les quantités consommées.
- L'accès aux services et équipements numériques est mutualisé avec des **services de location** pour éviter le suréquipement.
- **Les effets rebonds sont limités**, grâce à un usage et des comportements plus sobres. L'optimisation des couches logicielles et matérielles permet de limiter l'expansion des serveurs. Les principaux flux de données passent par des infrastructures physiques (fibres) nécessitant moins d'énergie. L'allongement de la durée de vie du matériel (serveurs, terminaux) permet une moindre pression sur les ressources.
- L'ensemble de la société a **accès au minimum de services numériques** pour la santé, l'éducation, la mobilité, l'économie servicielle et de fonctionnalité. Sont notamment mis en place des services d'accompagnement publics de proximité pour permettre cet accès à toutes les catégories socioprofessionnelles.
- **Les services numériques sont priorisés** en fonction de l'utilité pour la société (aide aux économies de ressources et d'énergie, à l'éducation, la santé, la culture).

Hypothèses générales dans S1

- **Tiers 1 – Équipements des usagers**
 - Le grand public, les entreprises et les administrations prennent conscience d'une nécessaire diminution des équipements et des terminaux. **Le volume des objets connectés reste modéré et stable par rapport à la situation de 2020**. Le matériel est optimisé grâce à des efforts d'écoconception et les innovations *low-tech* sont développées. Les achats publics sont systématiquement basés sur des **appareils reconditionnés**.
 - Les services numériques consommés connaissent une croissance relativement modérée du fait d'une production et d'une consommation plus écoresponsables et sobres.
 - Les durées d'usage des équipements sont également rallongées afin de limiter les volumes : un rallongement de deux ans par rapport à 2020 est la norme retenue.

- **Tiers 2 – Réseaux**

- La **fibre optique** est la seule technologie en œuvre pour les réseaux fixes.
- Pour les réseaux mobiles, les opérateurs adoptent une stratégie de **mutualisation/partage** des équipements et des infrastructures, notamment dans les zones les moins denses en mettant en œuvre des accords d'itinérance croisés afin de limiter le nombre d'équipements radios installés sur les points hauts. Dans un contexte de trafic très réduit par rapport au scénario tendanciel, la société est habituée à **limiter ses usages en mobilité et à favoriser le trafic en WiFi**.

- **Tiers 3 – Centres de données**

Dans une vision frugale, les centres de données sont optimisés : les espaces et les avancées technologiques, notamment en termes de refroidissement, moins gourmands en espace, permettent d'accueillir les serveurs dans un espace sensiblement équivalent à ceux opérationnels en 2020.

Pour l'ensemble des tiers, les consommations électriques unitaires des équipements sont largement revues à la baisse avec une consommation divisée par près de 3 par rapport à 2020.

Dans une vision du numérique, le scénario 2, **Coopérations territoriales**, pourrait se traduire de la façon suivante :

Principes généraux du numérique dans S2

- Scénario reprenant les principes d'une sobriété numérique et d'une écoconception modérée dans la construction et la mise en œuvre des biens et services numériques. Pour autant, il ne s'agit pas de revenir à une situation antérieure à 2020, mais de **figer plutôt les habitudes de production et de consommation** observées autour de cette date, tout en tenant compte des évolutions des technologies, des équipements, des réseaux, etc.
- Des changements de modes de fonctionnement, d'appropriation du numérique s'avèrent nécessaires, mais ils s'inscrivent dans **une logique globale de limitation des impacts par les évolutions technologiques** plus que par des changements radicaux.
- **La révolution numérique se fait, en prenant en compte toutes les typologies de territoires.** Ainsi, les tissus urbains voient le développement de toutes les nouvelles technologies tandis que les milieux ruraux sont connectés au juste besoin avec une optimisation logicielle qui leur permet d'accéder aux services et contenus sans nécessiter de très hauts débits de données.
- **Le besoin en matériel est systématiquement analysé avant acquisition**, sous l'angle performance attendue/nécessaire, possibilité de maintien de l'existant, existence d'offres servicielles... Un maillage territorial des équipements est organisé, avec une décentralisation des serveurs de données permettant de diminuer les temps d'accès et l'énergie nécessaire aux transferts de datas, sur le principe du *edge computing* et du *peer to peer*. L'IoT est utilisé principalement dans un objectif de gain énergétique (y compris dans les habitations) et de fluidité des services publics.
- **La recherche d'efficacité et de réponse aux besoins est systématisée.**
- **Les services numériques, considérés comme plus utiles pour la société, sont priorisés** (aide aux économies de ressources et d'énergie, à l'éducation, la santé, la culture notamment).
- La **communication** vers le grand public est principalement **centrée sur les écogestes** et sur un usage du numérique au service de l'écologie en même temps que sur la sobriété.
- Les effets rebonds sont limités mais peuvent exister, en raison du besoin de maillage territorial des équipements. **L'ensemble de la société est engagé dans une recherche de solutions pour des services numériques responsables.**
- Les **services numériques sont accessibles à tous** et l'exclusion numérique est limitée aux réfractaires à ces technologies.
- **Les principes de sobriété numérique et d'écoresponsabilité sont la norme** avec une vision moins contraignante que dans le scénario précédent.

Hypothèses générales dans S2

- **Tiers 1 – Équipements des usagers**
 - Le grand public, les entreprises et les administrations **changent certaines de leurs habitudes d'utilisation de leurs équipements numériques en rationalisant l'achat et la détention de certains équipements.** Ils envisagent de conserver les équipements devenus indispensables (smartphones par exemple) en limitant tout de même le nombre détenu. Pour d'autres équipements, jugés moins utiles ou indispensables, les comportements d'achats sont revus et les usages différents. Certains équipements restent dans des niveaux de volumétries comparables à ceux de 2020 afin de limiter les usages et les impacts carbone.
 - En termes d'usage, les services numériques consommés connaîtront une croissance relativement modérée du fait d'une production et d'une consommation plus écoresponsable et sobre.
 - Les durées d'usage des équipements sont également rallongées d'un an par rapport à 2020 sur la base d'un modèle d'écoconception modéré.
- **Tiers 2 – Réseaux**
 - Comme pour le scénario précédent, la fibre optique est la seule technologie en œuvre pour les réseaux fixes.
 - Pour les réseaux mobiles, les opérateurs déploient leurs équipements sur la base du nombre de points hauts qui n'évolue plus à l'horizon 2050 en restant figé sur les bases de 2020⁸. Par ailleurs, les nouveaux sites mobiles suivent un déploiement très limité dans un contexte de trafic réduit. Dans ce contexte, la société est habituée à limiter ses usages en mobilité et favorise le trafic en WiFi.
- **Tiers 3 – Centres de données**

Leur évolution et implantation dans le territoire visent à proposer une solution plus équilibrée entre les infrastructures déjà opérationnelles dans les grands pôles économiques et les autres territoires déjà pourvus ou avec des projets d'implantation. **La superficie totale en exploitation pourrait être réduite d'un quart par rapport au scénario tendanciel.**

Pour l'ensemble des tiers, les consommations électriques unitaires des équipements sont optimisées et divisées par 2 par rapport à 2020.

⁸ Tout en prenant en compte les déploiements réglementaires déjà actés.

Dans une vision du numérique, le scénario 3, **Technologies vertes**, pourrait se traduire de la façon suivante :

Principes généraux du numériques dans S3

- Ce scénario est plutôt basé sur la **consommation de numérique écoconçu généralisée** dans une optique d'efficacité énergétique et matière dans tous les secteurs. La notion de sobriété numérique est ici peu prégnante.
- Des changements de modes de fonctionnement, d'appropriation du numérique s'avèrent nécessaires, mais ils s'inscrivent dans une logique globale de limitation des impacts par les évolutions technologiques plus que par des changements de comportements.
- La révolution numérique se fait principalement pour les territoires urbanisés avec un accès généralisé au très haut débit (fibre). De fait, les contenus diffusés sont dimensionnés pour cette population. Grâce à ces capacités, les logiciels sont peu optimisés et gourmands en ressources. La consommation de données est importante. L'intelligence artificielle est développée dans tous les domaines.
- Le matériel (capteurs, terminaux...) est très utilisé et implémenté dans tous les services (avènement des *smart grids*, *smart cities*, industrie du futur et de l'IoT à grande échelle) et domiciles (*smart home*) mais en gardant à l'esprit de rationaliser et d'optimiser les usages.
- **Les usages du numérique augmentent considérablement, conduisant à une forte augmentation du nombre d'équipements.**
- Les taux de renouvellement et mise à niveau matériel sont stabilisés en raison notamment de la maintenance, mais **une recherche de qualité et de performance limite le suréquipement.** Les entreprises et services publics sont toutefois amenés à faire des efforts de rationalisation pour des questions économiques et cherchent à augmenter la durée de vie de leurs acquisitions. Une réflexion est systématisée sur l'acquisition de matériel professionnel, notamment les serveurs, pour connaître l'impact des solutions (cloud vs parc interne). La collecte de matériel en fin de vie est développée dans les villes, afin d'en recycler un maximum.
- **La communication** est axée sur **la sensibilisation à l'impact environnemental du numérique et sur le recyclage.**
- **Les effets rebonds sont élevés**, en raison d'une consommation importante de données, pour les services et les loisirs et d'un nombre important d'équipements impliquant de la consommation d'énergie dans les phases de fabrication et d'usage. Le développement du recyclage, de l'usage de *smart grids* et du développement des *smart cities* dans les villes permettent toutefois de limiter cet effet rebond.
- Mais la **fracture** est **plus grande** (comparé aux autres scénarios) **avec la campagne** où les débits ne sont pas suffisants pour accéder à ces services dimensionnés pour les territoires urbains.
- Les principes d'écoresponsabilité sont la norme.

Hypothèses générales dans S3

- **Tiers 1 – Équipements des usagers**
 - Le grand public, les entreprises et les administrations continuent à consommer les équipements sur le mode actuellement observé (téléphones, écrans TV, consoles de jeux, etc.). Cela étant, les équipements sont moins énergivores.
 - Concernant les équipements des objets connectés, ils évoluent en nombre au rythme du scénario tendanciel.
- **Tiers 2 – Réseaux**
 - Comme pour les scénarios précédents, **la fibre optique est la seule technologie en œuvre pour les réseaux fixes.**
 - Pour les réseaux mobiles, les déploiements des réseaux seront équivalents à ceux observés dans le scénario tendanciel. Le déploiement de la 5G sera plus ciblé.

- **Tiers 3 – Centres de données**

Ils constituent une pierre angulaire très importante du dispositif. Dans ce contexte, l'optimisation passe par une généralisation de l'externalisation des infrastructures opérées actuellement au sein des acteurs publics et entreprises vers des centres de données spécialisés et externalisés (services de colocation et/ou cloud) qui seront en capacité de sécuriser et proposer de nouvelles technologies de refroidissement et de gestion de l'énergie.

Pour l'ensemble des tiers, les consommations électriques unitaires des équipements et leurs durées d'usage sont équivalentes à celles du scénario tendanciel.

Dans une vision du numérique, le scénario 4, **Pari réparateur**, pourrait se traduire de la façon suivante :

Principes généraux du numérique dans S4

- Ce scénario repose sur un principe d'**une fuite en avant du numérique** qui pourrait être considérée comme présentant toutes les vertus technologiques garantissant une meilleure gestion des autres composantes de la société.
- La révolution numérique atteint son paroxysme. **Tout est digitalisé**, beaucoup de véhicules sont quasi autonomes, la plupart des services sont dématérialisés, les habitations sont toutes « smart », les interactions entre les personnes sont virtualisées à l'extrême aussi bien dans les relations privées que professionnelles. Les loisirs passent par des flux de données très importants (vidéos, jeux vidéo).
- Les villes sont toutes basées sur le **principe des smart cities, alimentées par des smart grids**. Les réseaux sont donc systématiquement multipliés et les algorithmes basés sur un fonctionnement en *blockchains*. Les mises à jour logiciel sont très fréquentes pour permettre des évolutions ergonomiques fortes et intégrer de nouvelles fonctionnalités entraînant une moindre optimisation logicielle en raison d'un besoin rapide de développement.
- Le développement des services numériques entraîne une **multiplication des équipements**, pour les ménages, les entreprises et les services publics.
- Pour les ménages : une **multiplication des objets connectés**, des écrans, une intégration de services connectés dans les véhicules ; une fréquence de remplacement élevée pour prendre en compte les besoins en puissance brute des équipements et suivre les mises à jour sans perte de qualité des services, un suréquipement fréquent.
- Seuls quelques équipements ne sont plus physiques (exemple : consoles de jeux, enregistreurs numériques, disques externes, stations de travail...) mais par ailleurs renvoient à des stations de travail mises à disposition à distance (intensification et **multiplication des serveurs**). L'allongement de la durée de vie des équipements n'est pas un objectif, mais le recyclage est optimisé pour pallier – en partie – la question des ressources.
- Pour les entreprises : tous les services sont numérisés, la collecte, la production et les échanges de données sont considérables. De fait, **les centres de serveurs se multiplient en nombre et en taille** ; la recherche d'efficacité énergétique impose le développement de production d'énergie dédiée (photovoltaïque) et d'utilisation de l'énergie de récupération (intégration à des réseaux de chaleur...).
- Dans les villes, **les capteurs se multiplient** pour optimiser les services publics : capteurs sur les bacs à déchets, capteurs de stationnement, caméras, capteurs de luminosité et lampadaires bornes WiFi, bornes multimédia interactives sur les services de la ville...
- La **communication** est axée sur la **sensibilisation à l'impact environnemental du numérique et sur le recyclage**.
- Les effets rebonds sont importants : malgré la virtualisation de certains équipements, l'efficacité énergétique accrue grâce à certains équipements/automatisation, la consommation de données et la fabrication des équipements entraînent, à une échelle mondiale, des **hausse d'émissions de CO₂ et de consommation de ressources**.
- La société est clivée entre les personnes ayant un accès à tous les appareils et à leur compréhension/possibilité d'intégration au quotidien, et celles qui n'y ont pas accès pour des raisons économiques/ergonomiques/géographiques et qui se retrouvent coupées de beaucoup de services. La sécurité des données personnelles est régulièrement mise à mal (cyber attaques nombreuses et organisées).
- L'efficacité des appareils numériques est optimisée.
- Cette **vision radicale** repose sur la **nécessité de maîtriser d'autres technologies**, notamment de production et stockage d'énergie ainsi que de capture et séquestration de carbone.

Hypothèses générales dans S4

- **Tiers 1 – Équipements des usagers**
 - Le grand public, les entreprises et les administrations continuent à consommer les équipements sur le mode actuellement observé (téléphones, écrans TV, consoles de jeux, etc.).
 - Le nombre des équipements des objets connectés explose, notamment dans le but de superviser, optimiser tous les équipements industriels qui seront développés et qui devront engendrer des bénéfices permettant d'atteindre la neutralité carbone.
- **Tiers 2 – Réseaux**

Les réseaux, notamment mobiles, sont au cœur de l'écosystème et donc connaissent des **déploiements importants**, notamment pour la 5G, mais également sur les autres technologies (6G et au-delà).
- **Tiers 3 – Centres de données**

Le deuxième pilier du numérique connaît également une très forte envolée des surfaces IT en exploitation. Le développement de services de cloud se base sur des infrastructures qui sont localisées au sein des territoires. Cette tendance s'amorce aujourd'hui en France avec le **déploiement de régions cloud** par tous les grands acteurs internationaux qui installent leurs serveurs dans des centres de données soit en propre, soit auprès d'acteurs spécialisés de la colocation. Cette tendance va devenir une règle avec une diffusion également dans les territoires et pas uniquement dans les quelques grands pôles économiques (Île-de-France, nord de la France, Bouches-du-Rhône, ...). Dans ce contexte, l'optimisation passe par une généralisation de l'externalisation des infrastructures des acteurs publics et des entreprises vers des centres de données spécialisés et externalisés (services de colocation et/ou cloud) qui seront en capacité de sécuriser et proposer de nouvelles technologies de refroidissement et de gestion de l'énergie. Dans un contexte où le numérique est vraiment la pierre angulaire du système et où les centres de données sont un des piliers, leurs surfaces pourraient augmenter considérablement avec des projets soit gigantesques soit une multiplicité de projets de déploiements dans les territoires.

Pour l'ensemble des tiers, les consommations électriques unitaires des équipements et leurs durées d'usage sont équivalentes à celles du scénario tendanciel.

Les quatre scénarios s'inscrivent donc dans un dégradé technologique que les hypothèses à suivre intègrent.

6.2. Hypothèses retenues pour les 4 scénarios

6.2.1. Tiers 1 – Équipements des usagers

NOMBRE D'UNITÉS

Les hypothèses structurantes retenues pour les équipements de S1 sont les suivantes :

- chaque habitant a un téléphone mobile, soit smartphone (80 %), soit *feature phone*⁹ (20 %). Certains conservent un téléphone fixe (un foyer sur 2). L'ordinateur portable est réduit à un par foyer, tandis que la mutualisation des équipements a permis l'extinction des ordinateurs fixes, des tablettes, des écrans d'ordinateurs et la division par 3 du nombre d'imprimantes.
- chaque foyer est équipé soit d'un téléviseur (50 %), soit d'un vidéoprojecteur (50 %) moins consommateur ;
- concernant les divertissements numériques, les habitants réduisent de 50 % leurs consoles de jeux vidéo fixes et portables par rapport à 2020. Quant aux casques de réalité virtuelle, ils restent minoritaires, à leur niveau 2020 ;
- les objets connectés restent stables par rapport à 2020 à l'exception des objets connectés e-santé dont la croissance est similaire au scénario tendanciel ;
- les écrans publicitaires numériques ont été interdits.

Les hypothèses structurantes retenues pour les équipements dans S2 sont les suivantes :

- le taux d'équipement est de 1,1 smartphone par habitant tandis que l'ordinateur portable reste à son niveau 2020 et qu'un foyer sur deux a un ordinateur fixe ;
- les téléviseurs cèdent relativement la place aux vidéoprojecteurs, moins consommateurs (30 % du parc). Le parc global reste stable par rapport à 2020 ;
- les consoles et box TV restent stables par rapport à 2020 ;
- le nombre d'imprimantes est divisé par 2 ;
- en termes d'objets connectés, leur croissance est divisée par 2 par rapport au scénario tendanciel ;

- les écrans publicitaires numériques sont limités à leur niveau 2020.

Les scénarios 3 et 4 sont identiques au scénario tendanciel en termes de nombre d'unités pour tous les équipements hors objets connectés. Pour S3, le nombre d'objets connectés est identique au scénario tendanciel. Quant à S4, il dépasse le cap des 10 milliards d'objets connectés à horizon 2050.

CONSOMMATION ÉLECTRIQUE ET DURÉE DE VIE UNITAIRE DES ÉQUIPEMENTS

Dans S1, la consommation électrique de chaque équipement est divisée par 3 tandis que leur durée de vie est allongée de 2 ans.

Le scénario 2 prend en compte une consommation électrique unitaire divisée par 2 tandis que leur durée de vie est allongée de 1 an.

Les scénarios 3 et 4 appliquent une consommation électrique unitaire et une durée de vie identiques au scénario tendanciel.

6.2.2. Tiers 2 – Équipements réseaux

NOMBRE D'UNITÉS DES RÉSEAUX MOBILES

Dans S1, le partage d'infrastructures passives et actives est devenu la règle. Les opérateurs se font concurrence sur la couche service, ce qui permet de réduire le nombre d'équipements par site à un opérateur. Dans cette configuration, deux générations de technologies mobiles sont conservées en parallèle, la 4G qui s'éteint vers 2045 et la 5G. Dans un contexte de trafic très réduit par rapport au scénario tendanciel, la société est habituée à limiter ses usages en mobilité et favorise le trafic en WiFi. La technologie 5G est mise en œuvre mais de manière plus mesurée. Les générations suivantes ne sont pas mises en œuvre.

Dans S2, le nombre de points hauts mobiles évolue de façon identique à celui de S1, pour les mêmes raisons. Le partage d'infrastructures passives devient la norme. Pour les équipements actifs, seules les zones rurales sont concernées. Dans cette configuration trois générations de technologies mobiles sont conservées en parallèle, la 4G, la 5G et la 6G. L'extinction de la technologie 4G est programmée aux alentours de 2040 contre 2045 dans le scénario tendanciel en raison du déploiement effectif des technologies 6G et au-delà dès 2031. Dans un contexte de trafic modéré par rapport au scénario tendanciel, la société est habituée à optimiser ses usages en mobilité et favorise le trafic en WiFi.

9 Gamme de téléphones mobiles plus simple.

Le scénario 3 propose des hypothèses proches du scénario tendanciel (le déploiement de la 5G est plus ciblé).

Le scénario 4 propose des hypothèses similaires au scénario tendanciel à l'exception de la 5G qui connaît un développement accru et du développement des technologies 6G et au-delà (XG).

CONSOMMATION ÉLECTRIQUE UNITAIRE DES ÉQUIPEMENTS

Dans S1, la consommation électrique des équipements réseaux fixes et mobiles est divisée par 3.

Le scénario 2 prend en compte une consommation électrique unitaire divisée par 2.

Les scénarios 3 et 4 appliquent une consommation électrique unitaire équivalente au scénario tendanciel : cette hypothèse est basée sur une hypothèse de densité du trafic nécessitant des équipements sans possibilité d'optimisation énergétique.

6.2.3. Tiers 3 – Centres de données

SUPERFICIE DE CENTRES DE DONNÉES

L'évolution du marché de l'hébergement à l'horizon 2050 a été construit pour les 4 scénarios sur la base des tendances à la croissance des besoins en espace d'hébergement et sur la base des niveaux d'externalisations *versus* les stratégies *on-premise*¹⁰.

Tableau 2 Superficie en m² IT des data centers (DC)

Superficie (en m ² IT)	2020	TEND 2050	S1	S2	S3	S4
DC traditionnels	458 190	0	416 939	478 823	0	0
DC à vocation commerciale	414 175	1 465 206	414 175	750 221	1 465 206	2 378 810
DC HPC	10 800	35 029	35 029	35 029	35 029	35 029
DC Edge	0	509 375	60 000	163 409	244 542	1 491 562
TOTAL	883 165	2 009 610	926 143	1 427 482	1 744 777	3 905 401

CONSOMMATION ÉLECTRIQUE DES ÉQUIPEMENTS IT PAR M² DE CENTRES DE DONNÉES

Dans S1, la consommation électrique des centres de données est divisée par trois par rapport au scénario tendanciel.

Le scénario 2 prend en compte une consommation électrique unitaire divisée par 2 par rapport au scénario tendanciel.

Les scénarios 3 et 4 appliquent une consommation électrique unitaire équivalente au scénario tendanciel : cette hypothèse est basée sur une hypothèse de densification des échanges d'information reposant largement sur les centres de données comme sur les réseaux. Les niveaux de consommation sont donc estimés sur la base du niveau tendanciel.

¹⁰ Utilisation du serveur et de l'environnement informatique de l'entreprise.

6.3. Synthèse des hypothèses

TIERS 1 (TERMINAUX)

Tableau 3 Nombre de terminaux par scénario

Nombre d'unités	2020	TEND 2050	S1	S2	S3	S4
Téléphones	116 578 847	98 114 075	84 718 798	91 405 363	98 114 075	110 281 631
Ordinateurs	147 102 668	180 124 277	44 865 004	136 202 931	180 124 277	180 124 277
Afficheurs électroniques	111 106 575	149 833 972	30 705 296	89 232 840	149 833 972	149 833 972
Consoles de jeux	19 583 396	78 640 629	10 011 317	19 583 396	78 640 629	78 640 629
Box TV	20 681 289	20 681 289	20 681 289	20 681 289	20 681 289	20 681 289
Périphériques externes	133 330 514	18 671 506	11 100 378	15 359 408	18 671 506	18 671 506
Objets connectés	247 005 197	3 604 237 985	247 005 197	902 446 485	3 604 237 985	10 553 991 980
TOTAL	795 388 486	4 150 303 732	449 087 279	1 274 911 711	4 150 303 732	11 527 125 584

TIERS 2 (RÉSEAUX)

Tableau 4 Nombre d'équipements réseaux par scénario

Nombre d'unités	2020	TEND 2050	S1	S2	S3	S4
Nombre de points hauts	51 572	108 149	55 372	55 372	108 149	113 539
Nombre d'équipements radios opérés	346 272	828 106	240 413	307 210	828 106	875 169

TIERS 3 (DATA CENTERS)

Tableau 5 Nombre d'équipements par scénario et par type de data center (DC)

Superficie (en m ² IT)	2020	TEND 2050	S1	S2	S3	S4
DC traditionnels	458 190		416 939	478 823		
DC à vocation commerciale	414 175	1 465 206	414 175	750 221	1 465 206	2 378 810
DC HPC	10 800	35 029	35 029	35 029	35 029	35 029
DC Edge		509 375	60 000	163 409	244 542	1 491 562
TOTAL	883 165	2 009 610	926 143	1 427 482	1 744 777	3 905 401

6.4. Résultats pour les 4 scénarios

Cet exercice constitue une première analyse appelant à engager une réflexion globale sur le secteur du numérique et les choix de vie et de société de demain.

- La mise en œuvre d'un de ces quatre scénarios aurait en effet un impact sur la maîtrise de l'empreinte carbone (qui couvre les phases de fabrication des équipements et d'usage) à 2050 qui serait très variable :

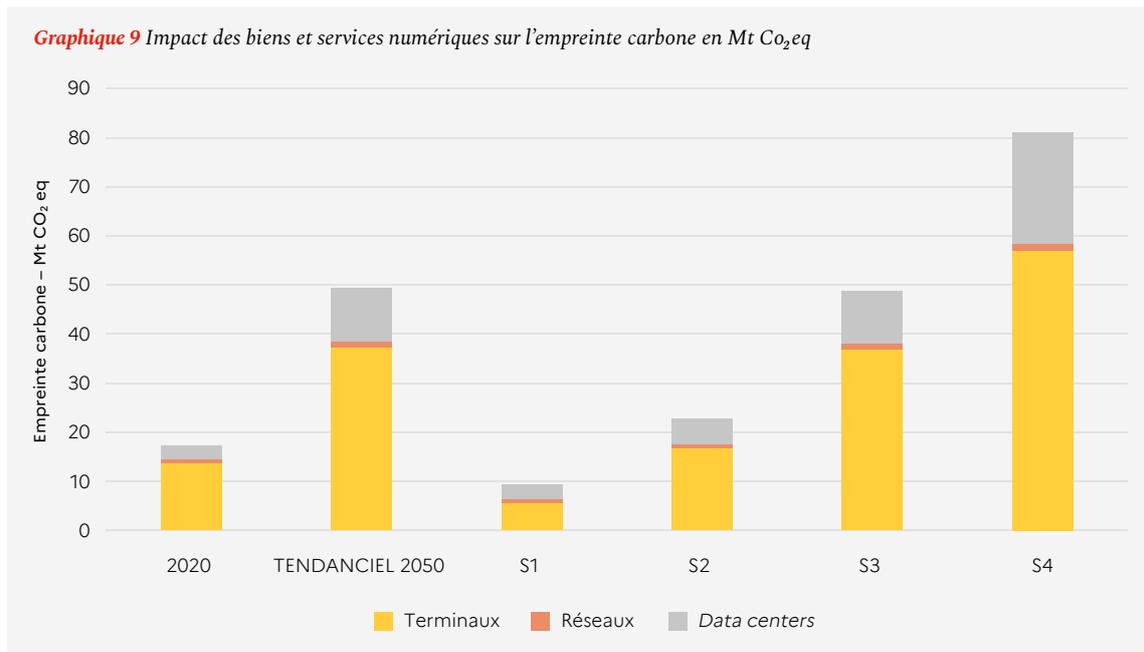
- S1 permettrait d'atteindre une réduction de moitié environ de l'empreinte carbone par rapport à la situation de 2020 avec une empreinte carbone de 9,4 Mt CO₂eq ;

- S2 permettrait d'atteindre une relative stabilité de l'empreinte carbone par rapport à la situation de 2020 avec une empreinte carbone de 22,8 Mt CO₂eq ;

- S3 serait très similaire au scénario tendanciel avec une empreinte carbone de 48,7 Mt CO₂eq, la différence minimale étant essentiellement permise par la variation du mix énergétique national ;

- S4 aurait des conséquences importantes sur l'empreinte carbone du numérique avec une multiplication par pratiquement 4 par rapport à 2020 pour atteindre 81,1 Mt de CO₂eq en 2050. Cela nécessiterait donc des efforts considérables dans d'autres secteurs pour arriver à endiguer les impacts de ce scénario ou un recours plus massif aux stratégies de captage et séquestration de carbone.

Graphique 9 Impact des biens et services numériques sur l'empreinte carbone en Mt CO₂eq



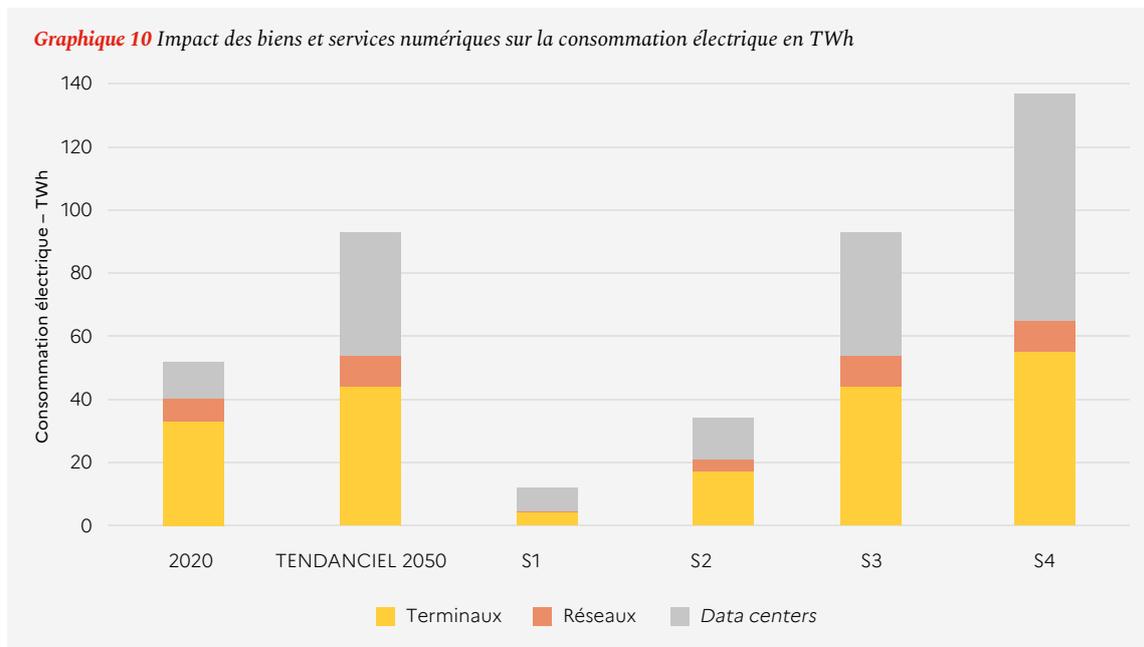
Dans ces différents scénarios, les sources des émissions de GES seront surtout concentrées autour des terminaux et des centres de données. En fonction du scénario considéré, les briques terminaux et centres de données pourraient voir leurs impacts environnementaux augmenter significativement en raison notamment du développement des équipements IoT et du volume de données à traiter et stocker.

Les équipements réseaux (fixes et mobiles) conservent une contribution à l’empreinte carbone relativement faible en comparaison des terminaux et des centres de données. Le développement de nouvelles technologies réseaux va cependant permettre notamment le déploiement massif des objets connectés entraînant des reports très importants en termes d’impacts environnementaux sur les briques équipements et centres de données.

• L’analyse des consommations électriques résultant de chacun des quatre scénarios permet également d’arriver à des conclusions similaires aux impacts GES :

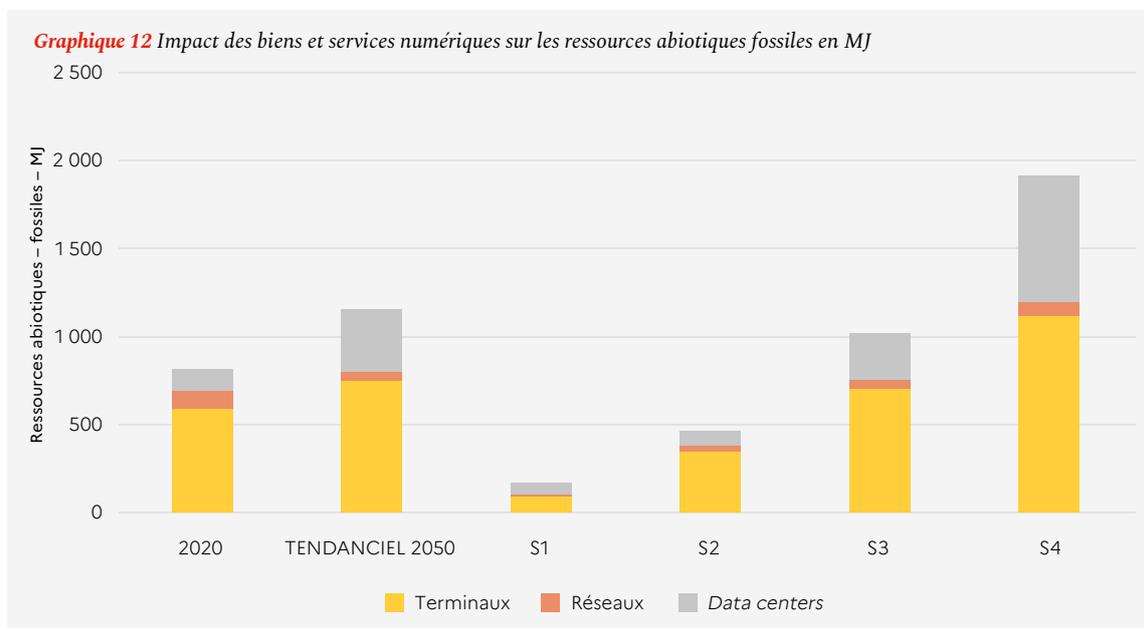
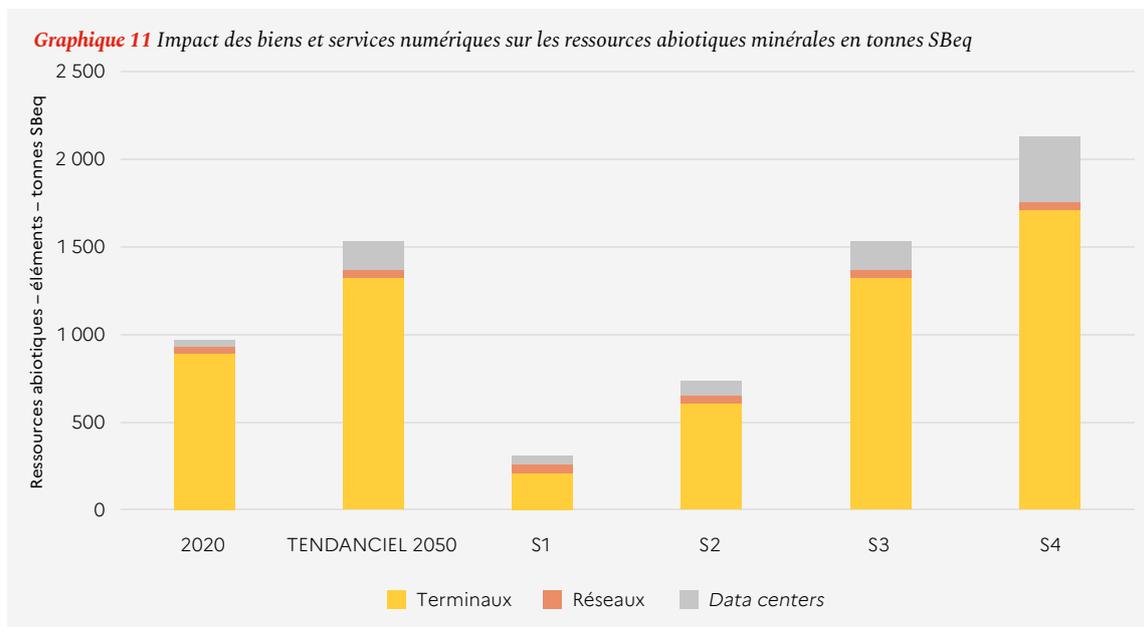
- les deux premiers scénarios permettraient d’atteindre une consommation électrique inférieure par rapport à la situation de 2020 avec respectivement une consommation de 12,3 TWh pour S1 et 33,6 TWh pour S2 ;
- S3, quant à lui, devrait atteindre un niveau de 92,8 TWh de consommation électrique, soit équivalent par rapport à la situation tendancielle 2050 ;
- enfin, S4 montre une explosion de la consommation électrique 50 % plus importante que les prévisions du scénario tendanciel pour atteindre près de 137 TWh en 2050.

Graphique 10 Impact des biens et services numériques sur la consommation électrique en TWh

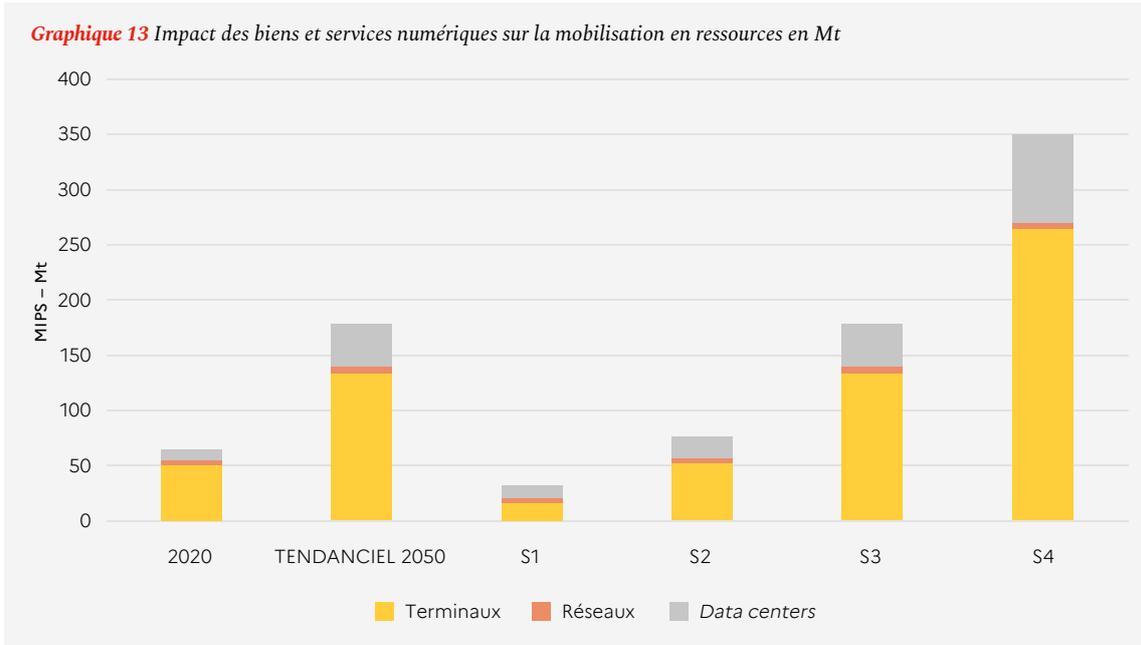


À horizon 2050, les terminaux ne représentent plus la consommation électrique (phases de fabrication et d'usage) la plus importante et sont égalés ou dépassés par les centres de données. Ces évolutions sont notamment liées aux besoins de traitement de données croissants. En revanche les terminaux représentent toujours l'impact environnemental le plus important en termes d'émissions de gaz à effet de serre (*Graphique 9*).

• L'analyse sur les autres indicateurs, notamment l'indicateur ressources minérales, montre également des résultats très similaires avec notamment un scénario 4 devant mobiliser près de 2 fois plus de matières que le scénario tendanciel, celui-ci mobilisant déjà 3 fois plus de matières qu'en 2020 (*Graphique 13*) :



Graphique 13 Impact des biens et services numériques sur la mobilisation en ressources en Mt



Par ailleurs, en termes de consommation de ressources et notamment en termes de consommation de métaux, l'analyse montre des

situations très différentes selon les scénarios avec un scénario 4 beaucoup plus dépendant à la pénurie de ressource que le scénario 1.

7. Limites de l'étude

L'incertitude sur la projection de données est inhérente à l'exercice de prospective, *a fortiori* dans un secteur numérique en évolution très rapide et à un horizon aussi lointain que 2050. Par ailleurs, la modélisation retenue ici (approche essentiellement *top-down* qui repose sur des hypothèses de projections de données d'inventaires et de consommation énergétique) ne permet pas de tenir compte de la complexité de l'évolution de l'infrastructure du numérique. Cela requiert une approche de modélisation plus fine et trop complexe afin de capturer l'interdépendance entre les différents tiers du numérique. Ce chapitre a pour but d'identifier les limites connues afin d'anticiper de futures mises à jour.

Les caractéristiques techniques et données d'impact des équipements sont celles des équipements de 2020. Pour 2050, ces caractéristiques vont vraisemblablement changer mais cela n'est pas pris en compte dans la modélisation ACV.

Les analyses issues d'échanges, d'entretiens avec différents experts des domaines numériques ont également été réalisées afin de partager les orientations, visions et hypothèses. Pour autant, il demeure des incertitudes liées aux échéances lointaines de la réflexion (2030-2050).

7.1. Incertitudes sur le nombre d'équipements, leurs caractéristiques, leurs impacts hors phase d'usage, leur durée de vie et leur consommation d'énergie

Les données collectées concernant le nombre d'équipements, leurs durées de vie et leur consommation électrique sont pourvoyeuses d'incertitude. En outre, les caractéristiques des équipements pris en compte pour l'ACV pour 2030 et 2050 sont les mêmes que pour 2020. Ce qui veut dire qu'une partie des hypothèses d'écoconception conduisant à une baisse des impacts environnementaux unitaires des équipements n'a pas été prise en compte comme l'augmentation de la taille des écrans qui a un effet négatif.

Les nouveaux équipements dont les normes n'ont pas été définies (6G, xG), sont considérés comme des améliorations des équipements

actuels et ne peuvent donc rendre compte des innovations disruptives que pourraient apporter ces nouvelles technologies. Par exemple, l'impact par équipement radio installé est réutilisé pour les modélisations de 2030 et 2050. Les seules évolutions considérées sont donc celles indiquées dans les hypothèses générales des différents scénarios modélisés.

Cette limite peut entraîner une surestimation des résultats si de réels efforts d'écoconception sont déployés dans les années à venir parvenant à réduire les impacts environnementaux unitaires des équipements. À l'inverse cela peut entraîner une sous-estimation des résultats si l'impact unitaire des équipements venait à augmenter (par exemple *via* la taille des écrans).

7.2. Prise en compte du recyclage

Les données utilisées dans la modélisation pour la partie relative à la fin de vie des équipements sont les mêmes qu'en 2020 (taux de collecte et taux de recyclage). Les 2 approches, à savoir avec bénéfices pour une partie des déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE) traités dans la filière réglementaire, et sans bénéfice pour la partie des DEEE orientés vers des filières alternatives, ont été prises en compte dans la modélisation 2020.

Ces approches et les paramètres qui les décrivent dans le modèle n'évoluent pas sur l'horizon de modélisation alors que deux scénarios (S3 et S4) misent sur une augmentation importante du taux de recyclage. Ceci a surtout un impact sur l'indicateur épuisement des ressources abiotiques métaux et minéraux.

7.3. Maintenance et *upgrade*

Lors de la phase d'utilisation, certains équipements requièrent une maintenance (changement de composants, nettoyage, etc.), et certains peuvent être mis à niveau (par exemple les ordinateurs fixes). Cela n'a pas été pris en compte dans l'étude. C'est le cas notamment des consommables d'impression (papier, cartouches d'encre, toners), même si leur inclusion dans les équipements du numérique est sujet à discussion.

Cette limite peut entraîner une sous-estimation des résultats.

7.4. Services numériques hors France et services numériques associés à l'usage hors France

Cette étude prend en compte les équipements basés sur le sol français : terminaux utilisateurs, réseaux et centres de données.

Concernant les réseaux et les centres de données, elle ne prend pas en compte les équipements basés à l'étranger et utilisés pour les services numériques utilisés en France. En revanche elle prend en compte tous les équipements installés en France, même s'ils sont utilisés pour des services à l'étranger.

Cette limite peut entraîner une sous-estimation des résultats.

7.5. Énergie renouvelable, obligations vertes, autoconsommation, compensation carbone, neutralité carbone

Certaines entreprises valorisent des actions de réduction d'impact liée à l'utilisation d'électricité décarbonée ou *via* des mécanismes financiers.

Certaines de ces actions (comme les obligations vertes ou la compensation carbone) n'ont pas été prises en compte du fait de l'approche méthodologique retenue reprenant le mix énergétique de l'électricité en France du fait du manque de données, notamment concernant l'autoconsommation d'électricité.

7.6. Détermination des quantitatifs d'équipement des réseaux

Pour 2020, la méthode de détermination des quantitatifs des équipements des réseaux (tiers 2) se base sur le flux des équipements de l'année 2020, c'est-à-dire sur la quantité d'équipements achetés en 2020. Cette approche diffère des deux autres tiers qui considèrent l'ensemble des équipements utilisés et leur durée de vie (approche par amortissement des impacts environnementaux hors phase d'usage).

Par cohérence avec le volet 2 de l'étude (2020), la modélisation de l'évolution du réseau à horizon 2030 et 2050 s'appuie sur cette approche en flux. En outre, elle intègre de l'incertitude en ce qu'elle dépend de nombreux facteurs (densité

de population, technologies de réseaux, type de terrain, consommation de données, etc.).

Par ailleurs, le modèle de dimensionnement des équipements de réseau déployés – basé sur des projections de déploiement (approche *top-down*) – reste d'une granularité assez large mais suffisante pour les besoins de l'exercice (dégager des tendances).

7.7. Calcul de la consommation électrique des réseaux

Une approche *top-down* a été choisie pour 2020. La consommation électrique à horizon 2030 et 2050 a dû être reconstituée à partir de l'évolution du nombre d'amplificateurs de puissance pour le mobile et du nombre d'abonnés pour le fixe.

7.8. Différentiation métropole/ Outre-mer

Les régions et territoires d'outre-mer ont des particularités en matière :

- de mix électrique.
- de quantitatif et d'efficacité des systèmes et infrastructures numériques.

Dans cette étude, il n'a pas été possible de différencier les quantitatifs d'équipement entre la métropole et les territoires et régions d'outre-mer, ce qui n'a pas rendu possible une analyse plus fine des impacts associés.

7.9. Objets connectés

La méthode de détermination des impacts environnementaux des objets connectés est issue d'une modélisation à un niveau large. Cette approche nécessiterait d'être renforcée par une analyse plus fine des équipements concernés afin de réduire l'incertitude associée, notamment sur le profil matériel des objets. De plus, la définition du périmètre des équipements considérés comme de l'IoT ne fait pas encore l'objet de consensus (notamment la frontière entre le numérique et d'autres secteurs embarquant la connectivité). Cela est d'autant plus important que les objets connectés sont amenés à se développer fortement dans les années à venir.

7.10. Hébergement

La méthode de détermination des impacts environnementaux des centres de données est basée sur une modélisation à partir d'une

analyse *top-down* qui est certes imparfaite, mais qui a le mérite de fixer les grandes tendances de l'hébergement à la fois en 2020 et de se projeter jusqu'en 2030 en limitant les incertitudes liées à une analyse purement *bottom-up* construite à partir des besoins de téléchargements, traitement et hébergement des données.

7.11. Technologies nouvelles

La méthode retenue pour la présente étude ne tient pas compte des technologies nouvelles qui pourraient apparaître au cours des prochaines décennies et qui pourraient favorablement ou défavorablement affecter les comportements de production des biens et des services, ou bien leurs usages. L'approche de modélisation retenue adopte une vision agrégée de l'évolution des technologies et des services du numérique et non des visions spécifiques (par IA/ML, *blockchain*, métavers, AR/VR etc.). La modélisation effectuée prend donc en compte implicitement ces tendances/services/technologies sans toutefois pouvoir rendre compte de leur impact individuel.

7.12. Différences entre l'étude sectorielle sur les impacts environnementaux du numérique en France et les travaux Transition(s) 2050 de 2021

Ce feuillet « Numérique » se base sur les résultats d'une étude sectorielle prospective à 2030 et 2050 visant à évaluer les impacts environnementaux multicritère du numérique en France *via* une modélisation ACV. Cette étude sectorielle a été réalisée postérieurement à Transition(s) 2050 et dans une logique d'approfondissement. Dans l'exercice Transition(s) 2050, l'impact du numérique n'a pas été pris en compte de manière sectorielle mais plutôt intégré comme une partie d'autres secteurs, notamment celui du bâtiment (par exemple consommation des terminaux dans le résidentiel et le tertiaire, ou des centres de données dans le tertiaire). Le périmètre ainsi que les approches de modélisation sont donc différents entre les deux exercices. Aussi, il peut apparaître des différences, notamment sur la consommation électrique des terminaux et des centres de données.

TRANSITION(S) 2050

Tableau 6 Consommation électrique des terminaux en TWh dans Transition(s) 2050 (novembre 2021)

Consommation électrique des terminaux en TWh	2015	TEND 2050	S1	S2	S3	S4
TOTAL RÉSIDENTIEL	18,0	15,8	7,3	11,4	13,6	20,2
TOTAL TERTIAIRE	8,3	8,0	6,1	6,1	7,4	8,0
TOTAL Résidentiel + Tertiaire	26,3	23,9	13,4	17,5	21,1	28,3

ÉTUDE IMPACT ENVIRONNEMENTAL DU NUMÉRIQUE EN FRANCE

Tableau 7 Consommation électrique des terminaux en TWh dans l'étude impact environnemental du numérique (janvier 2023)

Consommation électrique des terminaux en TWh	2020	TEND 2050	S1	S2	S3	S4
Résidentiel	18,2	20,9	2,8	10,4	20,9	25,5
Professionnel	14,9	23,4	1,4	6,6	23,4	29,5
TOTAL	33	44,3	4,1	17,0	44,3	55,0

Sur les terminaux du secteur du bâtiment, les écarts peuvent s'expliquer par des différences de périmètres :

- un périmètre plus large dans les équipements professionnels de l'étude sectorielle numérique que le seul secteur du tertiaire dans l'exercice Transition(s) 2050 ;
- une prise en compte d'un grand nombre d'équipements et notamment de l'IoT dans l'étude sectorielle moins détaillé dans l'exercice initial ;

- dans l'étude sectorielle numérique, la consommation électrique a été comptabilisée dans le périmètre « numérique » alors que dans Transition(s) 2050, cette consommation a été comptabilisée dans d'autres secteurs : par exemple les objets connectés dans les stores et fenêtres ou ceux dans l'automatisation des appareils électroménagers ou les capteurs réseaux ont été comptabilisés dans le secteur du bâtiment.

TRANSITION(S) 2050

Tableau 8 Consommation électrique des data centers en TWh dans Transition(s) 2050 (novembre 2021)

Consommation électrique des terminaux en TWh	2015	TEND 2050	S1	S2	S3	S4
TOTAL	1,9	31,7	0,9	1,0	17,3	29,3

ÉTUDE IMPACT ENVIRONNEMENTAL DU NUMÉRIQUE EN FRANCE

Tableau 9 Consommation électrique des data centers en TWh dans l'étude impact environnemental du numérique (janvier 2023)

Consommation électrique des terminaux en TWh	2020	TEND 2050	S1	S2	S3	S4
TOTAL	12,0	39,0	5,8	13,2	39,0	72,1

Sur les centres de données, des différences d'approche et de périmètre entre les deux exercices peuvent également expliquer les différences de résultats, notamment sur S3 et S4.

En effet, contrairement aux scénarios tendanciels qui se rejoignent dans l'étude sectorielle numérique et dans Transition(s) 2050, des hypothèses différentes ont été considérées dans S3 avec plus de découplage pris en compte dans Transition(s) 2050 (entraînant une forte augmentation de l'efficacité énergétique du traitement des données (GWh/EB) et une amélioration du PUE (*Power Usage Effectiveness*) et des scénarios d'évolution différents considérés, prenant notamment en compte un effet de saturation pour S4, effet de saturation qui n'a pas été retenu dans l'étude sectorielle numérique.

Cet effet de saturation peut être dû à l'automatisation et l'instrumentalisation des chaînes de production industrielles qui sera très avancée d'ici 2040 (et dont le rythme de croissance diminuera fortement à partir de 2040) ou à des risques de pénurie en ressources (et notamment en métaux)

pouvant limiter la capacité pour les centres de données à s'équiper en matériel.

Cela se traduit par une prise en compte dans Transition(s) 2050 d'une diminution de la croissance du volume de données des *edge data centers* (utilisés pour l'industrie, les *smarts buildings*, etc.) en comparaison à l'étude sectorielle numérique où une très forte croissance du volume de données liée au nombre très important d'objets connectés a été considérée.

Il existe également une différence de périmètre entre les deux études, puisque dans Transition(s) 2050, seuls les *data centers* de colocation (hébergeurs) et hyperscale sont pris en compte dans l'évaluation des consommations en 2020. En effet, les serveurs d'entreprises par exemple n'ont pas été pris en compte car intégrés dans les consommations des bâtiments tertiaires (cela représente aujourd'hui le plus gros des consommations mais d'ici à 2050, on considère que tout aura migré dans le cloud dans les *data centers* de colocation ou hyperscale).

8. Bibliographie

Pour revenir à la page contenant la première occurrence du renvoi bibliographique au sein du chapitre, cliquez sur le numéro concerné entre crochets.

- [1] Yasmine Aiouch et al., pour l'ADEME et l'Arcep, Évaluation de l'impact environnemental du numérique en France et analyse prospective. État des lieux et pistes d'actions, 179 pages, 2022.
- [2] Citizing, pour le Sénat, Empreinte carbone du numérique en France : des politiques publiques suffisantes pour faire face à l'accroissement des usages ?, 2020.
- [3] Haut conseil pour le climat, Maîtriser l'impact carbone de la 5G, 2020.
- [4] NegaOctet, pour Score LCA, Impacts environnementaux des objets connectés et des services basés sur leur utilisation : ordres de grandeurs et recommandations méthodologiques, 2021.
- [5] ADEME, Feuilleton « Évaluation des empreintes carbone et matières », 2023.
- [6] European Platform on Life Cycle Assessment.
- [7] Cisco, Cisco Global Cloud Index: Forecast and Methodology, 2016-2021: White Paper, 2018.
- [8] IEA 4E EDNA, Intelligent Efficiency For Data Centres & Wide Area Networks, 2019.
- [9] CRÉDOC, pour Arcep, Baromètre du numérique 2021, 2021.
- [10] Xerfi, Le Marché du matériel informatique et des smartphones, 2020.
- [11] Baromètre Recommerce, Le Marché du mobile d'occasion, communiqué de presse, 2022.
- [12] BVA Group, Numérique et environnement, 2019.
- [13] Ericsson, Ericsson Mobility Report, 2021.
- [14] Cisco, Cisco Visual Networking Index: Forecast and Trends, 2017-2022.
- [15] Ericsson, Ericsson Mobility Report, 2016.
- [16] Hazas, M. et al., Are there limits to growth in data traffic?: On time use, data generation and speed, ResearchGate, 6 pages, 2016.
- [17] Suski, P., All you can stream: Investigating the role of user behavior for greenhouse gas intensity of video streaming, 2020.
- [18] McKinsey Global Institute, Notes from the AI Frontier. Modeling the Impact of AI on the World Economy, 2018.
- [19] VHK and Viegand Maagøe for the European Commission, ICT Impact study, Final report, 2020.
- [20] IEA 4E EDNA, Total Energy Model for Connected Devices, 2019.
- [21] ADEME, Feuilleton « Mix électrique. Quelles alternatives et quels points communs ? », 2022.

FEUILLETON TRANSITION(S) 2050

« **Transition(s) 2050. Choisir maintenant. Agir pour le climat** » est une prospective qui peint quatre chemins cohérents et contrastés pour atteindre la neutralité carbone en France en 2050. Ils visent à articuler les dimensions technico-économiques avec des réflexions sur les transformations de la société qu'elles supposent ou qu'elles suscitent.

Le rapport Transition(s) 2050, première étape de cet exercice, a été publié le 30 novembre 2021. Chaque secteur y est détaillé, à savoir ceux qui relèvent de la consommation, du système productif, de l'offre d'énergie, des ressources et des puits de carbone. Il est complété par des feuillets qui apportent un éclairage supplémentaire, en particulier sur les impacts induits.

C'est l'objet du présent ouvrage qui vise à mesurer l'impact environnemental des biens et des services numériques en France à l'horizon 2050 sur la base d'une étude d'analyse de cycle de vie commandée par le gouvernement et réalisée pour le compte de l'ADEME et de l'Arcep.

L'ensemble de ces publications est le résultat d'un travail de quatre ans mené par l'ADEME en interaction avec des partenaires extérieurs afin d'éclairer les décisions à prendre dans les années à venir. Car le but n'est pas de proposer un projet politique, ni « la » bonne trajectoire mais de rassembler des éléments de connaissances techniques, économiques et environnementales afin de faire prendre conscience des implications des choix sociétaux et techniques qu'entraîneront les chemins qui seront choisis.



La version numérique de ce document est conforme aux normes d'accessibilité PDF/UA (ISO 14289-1), WCAG 2.1 niveau AA et RGAA 4.1 à l'exception des critères sur les couleurs. Son ergonomie permet aux personnes handicapées moteurs de naviguer à travers ce PDF à l'aide de commandes clavier. Accessible aux personnes déficientes visuelles, il a été balisé de façon à être retranscrit vocalement par les lecteurs d'écran, dans son intégralité, et ce à partir de n'importe quel support informatique.

Version e-accessible par  DocAxess

012105

