

# IMPACT ENVIRONNEMENTAL DES USAGES DU NUMÉRIQUE EN GRAND EST

---

---

**RAPPORT FINAL**



**EXPERTISES**

**Sept.  
2023**

## REMERCIEMENTS

### **Pilotage de l'étude :**

Jérôme BETTON, directeur régional ADEME Grand Est  
Yann CARBAIN, ADEME Grand Est

### **Membres du comité de pilotage :**

Apolline BUSCH, Grand E-Nov+  
Vincent COSTES, Région Grand Est  
Yann DACQUAY, Chambre Régionale d'Agriculture Grand Est  
Sylvain DORSCHNER, Grand E-Nov+  
Erwann FANGEAT, ADEME  
Benjamin GODFROY, Région Grand Est  
Raphaël GUASTAVI, ADEME  
Adrien HAIDAR, Arcep  
Isabelle KUHN, Grand E-Nov+  
Richard MARCELET, SGARE/DREAL Grand Est  
François MAZIERE, CCI Grand Est  
Julia MEYER, ADEME  
Caroline REY, Grand E-Nov+  
Alexis STEINER, Grand E-Nov+  
Antoine TROTET, Région Grand Est

### **Autres personnes interrogées dans le cadre des travaux ou ayant contribué à l'étude :**

Adrien BADINA, 2CRSI  
Arnaud CLEMENT, Adista  
Claire-Amance PREVOST, Grand Est Numérique  
Frédéric SCHNUR, Grand Est Numérique  
Frédéric SPINDLER, Numeum Grand Est  
Hugues FERREBOEUF, Virtus Management  
Caroline VATEAU, Cag Gemini Invent  
Etienne Lees-Perasso, TIDE

## CITATION DE CE RAPPORT

CARBAIN Yann, ADEME ; BONNENTIEN Guillaume, NICO Tom, MATHEVET Franck, GODINOT Victor, I Care ; ESKENAZI Laurent, FOURBOUL Eric, ROUSSILHE Gauthier, EKCHAJZER David, Hubblo ; 2023, **Impact environnemental des usages du numérique en région Grand Est, 153 pages**

Cet ouvrage est disponible en ligne <https://librairie.ademe.fr/>



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'oeuvre 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.

**Ce document est diffusé par l'ADEME**

**ADEME**

20, avenue du Grésillé  
BP 90 406 | 49004 Angers Cedex 01

**Numéro de contrat : 2021MA000338**

**Étude réalisée pour le compte de l'ADEME par :** I Care, Hubblo

**Coordination technique - ADEME :** CARBAIN Yann, Référent régional Bâtiment & Numérique

**Direction/Service :** Direction régionale Grand Est



# SOMMAIRE

<b>RÉSUMÉ.....</b>	<b>8</b>
<b>1. CONTEXTE DU PROJET .....</b>	<b>9</b>
1.1. Objectifs de l'étude.....	9
1.2. Définition du numérique.....	10
<b>2. ÉTAT DES LIEUX DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DU NUMERIQUE EN REGION GRAND EST .....</b>	<b>12</b>
2.1. Introduction.....	12
2.2. Méthodologie d'analyse de cycle de vie.....	12
2.3. Définition de l'objectif et du périmètre de l'étude.....	12
2.3.1. Objectif de l'étude.....	12
2.3.2. Périmètre de l'étude .....	12
2.4. Spécificités de la région Grand Est .....	13
2.4.1. Connectivité fixe.....	13
2.4.2. Connectivité mobile .....	14
2.4.3. Datacenters .....	15
2.4.4. Organisations et population en région Grand Est.....	15
2.5. Spécificité de l'étude : Approches « production » et « consommation ».....	15
2.5.1. L'approche « consommation ».....	15
2.5.2. L'approche « production » .....	16
2.6. Inventaires & données utilisées .....	17
2.6.1. Indicateurs étudiés.....	17
2.6.2. Données globales .....	19
2.6.2.1. Facteurs d'impacts de l'électricité .....	19
2.6.2.2. Proxy population et emplois .....	20
2.6.3. Données tiers 1 – Terminaux .....	20
2.6.3.1. Dénombrement.....	21
2.6.3.2. Hypothèses d'usage .....	22
2.6.5. Données tiers 2 – Réseau .....	25
2.6.6. Données tiers 3 – Datacenters .....	26
2.6.6.1. Approche production .....	26
2.6.6.2. Biais méthodologique .....	28
2.6.6.3. Le modèle « Trafic France » .....	28
2.6.6.4. Le modèle « Energie Monde » .....	29
2.6.6.5. Synthèse des modèles étudiés .....	30
2.7. Résultats.....	31
2.7.1. Evaluation globale.....	31
2.7.1.1. Approche Production .....	31
2.7.1.2. Approche Consommation .....	32
2.7.2. Décomposition des impacts par tier .....	34
2.7.2.1. Tiers 1 – Terminaux & IoT .....	34
2.7.2.2. Tiers 2 – Réseau .....	37
2.7.2.3. Tiers 3 – Datacenters .....	38



2.7.2.3.1.	Approche Production .....	38
2.7.2.3.2.	Approche Consommation .....	41
2.7.2.3.3.	Comparaison des deux approches .....	45
<b>2.8.</b>	<b>Analyses de sensibilité .....</b>	<b>46</b>
2.8.1.	Analyse de sensibilité sur le mix électrique des datacenters « importés » .....	46
2.8.2.	Analyse de sensibilité sur la proportion de data centers « importés » – zoom sur le tiers 3 .....	47
2.8.3.	Analyse de sensibilité sur le pourcentage de datacenters « importés » - vision globale.....	49
<b>2.9.</b>	<b>Recommandations .....</b>	<b>50</b>
<b>2.10.</b>	<b>Conclusions de l'état des lieux.....</b>	<b>51</b>
<b>2.11.</b>	<b>Limites de l'étude .....</b>	<b>52</b>
<b>3.</b>	<b>ETUDE DES EFFETS INDIRECTS DE LA NUMERISATION POUR TROIS CAS D'USAGE ....</b>	<b>53</b>
<b>3.1.</b>	<b>Introduction et objectifs de l'étude.....</b>	<b>53</b>
<b>3.2.</b>	<b>Méthodologie générale.....</b>	<b>53</b>
3.2.1.	Analyse de l'existant .....	53
3.2.2.	Méthodologie choisie.....	54
3.2.3.	Choix des indicateurs environnementaux.....	55
3.2.4.	Classification des effets environnementaux indirects de la numérisation .....	55
3.2.5.	Effets environnementaux nets .....	56
3.2.6.	Modèle paramétrique .....	56
<b>3.3.</b>	<b>Choix des services numériques à évaluer .....</b>	<b>56</b>
<b>3.4.</b>	<b>Enseignement à distance .....</b>	<b>58</b>
3.4.1.	Choix du cas d'étude .....	58
3.4.2.	Revue de littérature .....	58
3.4.3.	Cadre d'évaluation .....	58
3.4.3.1.	Objectifs de l'évaluation .....	58
3.4.3.2.	Définition du périmètre .....	59
3.4.4.	Identification des effets .....	60
3.4.4.1.	Définition du scénario de base.....	60
3.4.4.2.	Définition des effets.....	60
3.4.5.	Modélisation .....	61
3.4.5.1.	Définition des effets significatifs et des données disponibles .....	61
3.4.5.2.	Collecte des données .....	62
3.4.5.3.	Hypothèses .....	62
3.4.5.4.	Modèle paramétrique.....	63
3.4.6.	Résultats.....	63
3.4.6.1.	Configuration des paramètres par défaut .....	64
3.4.6.2.	Synthèse des résultats par unité fonctionnelle.....	68
3.4.6.3.	Analyse territoriale .....	68
3.4.6.4.	Analyse de sensibilité : modification des taux d'électrification de 2030 Optim .....	69
3.4.6.5.	Analyse de sensibilité : modification des conditions d'enseignement à distance .....	69
3.4.6.6.	Limites.....	70
3.4.7.	Conclusions .....	71
<b>3.5.</b>	<b>Maisons connectées.....</b>	<b>72</b>
3.5.1.	Choix du cas d'étude .....	72
3.5.2.	Revue de littérature .....	72
3.5.3.	Cadre d'évaluation .....	73
3.5.3.1.	Définition du terme.....	73
3.5.3.2.	Objectif de l'évaluation .....	74
3.5.3.3.	Définition du périmètre .....	74



3.5.3.4.	Définition de l'unité fonctionnelle .....	75
3.5.3.5.	Méthode d'attribution .....	75
3.5.4.	Identification des effets .....	75
3.5.4.1.	Définition du scénario de base.....	75
3.5.4.2.	Définition des effets.....	75
3.5.5.	Modélisation .....	77
3.5.5.1.	Définition des effets significatifs et des données disponibles .....	77
3.5.5.2.	Collecte des données .....	77
3.5.5.3.	Hypothèses .....	78
3.5.5.4.	Modèle paramétrique.....	80
3.5.6.	Résultats.....	80
3.5.6.1.	Synthèse des résultats par unité fonctionnelle.....	80
3.5.6.2.	Scénarios 2020 .....	81
3.5.6.3.	Scénarios 2030 .....	83
3.5.6.4.	Comparaison des scénarios.....	85
3.5.6.5.	Interprétation.....	86
3.5.6.6.	Limites.....	86
3.5.7.	Conclusions .....	87
<b>3.6.</b>	<b>Fermes connectées .....</b>	<b>88</b>
3.6.1.	Choix du cas d'étude .....	88
3.6.2.	Revue de littérature .....	88
3.6.3.	Définition des besoins méthodologiques.....	97
3.6.3.1.	Définition du terme.....	97
3.6.3.2.	Définition du cadre .....	98
3.6.3.3.	Exemple de la diversité de l'agriculture en région Grand Est .....	99
3.6.3.4.	Définition de l'impact environnemental des équipements et services numériques et non-numériques dans le secteur agricole .....	101
3.6.3.5.	Définition des catégories d'impact .....	103
3.6.3.6.	Définition du scénario de base.....	104
3.6.3.7.	Définition des effets.....	105
3.6.3.8.	Définition des scénarios futurs .....	107
3.6.3.9.	Perspectives possibles pour l'évaluation de la région Grand Est.....	107
<b>4.</b>	<b>ANALYSE PROSPECTIVE 2030 DE L'IMPACT ENVIRONNEMENTAL DU NUMERIQUE EN GRAND EST .....</b>	<b>109</b>
<b>4.1.</b>	<b>Introduction.....</b>	<b>109</b>
<b>4.2.</b>	<b>Méthodologie .....</b>	<b>109</b>
4.2.1.	Objectifs et méthodologie de l'analyse prospective.....	109
4.2.2.	Indicateurs étudiés.....	110
4.2.3.	Atelier sur les impacts du numérique en région Grand Est .....	110
4.2.4.	Présentation des scénarios étudiés .....	112
4.2.4.1.	Tendanciel.....	112
4.2.4.2.	Sobriété Numérique.....	112
4.2.4.3.	Technologies vertes .....	113
4.2.5.	Présentation des paramètres étudiés .....	114
4.2.5.1.	Tiers 1 – Equipements utilisateurs .....	114
4.2.5.2.	Tiers 1 – Objets connectés (IoT).....	114
4.2.5.3.	Tiers 2 – Réseaux.....	114
4.2.5.4.	Tiers 3 – Centres de données.....	115
<b>4.3.</b>	<b>Hypothèses et données utilisées.....</b>	<b>116</b>
4.3.1.	Tiers 1 – Equipements utilisateurs .....	116



4.3.1.1.	Scénario tendanciel.....	116
4.3.1.2.	Scénario « sobriété numérique ».....	116
4.3.1.3.	Scénario technologies vertes .....	117
4.3.1.4.	Comparaison des paramètres des scénarios.....	117
4.3.2.	Tiers 1 – Objets connectés (IoT).....	119
4.3.2.1.	Scénario tendanciel.....	119
4.3.2.2.	Scénario sobriété numérique.....	120
4.3.2.3.	Scénario technologies vertes .....	120
4.3.2.4.	Comparaison des paramètres des scénarios.....	121
4.3.3.	Tiers 2 – Réseaux.....	122
4.3.4.	Tiers 3 – Centres de données .....	123
4.3.4.1.	Besoins en salles informatiques.....	123
4.3.4.2.	Consommation électrique des équipements par m <sup>2</sup> de centre de données .....	124
<b>4.4.</b>	<b>Résultats des différents scénarios.....</b>	<b>125</b>
4.4.1.	Principaux enseignements .....	125
4.4.1.1.	Scénario tendanciel.....	125
4.4.1.2.	Scénario « sobriété numérique ».....	126
4.4.1.3.	Scénario Technologies Vertes .....	128
4.4.2.	Comparaison des scénarios.....	130
4.4.2.1.	Vision globale (tous tiers).....	130
4.4.2.2.	Tiers 1 - Equipements utilisateurs.....	140
4.4.2.3.	Tiers 2 – Réseaux.....	143
4.4.2.4.	Tiers 3 – Centre de données .....	145
<b>4.5.</b>	<b>Conclusions et limites de l'étude.....</b>	<b>148</b>
4.5.1.	Conclusions de la prospective .....	148
4.5.2.	Limites de l'étude.....	148
	<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES .....</b>	<b>149</b>
	<b>INDEX DES TABLEAUX &amp; FIGURES .....</b>	<b>151</b>
	<b>GLOSSAIRE.....</b>	<b>155</b>



## RÉSUMÉ

L'ADEME et l'Arcep ont publié en 2022 et 2023 les différents éléments constitutifs d'une étude sur les impacts environnementaux du numérique en France, composée d'un volet « état des lieux » et d'un volet « prospective » aux horizons temporels 2030 et 2050. La loi visant à Réduire l'Empreinte Environnementale du Numérique (dite loi REEN) a été officiellement promulguée le 15 novembre 2021. Cette loi propose une série de mesures pour favoriser un numérique sobre, responsable et environnementalement vertueux en France, notamment à l'échelle territoriale.

Dans la continuité de l'étude ADEME/Arcep portant sur l'échelle nationale et afin de lancer une démarche régionale sur le sujet du numérique responsable, la Direction Régionale Grand Est de l'ADEME a souhaité évaluer les impacts environnementaux du numérique à l'échelle de la région. En particulier, un état des lieux des impacts environnementaux a été réalisé, portant sur l'année 2020, décliné dans une vision prospective à horizon 2030. Par ailleurs, les effets environnementaux indirects, positifs comme négatifs, de la numérisation ont été évalués pour trois cas d'usage : l'enseignement à distance, des maisons connectées et des fermes connectées (ce dernier n'ayant été évalué que qualitativement). Pour ces trois grandes composantes de l'étude, la méthodologie utilisée est celle de l'Analyse de Cycle de Vie (ACV) multicritères.

L'état des lieux, réalisé sur l'année 2020, présente la spécificité de calculer les impacts environnementaux selon une approche dite « consommation », en plus de l'approche dite « production », correspondant à celle utilisée dans l'étude nationale ADEME-Arcep. La principale distinction entre ces deux approches se trouve au niveau du périmètre de prise en compte des datacenters : l'approche « production » se cantonne aux datacenters présents sur le territoire de la région Grand Est, l'approche « consommation » inclut les datacenters situés en dehors du territoire mais desservant des usages ayant lieux sur le territoire régionale. Par ailleurs, l'inventaire effectué souligne la faible disponibilité à ce jour des données relatives aux biens et usages numériques à l'échelle locale.

En 2020, les émissions de GES associées aux usages du numérique en région Grand Est s'élèvent à 2,2 millions de tCO<sub>2</sub>e, soit environ 400 kgCO<sub>2</sub>e par habitant. Les équipements utilisateurs et assimilés représentent la majorité des impacts pour tous les indicateurs étudiés (de 50% à 87% du total), devant les data centers (de 10% à 46%, en fonction des indicateurs). La contribution du réseau varie entre 1% et 11%, en fonction des indicateurs).

La prospective à horizon 2030 montre que les impacts (sur tous les indicateurs étudiés) augmentent dans le scénario tendanciel (+31% d'émissions de GES, +32% de consommation d'énergie primaire notamment). Le scénario « technologies vertes », qui met l'accent sur le progrès technique dans le contexte d'une dynamique soutenue d'augmentation des usages, permet de contenir la hausse des impacts (+18% d'émissions de GES, -8% de consommation de ressources minérales et métalliques). Seul le scénario « sobriété numérique », qui combine l'activation des leviers techniques à une maîtrise de la croissance des usages, permet de réduire significativement les impacts sur tous les indicateurs étudiés : -14% d'émissions de GES, -24% de production de déchets, -32% de consommation de ressources minérales et métalliques.

L'étude des impacts environnementaux *nets*, c'est-à-dire prenant en compte les conséquences sur les autres secteurs de la société, des trois cas d'usages du numérique souligne que les gains potentiels en matière d'émissions de GES (contribution à la décarbonation de la société) dépendent très fortement du contexte et sont difficiles à généraliser. Concernant le cas d'étude *enseignement à distance*, si les gains peuvent être significatifs à l'échelle individuelle, ils ne le sont à l'échelle collective que si le modèle à *distance* est largement déployé. Concernant le cas *maisons connectées*, les gains potentiels sont extrêmement sensibles aux évolutions des comportements individuels, et notamment de l'effet rebond. Les gains ne sont possibles qu'en l'absence d'effet rebond.



# 1. Contexte du projet

## 1.1. Objectifs de l'étude

Comme souligné dans l'étude nationale relative aux impacts environnementaux du numérique en France réalisée par l'ADEME et l'Arcep [1], 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.). En France, la consommation de biens électroniques connaît une croissance de plus en plus soutenue. Ainsi, d'après l'ADEME [2], plus de 1,2 milliard d'équipements électriques et électroniques ont été mis sur le marché en 2019, en croissance de 25 % par rapport à 2018.

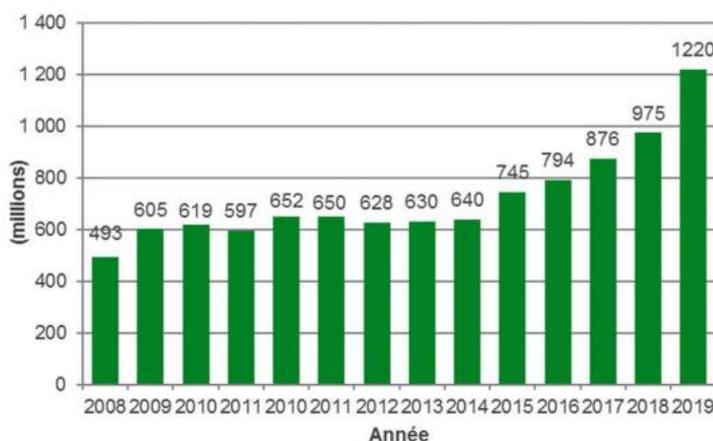


Figure 1 : Evolution du nombre d'équipements électriques et électroniques mis sur le marché entre 2006 et 2019 [2].

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 [3] et Impacts du numérique en France – iNUM 2020 [4] de GreenIT.fr, Rapport du Shift Project [5,6,7], Étude Citizing commandée par le Sénat [8], Rapport du haut conseil pour le climat sur la 5G [9], etc.) éclairent le débat.

Compte tenu de la connaissance accumulée sur le sujet des équipements et infrastructures numériques [10], est mise en évidence la nécessité d'adopter une approche plus globale, robuste et transparente qui soit à la fois :

- **Multicritères**, car les impacts environnementaux du numérique ne se réduisent pas aux émissions de gaz à effet de serre ;
- **Multi-étapes**, afin d'intégrer les impacts générés lors de toutes les étapes du cycle de vie des équipements et sur les 3 tiers du numérique (terminal, réseau, centres de données) ;
- **Multi composants**, 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 propre.

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 et n'est pas porteuse, en elle-même, d'impacts environnementaux.

Par ailleurs, la loi visant à Réduire l'Empreinte Environnementale du Numérique (REEN) a été officiellement promulguée le 15 novembre 2021, une première en France. Cette Loi propose une série de mesures pour favoriser un numérique sobre, responsable et environnementalement vertueux en France. Notamment, la loi REEN vise à :

- Promouvoir une stratégie numérique responsable dans les territoires : dès 2025, les communes et leurs intercommunalités de plus de 50 000 habitants devront élaborer une stratégie numérique responsable ;
- Sensibiliser et faire prendre conscience de l'impact environnemental du numérique : dès l'école et à l'entrée à l'université et par la création d'un observatoire des impacts environnementaux du numérique auprès de l'ADEME et l'ARCEP ;
- Limiter le renouvellement des appareils numériques : en rendant plus opérationnel le délit d'obsolescence programmée, en renforçant la lutte contre l'obsolescence logicielle, en informant le consommateur des caractéristiques essentielles de chaque mise à jour de son appareil numérique ou en interdisant les techniques empêchant le consommateur d'installer les logiciels ou systèmes d'exploitation de son choix sur son appareil au bout d'un délai de deux ans ;
- Favoriser les usages numériques écologiquement vertueux : en prévoyant un référentiel général d'écoconception des services numériques, fixant des critères de conception durable des sites web à partir de 2024 ;
- Promouvoir des data centers et réseaux moins énergivores : en permettant aux data centers les plus vertueux de bénéficier d'un tarif réduit de la TICFE dès 2022.

C'est dans ce contexte que l'ADEME Grand Est a lancé cette étude. Les objectifs sont ainsi de :

- Connaître la nature et le volume des impacts environnementaux (effets négatifs) liés au numérique aujourd'hui et demain en région Grand Est, afin d'identifier les leviers d'action de réduction potentiels, en lien avec les démarches nationale et régionale existantes ;
- Identifier la capacité du numérique à être un levier pour la transition énergétique et écologique du territoire en évaluant les impacts indirects (potentiellement positifs) associés à trois cas d'usage du numérique ;
- Définir une stratégie d'accompagnement des acteurs en lien avec les parties prenantes déjà engagées sur ce sujet du numérique responsable et construire une stratégie de communication différenciée à ce sujet.

Le présent rapport restitue les résultats des travaux liés aux deux premiers objectifs de l'étude (connaissance de l'impact actuel du numérique, scénarios prospectifs de son évolution, évaluation des impacts indirectes potentiellement positifs). Le dernier volet (accompagnement, stratégie de mobilisation et plan de communication) fait l'objet d'un document séparé.

## **1.2. Définition du numérique**

En s'inspirant de la recommandation ITU-T L.1450 [11] définissant une méthodologie pour la quantification de l'impact environnemental du secteur de l'information et de la communication (TIC), le périmètre de cette étude comprend les catégories suivantes :

### **I. Les biens d'utilisateurs finaux (les terminaux)**

Les biens des utilisateurs finaux comprennent :

- 1) les ordinateurs (les périphériques informatiques étant exclus du périmètre de la présente étude) ;
- 2) l'électronique grand public à des fins de communication comprend entre autres :
  - a) téléphones mobiles, téléphones intelligents, tablettes, ordinateurs fixes et ordinateurs portables,
  - b) les biens du réseau domestique ;
- 3) les appareils IoT.

En cohérence avec l'étude nationale ADEME/Arcep [1], il est considéré que les télévisions et autres écrans, box TV, imprimantes, consoles de jeu vidéo et enceinte connectées peuvent être rattachés au périmètre, élargissant ainsi la définition *stricto sensu* des TIC de l'ITU à une acceptation plus large de la sphère numérique.

### **II. Les biens de réseau TIC (le réseau)**

Les biens de réseau TIC comprennent :

- 1) le réseau d'accès filaire ;
- 2) le réseau d'accès sans fil ;
- 3) le réseau central des télécommunications et les centres de données connexes ;
- 4) le réseau de base et de transmission de données Metro/Edge/IP et les centres de données de réseau ;



La télécommunication par satellite, les réseaux d'entreprise, le réseau téléphonique commuté public sont exclus du périmètre faute de données suffisantes. De la même manière, les activités de maintenance des réseaux et les équipements supports des réseaux (alimentation et climatisation) ne sont pas inclus.

Afin d'assurer la cohérence du périmètre avec celui de l'étude ADEME/Arcep [1] et contrairement à la recommandation de l'ITU, les box sont comptabilisés dans le volet réseau.

### **III. Les centres informatiques (les centres de données)**

Les centres informatiques comprennent :

- 1) tous les centres de données, à l'exception des centres de données de télécommunication mais incluant les équipements supports des centres de données (alimentation et climatisation) ;
- 2) réseaux d'entreprise.

La catégorie des services ICT proposée par l'ITU (développement logiciel, consultance IT) est exclus du périmètre de la présente étude.



## 2. État des lieux des impacts environnementaux du numérique en région Grand Est

### 2.1. Introduction

Ce premier volet vise à dresser un état des lieux des impacts environnementaux des usages du numérique en région Grand Est en 2020. Cette première étape est indispensable à définir une valeur d'impact de référence, afin de comprendre les principaux ordres de grandeur des différents postes d'impact et de déterminer des leviers de réduction.

### 2.2. Méthodologie d'analyse de cycle de vie

L'étape d'évaluation des impacts environnementaux permet de classer et de combiner les flux de matières, énergie et émissions issus de l'inventaire par type d'impact, pour chaque système à l'étude.

Dans cette étude, les impacts environnementaux ont été évalués au niveau « mid-point » uniquement. Ceux-ci traduisent les impacts sur l'environnement selon plusieurs catégories d'impact. L'évaluation des impacts environnementaux a été effectuée à l'aide de la méthode de la norme NF EN 15804 + A2 (2019). Cette norme fournit le tronc commun des règles de catégories de produits pour les déclarations environnementales de type III relatives à tout produit ou service de construction. La norme EN 15804 + A2 remplace la version A1 en vigueur depuis 2013. La révision a notamment pour objectif d'être alignée avec le format du PEF (Product Environmental Footprint) de la Commission Européenne. Les facteurs de caractérisation sont donc basés sur les facteurs de la méthode EF3.0, développée et mise à jour par le *Joint Research Center* de la Commission Européenne.

La méthodologie EF3.0 est internationalement reconnue par les experts de l'ACV et largement utilisée. Cette méthode figure parmi les plus récentes méthodes mises à jour.

### 2.3. Définition de l'objectif et du périmètre de l'étude

#### 2.3.1. Objectif de l'étude

L'objectif de l'étude est d'évaluer les impacts environnementaux liés aux usages numériques en région Grand Est, sur l'ensemble du cycle de vie.

#### 2.3.2. Périmètre de l'étude

Cette étude apporte un éclairage sur l'impact environnemental du numérique en région Grand Est, en utilisant la méthodologie ACV décrite ci-dessus, sur le périmètre géographique de la région Grand Est pendant 1 an. La période de référence retenue est 2020.



Figure 2 : Carte du territoire de la région Grand Est.

Le périmètre retenu est constitué :

- Des terminaux utilisateurs ainsi que des équipements de type IoT (tiers 1). La liste complète des équipements considérés est détaillée dans la section dédiée.
- D'une partie des réseaux de télécommunications soutenant le trafic IP (tiers 2). La liste des réseaux considérés est détaillée dans la section dédiée.
- Des datacenters (tiers 3) soutenant les usages des habitants et organisations (publiques comme privées) de la région Grand Est hébergé en propre et en colocation. Une approche complémentaire suivant celle de l'étude ADEME/ARCEP [1] et considérant seulement les datacenters opérés en région Grand Est est également proposée en complément.

Dans ce chapitre, **seuls les impacts directs** sont comptabilisés, à travers **une ACV attributionnelle**.

## 2.4. Spécificités de la région Grand Est

Nous proposons dans cette section une description rapide du territoire analysé en particulier sur les infrastructures numériques.

### 2.4.1. Connectivité fixe

L'INSEE notait un retard de la région Grand Est sur l'accès à la fibre optique en 2017 « 13,9 % [pour la région Grand Est] contre 20,3 % en métropole et 14,5 % pour la France de « province » [12]. Elle a récemment rattrapé son retard pour atteindre un taux d'éligibilité de près de 85 % en la plaçant en 4e au classement fibre des régions (2022) [13, 14].

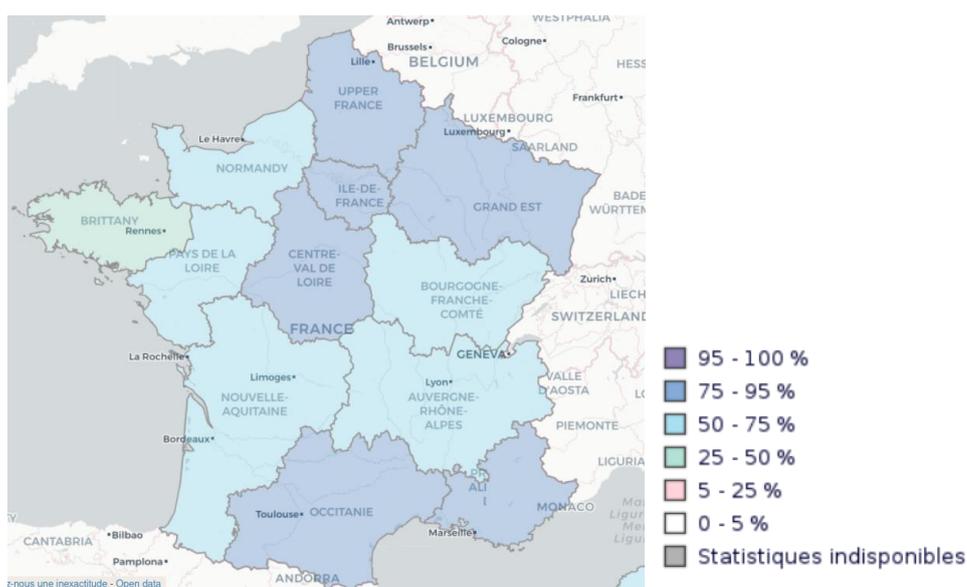


Figure 3 : Taux de locaux éligibles - Fibre, Au 30 septembre 2022, ARCEP [15]

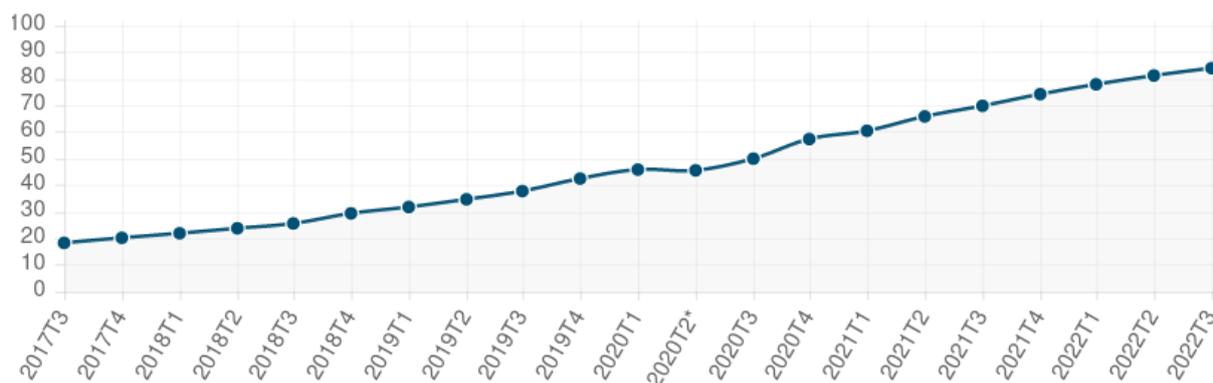


Figure 4 : Couverture Fibre de la région Grand Est [16]

Malgré l'augmentation du déploiement de la fibre, la couverture reste disparate en fonction des départements aux dépens des départements ruraux [12].

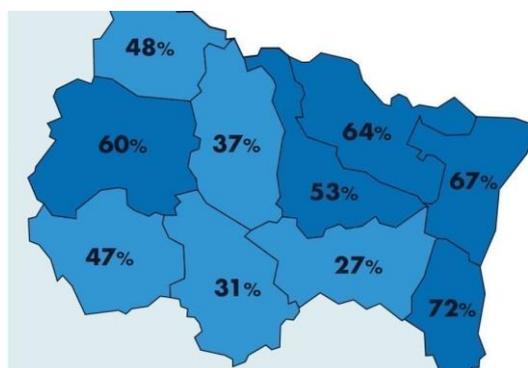


Figure 5 : Taux de couverture fibre par département du Grand Est au 4<sup>e</sup> trimestre 2020 [13, 14]

### 2.4.2. Connectivité mobile

Concernant la couverture 4G, la région se place au 8<sup>e</sup> rang français des régions. Là encore, la couverture reste disparate entre les départements [12].

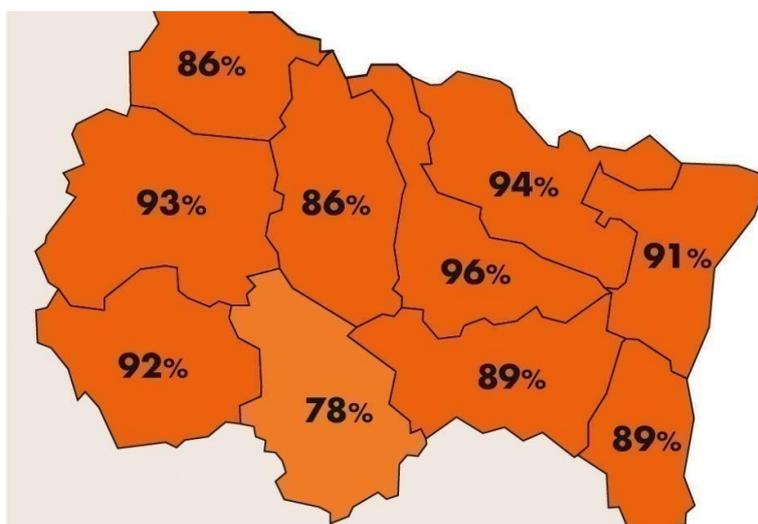


Figure 6 : Taux de couverture 4G par département Grand Est au 4<sup>e</sup> trimestre 2020 [14].



### 2.4.3. Datacenters

D'après les données fournies par Grand e-Nov + et utilisées dans le cadre de l'étude, la région Grand Est est sous-dotée en datacenters comparé au reste de la France. On note un déficit d'environ 50% sur le nombre de m<sup>2</sup> de datacenters en colocation par habitant opérés dans la région Grand Est par rapport à la moyenne française (3,24 m<sup>2</sup>/1000 hab pour la région Grand Est vs 6,18 m<sup>2</sup>/1000hab à l'échelle nationale). De plus, la région ne compte pas de supercalculateur [17]. Il est donc pertinent de penser qu'une partie des consommations provenant de la région Grand Est est opéré en dehors de la région.

### 2.4.4. Organisations et population en région Grand Est

Plusieurs statistiques ont été collectées pour caractériser les organisations et la population de la région Grand Est :

Type	Champs	Valeur	Source (année)
Conseils régionaux	Nombre d'entités sur le territoire	1	(2020)
Conseils départementaux	Nombre d'entités sur le territoire	10	INSEE (2020)
SDIS	Nombre d'entités sur le territoire	10	INSEE (2020)
COMUE (Communauté Universitaire et d'établissements)	Nombre d'entités sur le territoire	6	MESRI (2020)
Métropole, Communautés Urbaines ou Communautés d'agglomération	Nombre d'entités sur le territoire	24	INSEE (2020)
Mairie (plus de 30 000 habitants)	Nombre d'entités sur le territoire	13	INSEE (2020)
CHRU	Nombre d'entités sur le territoire	2	Fédération Hospitalière de France (2020)
CHU et Centres Hospitaliers	Nombre d'entités sur le territoire	65	Fédération Hospitalière de France (2020)
Ministères	Nombre d'entités sur le territoire	0	<a href="https://lannuaire.service-public.fr/navigation/ministeres">https://lannuaire.service-public.fr/navigation/ministeres</a>
EPIC (rattachés au national)	Nombre d'entités sur le territoire	1	Fédération Nationale des OPH (2021)
EPIC (rattachés au local)	Nombre d'entités sur le territoire	21	Fédération Nationale des OPH (2021)
ODAC (rattachés au national)	Nombre d'entités sur le territoire	32	INSEE (2021)
ODAC (rattachés au local)	Nombre d'entités sur le territoire	1	INSEE (2021)
MIC (1 -9 salariés)	Nombre d'entités sur le territoire	124 558	INSEE (2021)
PME (10-49 salariés)	Nombre d'entités sur le territoire	25 912	INSEE (2021)
PME (50-99 salariés)	Nombre d'entités ayant leur siège sur le territoire	3630	Hypothèse, base comptage CCI Webstore (2022)
PME (100- 249 salariés)	Nombre d'entités ayant leur siège sur le territoire	1800	Hypothèse, base comptage CCI Webstore (2022)
ETI (250-5000 salariés)	Nombre d'entités ayant leur siège sur le territoire	955	Hypothèse, base comptage CCI Webstore (2022)
Grandes Entreprises (> 5000 salariés)	Nombre d'entités ayant leur siège sur le territoire	0	Hypothèse, base comptage CCI Webstore (2022)
Population	Nombre d'habitants	5 556 219	<a href="https://www.insee.fr/fr/statistiques/4481430#titre-bloc-1">https://www.insee.fr/fr/statistiques/4481430#titre-bloc-1</a> (2020)
	Nombre d'emplois	2 073 968	<a href="https://www.insee.fr/fr/statistiques/2011101?geo=REG-44">https://www.insee.fr/fr/statistiques/2011101?geo=REG-44</a> (2019)
Émissions territoriales	MtCO <sub>2</sub> eq	44,3	<a href="https://www.observatoire-climat-energie.fr/regions/grand-est/emissions-de-gaz-a-effet-de-serre/">https://www.observatoire-climat-energie.fr/regions/grand-est/emissions-de-gaz-a-effet-de-serre/</a> (2020)

Tableau 1 : Données de caractérisation du territoire de la région Grand Est et sources associées

## 2.5. Spécificité de l'étude : Approches « production » et « consommation »

L'analyse territoriale de l'impact environnemental du numérique peut suivre deux approches :

### 2.5.1. L'approche « consommation »

Dans cette approche, on évalue les impacts environnementaux de l'ensemble des usages numériques individuels, collectifs et industriels sur un territoire donné délimité par ses frontières géographiques. Cette évaluation implique les étapes du cycle de vie s'étant potentiellement produits en dehors de ses frontières (production, fin de vie, transport, opérations externes au territoire...).



On privilégiera cette approche pour mettre en évidence l'affectation des impacts liés à la chaîne de valeurs globale sur un territoire donné.

### 2.5.2. L'approche « production »

Dans cette approche, on évalue les impacts environnementaux liés à la production de biens et services numériques sur un territoire donné délimité par ses frontières géographiques.

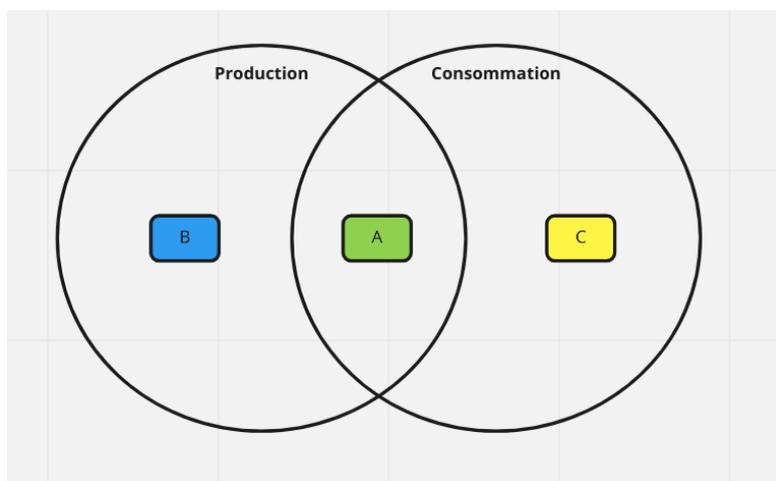
On privilégiera cette approche dans des territoires à forte intensité de production liés à la fabrication des produits (Asie du sud-est), à leur fin de vie (Afrique de l'Ouest, Asie du sud-est, ...), ou à la production de services (Silicone Valley, technopoles...).

Ces deux approches peuvent être complémentaires et s'alimenter mutuellement, mais ne doivent pas être agrégées pour éviter toute double comptabilité.

Dans le cas d'une approche consommation la phase d'usage détermine l'affectation ou non des ressources. En d'autres termes, toutes les ressources (équipements et services à toutes les phases de leur cycle de vie) nécessaires à l'existence des processus numériques sur le territoire doivent être imputées au territoire.

La distinction entre la production et la consommation n'est pas triviale, car les deux ensembles se superposent. Plusieurs cas existent alors :

- [A] La ressource est produite et consommée sur le territoire
- [B] la ressource est produite sur le territoire, mais consommée à l'extérieur
- [C] La ressource est consommée sur le territoire, mais produite à l'extérieur



**L'approche consommation :**

$[A] + [C]$

**L'approche production :**

$[A] + [B]$

Figure 7 : Différence entre les approches Production et Consommation

Cette étude suit une approche consommation  $[A] + [C]$ . Pour les impacts relatifs au tiers 3 nous proposons, en plus de l'approche consommation, une approche dite de production suivant la méthode établie dans le rapport ADEME/ARCEP [1], pour identifier spécifiquement les impacts des datacenter opérés en région Grand Est. Cette approche dite de production est en réalité une approche hybride. En effet, elle prend seulement en compte les datacenters opérés en région Grand-Est, mais sur l'ensemble de leur cycle de vie.

## 2.6. Inventaires & données utilisées

### 2.6.1. Indicateurs étudiés

Cette étude est une évaluation de l'impact environnemental du numérique de la région Grand Est en 2020 (terminaux, réseaux, datacenters). Plusieurs indicateurs environnementaux sont évalués et analysés (détail ci-après) :

- Épuisement des ressources naturelles (minérales et métaux)
- Épuisement des ressources abiotiques (fossiles)
- Acidification
- Ecotoxicité, eaux douces
- Changement climatique
- Radiations ionisantes
- Émissions de particules fines
- Formation d'ozone photochimique, santé humaine
- Matières premières
- Masse de déchets
- Consommation d'énergie primaire
- Consommation d'énergie finale

Les indicateurs relatifs à la consommation d'eau et à l'occupation des sols n'ont pas été utilisés par manque de fiabilité des facteurs d'impact sur la fin de vie (valeurs jugées aberrantes) et par manque d'exhaustivité des flux élémentaires relatifs à l'occupation des sols.

#### Épuisement des ressources naturelles abiotiques (minéraux et métaux) – dit « éléments »

- Type d'indicateur : Indicateur d'impact orienté problème (mid-point)
- Unité : kg Sb équivalent (kg Sb eq.)
- Méthode d'évaluation : CML 2002

Définition : L'exploitation industrielle entraîne une diminution des ressources disponibles dont les réserves sont limitées. Cet indicateur évalue la quantité de ressources minérales et métalliques extraites de la nature comme s'il s'agissait d'antimoine.

#### Épuisement des ressources naturelles abiotiques (fossiles)

- Type d'indicateur : Indicateur d'impact orienté problème (mid-point)
- Unité : MJ
- Méthode d'évaluation : CML 2002

Définition : L'indicateur représente la consommation d'énergie primaire provenant de différentes sources non renouvelables (pétrole, gaz naturel, etc.). Contrairement à ce que le nom indique, la consommation d'énergie primaire issue de l'uranium est également considérée. Les calculs sont basés sur le Pouvoir Calorifique Inférieur (PCI) des types d'énergie considérés, exprimé en MJ/kg. Par exemple, 1 kg de pétrole apportera 41,87 MJ à l'indicateur considéré.

#### Acidification

- Type d'indicateur : Indicateur d'impact orienté problème (mid-point)
- Unité : mol H+ eq.
- Méthode d'évaluation : Accumulated Exceedance (Seppälä et al. 2006, Posch et al, 2008)

Définition : L'acidification de l'air est liée aux émissions d'oxydes d'azote, d'oxydes de soufre, d'ammoniac et d'acide chlorhydrique. Ces polluants se transforment en acides en présence d'humidité, et leurs retombées peuvent endommager les écosystèmes ainsi que les bâtiments.

#### Ecotoxicité, eaux douces

- Type d'indicateur : Indicateur d'impact orienté problème (mid-point)
- Unité : CTUe
- Méthode d'évaluation : USEtox (Rosenbaum et al., 2008)

Définition : Ces indicateurs suivent toute la chaîne d'impact depuis l'émission d'un composant chimique jusqu'à l'impact final sur l'homme et les écosystèmes. Cela comprend la modélisation de la distribution et du devenir dans l'environnement, l'exposition des populations humaines et des écosystèmes, et les effets liés à la toxicité associés à l'exposition.



## Changement climatique

- Type d'indicateur : Indicateur d'impact orienté problème (mid-point)
- Unité : kg CO<sub>2</sub> équivalent (kg CO<sub>2</sub> eq.)
- Méthode d'évaluation : IPCC 2013 method

Définition : Les gaz à effet de serre (GES) sont des composés gazeux qui absorbent le rayonnement infrarouge émis par la surface de la Terre. L'augmentation de leur concentration dans l'atmosphère terrestre contribue au réchauffement climatique.

## Radiations ionisantes

- Type d'indicateur : Indicateur d'impact orienté problème (mid-point)
- Unité : kBq U235 eq.
- Méthode d'évaluation : Human health effect model as developed by Dreicer et al. 1995 (Frischknecht et al, 2000)

Définition : Les radionucléides peuvent être libérés lors de plusieurs activités humaines. Lorsque les radionucléides se désintègrent, ils libèrent des rayonnements ionisants. L'exposition humaine aux rayonnements ionisants provoque des dommages à l'ADN, qui à leur tour peuvent conduire à divers types de cancer et de malformations congénitales

## Émissions de particules fines

- Type d'indicateur : Indicateur d'impact orienté problème (mid-point)
- Unité : Disease incidence
- Méthode d'évaluation : PM method recommended by UNEP (UNEP 2016)

Définition : La présence de particules fines de petit diamètre dans l'air - en particulier celles d'un diamètre inférieur à 10 microns - représente un problème de santé humaine, car leur inhalation peut provoquer des problèmes respiratoires et cardiovasculaire

## Formation d'ozone photochimique, santé humaine

- Type d'indicateur : Indicateur d'impact orienté problème (mid-point)
- Unité : kg NMVOC eq.
- Méthode d'évaluation : Van Zelm et al., 2008, as applied in ReCiPe, 2008

Définition : L'ozone troposphérique se forme dans la basse atmosphère à partir de composés organiques volatils (COV) et d'oxydes d'azote résultant du rayonnement solaire. L'ozone est un oxydant très puissant connu pour avoir des effets sur la santé, car il pénètre facilement dans les voies respiratoires

## Matières premières

- Type d'indicateur : Indicateur de consommation de ressources
- Unité : kg
- Méthode d'évaluation : MIPS - Material Input per Service-unit

Définition : L'indicateur MIPS permet de calculer les ressources utilisées pour produire une unité de produit ou de service avec une approche d'analyse de cycle de vie (Schmidt-Bleek, 1994). Cinq types de ressources sont considérés : les ressources abiotiques (matériaux, énergie fossile...), la biomasse, les déplacements de terre mécaniques ou par érosion, l'eau, et l'air (Ritthoff et coll., 2002). Ces consommations sont simplement sommées, ce qui donne un indicateur de consommation de ressources (matières premières extraites et matières premières énergétiques).

## Masse de déchets

- Type d'indicateur : Indicateur de flux
- Unité : kg

Définition : Quantité de déchets générés tout au long du cycle de vie, y compris les déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE), ainsi que les déchets liés à l'extraction des matières premières

## Consommation d'énergie primaire

- Type d'indicateur : Indicateur de flux
- Unité : MJ



Définition : L'énergie primaire est la première forme d'énergie directement disponible dans la nature avant toute transformation : bois, charbon, gaz naturel, pétrole, vent, rayonnement solaire, énergie hydraulique, géothermique, etc.

### Consommation d'énergie finale

- Type d'indicateur : Indicateur de flux
- Unité : MJ

Définition : Désigne l'énergie directement utilisée par l'utilisateur final, sous forme d'électricité ou de carburant

Dans la suite de ce rapport, les résultats multicritères sont présentés sous forme de tableaux, en notation scientifique :

Epuisement des ressources abiotiques naturelles - éléments - kg Sb eq	3,16E-08
Epuisement des ressources abiotiques naturelles - fossiles - MJ	1,28E+01
Acidification - mol H+ eq.	3,85E-04
Ecotoxicité - CTUe	4,72E-01
Changement climatique - kg CO <sub>2</sub> eq.	6,70E-02
Radiations ionisantes - kBq U235 eq.	1,73E+00
Emissions de particules fines - Disease occurrence	1,50E-08
Création d'ozone photochimique - kg NMVOC eq.	1,58E-04
MIPS - kg	1,62E-01
Production de déchets - kg	0,00E+00
Consommation d'énergie primaire - MJ	1,40E+01
Consommation d'énergie finale (usage) - MJ	3,60E+00

Par exemple : Dans ce tableau, 3,16E-08 kg Sb eq signifie  $3,16 \times 10^{-8} = 3,16 \times 0,00000001 = 0,0000000316$  kg Sb eq.

Cette étude met en œuvre une approche de type ACV simplifiée, s'appuyant sur modèle paramétrique via un tableur alimenté par une collecte de données primaires locales autant que possible.

Elle utilise une approche mixte « bottom-up » et « top-down », et intègre une réflexion autour de l'impact environnemental de services numériques « consommés » en région Grand Est, par opposition à ceux « produits » ou « opérés » en région Grand Est.

## 2.6.2. Données globales

### 2.6.2.1. Facteurs d'impacts de l'électricité

Pour l'électricité, et à défaut de facteurs d'impacts locaux disponibles, ce sont les facteurs d'impact de la base ecoinvent qui ont été utilisés :

Epuisement des ressources abiotiques naturelles - éléments - kg Sb eq	3,16E-08
Epuisement des ressources abiotiques naturelles - fossiles - MJ	1,28E+01
Acidification - mol H+ eq.	3,85E-04
Ecotoxicité - CTUe	4,72E-01
Changement climatique - kg CO <sub>2</sub> eq.	6,70E-02
Radiations ionisantes - kBq U235 eq.	1,73E+00
Emissions de particules fines - Disease occurrence	1,50E-08
Création d'ozone photochimique - kg NMVOC eq.	1,58E-04
MIPS - kg	1,62E-01
Production de déchets - kg	0,00E+00
Consommation d'énergie primaire - MJ	1,40E+01
Consommation d'énergie finale (usage) - MJ	3,60E+00

Tableau 2 : facteurs d'impact utilisés pour l'électricité FR. source : ecoinvent



### 2.6.2.2. Proxy population et emplois

Dans le cadre de cette étude, un certain nombre de chiffres identifiés au niveau national ont dû être ramenés à une échelle régionale. Les ratios suivants ont été utilisés dans cet objectif :

	Année	%	Utilisation	Source
Ratio population GE / FR	2019	8,29%	Usages personnels	INSEE
Ratio emplois GE / FR	2019	7,27%	Usages professionnels	INSEE

Tableau 3 : Ratio Grand Est/France utilisés & sources associées.

### 2.6.3. Données tiers 1 – Terminaux

Les terminaux utilisateurs suivants ont été considérés dans l'analyse :

Catégorie	Type d'équipement
Téléphone	Smartphone
Téléphone	Téléphone portable (non-smartphone)
Téléphone	Téléphone (ligne fixe via Box)
Tablettes	Tablettes
Ordinateur	Ordinateur portable
Ordinateur	Station d'accueil
Ordinateur	Ordinateur fixe
Écrans & matériels audiovisuels	Écran ordinateur
Écrans & matériels audiovisuels	Écran de signalisation
Écrans & matériels audiovisuels	TV
Écrans & matériels audiovisuels	Projecteur
Stockages	Disque SSD externe
Stockages	Disque HDD externe
Stockages	Clefs USB
Écrans & matériels audiovisuels	Box TV
Consoles	Console de jeu salon
Consoles	Console de jeu mobile
Écrans & matériels audiovisuels	Enceintes connectées
Imprimante	Imprimante

Tableau 4 : détail des équipements utilisateurs pris en compte dans le tiers 1.



### 2.6.3.1. Dénombrement

Le dénombrement des terminaux utilisateurs est issu de sources secondaires initialement construites avec un périmètre français et européen utilisé sur un périmètre France dans l'étude nationale ADEME/ARCEP. Une partie des équipements professionnels sont dénombrés en considérant les taux d'équipements issus d'usages professionnels référencés dans l'étude « Données gisement DEEE ménager pour ADEME, 2019 ». L'extrapolation de ces données sur un périmètre Grand Est est conduite en utilisant un proxy « population » pour les usages personnels et un proxy « emplois » pour les usages professionnels.

Type d'équipement	Inventaire personnel	Inventaire professionnel	Sources initiale
Smartphone	4 937 504	732 635	AFNUM - Études téléphones portables - 2019 [18]
Téléphone portable (non-smartphone)	875 142	129 855	Ipsos - Quantification des équipements électriques et électroniques au sein des ménages – 2016 [19]
Téléphone (ligne fixe via Box)	2 166 443	814 331	European Commission, ICT Impact study, July 2020 [20]
Tablettes	1 996 812	796 854	CITIZING, Empreinte carbone du numérique en France, Juin 2020 [8]
Ordinateur portable	2 664 129	1 950 744	Ipsos - Quantification des équipements électriques et électroniques au sein des ménages – 2016 [19]
Station d'accueil	0	1 950 744	Ipsos - Quantification des équipements électriques et électroniques au sein des ménages – 2016 [19]
Ordinateur fixe	1 453 161	1 437 216	Ipsos - Quantification des équipements électriques et électroniques au sein des ménages – 2016 [19]
Écran ordinateur	1 516 936	1 384 751	CITIZING, Empreinte carbone du numérique en France, Juin 2020 [8]
Écran de signalisation	0	546 669	European Commission, ICT Impact study, July 2020 [20]
TV	3 632 903	1 365 549	Ipsos - Quantification des équipements électriques et électroniques au sein des ménages – 2016 [19]
Projecteur	344 875	33 608	European Commission, ICT Impact study, July 2020 [20]
Disque SSD externe	633 266	16 411	ADEME-Arcep 2022 [1]
Disque HDD externe	2 928 466	75 892	ADEME-Arcep 2022 [1]
Clefs USB	5 328 258	138 084	Ipsos - Quantification des équipements électriques et électroniques au sein des ménages – 2016 [19]
Box TV	1 576 687	592 651	GreenIT, impacts environnementaux du numérique en France, 2021 [4]
Console de jeu salon	974 252	0	VGChartz, Yearly Europe hardware data grouped by platform [21].
Console de jeu mobile	559 916	0	VGChartz, Yearly Europe hardware data grouped by platform [21].
Enceintes connectées	206 110	0	CITIZING, Empreinte carbone du numérique en France, Juin 2020 [8]
Imprimante	514 663	1 220 429	CITIZING, Empreinte carbone du numérique en France, Juin 2020 [8]

Tableau 5 : dénombrement des équipements utilisateurs pris en compte dans le tiers 1 et sources associées



### 2.6.3.2. Hypothèses d'usage

Les hypothèses de durées de vie moyennes suivantes ont été considérées pour les terminaux utilisateurs :

Type d'équipement	Durée de vie perso (ans)	Durée de vie Pro (ans)	Source
Smartphone	2,5	2,5	European Commission, ICT Impact study, July 2020 [20]
Téléphone portable (non-smartphone)	2,5	2,5	European Commission, ICT Impact study, July 2020 [20]
Téléphone (ligne fixe via Box)	8	8	Entwicklung des IKT-bedingten Strombedarfs in Deutschland, Borderstep, 2015
Tablettes	3	3	European Commission, ICT Impact study, July 2020 [20]
Ordinateur portable	5	5	European Commission, ICT Impact study, July 2020 [20]
Station d'accueil	6	6	GreenIT.fr Benchmark 2021 [22]
Ordinateur fixe	6	6	GreenIT.fr Benchmark 2021 [22]
Écran ordinateur	6	6	GreenIT.fr Benchmark 2021 [22]
Écran de signalisation	6	6	ADEME-Arcep 2022 [1]
TV	8	8	ADEME, Base Impact, 2019
Projecteur	5	5	European Commission, ICT Impact study, July 2020 [20]
Disque SSD externe	5	5	ADEME-Arcep 2022 [1]
Disque HDD externe	5	5	ADEME-Arcep 2022 [1]
Clefs USB	5	5	ADEME-Arcep 2022 [1]
Box TV	5	5	ADEME-Arcep 2022 [1]
Console de jeu salon	6,5	6,5	European Commission, ICT Impact study, July 2020 [20]
Console de jeu mobile	6,5	6,5	European Commission, ICT Impact study, July 2020 [20]
Enceintes connectées	5	5	ADEME-Arcep 2022 [1]
Imprimante	5	5	European Commission, ICT Impact study, July 2020 [20]

Tableau 6 : hypothèses d'usage des équipements utilisateurs pris en compte dans le tiers 1 et sources associées



Les hypothèses de consommation annuelles moyennes suivantes ont été considérées :

Type d'équipement	Consommation - usage personnel (en kWh)	Consommation usage professionnel (en kWh)	Source
Smartphone	3,9	2	European Commission, ICT Impact study, July 2020 [20]
Téléphone portable (non-smartphone)	0,09	0,09	ADEME-Arcep 2022 [1]
Téléphone (ligne fixe via Box)	18	40	<i>Personnel</i> : European Commission, ICT Impact study, July 2020 [20] <i>Professionnel</i> : ADEME, Livre blanc – Conso. énergétique des équipements informatiques en milieu professionnel [23]
Tablettes	18,6	5	<i>Personnel</i> : European Commission, ICT Impact study, July 2020 [20] <i>Professionnel</i> : ADEME, Livre blanc – Conso. énergétique des équipements informatiques en milieu professionnel [23]
Ordinateur portable	29,1	48	<i>Personnel</i> : European Commission, ICT Impact study, July 2020 [20] <i>Professionnel</i> : ADEME, Livre blanc – Conso. énergétique des équipements informatiques en milieu professionnel [23]
Station d'accueil	-	1,28	ADEME-Arcep 2022 [1]
Ordinateur fixe	100	151	<i>Personnel</i> : European Commission, ICT Impact study, July 2020 [20] <i>Professionnel</i> : ADEME, Livre blanc – Conso. énergétique des équipements informatiques en milieu professionnel [23]
Écran ordinateur	70	70	European Commission, ICT Impact study, July 2020 [20]
Écran de signalisation	-	391	ADEME-Arcep 2022 [1]
TV	179	179	European Commission, ICT Impact study, July 2020 [20]
Projecteur	49	200	European Commission, ICT Impact study, July 2020 [20]
Disque SSD externe	0,37	0,37	ADEME-Arcep 2022 [1]
Disque HDD externe	0,37	0,37	ADEME-Arcep 2022 [1]
Clefs USB	0,15	0,15	ADEME-Arcep 2022 [1]
Box TV	73	73	European Commission, ICT Impact study, July 2020 [20]
Console de jeu salon	-	100,2	European Commission, ICT Impact study, July 2020 [20]
Console de jeu mobile	-	6,5	European Commission, ICT Impact study, July 2020 [20]
Enceintes connectées	23	23	European Commission, ICT Impact study, July 2020 [20]
Imprimante	21,34	106,37	European Commission, ICT Impact study, July 2020 [20]

Tableau 7 : hypothèses de consommation électrique des équipements utilisateurs pris en compte dans le tiers 1 et sources associées

#### 2.6.4. Données tiers 1 - IoT

Les catégories d'équipements IoT (Internet of Things) considéré sont reprises d'une étude datant de 2019 l'IEA [24].

Le dénombrement des équipements « Internet Of Things » (IoT) est issu de sources secondaires initialement construites avec un périmètre monde (le modèle de l'IEA [24] et le rapport Data Bridge Market Research). L'extrapolation de ces données sur un périmètre France a été conduite dans le rapport ADEME/ARCEP [1]. La répartition professionnel / personnel est établie



dans le même rapport. L'extrapolation sur le périmètre de la région Grand Est est conduite en utilisant un proxy « population » pour les usages personnels et un proxy « emplois » pour les usages professionnels.

La consommation d'énergie et la durée de vie des appareils IoT sont issues du modèle IEA [24].

Type	Dénombrement perso	Dénombrement pro	Taux professionnel	Durée de vie (années)	Conso électrique annuelle (kWh)
Security - Video	289 732	254 113	50%	5,00	18,00
Security - Control	482 887	423 522	50%	5,00	0,01
Automation - Water Heating	521 518	50 823	10%	12,00	18,00
Automation - Street Lights	0	508 226	100%	10,00	13,00
Automation - Space Conditioning	521 518	50 823	10%	12,00	16,00
Automation - Lightning	1 545 237	1 390 714	10%	7,00	18,00
Automation - Cooking	579 464	521 518	10%	15,00	22,00
Automation - Audio	1 738 392	169 409	10%	4,00	25,00
Automation - Appliances	695 357	67 763	10%	12,00	22,00
Smart Meters	2 172 990	21 1761	10%	12,00	18,00
Sensors : Res - Wi-Fi	96 577	0	0%	5,00	11,00
Sensors : Res - LE	502 202	0	0%	5,00	0,01
Sensors : Industry - LE	0	762 339	100%	5,00	0,01
Sensors : Health - LE	0	1 118 097	100%	5,00	0,01
Gateway : Bus	0	93 175	100%	7,00	61,00
Gateway : LE to Wi-Fi	0	84 704	100%	7,00	12,00
Comm Building Control	6 084 373	592 930	10%	12,00	13,00
Blinds + Windows	43 460	4 235	10%	5,00	0,00

Tableau 8 : dénombrement, hypothèses de durée de vie et de consommation électrique des équipements IoT pris en compte dans le tiers 1.

## IMPACTS A L'USAGE

Les impacts liés à la phase d'usage des terminaux sont évalués annuellement en considérant le dénombrement, la consommation moyenne et le facteur d'impact de l'électricité, tous présentés dans les sections dédiées.

## IMPACTS A LA FABRICATION, DISTRIBUTION ET FIN DE VIE

Les impacts des phases extraction, fabrication, distribution et fin de vie sont évalués à partir des configurations moyennes issues de la base de données NegaOctet. Pour le transport, l'hypothèse Pékin <> Paris est prise en compte. Les impacts sont amortis annuellement sur la durée de vie par type d'équipement.

## LIMITES

À noter qu'une des principales limites de l'étude des impacts liés au tiers 1 est le manque de données primaires spécifiques à la région Grand-Est. Ce manque de données issues d'études conduites sur le périmètre de la région a contraint à utiliser des données issues de rapports sur le périmètre français et européen, et à les extrapoler à la région.

## 2.6.5. Données tiers 2 – Réseau

Les réseaux considérés dans cette étude sont les réseaux xDSL, FTTx (fibre), 2G-5G. Les autres réseaux (TV/radio, téléphone fixe, satellite, entreprise, Wifi public, LPWAN...etc.) ne sont pas considérés, faute de données d'inventaire et de données environnementales (facteurs d'impacts) adaptés pour les prendre en compte.

La collecte de données primaires sur l'inventaire des équipements réseau en région Grand-Est n'a pas été possible. Ce sont les impacts du rapport ADEME/ARCEP [1], extrapolés à la région via un facteur population ou emploi qui ont été utilisés dans cette étude.

Les chiffres suivants ont été utilisés pour comptabiliser les abonnés aux réseaux fixes et mobiles :

	Abonnés, usage personnel	Abonnés, usage professionnel
Fibre	1 175 302	38 555
xDSL	1 194 545	112 757
Mobile - hors MtoM	5 469 593	698 072
Mobile - MtoM	1 607 788	205 198

Tableau 9 : dénombrement des abonnés internet pris en compte dans le tiers 2. Sources : ARCEP [26], [27] et [28].

Les chiffres suivants ont été utilisés pour comptabiliser la consommation de données des réseaux fixes et mobiles :

	Consommation de données par mois par abonné, usage personnel (Go/mois/abonné)	Consommation de données par mois par abonné, usage professionnel (Go/mois/abonné)
Fibre	220	220
xDSL	220	220
Mobile - hors MtoM	5,90	5,90
Mobile - MtoM	5,90	5,90

Tableau 10 : dénombrement des abonnés internet pris en compte dans le tiers 2 Sources : European Commission [20], ARCEP [26].

Les chiffres suivants ont été utilisés pour comptabiliser la consommation électrique des box réseau :

	Consommation électrique des box, usage personnel (kWh/an)	Consommation électrique des box, usage professionnel (kWh/an)	Source
Fibre	82	82	ADEME-Arcep 2022 [1]
xDSL	98	98	ADEME-Arcep 2022 [1]

Tableau 11 : consommation électrique annuelle des box en fonction des usages.

Pour la fabrication, distribution et fin de vie des équipements réseaux, l'étude s'appuie sur l'approche retenue pour l'étude ADEME - Arcep 2022 [1], à savoir : considérer tous les équipements installés sur l'année, et prendre en compte les impacts de leur fabrication, distribution et fin de vie comme s'ils intervenaient dans le courant de l'année. A défaut d'inventaires ou de flux achats disponibles pour la région, ces impacts, connus au niveau national, ont été extrapolés à la région via un facteur population ou emploi.

Pour la consommation électrique des réseaux fixes et mobiles, les chiffres suivants ont été utilisés :

	Consommation électrique des réseaux, usage personnel (kWh/Go)	Consommation électrique des réseaux, usage professionnel (kWh/Go)
Fibre	0,0342	0,0342
xDSL	0,0342	0,0342
Mobile - hors MtoM	0,237	0,237
Mobile - MtoM	0,237	0,237

Tableau 12 : consommation électrique des réseaux. Sources ; European Commission [20], IEA [24]



## 2.6.6. Données tiers 3 – Datacenters

Les données et les méthodologies mises en œuvre dans le cadre de l'étude ont été affinées à travers des échanges avec plusieurs acteurs :

- ADEME Grand Est et nationale
- Arcep
- Grand E-Nov+
- Virtus Management (Virtus Management & The Shift Project)
- Caroline Vateau (ex-APL datacenter et co-auteure du rapport ADEME-ARCEP 2022 [1])
- Etienne Lees Perasso (TIDE, ex-Bureau Veritas et co-auteur du rapport ADEME/ARCEP 2022 [1])

### 2.6.6.1. Approche production

L'évaluation des impacts liés aux datacenters situés sur le territoire de la région suit l'approche décrite dans le rapport ADEME-Arcep 2022 [1]. Les mêmes hypothèses sont utilisées pour les besoins par type d'organisation et pour la caractérisation technique par type de datacenter. Des données INSEE et autres sources spécifiques à la région Grand Est ont été utilisées pour définir le nombre d'organisations par type (Conseils départementaux, SDIS, COMUE... Micro entreprises, PME, ETI...etc.). Des données provenant de Grand E-Nov+ ont été utilisées pour définir le nombre de datacenter de type colocation et cloud sur le territoire.

Type	Champs	Valeur	Source
Datacenter colocation	Nombre TOTAL	17	Cf. section 2.4.3
	Besoin TOTAL en espace informatique (m <sup>2</sup> )	18000	
Datacenter HPC	Nombre TOTAL	0	Cf. section 2.4.3
	Besoin TOTAL en espace informatique (m <sup>2</sup> )	0	
Conseil régionaux	Nombre d'entités sur la zone géographique	1	Cf. section 2.4.4
	Besoin unitaire en espace informatique (m <sup>2</sup> )	50	ADEME-Arcep 2022 [1]
	% de migration vers de l'hébergement externe (colocation et Cloud)	70%	ADEME-Arcep 2022 [1]
Conseils départementaux	Nombre d'entités sur la zone géographique	10	Cf. section 2.4.4
	Besoin unitaire en espace informatique (m <sup>2</sup> )	50	ADEME-Arcep 2022 [1]
	% de migration vers de l'hébergement externe (colocation et Cloud)	70%	ADEME-Arcep 2022 [1]
SDIS	Nombre d'entités sur la zone géographique	10	Cf. section 2.4.4
	Besoin unitaire en espace informatique (m <sup>2</sup> )	50	ADEME-Arcep 2022 [1]
	% de migration vers de l'hébergement externe (colocation et Cloud)	70%	ADEME-Arcep 2022 [1]
COMUE (Communauté Universitaire et d'établissements)	Nombre d'entités sur la zone géographique	6	Cf. section 2.4.4
	Besoin unitaire en espace informatique (m <sup>2</sup> )	250	ADEME-Arcep 2022 [1]
	% de migration vers de l'hébergement externe (colocation et Cloud)	10%	ADEME-Arcep 2022 [1]
Agglomérations	Nombre d'entités sur la zone géographique	24	Cf. section 2.4.4
	Besoin unitaire en espace informatique (m <sup>2</sup> )	100	ADEME-Arcep 2022 [1]
	% de migration vers de l'hébergement externe (colocation et Cloud)	30%	ADEME-Arcep 2022 [1]
Mairie (plus de 30 000 habitants)	Nombre d'entités sur la zone géographique	13	Cf. section 2.4.4
	Besoin unitaire en espace informatique (m <sup>2</sup> )	50	ADEME-Arcep 2022 [1]
	% de migration vers de l'hébergement externe (colocation et Cloud)	70%	ADEME-Arcep 2022 [1]
CHRU	Nombre d'entités sur la zone géographique	2	Cf. section 2.4.4
	Besoin unitaire en espace informatique (m <sup>2</sup> )	150	ADEME-Arcep 2022 [1]
	% de migration vers de l'hébergement externe (colocation et Cloud)	10%	ADEME-Arcep 2022 [1]
CHU et Centres Hospitaliers	Nombre d'entités sur la zone géographique	65	Cf. section 2.4.4
	Besoin unitaire en espace informatique (m <sup>2</sup> )	75	ADEME-Arcep 2022 [1]



	% de migration vers de l'hébergement externe (colocation et Cloud)	10%	ADEME-Arcep 2022 [1]
Ministères	Nombre d'entités sur la zone géographique	-	Cf. section 2.4.4
	Besoin unitaire en espace informatique (m <sup>2</sup> )	-	
	% de migration vers de l'hébergement externe (colocation et Cloud)	-	
EPIC	Nombre d'entités sur la zone géographique	1	Cf. section 2.4.4
	Besoin unitaire en espace informatique (m <sup>2</sup> )	500	ADEME-Arcep 2022 [1]
	% de migration vers de l'hébergement externe (colocation et Cloud)	10%	ADEME-Arcep 2022 [1]
ODAC	Nombre d'entités sur la zone géographique	32	Cf. section 2.4.4
	Besoin unitaire en espace informatique (m <sup>2</sup> )	50	ADEME-Arcep 2022 [1]
	% de migration vers de l'hébergement externe (colocation et Cloud)	10%	ADEME-Arcep 2022 [1]
MIC (1 -9 salariés)	Nombre d'entités sur la zone géographique	124 558	Cf. section 2.4.4
	Besoin unitaire en espace informatique (m <sup>2</sup> )	0	ADEME-Arcep 2022 [1]
	% de migration vers de l'hébergement externe (colocation et Cloud)	100%	ADEME-Arcep 2022 [1]
PME (10-49 salariés)	Nombre d'entités sur la zone géographique	25 912	Cf. section 2.4.4
	Besoin unitaire en espace informatique (m <sup>2</sup> )	5	ADEME-Arcep 2022 [1]
	% de migration vers de l'hébergement externe (colocation et Cloud)	90%	ADEME-Arcep 2022 [1]
PME (50-99 salariés)	Nombre d'entités sur la zone géographique	3630	Cf. section 2.4.4
	Besoin unitaire en espace informatique (m <sup>2</sup> )	10	ADEME-Arcep 2022 [1]
	% de migration vers de l'hébergement externe (colocation et Cloud)	80%	ADEME-Arcep 2022 [1]
PME (100- 249 salariés)	Nombre d'entités sur la zone géographique	1800	Cf. section 2.4.4
	Besoin unitaire en espace informatique (m <sup>2</sup> )	15	ADEME-Arcep 2022 [1]
	% de migration vers de l'hébergement externe (colocation et Cloud)	80%	ADEME-Arcep 2022 [1]
ETI (250-5000 salariés)	Nombre d'entités sur la zone géographique	955	Cf. section 2.4.4
	Besoin unitaire en espace informatique (m <sup>2</sup> )	50	ADEME-Arcep 2022 [1]
	% de migration vers de l'hébergement externe (colocation et Cloud)	70%	ADEME-Arcep 2022 [1]
Grandes Entreprises (> 5000 salariés)	Nombre d'entités sur la zone géographique	0	Cf. section 2.4.4
	Besoin unitaire en espace informatique (m <sup>2</sup> )	1000	ADEME-Arcep 2022 [1]
	% de migration vers de l'hébergement externe (colocation et Cloud)	70%	ADEME-Arcep 2022 [1]

Tableau 13 : hypothèses de besoin unitaire et de pourcentage de migration vers de l'hébergement externe par typologie d'acteurs.

#### Synthèse

m <sup>2</sup> Datacenters organismes publics locaux	8 198
m <sup>2</sup> Datacenters organismes publics nationaux	1 890
m <sup>2</sup> Datacenters entreprises	39 941
m <sup>2</sup> Datacenters colocation	18 000
m <sup>2</sup> Datacenters HPC	0

Tableau 14 : Synthèse des besoins en surface de salles serveurs prises en compte.



### 2.6.6.2. Biais méthodologique

Pour reporter des impacts du tiers 3 d'un point de vue consommation, il est nécessaire d'inclure les infrastructures opérées à l'extérieur de la région Grand Est, mais utilisées en région Grand Est.

Avec la méthode employée ci-dessus, issue de l'étude ADEME - Arcep [1], seuls les DC et réseaux opérés en région Grand Est sont pris en compte. Il n'y a pas dans cette étude nationale d'intégration de l'impact des infrastructures opérées à l'extérieur de la région Grand Est mais utilisées en région Grand Est. La raison évoquée est le manque de fiabilité des données disponibles. La région étant sous dotée en datacenter au regard du dénombrement national, nous supposons que ces impacts sont importants. C'est ainsi une spécificité régionale qu'il a été important d'intégrer à l'étude.

Dans le cadre de la présente étude, l'équipe a donc décidé d'évaluer et d'intégrer cet impact « importé » (pour les datacenters pour l'instant), en complément de l'approche par production.

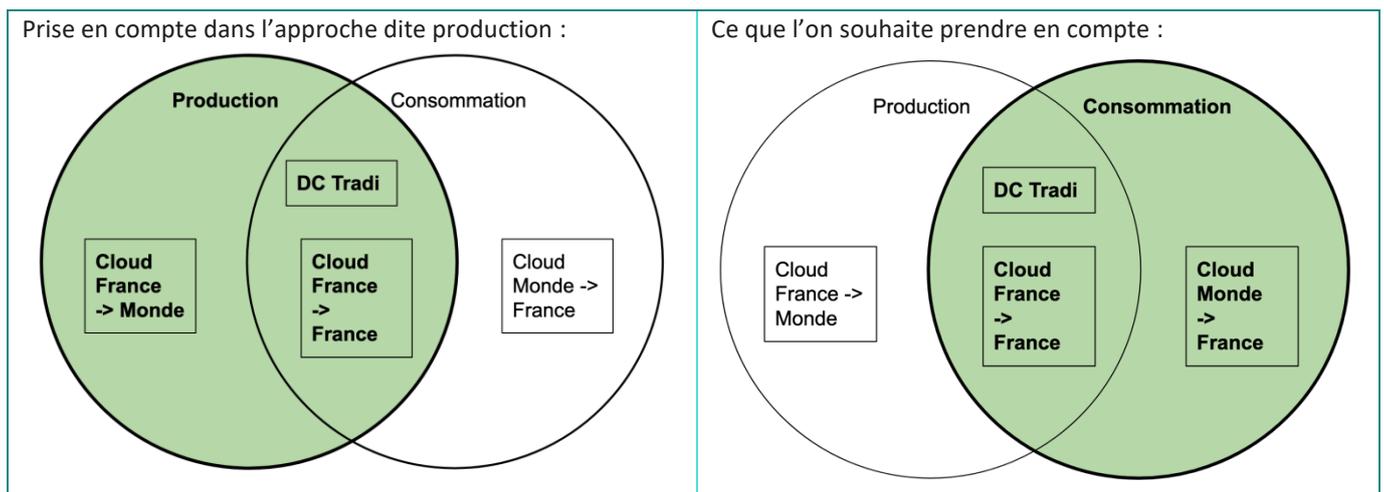


Figure 8 : Comparaison des approches « production » et « consommation »

Dans le cadre de cette réflexion, nous avons étudié l'état de l'art et identifié plusieurs approches intéressantes.

### 2.6.6.3. Le modèle « Trafic France »

Cette approche est documentée dans l'étude Citizing pour le Sénat [8]. Le modèle proposé se base sur l'évaluation du trafic français à l'international (Cisco), et sur la consommations électriques des DC à l'international pour ce trafic. La conclusion de leur étude pour l'année 2019 est que « 55% du trafic de données vers les utilisateurs en France provient de l'étranger, en particulier des centres informatiques des GAFAM implantés aux États-Unis, en Irlande ». Le trafic sortant est équivalent à 5,5% du trafic total vers les utilisateurs français.

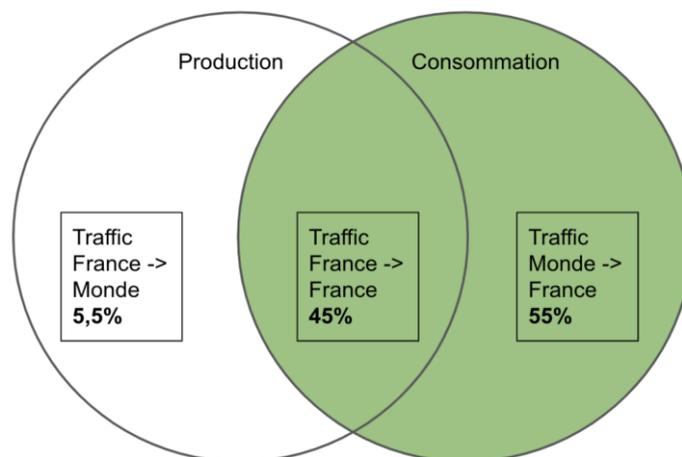


Figure 9 : Modèle de consommation « Trafic France »

#### 2.6.6.4. Le modèle « Energie Monde »

Cette approche est documentée dans les travaux de Masanet et al. [25]. Cette étude étant à l'échelle mondiale, les modèles de consommation et de production sont identiques. Les principales hypothèses de l'étude sont les suivantes :

- « *Data centers are defined as global server deployments in server closets, server rooms, and localized, mid-tier, high-end, and hyperscale data centers* » [United States Data Center Energy Usage Report. Lawrence Berkeley National , 2016].
- « *These data center types are organized under the meta-categories of traditional and cloud data centers per Cisco market analysis conventions* » [Cisco Global Cloud Index : Forecast and Methodology, 2016-2021, White Paper 2018]. « *Cloud is further subdivided in this analysis into hyperscale and cloud (non-hyperscale) data centers.* »

Les résultats pour les années 2019 et 2020 sont les suivants :

	2019			2020		
	DC Tradi	Cloud	Cloud Hyperscale	DC Tradi	Cloud	Cloud Hyperscale
Servers (TWh)	26	35	45	23	35	50
Storage (TWh)	3,6	7,4	10,8	2,6	7,5	11,8
Network (TWh)	0,7	1,0	2,2	0,5	0,9	2,2
Infra (TWh)	30,2	25,6	11,5	24,7	24,6	12,4
TOTAL (TWh)	61	69	70	51	68	77
PUE	1,99	1,59	1,20	1,93	1,56	1,19
%	30,41%	34,52%	35,07%	26,07%	34,86%	39,07%

Tableau 15 : Modèle de consommation « Energie Monde »

Soit, en regroupant le « Cloud » et les « Hyperscalers » :

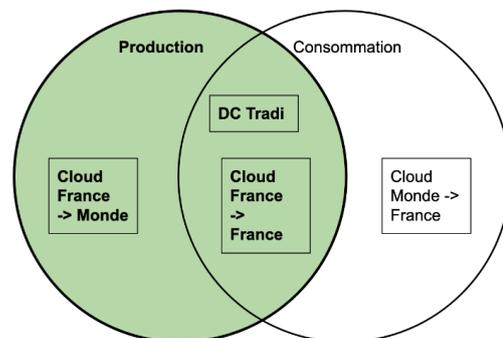
Modèle Energétique Monde (Masanet [25])	DC Traditionnels	Cloud
Consommation électrique totale (TWh)	51	145
Part du total	26,07%	73,93%

Tableau 16 : Modèle de consommation « Energie Monde » - agrégé

En utilisant les mêmes catégories de datacenters, l'étude nationale ADEME - Arcep [1] fournit les résultats suivants :

ADEME-Arcep [1]	DC Traditionnels	Cloud
Consommation électrique totale (TWh)	5,97	5,62
Part du total	51,51%	48,49%

Tableau 17 : Modèle de production – données étude ADEME- Arcep



Nous avons ensuite appliqué le modèle énergétique de Masanet et al. [25] à la France, en négligeant la production sur territoire français consommée à l'international (cf. 2.6.5.3). Pour respecter la proportion DC traditionnels/Cloud, il manque 14,08 TWh de DC « Cloud » extérieur, soit 54,8% de la consommation totale (ce pourcentage serait même plus important si on considérait la production Cloud française consommée à l'étranger).

Avec ces hypothèses - qui semblent minimiser les impacts – le Modèle de consommation « France » considéré est le suivant :

Modèle Énergétique France	DC Traditionnels	Cloud France → France	Cloud Monde → France
Consommation électrique totale (TWh)	5,97	5,62	14,08
Part du total	23,26%	21,90%	54,84%

Tableau 18 : Modèle de consommation « Energie » - appliqué à l'échelle France

### 2.6.6.5. Synthèse des modèles étudiés

Sur la proportion des datacenters opérés à l'extérieur du territoire et utilisés en France, les modèles par « trafic » (France) ou par « consommation énergétique » (Monde) convergent sur un chiffre supérieur à 50%. Cela conforte l'intérêt de considérer aussi une approche par consommation en complément de l'approche production choisie dans le rapport national (ADEME/ARCEP). Compte tenu des incertitudes sur la nature et valeurs des données échangées pour le modèle « trafic », de la disponibilité dans le rapport ADEME – Arcep 2022 [1] des consommations énergétiques par type de datacenter, l'application du modèle « énergétique » nous apparaît comme plus pertinente.



## 2.7. Résultats

### 2.7.1. Evaluation globale

#### 2.7.1.1. Approche Production

Dans l'approche Production (équipements opérés en région Grand Est), l'impact « Changement climatique » des activités numériques sur le territoire de la région Grand Est en 2020 s'établit à 1,39 MtCO<sub>2</sub>eq. Ces émissions (ayant lieu sur le territoire mais surtout en dehors) équivalent à 3,45% des émissions territoriales de la région<sup>1</sup>, et correspondent à 250 kgCO<sub>2</sub>eq/habitant.

L'impact pour l'ensemble des indicateurs environnementaux s'établit comme suit :

Indicateur	Total – approche production
Epuisement des ressources abiotiques naturelles - éléments - kg Sb eq	7,74E+04
Epuisement des ressources abiotiques naturelles - fossiles - MJ	6,97E+10
Acidification - mol H+ eq.	8,19E+06
Ecotoxicité - CTUe	2,17E+10
Changement climatique - kg CO <sub>2</sub> eq.	1,39E+09
Radiations ionisantes - kBq U235 eq.	8,69E+09
Emissions de particules fines - Disease occurrence	1,00E+02
Création d'ozone photochimique - kg NMVOC eq.	3,52E+06
MIPS - kg	5,06E+09
Production de déchets - kg	1,61E+09
Consommation d'énergie primaire - MJ	7,10E+10
Consommation d'énergie finale (usage) - MJ	1,51E+10

Tableau 19 : Impacts environnementaux du numérique en Grand Est en 2020, tous tiers, approche production.

La décomposition des impacts par tiers s'établit comme suit :

Indicateur	Tiers 1	Tiers 2	Tiers 3 – approche production
Epuisement des ressources abiotiques naturelles - éléments - kg Sb eq	7,16E+04	3,12E+03	2,74E+03
Epuisement des ressources abiotiques naturelles - fossiles - MJ	4,94E+10	7,82E+09	1,24E+10
Acidification - mol H+ eq.	6,73E+06	3,94E+05	1,07E+06
Ecotoxicité - CTUe	1,85E+10	4,09E+08	2,84E+09
Changement climatique - kg CO <sub>2</sub> eq.	1,12E+09	7,57E+07	1,94E+08
Radiations ionisantes - kBq U235 eq.	6,11E+09	1,08E+09	1,50E+09
Emissions de particules fines - Disease occurrence	7,43E+01	9,38E+00	1,64E+01
Création d'ozone photochimique - kg NMVOC eq.	2,89E+06	1,81E+05	4,49E+05
MIPS - kg	4,02E+09	3,48E+08	6,91E+08
Production de déchets - kg	1,41E+09	8,88E+07	1,13E+08
Consommation d'énergie primaire - MJ	4,88E+10	8,61E+09	1,36E+10
Consommation d'énergie finale (usage) - MJ	9,82E+09	2,12E+09	3,14E+09

Tableau 20 : Impacts environnementaux du numérique en Grand Est en 2020, par tiers, approche production.

<sup>1</sup> Sur la base des émissions territoriales format SECTEN en 2020 (40,23 MtCO<sub>2</sub>e), publié sur l'observatoire Climat-Air-Energie du Grand Est : <https://observatoire.atmo-grandest.eu/tableau-de-bord-des-territoires/>



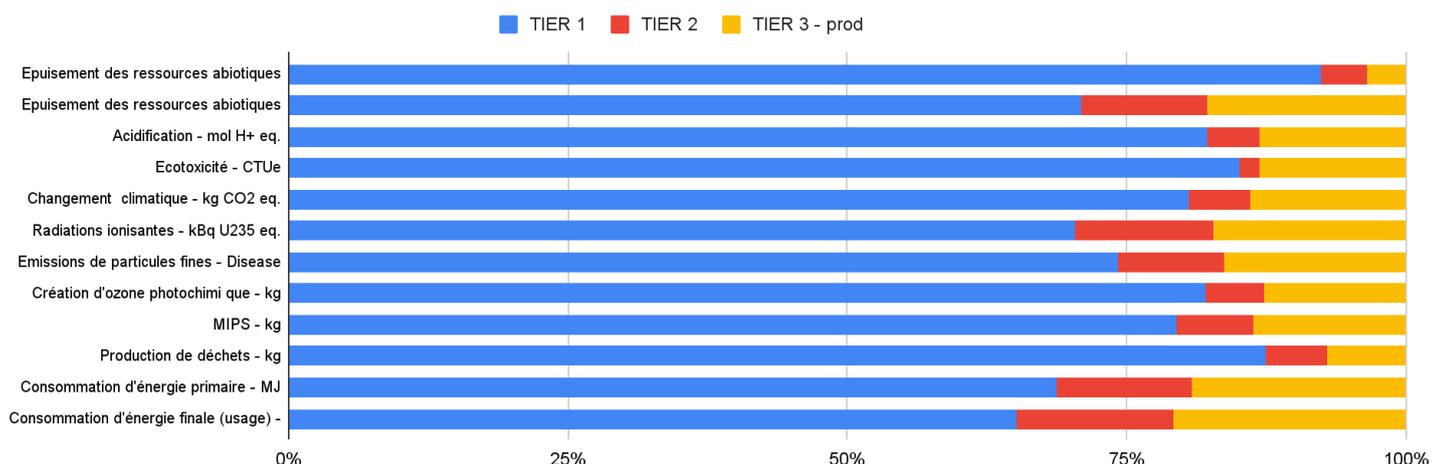


Figure 10 : Répartition des impacts environnementaux du numérique en Grand Est en 2020 par tiers, en fonction des indicateurs, approche production.

### Messages clés :

Dans cette approche « Production », les principaux postes d'impacts sont les terminaux utilisateurs (ex : 70% de l'impact sur le critère « changement climatique ») et les datacenters (ex : 14% de l'impact sur le critère « changement climatique »). L'impact du réseau apparaît mineur par rapport aux deux autres tiers. L'analyse détaillée par tiers (cf. sections suivantes) souligne l'importance des écrans dans l'impact des terminaux, ainsi que de la phase de fabrication par rapport à la phase d'utilisation. A l'inverse, pour le tiers 3 – data centers, la phase d'utilisation est prépondérante par rapport à la phase de fabrication pour certains indicateurs. Pour rappel, les datacenters pris en compte dans cette approche sont ceux présents sur le territoire de la région Grand Est, et non ceux formellement utilisés par les habitants et organisations de la région. Il est donc nécessaire de rapprocher ces résultats de ceux de l'approche « consommation » (cf. ci-dessous).

#### 2.7.1.2. Approche Consommation

Dans l'approche Consommation (prise en compte des équipements mobilisés pour la consommation de services numériques en Grand Est, incluant dont les impacts importés sur le volet Data Centers), l'impact « Changement climatique » de la région Grand Est en 2020 s'établit à 2,21 MtCO<sub>2</sub>eq. Cela équivaut à 5,48% des émissions territoriales de la région, et à 397 kgCO<sub>2</sub>eq/habitant.

L'impact pour l'ensemble des critères environnementaux s'établit comme suit :

Indicateur	Total – approche consommation
Epuisement des ressources abiotiques naturelles - éléments - kg Sb eq	8,22E+04
Epuisement des ressources abiotiques naturelles - fossiles - MJ	8,62E+10
Acidification - mol H+ eq.	1,27E+07
Ecotoxicité - CTUe	3,25E+10
Changement climatique - kg CO <sub>2</sub> eq.	2,21E+09
Radiations ionisantes - kBq U235 eq.	9,49E+09
Emissions de particules fines - Disease occurrence	1,30E+02
Création d'ozone photochimique - kg NMVOC eq.	5,28E+06
MIPS - kg	7,18E+09
Production de déchets - kg	1,80E+09
Consommation d'énergie primaire - MJ	8,92E+10
Consommation d'énergie finale (usage) - MJ	1,96E+10

Tableau 21 : Impacts environnementaux du numérique en Grand Est en 2020, tous tiers, approche consommation.



Dans cette approche, les principaux postes d'impacts sont les terminaux utilisateurs (ex : 51% de l'impact sur le critère « changement climatique ») ainsi que les datacenters, avec une part d'impact plus importante que selon l'approche production. L'impact réseau apparaît comme mineur par rapport à ces 2 postes.

La décomposition des impacts par tiers s'établit comme suit :

Indicateur	Tiers 1	Tiers 2	Tiers 3 – approche consommation
Epuisement des ressources abiotiques naturelles - éléments - kg Sb eq	7,16E+04	3,12E+03	7,47E+03
Epuisement des ressources abiotiques naturelles - fossiles - MJ	4,94E+10	7,82E+09	2,90E+10
Acidification - mol H+ eq.	6,73E+06	3,94E+05	5,56E+06
Ecotoxicité - CTUe	1,85E+10	4,09E+08	1,36E+10
Changement climatique - kg CO <sub>2</sub> eq.	1,12E+09	7,57E+07	1,01E+09
Radiations ionisantes - kBq U235 eq.	6,11E+09	1,08E+09	2,30E+09
Emissions de particules fines - Disease occurrence	7,43E+01	9,38E+00	4,63E+01
Création d'ozone photochimique - kg NMVOC eq.	2,89E+06	1,81E+05	2,21E+06
MIPS - kg	4,02E+09	3,48E+08	2,81E+09
Production de déchets - kg	1,41E+09	8,88E+07	3,04E+08
Consommation d'énergie primaire - MJ	4,88E+10	8,61E+09	3,18E+10
Consommation d'énergie finale (usage) - MJ	9,82E+09	2,12E+09	7,67E+09

Tableau 22 : Impacts environnementaux du numérique en Grand Est en 2020, par tiers, approche consommation.

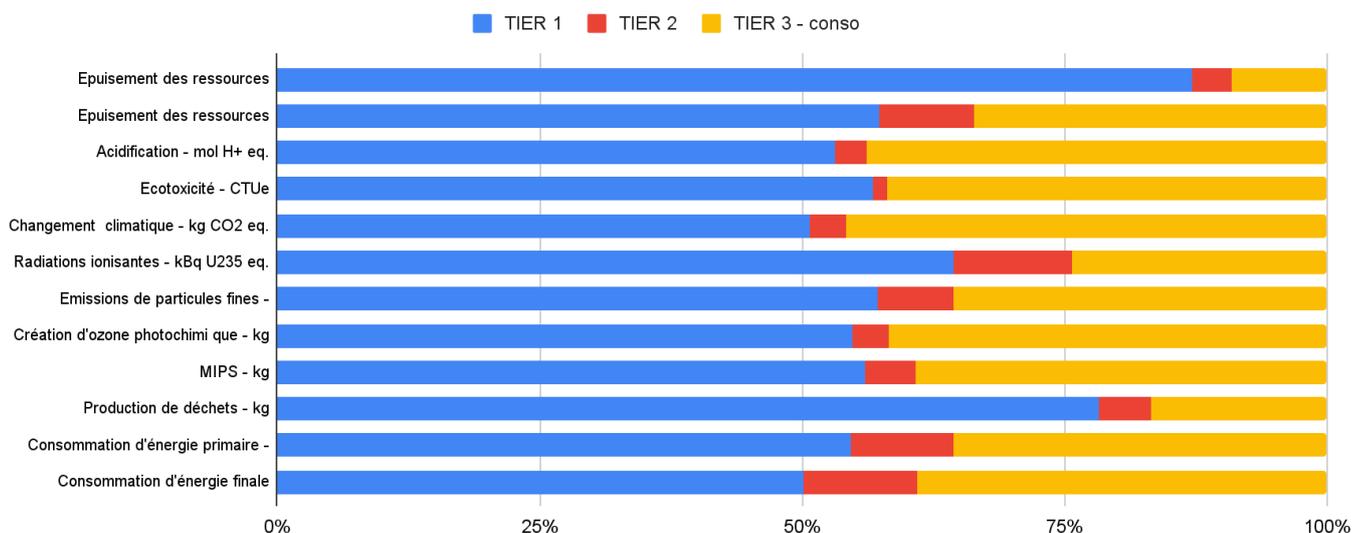


Figure 11 : Répartition des impacts environnementaux du numérique en Grand Est en 2020 par tiers, en fonction des indicateurs, approche consommation.

### Messages clés :

L'approche consommation présente, des impacts représentant entre 106% et 159% de ceux de l'approche production, en fonction des indicateurs. Les tiers 1 et 2 étant les mêmes dans les deux approches, l'ensemble de la hausse de l'impact est dû au tiers 3, qui voit donc sa part d'impact augmenter significativement. Pour certains indicateurs (changement climatique et acidification principalement), les tiers 1 et 3 sont quasiment équivalents dans cette approche consommation.

L'impact du numérique en général, et des datacenters en particulier, en région Grand Est (et en France) est donc plus important qu'envisagé initialement à travers une méthodologie du type de celle déployée dans le rapport ADEME - Arcep [1] (approche « production » exclusivement). Il paraît crucial de prendre en compte tous les impacts importés lors de toute évaluation focalisée sur une zone géographique, bien que ce volet-là soit plus compliqué à quantifier que les impacts ayant lieu sur le territoire.



## 2.7.2. Décomposition des impacts par tier

### 2.7.2.1. Tiers 1 – Terminaux & IoT

L'impact « Changement climatique » du tiers 1 (terminaux utilisateurs et IoT) de la région Grand Est en 2020 s'établit à 1,12 MtCO<sub>2</sub>eq, pour 10,87 équipements par habitant en moyenne (tous usages confondus, pro / perso / IoT).

L'impact pour l'ensemble des critères environnementaux s'établit comme suit :

Indicateur	Tiers 1
Epuisement des ressources abiotiques naturelles - éléments - kg Sb eq	7,16E+04
Epuisement des ressources abiotiques naturelles - fossiles - MJ	4,94E+10
Acidification - mol H+ eq.	6,73E+06
Ecotoxicité - CTUe	1,85E+10
Changement climatique - kg CO <sub>2</sub> eq.	1,12E+09
Radiations ionisantes - kBq U235 eq.	6,11E+09
Emissions de particules fines - Disease occurrence	7,43E+01
Création d'ozone photochimique - kg NMVOC eq.	2,89E+06
MIPS - kg	4,02E+09
Production de déchets - kg	1,41E+09
Consommation d'énergie primaire - MJ	4,88E+10
Consommation d'énergie finale (usage) - MJ	9,82E+09

Tableau 23 : Impacts environnementaux du numérique en Grand Est en 2020, tiers 1.

## ANALYSE PAR TYPE D'ÉQUIPEMENTS

La décomposition des impacts par équipements s'établit comme suit :

Indicateur - Tiers 1	Ordinateurs	Téléphones	Ecrans & matériels audiovisuels	Consoles	Stockages	IoT	Imprimantes	Tablettes
Epuisement des ressources abiotiques naturelles - éléments - kg Sb eq	1,90E+04	7,60E+03	3,64E+04	3,54E+03	9,49E+02	1,93E+02	8,55E+01	3,78E+03
Epuisement des ressources abiotiques naturelles - fossiles - MJ	1,10E+10	4,05E+09	2,33E+10	1,77E+09	4,69E+08	4,56E+09	2,58E+09	1,74E+09
Acidification - mol H+ eq.	1,90E+06	1,31E+06	1,92E+06	2,45E+05	2,06E+05	2,89E+05	2,95E+05	5,64E+05
Ecotoxicité - CTUe	6,46E+09	3,56E+09	3,96E+09	6,51E+08	5,73E+08	6,49E+08	9,47E+08	1,67E+09
Changement climatique - kg CO <sub>2</sub> eq.	3,11E+08	2,21E+08	3,15E+08	4,08E+07	3,46E+07	5,43E+07	4,82E+07	9,43E+07
Radiations ionisantes - kBq U235 eq.	1,36E+09	2,07E+08	3,16E+09	3,29E+08	1,32E+07	6,36E+08	3,02E+08	1,01E+08
Emissions de particules fines - Disease occurrence	1,77E+01	8,51E+00	3,10E+01	2,73E+00	1,19E+00	5,88E+00	3,67E+00	3,69E+00
Création d'ozone photochimique - kg NMVOC eq.	7,58E+05	5,80E+05	8,30E+05	1,00E+05	7,69E+04	1,39E+05	1,38E+05	2,68E+05
MIPS - kg	1,13E+09	1,05E+08	1,71E+09	2,19E+08	1,14E+08	2,60E+08	1,86E+08	3,07E+08
Production de déchets - kg	3,50E+08	3,84E+07	6,72E+08	7,10E+07	3,01E+07	3,47E+07	5,78E+07	1,57E+08
Consommation d'énergie primaire - MJ	1,05E+10	1,51E+09	2,48E+10	1,91E+09	4,91E+08	4,94E+09	2,76E+09	1,82E+09
Consommation d'énergie finale (usage) - MJ	1,93E+09	3,33E+08	5,39E+09	3,65E+08	7,82E+06	1,13E+09	5,07E+08	1,48E+08

Tableau 24 : Impacts environnementaux du numérique en Grand Est en 2020, tiers 1, par type d'équipements.



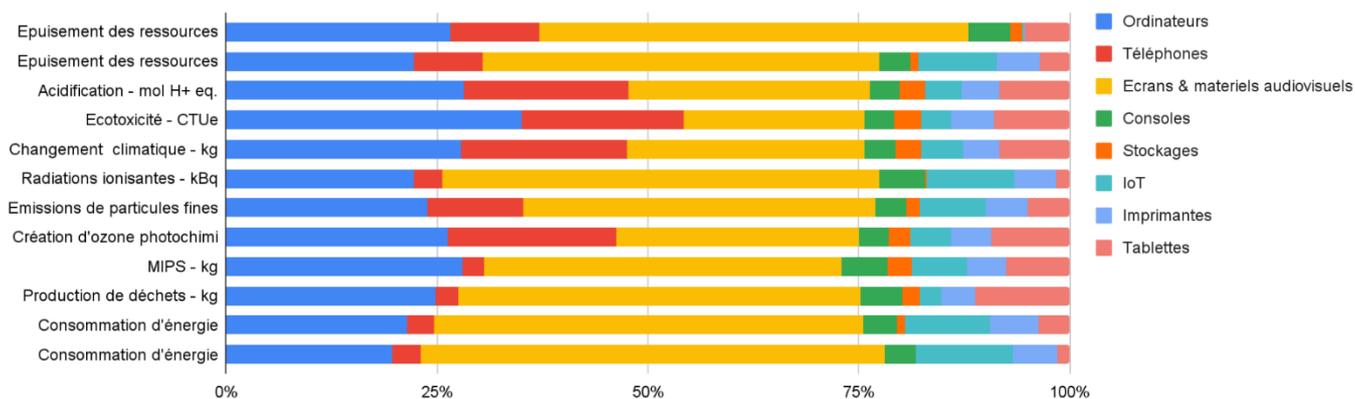


Figure 12 : Répartition des impacts environnementaux du numérique en Grand Est en 2020, tiers 1, par type d'équipements.

## ANALYSE PAR TYPE D'USAGE

La décomposition des impacts par type d'usage s'établit comme suit :

Indicateur - Tiers 1	Perso	Pro
Epuisement des ressources abiotiques naturelles - éléments - kg Sb eq	4,71E+04	2,44E+04
Epuisement des ressources abiotiques naturelles - fossiles - MJ	3,01E+10	1,94E+10
Acidification - mol H+ eq.	4,56E+06	2,17E+06
Ecotoxicité - CTUe	1,25E+10	6,00E+09
Changement climatique - kg CO <sub>2</sub> eq.	7,60E+08	3,59E+08
Radiations ionisantes - kBq U235 eq.	3,66E+09	2,45E+09
Emissions de particules fines - Disease occurrence	4,68E+01	2,75E+01
Création d'ozone photochimique - kg NMVOC eq.	1,96E+06	9,29E+05
MIPS - kg	2,36E+09	1,67E+09
Production de déchets - kg	8,27E+08	5,84E+08
Consommation d'énergie primaire - MJ	2,82E+10	2,05E+10
Consommation d'énergie finale (usage) - MJ	5,64E+09	4,17E+09

Tableau 25 : Impacts environnementaux du numérique en Grand Est en 2020, tiers 1, par type d'usage.

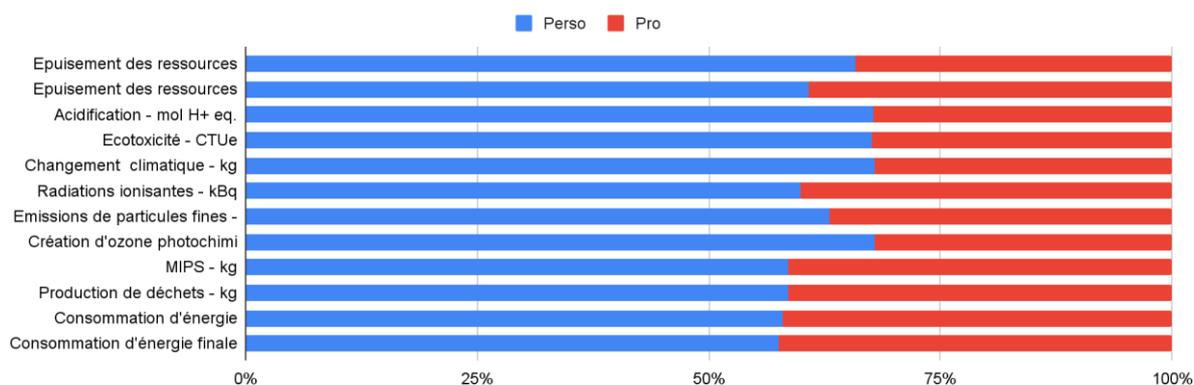


Figure 13 : Répartition des impacts environnementaux du numérique en Grand Est en 2020, tiers 1, par type d'usage.



## ANALYSE PAR PHASE DU CYCLE DE VIE

La décomposition des impacts par phase du cycle de vie s'établit comme suit :

Indicateur - Tiers 1	Fabrication, distribution et fin de vie	Usage
Epuisement des ressources abiotiques naturelles - éléments - kg Sb eq	7,15E+04	8,62E+01
Epuisement des ressources abiotiques naturelles - fossiles - MJ	1,45E+10	3,49E+10
Acidification - mol H+ eq.	5,68E+06	1,05E+06
Ecotoxicité - CTUe	1,72E+10	1,29E+09
Changement climatique - kg CO <sub>2</sub> eq.	9,37E+08	1,83E+08
Radiations ionisantes - kBq U235 eq.	1,39E+09	4,72E+09
Emissions de particules fines - Disease occurrence	3,35E+01	4,08E+01
Création d'ozone photochimique - kg NMVOC eq.	2,46E+06	4,31E+05
MIPS - kg	3,58E+09	4,43E+08
Production de déchets - kg	1,41E+09	0,00E+00
Consommation d'énergie primaire - MJ	1,06E+10	3,82E+10
Consommation d'énergie finale (usage) - MJ	0,00E+00	9,82E+09

Tableau 26 : Impacts environnementaux du numérique en Grand Est en 2020, tiers 1, par étape du cycle de vie.

Note : la phase de fabrication est très largement majoritaire au sein du bloc « fabrication, distribution et fin de vie ».

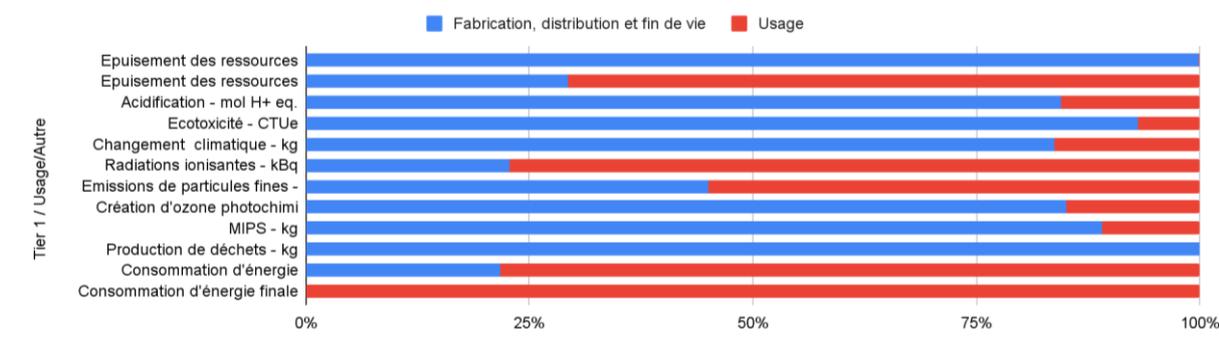


Figure 14 : Répartition des impacts environnementaux du numérique en Grand Est en 2020, tiers 1, par étape du cycle de vie.

### Messages clés :

Les équipements qui représentent la majeure partie de l'impact, tous indicateurs confondus, sont les écrans & matériels audiovisuels, les ordinateurs et les téléphones (d'une ampleur plus variable en fonction des indicateurs).

La fabrication, distribution et fin de vie des équipements représentent la majorité des impacts pour les critères Épuisement des ressources abiotiques naturelles - éléments, Acidification, Ecotoxicité, Changement climatique, Création d'ozone photochimique, MIPS, Production de déchets, principalement grâce à un mix électrique faisant peu recours aux énergies fossiles carbonées.

Les équipements personnels représentent environ 2/3 des impacts, le dernier tiers étant imputable aux équipements professionnels.

Note : Par manque de données primaires Grand Est, ces résultats sont extrapolés de données France.

### 2.7.2.2. Tiers 2 – Réseau

L'impact « Changement climatique » du tiers 2 (réseau) de la région Grand Est en 2020 s'établit à 0,07 MtCO<sub>2</sub>eq.

L'impact pour l'ensemble des critères environnementaux s'établit comme suit :

Indicateur	Tiers 2
Epuisement des ressources abiotiques naturelles - éléments - kg Sb eq	3,12E+03
Epuisement des ressources abiotiques naturelles - fossiles - MJ	7,82E+09
Acidification - mol H+ eq.	3,94E+05
Ecotoxicité - CTUe	4,09E+08
Changement climatique - kg CO <sub>2</sub> eq.	7,57E+07
Radiations ionisantes - kBq U235 eq.	1,08E+09
Emissions de particules fines - Disease occurrence	9,38E+00
Création d'ozone photochimique - kg NMVOC eq.	1,81E+05
MIPS - kg	3,48E+08
Production de déchets - kg	8,88E+07
Consommation d'énergie primaire - MJ	8,61E+09
Consommation d'énergie finale (usage) - MJ	2,12E+09

Tableau 27 : Impacts environnementaux du numérique en Grand Est en 2020, tiers 2.

## ANALYSE PAR TYPE DE RESEAU

La décomposition des impacts par type de réseau s'établit comme suit :

Indicateur – Tiers 2	Fixe	Mobile
Epuisement des ressources abiotiques naturelles - éléments - kg Sb eq	2,37E+03	7,51E+02
Epuisement des ressources abiotiques naturelles - fossiles - MJ	6,12E+09	1,71E+09
Acidification - mol H+ eq.	3,25E+05	6,89E+04
Ecotoxicité - CTUe	3,67E+08	4,15E+07
Changement climatique - kg CO <sub>2</sub> eq.	6,17E+07	1,40E+07
Radiations ionisantes - kBq U235 eq.	8,45E+08	2,33E+08
Emissions de particules fines - Disease occurrence	7,39E+00	1,99E+00
Création d'ozone photochimique - kg NMVOC eq.	3,20E+04	1,49E+05
MIPS - kg	2,87E+08	6,10E+07
Production de déchets - kg	7,19E+07	1,69E+07
Consommation d'énergie primaire - MJ	6,72E+09	1,89E+09
Consommation d'énergie finale (usage) - MJ	1,64E+09	4,81E+08

Tableau 28 : Impacts environnementaux du numérique en Grand Est en 2020, tiers 2, par type de réseau.

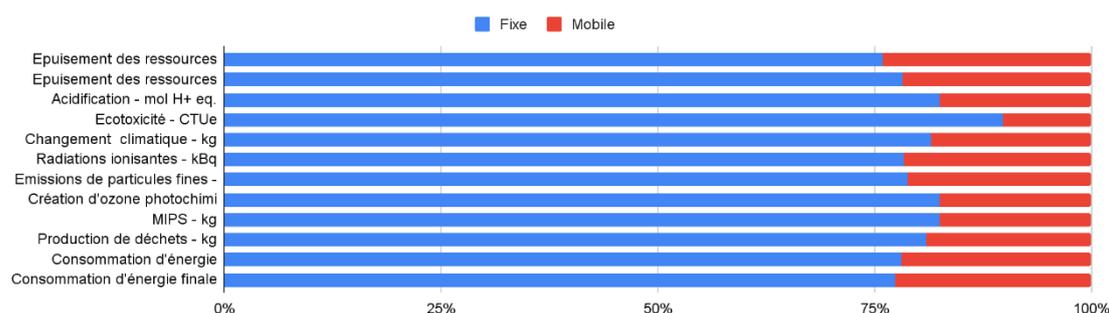


Figure 15 : Répartition des impacts environnementaux du numérique en Grand Est en 2020, tiers 2, par type de réseau.



## ANALYSE PAR TYPE D'USAGE

La décomposition des impacts par type d'usage s'établit comme suit :

Indicateur – Tiers 2	Perso	Pro
Epuisement des ressources abiotiques naturelles - éléments - kg Sb eq	2,89E+03	2,27E+02
Epuisement des ressources abiotiques naturelles - fossiles - MJ	7,26E+09	5,60E+08
Acidification - mol H+ eq.	3,66E+05	2,73E+04
Ecotoxicité - CTUe	3,82E+08	2,68E+07
Changement climatique - kg CO <sub>2</sub> eq.	7,04E+07	5,28E+06
Radiations ionisantes - kBq U235 eq.	1,00E+09	7,71E+07
Emissions de particules fines - Disease occurrence	8,71E+00	6,69E-01
Création d'ozone photochimique - kg NMVOC eq.	1,25E+04	1,68E+05
MIPS - kg	3,24E+08	2,41E+07
Production de déchets - kg	8,26E+07	6,23E+06
Consommation d'énergie primaire - MJ	7,99E+09	6,17E+08
Consommation d'énergie finale (usage) - MJ	1,97E+09	1,53E+08

Tableau 29 : Impacts environnementaux du numérique en Grand Est en 2020, tiers 2, par type d'usage.

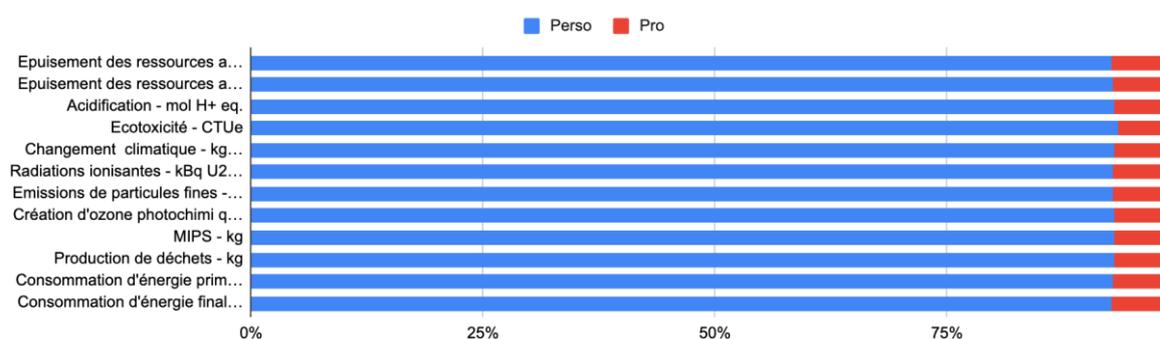


Figure 16 : Répartition des impacts environnementaux du numérique en Grand Est en 2020, tiers 2, par type d'usage.

### Messages clés :

Le réseau fixe représente la majorité des impacts du tiers 2, par rapport au réseau mobile, et cela pour la totalité des indicateurs étudiés. En particulier, l'impact du réseau fixe est plutôt corrélé au nombre de lignes installés (l'impact est moins sensible à la quantité de données transitant par le réseau), quand celui du réseau mobile est corrélé à la quantité de données transitant par le réseau. Les usages personnels représentent la majorité des impacts.

Note : Par manque de données primaires Grand Est, ces résultats sont extrapolés de données France

### 2.7.2.3. Tiers 3 – Datacenters

#### 2.7.2.3.1. Approche Production

L'impact « Changement climatique » du tiers 3 (datacenter) de la région Grand Est en 2020 s'établit à 0,19 MtCO<sub>2</sub>eq dans une approche « production ».

L'impact pour l'ensemble des critères environnementaux s'établit comme suit :



Indicateur	Tiers 3 - production
Epuisement des ressources abiotiques naturelles - éléments - kg Sb eq	2,74E+03
Epuisement des ressources abiotiques naturelles - fossiles - MJ	1,24E+10
Acidification - mol H+ eq.	1,07E+06
Ecotoxicité - CTUe	2,84E+09
Changement climatique - kg CO <sub>2</sub> eq.	1,94E+08
Radiations ionisantes - kBq U235 eq.	1,50E+09
Emissions de particules fines - Disease occurrence	1,64E+01
Création d'ozone photochimique - kg NMVOC eq.	4,49E+05
MIPS - kg	6,91E+08
Production de déchets - kg	1,13E+08
Consommation d'énergie primaire - MJ	1,36E+10
Consommation d'énergie finale (usage) - MJ	3,14E+09

Tableau 30 : Impacts environnementaux du numérique en Grand Est en 2020, tiers 3, approche production.

## ANALYSE PAR TYPE DE DATACENTER

Dans le cadre de cette étude, Les centres de données sont divisés en différents types :

- public local (correspondant aux centres de données *on-premise* des organisations publiques territoriales) ;
- public national (correspondant aux centres de données *on-premise* des organisations publiques nationales) ;
- entreprises (correspondant aux centres de données *on-premise* des entreprises) ; ;
- colocation (correspondant aux centres de données non dédiés à une organisation en particulier) ;
- HPC (correspondant aux centres de données dédiés au calcul haute-performance).

L'impact pour chaque type de centre de données, pour l'ensemble des critères environnementaux, s'établit comme suit :

Indicateur – Tiers 3 – production	Datacenters public local	Datacenters public national	Datacenters entreprises	Datacenters colocation
Epuisement des ressources abiotiques naturelles - éléments - kg Sb eq	2,21E+02	6,39E+01	1,57E+03	8,89E+02
Epuisement des ressources abiotiques naturelles - fossiles - MJ	9,35E+08	2,85E+08	7,59E+09	3,60E+09
Acidification - mol H+ eq.	7,68E+04	2,36E+04	6,15E+05	3,55E+05
Ecotoxicité - CTUe	2,23E+08	6,41E+07	1,62E+09	9,34E+08
Changement climatique - kg CO <sub>2</sub> eq.	1,40E+07	4,29E+06	1,12E+08	6,37E+07
Radiations ionisantes - kBq U235 eq.	1,16E+08	3,50E+07	9,27E+08	4,25E+08
Emissions de particules fines - Disease occurrence	1,22E+00	3,72E-01	9,87E+00	4,90E+00
Création d'ozone photochimique - kg NMVOC eq.	3,33E+04	9,70E+03	2,59E+05	1,47E+05
MIPS - kg	5,62E+07	1,60E+07	3,99E+08	2,20E+08
Production de déchets - kg	9,67E+06	2,68E+06	6,51E+07	3,60E+07
Consommation d'énergie primaire - MJ	1,02E+09	3,14E+08	8,35E+09	3,94E+09
Consommation d'énergie finale (usage) - MJ	2,38E+08	7,28E+07	1,95E+09	8,80E+08

Tableau 31 : Impacts environnementaux du numérique en Grand Est en 2020, tiers 3, approche production, par type de data center.



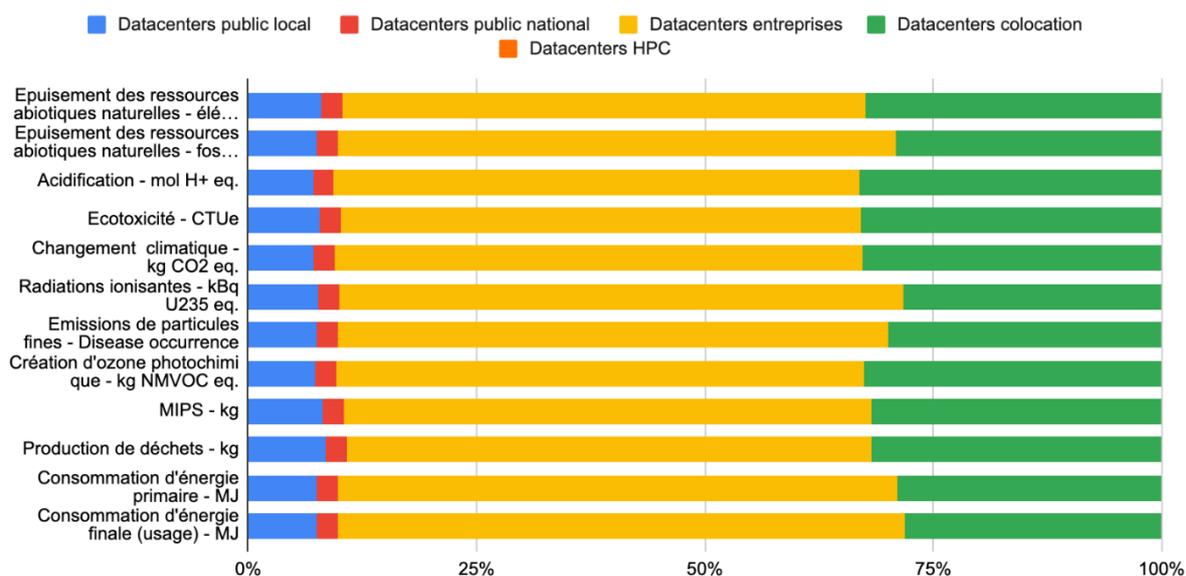


Figure 17 : Répartition des impacts environnementaux du numérique en Grand Est en 2020, tiers 3, approche production, par type de data center.

## ANALYSE PAR PHASE DU CYCLE DE VIE

L'impact pour l'ensemble des critères environnementaux et pour les phases du cycle de vie des datacenters (approche « production ») s'établit comme suit :

Indicateur – Tiers 3 - production	Fabrication, distribution et fin de vie	Usage
Epuisement des ressources abiotiques naturelles - éléments - kg Sb eq	2,72E+03	1,92E+01
Epuisement des ressources abiotiques naturelles - fossiles - MJ	2,62E+09	9,79E+09
Acidification - mol H+ eq.	8,52E+05	2,18E+05
Ecotoxicité - CTUe	2,59E+09	2,50E+08
Changement climatique - kg CO <sub>2</sub> eq.	1,46E+08	4,78E+07
Radiations ionisantes - kBq U235 eq.	1,32E+08	1,37E+09
Emissions de particules fines - Disease occurrence	5,84E+00	1,05E+01
Création d'ozone photochimique - kg NMVOC eq.	3,53E+05	9,66E+04
MIPS - kg	5,86E+08	1,05E+08
Production de déchets - kg	1,09E+08	4,65E+06
Consommation d'énergie primaire - MJ	2,74E+09	1,09E+10
Consommation d'énergie finale (usage) - MJ	0,00E+00	3,14E+09

Tableau 32 : Impacts environnementaux du numérique en Grand Est en 2020, tiers 3, approche production, par phase du cycle de vie.



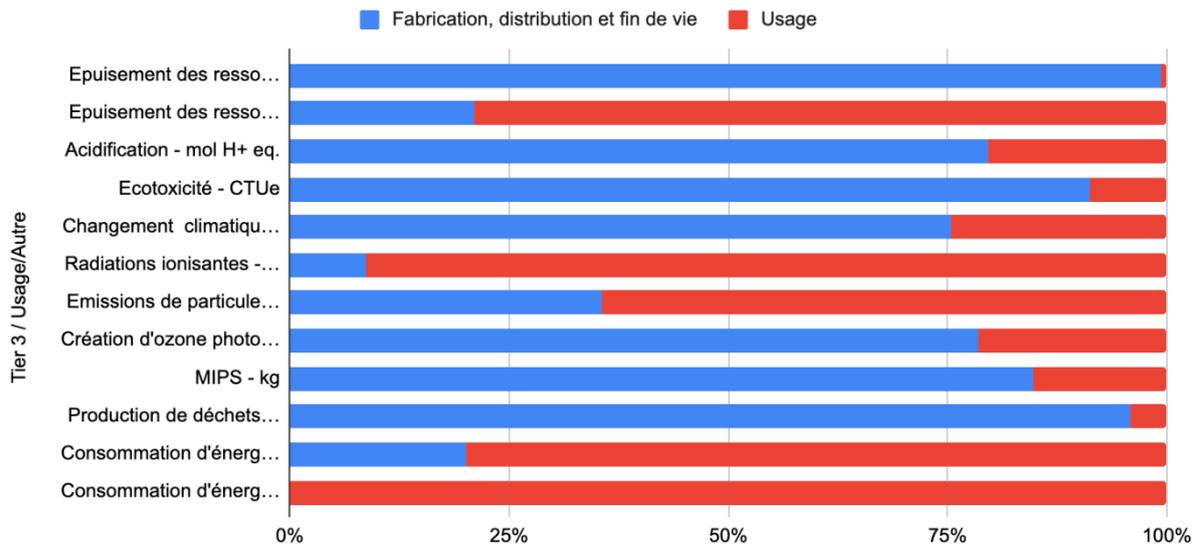


Figure 18 : Répartition des impacts environnementaux du numérique en Grand Est en 2020, tiers 3, approche production, par phase du cycle de vie.

### Messages clés :

Les centres de données les plus impactant en valeur absolue, sont (dans un ordre décroissant) : les entreprises, les datacenters de colocation, le public local et le public national. La faible part du public national s'explique par un faible nombre d'entités de ce type implantées en région Grand Est (par rapport à la région parisienne). Par ailleurs, il n'y a pas de HPC identifié en région Grand Est.

Par ailleurs, la part des datacenters de colocation est également sensiblement plus faible que celle évaluée à l'échelle nationale. Cette différence s'explique par le fait que la région parisienne accueillant la majorité de ce type de centre de données.

La fabrication, distribution et fin de vie des équipements représentent la majorité des impacts pour les critères Épuisement des ressources abiotiques naturelles - éléments, Acidification, Ecotoxicité, Changement climatique, Création d'ozone photochimique, MIPS, Production de déchets (mix électrique à faible impact en France).

### 2.7.2.3.2. Approche Consommation

En plus des types de datacenter définis dans l'approche « production », les résultats de l'approche par « consommation » incluent les datacenters de type colocation situés à l'étranger.

## LES HYPOTHESES DE CALCUL

- On considère le même impact de fabrication pour les datacenters de « colocation » qu'ils soient en France ou à l'Étranger.
- Plusieurs rapports d'Equinix [29] ou de CBRE [30] sur l'évolution des data centres mettent en avant la prédominance des Etats Unis à l'échelle mondiale et de Londres, Amsterdam, Francfort et Dublin à l'échelle européenne. Comme il n'existe pas, à notre connaissance, de données précises sur la localisation des data centres consommés par la France, nous avons considéré un mix électrique basé sur une répartition 50% Europe (les mix de l'Allemagne, du Royaume Uni et des Pays Bas en sont assez proches) et 50% US.
- On utilise le ratio population pour passer de l'échelle nationale à l'échelle de la région Grand Est. En effet, aucune données fiables (exhaustives et récentes) permettant d'estimer la répartition des flux et quantités de données entre la région et le reste de la France n'a été trouvée, les seuls éléments probants étant ceux permettant d'estimer la répartition France/Etranger.

## LES RESULTATS

Dans ce contexte, l'impact « Changement climatique » du tiers 3 (datacenter) de la région Grand Est en 2020 s'établit à 1,01 MtCO<sub>2</sub>eq dans une approche « consommation ».

L'impact pour l'ensemble des critères environnementaux s'établit comme suit :

Indicateur	Tiers 3 - consommation
Epuisement des ressources abiotiques naturelles - éléments - kg Sb eq	7,47E+03
Epuisement des ressources abiotiques naturelles - fossiles - MJ	2,90E+10
Acidification - mol H+ eq.	5,56E+06
Ecotoxicité - CTUe	1,36E+10
Changement climatique - kg CO <sub>2</sub> eq.	1,01E+09
Radiations ionisantes - kBq U235 eq.	2,30E+09
Emissions de particules fines - Disease occurrence	4,63E+01
Création d'ozone photochimique - kg NMVOC eq.	2,21E+06
MIPS - kg	2,81E+09
Production de déchets - kg	3,04E+08
Consommation d'énergie primaire - MJ	3,18E+10
Consommation d'énergie finale (usage) - MJ	7,67E+09

Tableau 33 : Impacts environnementaux du numérique en Grand Est en 2020, tiers 3, approche consommation.

## ANALYSE PAR TYPE DE DATACENTER

La décomposition des impacts par type de datacenter dans une approche consommation s'établit comme suit :

Indicateur – Tiers 3 – consommation	Datacenters public local	Datacenters public national	Datacenters entreprises	Datacenters colocation	Datacenters colocation extérieurs
Epuisement des ressources abiotiques naturelles - éléments - kg Sb eq	1,82E+02	1,82E+02	1,02E+03	1,70E+03	4,39E+03
Epuisement des ressources abiotiques naturelles - fossiles - MJ	7,70E+08	8,14E+08	4,91E+09	6,87E+09	1,56E+10
Acidification - mol H+ eq.	6,33E+04	6,74E+04	3,98E+05	6,77E+05	4,35E+06
Ecotoxicité - CTUe	1,84E+08	1,83E+08	1,05E+09	1,78E+09	1,04E+10
Changement climatique - kg CO <sub>2</sub> eq.	1,15E+07	1,22E+07	7,27E+07	1,22E+08	7,92E+08
Radiations ionisantes - kBq U235 eq.	9,52E+07	9,97E+07	6,00E+08	8,11E+08	6,94E+08
Emissions de particules fines - Disease occurrence	1,01E+00	1,06E+00	6,39E+00	9,34E+00	2,85E+01
Création d'ozone photochimique - kg NMVOC eq.	2,74E+04	2,86E+04	1,68E+05	2,80E+05	1,71E+06
MIPS - kg	4,63E+07	4,57E+07	2,59E+08	4,19E+08	2,04E+09
Production de déchets - kg	7,97E+06	7,66E+06	4,22E+07	6,87E+07	1,77E+08
Consommation d'énergie primaire - MJ	8,44E+08	8,95E+08	5,41E+09	7,52E+09	1,71E+10
Consommation d'énergie finale (usage) - MJ	1,96E+08	2,08E+08	1,26E+09	1,68E+09	4,33E+09

Tableau 34 : Impacts environnementaux du numérique en Grand Est en 2020, tiers 3, approche consommation, par type de datacenter.



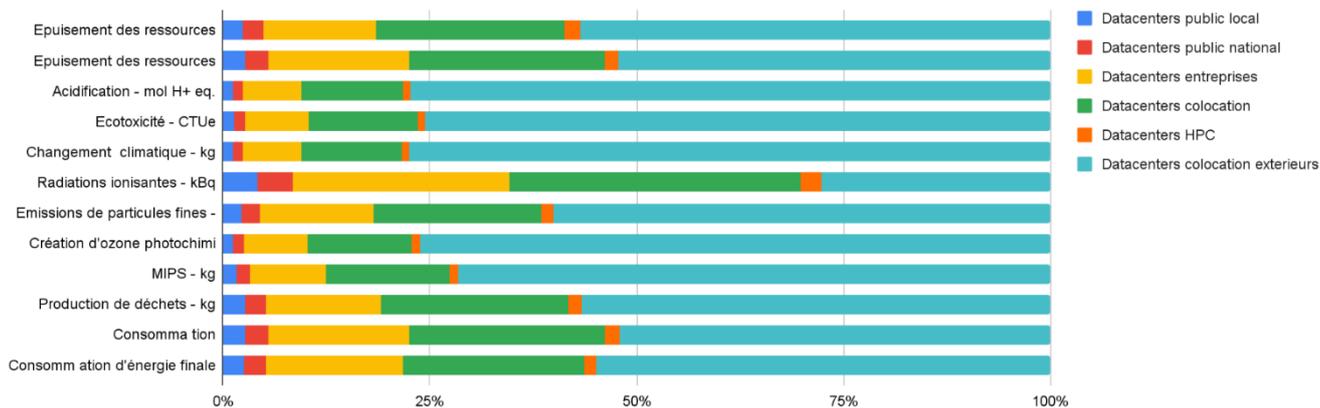


Figure 19 : Répartition des impacts environnementaux du numérique en Grand Est en 2020, tiers 3, approche consommation, par type de data center.

## DECOMPOSITION PAR PHASE DU CYCLE DE VIE

Dans le détail, la décomposition des impacts par phase du cycle de vie (construction, distribution, usage, fin de vie) s'établit comme suit :

Indicateur – Tiers 3 - consommation	Fabrication, distribution et fin de vie	Usage
Epuisement des ressources abiotiques naturelles - éléments - kg Sb eq	7,41E+03	6,06E+01
Epuisement des ressources abiotiques naturelles - fossiles - MJ	3,82E+09	2,52E+10
Acidification - mol H+ eq.	2,13E+06	3,42E+06
Ecotoxicité - CTUe	6,79E+09	6,85E+09
Changement climatique - kg CO <sub>2</sub> eq.	3,89E+08	6,23E+08
Radiations ionisantes - kBq U235 eq.	1,08E+07	2,29E+09
Emissions de particules fines - Disease occurrence	9,95E+00	3,64E+01
Création d'ozone photochimique - kg NMVOC eq.	8,90E+05	1,32E+06
MIPS - kg	1,50E+09	1,31E+09
Production de déchets - kg	3,04E+08	0,00E+00
Consommation d'énergie primaire - MJ	4,25E+09	2,75E+10
Consommation d'énergie finale (usage) - MJ	0,00E+00	7,67E+09

Tableau 35 : Impacts environnementaux du numérique en Grand Est en 2020, tiers 3, approche consommation, par phase du cycle de vie.



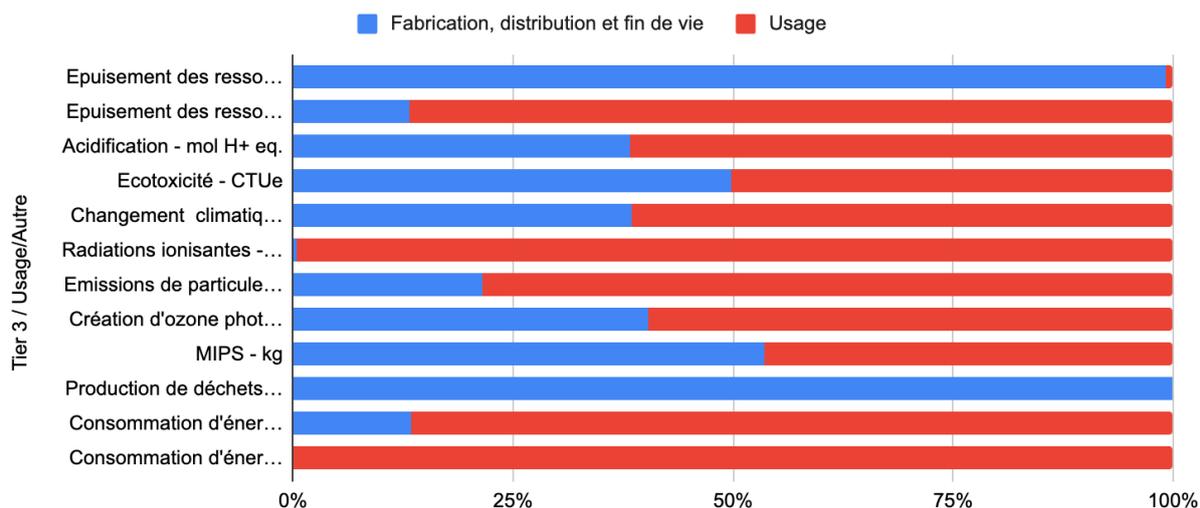
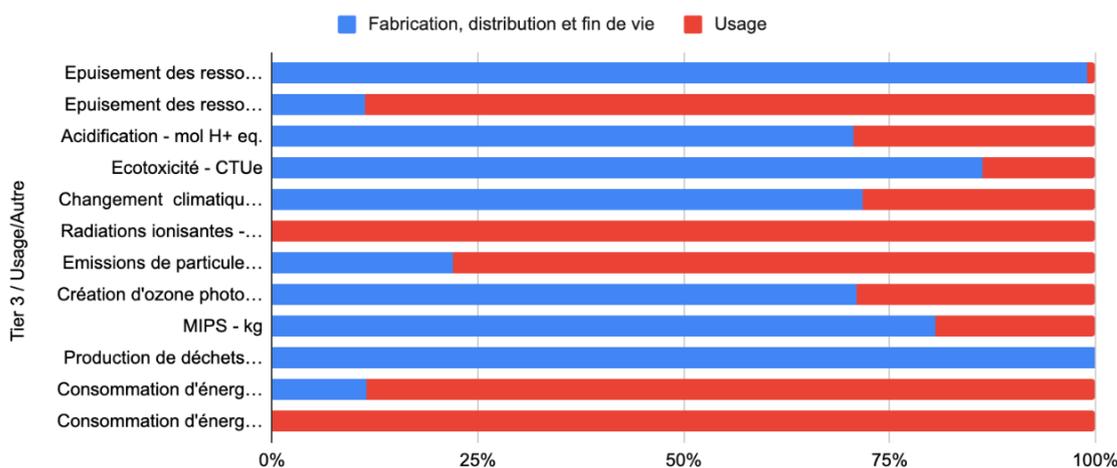


Figure 20 : Répartition des impacts environnementaux du numérique en Grand Est en 2020, tiers 3, approche production, par phase du cycle de vie.

Par comparaison, la répartition par phases du cycle de vie issue du modèle production de l'étude nationale est la suivante :



Rappel de la Figure 18 : Répartition des impacts environnementaux du numérique en Grand Est en 2020, tiers 3, approche production, par phase du cycle de vie.

### Messages clés :

La distribution par type de datacenters diffère sensiblement du modèle « production », puisque les data centers de colocations (hors du territoire français principalement) prennent le pas sur les salles serveurs *on-premise*. Les centres de données les plus impactant sont (dans un ordre décroissant) : les colocations extérieures, les colocations (françaises), les entreprises, le public national et le public local.

La prise en compte des datacenters importés modifie grandement l'impact du tiers 3. Le mix électrique étranger induit des impacts nettement plus importants sur l'ensemble des indicateurs, à l'exception des Radiations Ionisantes, du fait de l'importance de l'électricité nucléaire dans le mix français. Par ailleurs, la phase d'usage devient majoritaire sur la plupart des indicateurs pour le modèle par consommation. Ainsi sur le potentiel de changement climatique la phase d'usage passe de 28% à 61%, à cause d'un mix électrique choisi (50% Europe /50% US) plus impactant que le mix français.

Note : le modèle consommation a été calculé sur un périmètre national et extrapolé à la région Grand Est sur la base de sa population. Les usages inter-régions (Grand Est vers et depuis d'autres régions de France) n'étant pas connus, ils n'ont pu être intégrés dans le modèle. Ce sujet pourrait faire l'objet d'une future amélioration du modèle.



### 2.7.2.3.3. Comparaison des deux approches

Les impacts comparés pour le tiers 3 (datacenters), dans une approche production et consommation s'établissent comme suit :

Indicateur – Tiers 3	Approche consommation	Approche production
Epuisement des ressources abiotiques naturelles - éléments - kg Sb eq	7,47E+03	2,74E+03
Epuisement des ressources abiotiques naturelles - fossiles - MJ	2,90E+10	1,24E+10
Acidification - mol H+ eq.	5,56E+06	1,07E+06
Ecotoxicité - CTUe	1,36E+10	2,84E+09
Changement climatique - kg CO <sub>2</sub> eq.	1,01E+09	1,94E+08
Radiations ionisantes - kBq U235 eq.	2,30E+09	1,50E+09
Emissions de particules fines - Disease occurrence	4,63E+01	1,64E+01
Création d'ozone photochimique - kg NMVOC eq.	2,21E+06	4,49E+05
MIPS - kg	2,81E+09	6,91E+08
Production de déchets - kg	3,04E+08	1,13E+08
Consommation d'énergie primaire - MJ	3,18E+10	1,36E+10
Consommation d'énergie finale (usage) - MJ	7,67E+09	3,14E+09

Tableau 36 : Impacts environnementaux du numérique en Grand Est en 2020, tiers 3, comparaison des approches production et consommation.

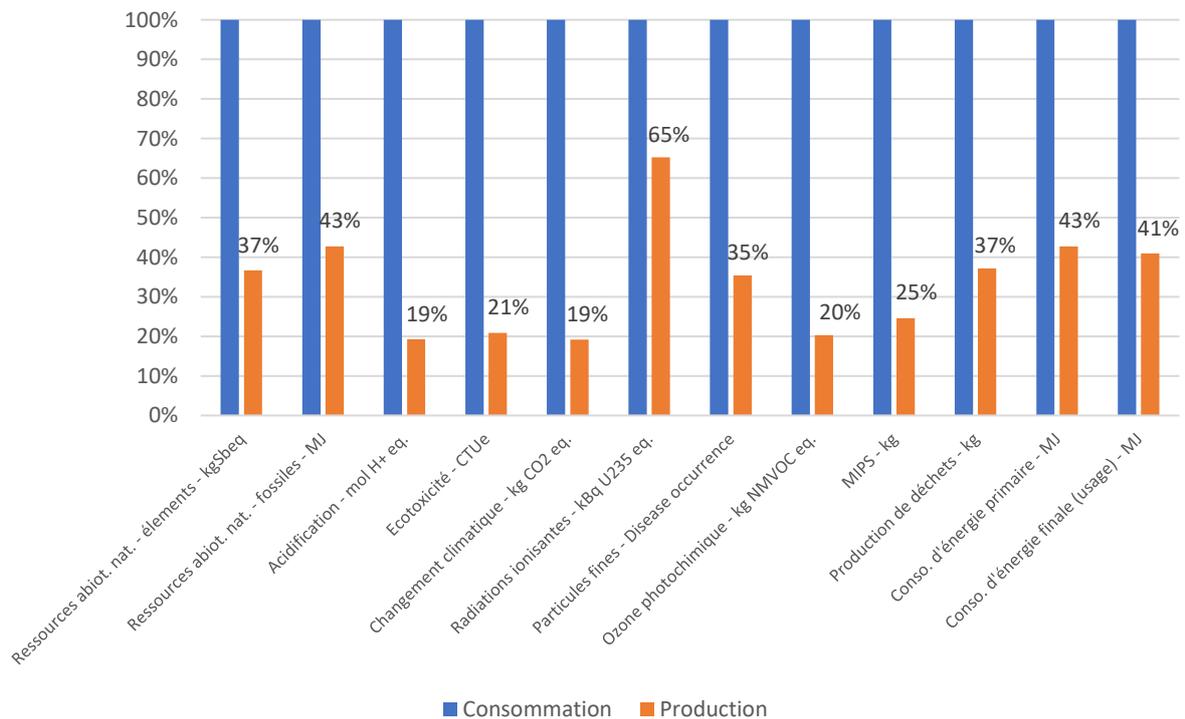


Figure 21 : Répartition des impacts environnementaux du numérique en Grand Est en 2020, tiers 3, approche production, par phase du cycle de vie.

Les impacts issus du modèle consommation sont nettement plus importants que pour le modèle production, sur l'ensemble des indicateurs. Par exemple, le potentiel de changement climatique est 4,4 fois plus important pour le modèle consommation que pour le modèle production. La proportion des datacenters importés (plus de 50%) et le mix électrique moins favorable sont les raisons de cet accroissement de l'impact du tiers 3 sur l'ensemble des indicateurs.



## 2.8. Analyses de sensibilité

### 2.8.1. Analyse de sensibilité sur le mix électrique des datacenters « importés »

Compte tenu de l'importance du mix électrique, nous avons considéré plusieurs cas de figure à comparer au cas de référence (50% US, 50% Europe) :

- Un scénario plus défavorable basé sur un mix électrique US ;
- Un scénario plus favorable basé sur un mix électrique Europe ;
- Un scénario très favorable basé sur un mix électrique peu carboné (équivalent à la France).

Changer la nature du mix électrique a un impact important sur la plupart des indicateurs. Un mix peu carboné (équivalent à la France) diminuerait de moitié l'impact des datacenters sur le potentiel de changement climatique. Cette analyse de sensibilité révèle également que la prise en compte des datacenters importés est d'autant plus importante que les mix électriques des principales localisations actuelles (US et Allemagne/Pays Bas/UK/Irlande pour l'Europe) sont peu favorables en termes d'impacts environnementaux.

Dans le détail, les impacts comparés des différents scénarios pour le tiers 3 s'établissent comme suit :

Indicateur – Tiers 3 - consommation	Scenario de référence (50% US-50%EU)	Scenario Mix peu carboné - France	Scenario Mix US	Scenario Mix EU
Epuisement des ressources abiotiques naturelles - éléments - kg Sb eq	7,47E+03	7,47E+03	7,46E+03	7,47E+03
Epuisement des ressources abiotiques naturelles - fossiles - MJ	2,90E+10	3,11E+10	2,97E+10	2,83E+10
Acidification - mol H+ eq.	5,56E+06	2,95E+06	5,88E+06	5,24E+06
Ecotoxicité - CTUe	1,36E+10	7,80E+09	1,49E+10	1,24E+10
Changement climatique - kg CO <sub>2</sub> eq.	1,01E+09	5,32E+08	1,09E+09	9,33E+08
Radiations ionisantes - kBq U235 eq.	2,30E+09	3,69E+09	2,21E+09	2,38E+09
Emissions de particules fines - Disease occurrence	4,63E+01	4,19E+01	4,71E+01	4,55E+01
Création d'ozone photochimique - kg NMVOC eq.	2,21E+06	1,23E+06	2,37E+06	2,04E+06
MIPS - kg	2,81E+09	1,85E+09	2,96E+09	2,66E+09
Production de déchets - kg	3,04E+08	3,04E+08	3,04E+08	3,04E+08
Consommation d'énergie primaire - MJ	3,18E+10	3,41E+10	3,13E+10	3,23E+10
Consommation d'énergie finale (usage) - MJ	7,67E+09	7,67E+09	7,67E+09	7,67E+09

Tableau 37 : Impacts environnementaux du numérique en Grand Est en 2020, tiers 3, analyse de sensibilité sur le mix électrique, approche consommation.



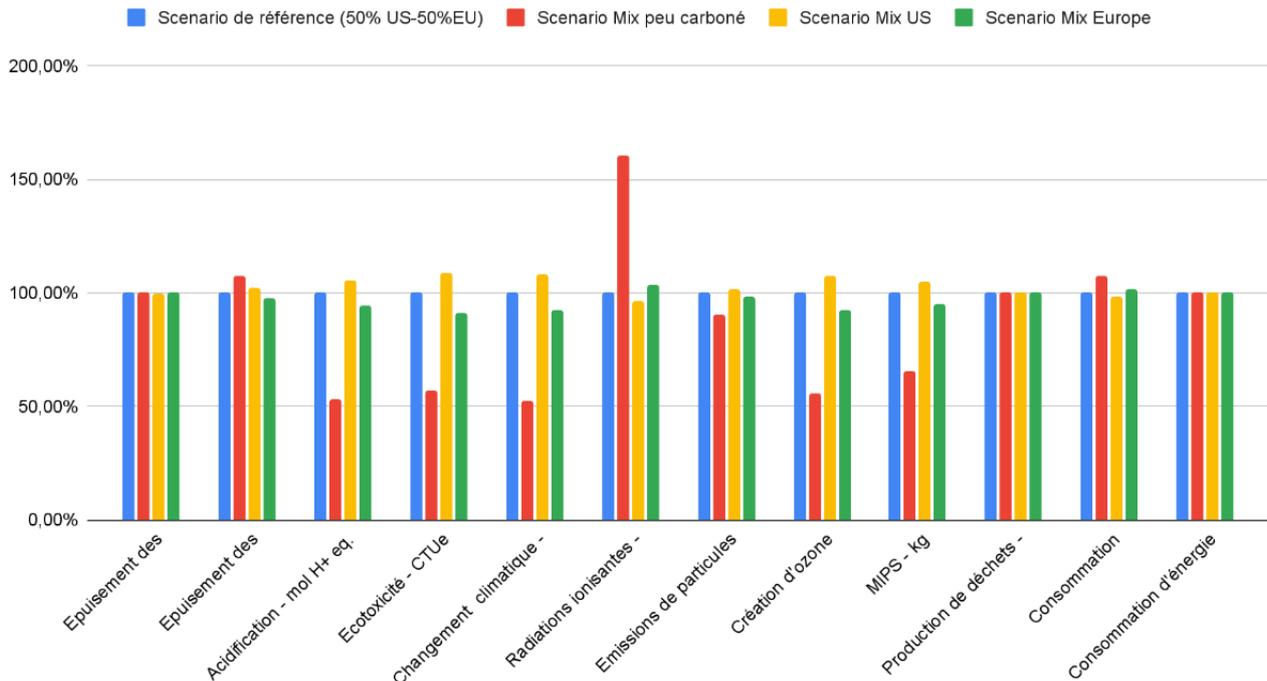


Figure 22 : Répartition des impacts environnementaux du numérique en Grand Est en 2020, tiers 3, analyse de sensibilité sur le mix électrique, approche consommation.

### Messages clés :

Les datacenters situés à l'étranger et utilisés au profit des usages en région Grand Est ont un impact environnemental plus important que ceux du territoire, à cause d'une électricité souvent plus impactante en phase d'utilisation. Les indicateurs pour lesquels le mix français est défavorable sont les radiations ionisantes et, dans une moindre mesure, l'épuisement des ressources naturelles fossiles. Les mix US et moyenne UE ressortent comme relativement équivalents.

## 2.8.2. Analyse de sensibilité sur la proportion de data centers « importés » – zoom sur le tiers 3

Une incertitude majeure existe sur la proportion des datacenters extérieurs utilisés en France. Nous avons donc considéré deux scénarios en complément des scénarios « production » et « consommation » (référence) :

- scénario bas : 30% des datacenters consommés en France sont de type colocation provenant de l'extérieur ;
- scénario haut : 70% des datacenters consommés en France sont de type colocation provenant de l'extérieur.

	m <sup>2</sup>	% de datacenters « importés »
Scénario « consommation »	1 037 646	55%
Scénario « production »	0	0
Scénario « consommation » bas	567 537	30%
Scénario « consommation » haut	1 324 251	70%

Tableau 38 : définition des scénarios pour l'analyse de sensibilité sur la proportion de data centers « importés ».

On observe une forte variation des impacts en fonction du pourcentage de datacenters importés (par ex : jusqu'à 540% sur le critère changement climatique par rapport à l'approche production dans le cas d'usages de datacenters à 70% importés). Cette analyse de sensibilité illustre l'importance de progresser dans la quantification de la consommation des datacenters extérieurs. La croissance en part de marché des hyperscalers pour le IaaS et des éditeurs (souvent américains) pour le SaaS, soulignées notamment par les rapports GXI d'Equinix [29], devrait accentuer cette tendance.

Dans le détail, les impacts comparés des différentes analyses de sensibilité s'établissent comme suit :



Indicateur – Tiers 3 - consommation	Scenario « consommation » (55% importé)	Scénario « production » (0% importé)	Scénario de consommation « bas » (30% importé)	Scénario de consommation « haut » (70% importé)
Epuisement des ressources abiotiques naturelles - éléments - kg Sb eq	7,47E+03	2,74E+03	5,54E+03	8,64E+03
Epuisement des ressources abiotiques naturelles - fossiles - MJ	2,90E+10	1,24E+10	2,21E+10	3,31E+10
Acidification - mol H+ eq.	5,56E+06	1,07E+06	3,61E+06	6,75E+06
Ecotoxicité - CTUe	1,36E+10	2,84E+09	8,97E+09	1,65E+10
Changement climatique - kg CO <sub>2</sub> eq.	1,01E+09	1,94E+08	6,57E+08	1,23E+09
Radiations ionisantes - kBq U235 eq.	2,30E+09	1,50E+09	2,01E+09	2,47E+09
Emissions de particules fines - Disease occurrence	4,63E+01	1,64E+01	3,37E+01	5,40E+01
Création d'ozone photochimique - kg NMVOC eq.	2,21E+06	4,49E+05	1,44E+06	2,67E+06
MIPS - kg	2,81E+09	6,91E+08	1,90E+09	3,37E+09
Production de déchets - kg	3,04E+08	1,13E+08	2,26E+08	3,51E+08
Consommation d'énergie primaire - MJ	3,18E+10	1,36E+10	2,43E+10	3,64E+10
Consommation d'énergie finale (usage) - MJ	7,67E+09	3,14E+09	5,76E+09	8,83E+09

Tableau 39 : Impacts environnementaux du numérique en Grand Est en 2020, tiers 3, analyse de sensibilité sur la proportion de datacenters « importés », approche consommation.

Si on prend comme référence le modèle de « production », voici les variations de l'impact global en fonction des différents scénarios de modèles de « consommation » :

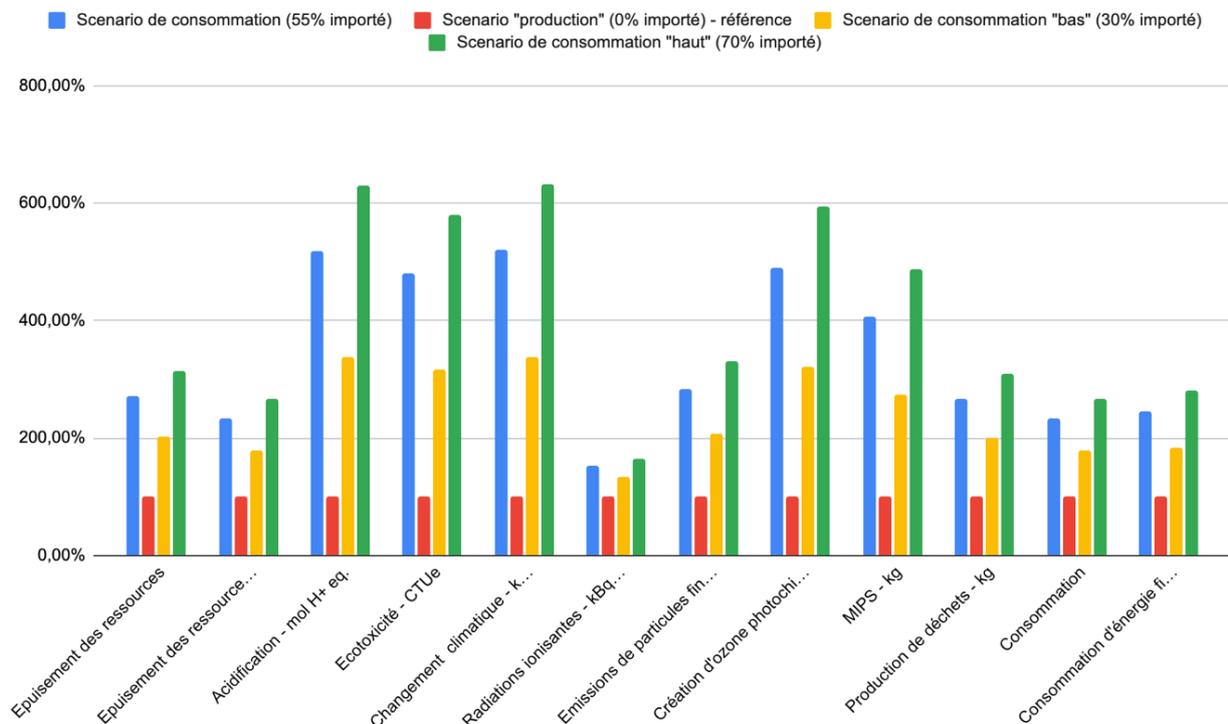


Figure 23 : Répartition des impacts environnementaux du numérique en Grand Est en 2020, tiers 3, analyse de sensibilité sur la proportion de datacenters « importés », approche consommation.



### 2.8.3. Analyse de sensibilité sur le pourcentage de datacenters « importés » - vision globale

La prise en compte des datacenters importés entraîne une croissance des impacts pour l'ensemble des indicateurs. Cependant, cette croissance est directement corrélée à l'hypothèse faite sur le pourcentage de datacenters « importés ». Par exemple, l'indicateur d'impact sur le changement climatique représente entre 130% et 170% de celui pour le modèle production.

Dans le détail, les impacts environnementaux de la région Grand Est s'établissent comme suit dans différentes approches d'évaluation des datacenters :

Indicateur – tous tiers	Scénario « consommation » (55% importé)	Scénario « production » (0% importé)	Scénario de consommation « bas » (30% importé)	Scénario de consommation « haut » (70% importé)
Épuisement des ressources abiotiques naturelles - éléments - kg Sb eq	8,22E+04	7,74E+04	8,02E+04	8,33E+04
Épuisement des ressources abiotiques naturelles - fossiles - MJ	8,62E+10	6,97E+10	7,94E+10	9,04E+10
Acidification - mol H+ eq.	1,27E+07	8,19E+06	1,07E+07	1,39E+07
Ecotoxicité - CTUe	3,25E+10	2,17E+10	2,79E+10	3,54E+10
Changement climatique - kg CO <sub>2</sub> eq.	2,21E+09	1,39E+09	1,85E+09	2,42E+09
Radiations ionisantes - kBq U235 eq.	9,49E+09	8,69E+09	9,20E+09	9,66E+09
Emissions de particules fines - Disease occurrence	1,30E+02	1,00E+02	1,17E+02	1,38E+02
Création d'ozone photochimique - kg NMVOC eq.	5,28E+06	3,52E+06	4,51E+06	5,74E+06
MIPS - kg	7,18E+09	5,06E+09	6,27E+09	7,74E+09
Production de déchets - kg	1,80E+09	1,61E+09	1,73E+09	1,85E+09
Consommation d'énergie primaire - MJ	8,92E+10	7,10E+10	8,16E+10	9,37E+10
Consommation d'énergie finale (usage) - MJ	1,96E+10	1,51E+10	1,77E+10	2,08E+10

Tableau 40 : Impacts environnementaux du numérique en Grand Est en 2020, tous tiers, analyse de sensibilité sur la proportion de datacenters « importés », approche consommation.

Si on prend comme référence le modèle de « production », voici les variations de l'impact global en fonction des différents scénarios de modèles de « consommation » :

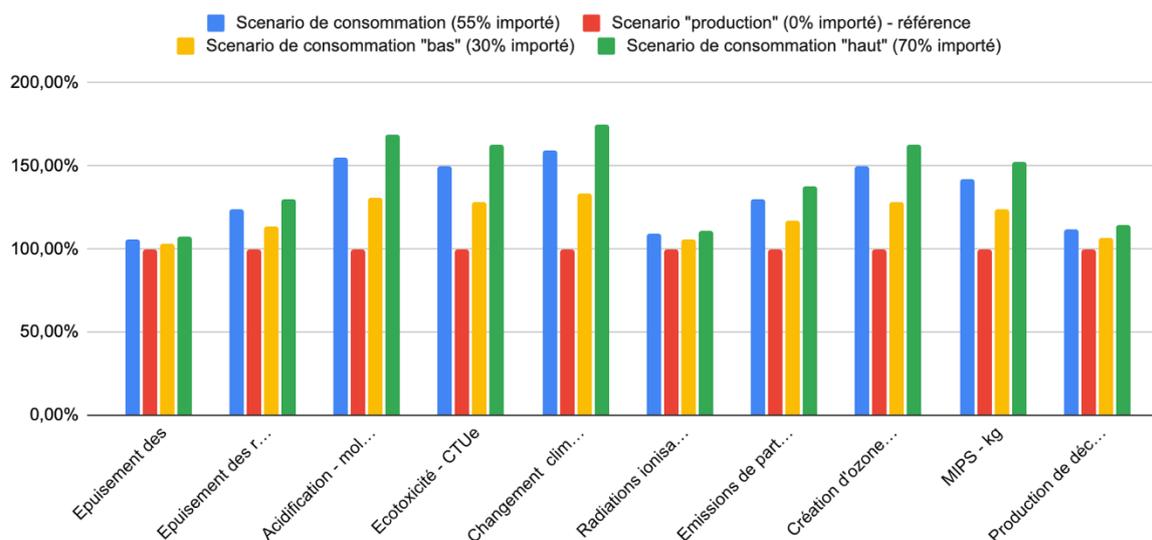


Figure 24 : Répartition des impacts environnementaux du numérique en Grand Est en 2020, tous tiers, analyse de sensibilité sur la proportion de datacenters « importés », approche consommation.



Enfin, il est intéressant de comparer la répartition par tiers entre le modèle de « production » et les différents modèles de « consommation ». En effet, la prise en compte des datacenters importés modifiant sensiblement les impacts du tiers 3, la répartition des impacts par tiers s'en voit également fortement impactée. Par exemple, sur l'indicateur de Potentiel de Changement Climatique et en fonction des scénarios, le poids du tiers 3 passe de 15,9% (modèle production) à 35,5% (scenarior bas) ou 50,7% (scenarior haut).

Indicateur changement climatique	Scenario « consommation » (55% importé)	Scénario « production » (0% importé)	Scénario de consommation « bas » (30% importé)	Scénario de consommation « haut » (70% importé)
Tiers 1	50,70%	80,57%	60,44%	46,16%
Tiers 2	3,43%	5,45%	4,09%	3,12%
Tiers 3	45,87%	13,98%	35,47%	50,71%

Tableau 41 : Impacts environnementaux du numérique en Grand Est en 2020, répartition des impacts par tiers en fonction des scénarios.

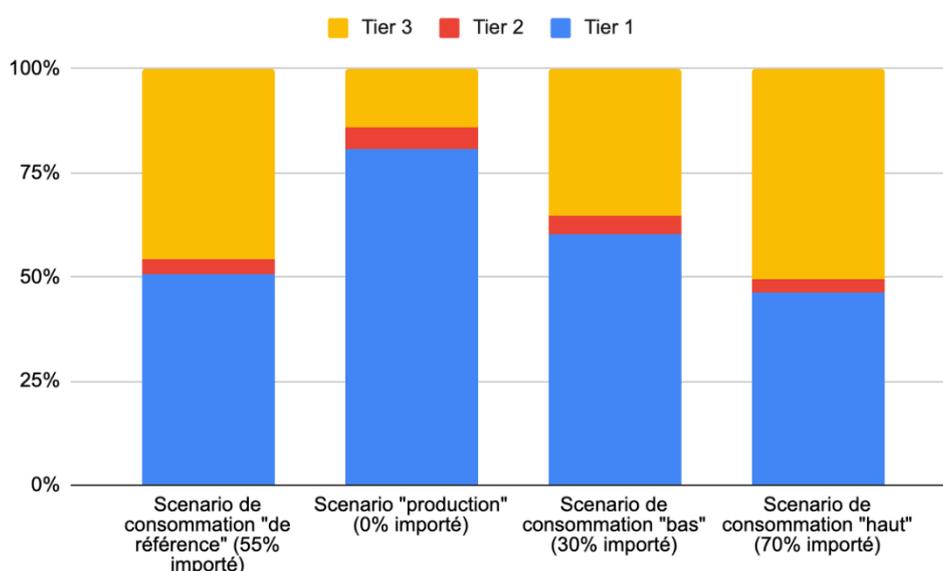


Figure 25 : Impacts environnementaux du numérique en Grand Est en 2020, répartition des impacts par tiers en fonction des scénarios.

### Messages clés :

La variation des résultats, tant en valeur absolue qu'en matière de répartition entre les tiers, étant très significative sur cette analyse de sensibilité, il apparaît important de progresser en maturité dans l'estimation des volumes de ressources numériques physiques (surface de datacenters) mobilisées au profit des usages d'un territoire mais situées en dehors de ce même territoire.

## 2.9. Recommandations

Dans le cadre de cette évaluation, nous recommandons les actions suivantes afin d'affiner la spécification régionale et d'améliorer la précision de l'étude :

- Mener un recensement précis des terminaux utilisateurs présents à l'échelle régionale ;
- Inciter l'ARCEP à construire des bases de données telecom régionalisées (équipements / usages), nouer des collaborations locales avec les opérateurs sur l'évaluation des impacts ;
- Approfondir la collecte de données primaires des datacenter entreprises et datacenters colocation (besoins en m<sup>2</sup> de salles machines et taux d'externalisation) ;
- Promouvoir une version territorialisée de la loi AGECE permettant une mise à disposition de données territoriale plus systématique ;
- Mener une analyse focalisée sur l'impact des écrans (publicitaires, informationnels...etc.), notamment ceux présents sur la voie publique, qui représente une part importante de l'impact quantifié ici ;

- Mener une étude sur les services applicatifs hébergés à l'étrangers et utilisés en France ou à l'échelle régionale, afin de pouvoir affiner la prise en compte des impacts importés ;
- Intégrer systématiquement des évaluations des impacts importés dans les études futures si pertinent (approche « consommation »).

## 2.10. Conclusions de l'état des lieux

Cette étude évalue l'impact environnemental du numérique de la région Grand Est en 2020. Elle prend en compte les terminaux utilisateurs et l'IoT, les réseaux de télécommunication IP, les datacenters.

Elle souligne l'existence de deux approches d'évaluation pour un territoire : l'approche « production » et l'approche « consommation ». Dans l'approche « production », on évalue les impacts environnementaux liés à la production de biens et services numériques sur un territoire donné, délimité par ses frontières géographiques. Dans l'approche « consommation », on évalue les impacts environnementaux de l'ensemble des usages numériques individuels, collectifs et industriels sur un territoire donné, délimité par ses frontières géographiques. Cette dernière approche implique des étapes du cycle de vie s'étant potentiellement produits en dehors de ses frontières (production, fin de vie, transport, opérations externes au territoire...).

Dans l'ensemble de l'étude, 12 critères environnementaux sont étudiés à travers une Analyse de Cycle de vie multi-étapes (construction, distribution, usage, fin de vie).

En début d'étude, un inventaire couvrant les 3 tiers a été réalisé. Un certain nombre de données régionales étant manquantes, des sources secondaires basées sur un périmètre français et européen sont utilisées et adaptées à la région Grand Est via des proxy population et emplois. Malgré ces hypothèses, les résultats obtenus fournissent des ordres de grandeur intéressants, qui appellent cependant à être affinés avec une collecte de données spécifiques à l'échelle régionale plus étendue.

Le tiers 3 (datacenter) fait l'objet d'une double évaluation avec les approches « production » et « consommation ». Pour cette dernière approche, plusieurs modèles sont considérés (« trafic France », « énergie Monde »). Ces 2 modèles convergent vers un taux de datacenters opérés hors France et utilisés en France supérieur à 50%. Le modèle « énergie Monde » est retenu comme modèle de référence.

Dans une approche « production », l'impact Changement climatique de la région Grand Est en 2020 s'établit à 1,39 MtCO<sub>2</sub>eq (soit l'équivalent de 3,14% des émissions territoriales de la région, et 250 kgCO<sub>2</sub>eq / habitant). Mais dans une approche « consommation », l'impact Changement climatique de la région Grand Est en 2020 s'établit à 2,21 MtCO<sub>2</sub>eq (soit l'équivalent de 4,98% des émissions territoriales de la région, et 397 kgCO<sub>2</sub>eq / habitant), soit une hausse de 59%. Sur l'ensemble des critères environnementaux, on observe des hausses allant de 6% à 59% entre l'approche « production » et l'approche « consommation ».

Dans l'ensemble des approches, les terminaux utilisateurs (et les écrans au premier rang) représentent le premier poste d'impact, et principalement leur phase de fabrication. Mais, en fonction de l'approche retenue, le poids des datacenters passe de 14% de l'impact global sur le critère « changement climatique » à 46%. Ceci est dû à la prise en compte des datacenters colocations situés à l'extérieur de la région et utilisés sur le territoire et, pour ceux-ci, à une part plus importante de la phase d'utilisation, lié à une électricité plus carbonée que la moyenne française. Dans toutes les approches, l'impact du réseau reste limité.

L'impact du numérique et des datacenters en région Grand Est (et en France) est plus important qu'envisagé initialement à travers une méthodologie du type de celle déployée dans le rapport ADEME - Arcep 2022 [1] (approche « production » pour les datacenters). La forte croissance des hyperscalers (IaaS) et des éditeurs SaaS (tous deux souvent américains), mise en évidence notamment par les rapports GXI d'Equinix [29], souligne la nécessité de systématiquement prendre en compte les impacts importés lors d'évaluations géolocalisées.



## **2.11. Limites de l'étude**

Dans le cadre de cette évaluation / analyse, nous avons été confrontés aux limites suivantes :

- Données primaires / bottom-up limitées : peu de données primaires ont été fournies par les acteurs du territoire. Il conviendrait ainsi de lancer dans le futur une collecte de données spécifique à ce sujet : inventaire des équipements, sondage pour analyser les services numériques consommés en région Grand Est... Seul l'inventaire des datacenters présents en région Grand Est, à la suite d'une étude du Grand E-Nov+ a été utilisé de manière spécifique ;
- Evaluation en approche « consommation » émergente : exclure les services numériques consommés en région Grand Est et hébergés en dehors du territoire aurait sous-estimé l'impact environnemental des datacenters. Même si l'approche est relativement récente, il conviendrait que cette approche puis être revue et complétée par d'autres parties prenantes pour en améliorer la robustesse.



## 3. Etude des effets indirects de la numérisation pour trois cas d'usage

---

### 3.1. Introduction et objectifs de l'étude

La modélisation des effets environnementaux nets, c'est-à-dire la somme des effets négatifs et positifs, est relativement jeune et leur usage au niveau territorial l'est encore plus. Alors, pourquoi porter ces outils à l'échelle de la région Grand Est ? Premièrement, ce type d'analyse a pour but de faire comprendre les effets environnementaux liés au déploiement de services numériques à l'échelle régionale. À ce titre, l'analyse reste au plus proche du territoire en s'appuyant sur des données propres à ce dernier et en requérant le moins possible à des moyennes nationales ou des données non contextuelles. Deuxièmement, il s'agit d'évaluer si ces déploiements sont compatibles avec les objectifs de transition fixés par le SRADDET de la région Grand Est. Cela permet donc d'évaluer la compatibilité entre les trajectoires soutenables de la région et le service numérique donné.

De part ces objectifs, il est nécessaire d'être agnostique vis-à-vis des effets environnementaux de la numérisation, c'est-à-dire, de ne pas partir du principe que la transition numérique va par défaut dans le sens de la transition écologique. Il s'agit plutôt d'identifier dans quelles conditions des services et des infrastructures numériques peuvent soutenir des politiques de transition écologique et dans quelles conditions elles les ralentissent, voire les empêchent.

Ces deux pans de l'analyse visent à accompagner les politiques publiques territoriales afin de prendre de meilleures décisions pour les enjeux régionaux de transition écologique et de numérisation.

**Note : la littérature mobilisée au sein de cette partie est présentée directement dans les sections dédiées et n'est pas reprise en bibliographie globale qui se focalise sur l'état des lieux et la prospective.**

### 3.2. Méthodologie générale

#### 3.2.1. Analyse de l'existant

Il n'existe aujourd'hui que très peu de documents normatifs ou de publications scientifiques pour encadrer méthodologiquement l'estimation des effets environnementaux nets d'un service numérique.

Au niveau institutionnel, seulement deux documents méthodologiques sont en préparation :

- ITU-T L.1480 « Enabling the Net Zero transition: Assessing how the use of ICT solutions impacts GHG emissions of other sectors », validée en décembre 2022 ;
- EGDC Generic Methodology for the European Commission (livraison fin 2023).

Ces deux documents s'appuient généralement sur les publications scientifiques suivantes (liste non-exhaustive, du plus récent au plus ancien) :

- Permill Bergmark et al. « A Methodology for Assessing the Environmental Effects Induced by ICT Services - Part II: Multiples Services and Companies », ICT4S 2020,
- Vlad Coroamă et al. "A Methodology for Assessing the Environmental Effects Induced by ICT Services - Part I: Single Services", ICT4S 2020,
- Jan Bieser and Lorenz M. Hilty, « Assessing Indirect Environmental Effects of Information and Communication Technology (ICT): A Systematic Literature Review », Sustainability, 2018,
- Jens Malmodin and Vlad C. Coroamă, « Assessing ICT's enabling effect through case study extrapolation – the example of smart metering », The proceedings of 2016 Electronics Goes Green 2016+ (EGG 2016),
- Miriam Börjesson Rivera et al. « Including second order effects in environmental assessments of ICT », Environmental Modelling & Software, 2014,
- Eric Williams, « Environmental effects of information and communications technologies ». Nature, 2011,
- Lorenz Erdmann and Lorenz M. Hilty, « Scenario Analysis: Exploring the Macroeconomic Impacts of Information and Communication Technologies on Greenhouse Gas Emissions », Journal of Industrial Ecology, 2010.



De nombreuses estimations globales ont été publiées par des organismes de représentation professionnelle ou des consortiums d'entreprises pour estimer les émissions évitées, tels « SMARTer 2030 » de la Global e-Sustainability Initiative (GeSI) et « The Enablement Effect » de la Global System for Mobile Communications (GSMA), mais la faiblesse méthodologique et la différence de périmètre de telles études les écartent de l'analyse.

### 3.2.2. Méthodologie choisie

La méthodologie suivie pour cette étude est celle du EGDC, basée sur l'ITU-T L.1480 et les travaux de Coroama et al. et Bergmark et al. Dans ce cadre, les effets environnementaux nets désignent l'addition des effets environnementaux positifs et négatifs d'une même solution numérique entre un scénario sans cette solution ou un scénario où cette dernière est implantée. Le bilan peut être positif si l'empreinte environnementale du système où la solution numérique est implantée, est inférieur à l'empreinte du système sans cette solution.

Il est donc nécessaire de caractériser différents aspects de l'étude. Le premier est le cadre d'évaluation dont lesquels sont définis :

- l'objectif de l'évaluation, déjà défini précédemment au début du rapport ;
- les frontières du périmètre étudié ;
- le scénario d'usage du service numérique étudié, appelé aussi « unité fonctionnelle » ;
- la méthode d'attribution des impacts.

Ensuite, les effets doivent être identifiés, pour cela on caractérise :

- le scénario de base, appelé *baseline* ;
- les effets du service numérique.

Une fois ce socle établi, la modélisation des différents scénarios peut être établie, en définissant :

- les effets qui ont un impact significatif et les données disponibles, appelé *materiality assessment* ;
- la collecte de données ;
- les méthodes de calcul.

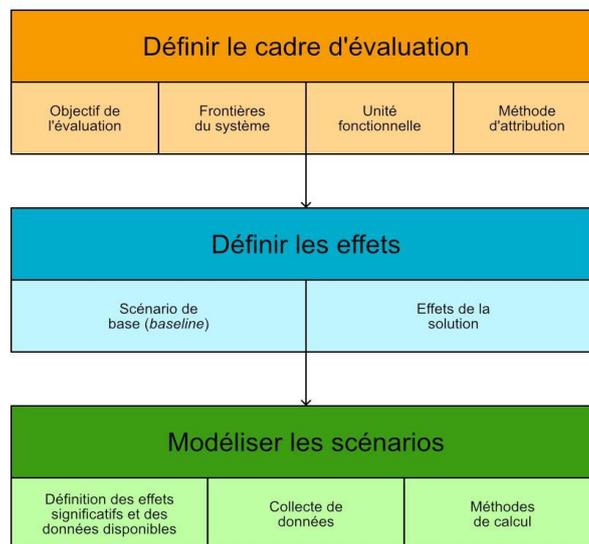


Figure 26 : Rappel du cadre méthodologique (type EGDC)



### 3.2.3. Choix des indicateurs environnementaux

D'après la réglementation européenne "Product Environmental Footprint", 16 catégories d'impacts environnementaux structurent l'analyse de cycle de vie d'un produit et d'un service :

- le changement climatique ;
- les particules fines ;
- l'épuisement des ressources en eau ;
- l'épuisement des ressources énergétiques non renouvelables ;
- l'usage des terres ;
- l'épuisement des ressources minérales non renouvelables ;
- l'appauvrissement de la couche d'ozone ;
- l'acidification ;
- la radiation ionisante ;
- la formation photochimique d'ozone ;
- l'eutrophisation terrestre ;
- l'eutrophisation marine ;
- l'eutrophisation en eau douce ;
- la toxicité humaine cancérigène ;
- l'écotoxicité de l'eau douce ;
- la toxicité humaine non cancérigène.

Cependant, il n'existe presque pas d'analyse multicritères dans la littérature scientifique et les rapports sur les effets environnementaux indirects. La vaste majorité de la littérature tend à calculer des évitements exprimés en émissions de GES évitées. En fonction des services étudiés d'autres types d'évitement peuvent être utilisés : consommation d'énergie évitée (essence, électricité, etc.), eutrophisation évitée (pesticides). Ainsi, si l'empreinte environnementale d'un service numérique peut être exprimée via une analyse multicritère en s'appuyant sur des inventaires de cycle de vie, les effets indirects ne peuvent rester que monocritères, exprimés en émissions de GES évitées ou en flux évité (consommation énergétique et/ou électrique).

### 3.2.4. Classification des effets environnementaux indirects de la numérisation

On distingue généralement **deux types d'effet, les effets directs**, c'est-à-dire, l'empreinte environnementale liée à l'extraction de ressources, la fabrication, le transport, l'usage et la fin de vie d'un service numérique et des équipements qui y sont liés ; **et les effets indirects**, c'est-à-dire, les effets que produit l'usage d'un service numérique. Les effets directs correspondent donc à l'empreinte environnementale, souvent modélisés via une analyse de cycle de vie, et les effets indirects désignent une grande variété d'effets qui peuvent être positifs et/ou négatifs d'un point de vue environnemental.

Dans la littérature scientifique ou normative sur le sujet, les effets indirects sont généralement définis comme : « les impacts et les opportunités créés par l'utilisation et l'application des TIC. Il s'agit notamment des effets de réduction de la charge environnementale, qui peuvent être réels ou potentiels », ou encore comme « [...] les conséquences environnementales de la capacité d'une solution TIC à modifier les modes de consommation et de production existants, en tenant compte des incidences socio-économiques, culturelles et sanitaires interdépendantes, tant positives que négatives » (Bieser et Hilty 2018).

Il faut noter que la terminologie et le vocabulaire désignant les effets indirects varient d'une publication à l'autre et n'est pas encore tout à fait fixé dans la communauté scientifique. Les effets directs sont parfois nommés effets de premier ordre et les effets indirects peuvent être appelés effets de deuxième et de troisième ordre. Le tableau ci-dessous résume les différentes terminologies et leur explication.

	Effet	Exemple (d'après Horner)	Méthodes
Direct / de première ordre	Empreinte « embarquée »	Énergie, matériaux, pollutions et ressources pour produire un système GPS	Analyse de cycle de vie
	Empreinte opérationnelle	Énergie, matériaux, pollutions et ressources pour faire fonctionner un système GPS	
	Empreinte de fin de vie	Énergie, matériaux, pollutions et ressources nécessaires à l'élimination d'un système GPS en fin de vie	
Cas frontière	Induction	Équipement induit par l'utilisation du système GPS (satellites, etc.) - peut également être considéré comme un effet direct ou un effet de rebond.	Analyse de cycle de vie
Indirect / de second ordre	Efficacité / optimisation	Une circulation plus efficace grâce à un routage amélioré par GPS.	<i>Enablement / Avoided Emissions Framework</i>
	Rebond direct	Davantage de déplacements en raison de la diminution des embouteillages.	Effet rebond
Indirect / de plus grand ordre (higher order)	Rebond indirect	Empreinte consommée pendant le temps gagné par des déplacements efficaces	
	Rebond macroéconomique	Le GPS permet les véhicules autonomes et entraîne la croissance de la fabrication de systèmes de transport intelligents.	
	Transformation systémique	Les véhicules autonomes modifient les habitudes de vie et de travail des personnes.	ND

Sources : adapté de Horner (2016) Known unknowns : indirect energy effects of information and communication technology ; Bieser & Hilty (2018) Assessing Indirect Environmental Effects of Information and Communication Technology (ICT) : A Systematic Literature Review; Coroama et al. (2020) A Methodology for Assessing the Environmental Effects Induced by ICT Services – Part I : Single Services

Tableau 42 : Synthèse des différents types d'effets environnementaux de la numérisation

### 3.2.5. Effets environnementaux nets

L'estimation des effets environnementaux revient à modéliser ensemble les effets positifs et négatifs d'une solution numérique dans le périmètre étudié. Cette estimation permet de mieux de répertorier et de comprendre les facteurs qui influencent sur les effets environnementaux possibles de cette solution dans un territoire donné et permet de de facto une vue plus complète de ce que fait cette solution et, si c'est possible, de ce qui est nécessaire pour qu'elle aille dans le sens des objectifs de transition, aujourd'hui et dans un avenir proche.

### 3.2.6. Modèle paramétrique

Un modèle paramétrique permet de tester les configurations de paramètres de son choix et d'en visualiser les résultats. Cette approche permet de mettre l'accent sur les leviers plutôt que de se focaliser sur un résultat chiffré. Les approches plus traditionnelles considèrent une solution numérique comme ayant un effet homogène quel que soit le terrain d'application et se focalisent plutôt sur le taux d'adoption pour extrapoler des effets bénéfiques homogènes à plus grande échelle. Le modèle paramétrique permet ici déjà de définir un territoire, ses critères socio-économiques, ses infrastructures, ses politiques de transition puis en dernier de placer la solution numérique en milieu de cet existant. Dans un modèle paramétrique, les variables significatives sont clairement exposées afin d'être modifiées en fonction du scénario prospectif exploré.

Ce choix méthodologique est plus approprié au vu de la qualité variable des données mobilisées sur des services peu étudiés ou mal documentés dans le contexte de l'étude, mais aussi au vu des hypothèses qui peuvent être prises dans le modèle. Le modèle paramétrique fait le gage de la transparence et l'exposé du processus plutôt que de clore le débat avec un résultat incluant une grande incertitude.

## 3.3. Choix des services numériques à évaluer

Le choix de services numériques à évaluer dépend généralement de trois critères :

- la pertinence du service dans le territoire étudié,
- la capacité du service à se déployer à grande échelle,
- le maintien du service dans le temps.

Le premier critère permet d'évaluer des solutions qui ont de l'intérêt à l'échelle territoriale. Cette pertinence est évaluée via l'analyse des indicateurs économiques, les politiques publiques en place et via des discussions avec des acteurs régionaux, ici

l'ADEME Grand Est. Par exemple, il n'y a pas besoin d'évaluer des solutions numériques pour le secteur agricole là où ce secteur est très peu développé, comme des zones massivement urbanisées ; ou d'évaluer des solutions de VTC dans des zones rurales qui ne correspondent pas au modèle économique de ce type de service.

Le deuxième critère permet de s'assurer que l'évaluation a des effets environnementaux potentiels suffisamment importants pour être étudiés. De même, les gains d'efficacité permis par des économies d'échelle ou les effets rebond dû à des changements de comportement sont bien plus visibles, et donc modélisables, à plus grande échelle. Ce critère est évalué par l'analyse des infrastructures numériques installées (réseaux, couverture, etc.), le taux de pénétration des équipements numériques (ordinateurs, smartphones) et l'importance du public potentiel du service.

Finalement, le troisième critère permet d'évacuer de l'analyse tous les services qui correspondent à des acteurs essayant de créer un marché sans garantie de succès, ou les services qui correspondent à des effets de mode qui ne sont pas voués à durer. Ce critère est évalué par la maturité des solutions proposées, l'existence d'usages concrets et pérennes et d'une analyse de marché de surface.



### 3.4. Enseignement à distance

#### 3.4.1. Choix du cas d'étude

Dans le cadre de l'analyse environnementale de la numérisation en région Grand Est, l'enseignement à distance a été choisi car les acteurs régionaux expérimentent de nombreux programmes numériques dans son orientation : lycées 4.0, collèges numériques, visioprofesseurs (critère de pertinence territoriale). De même, le déploiement de politiques d'enseignement à distance peut s'exercer à grande échelle, des collèges jusqu'aux universités, et mérite donc une attention particulière (critère d'échelle). Finalement, on peut supposer que, du fait de la numérisation croissante, les dispositifs numériques d'enseignement à distance s'inscrivent dans le temps, notamment quand ils sont le fruit de politiques publiques (critère de temps). Toutefois, le maintien de tels dispositifs dépend de nombreux critères externes (sociaux, éducatifs, politiques, etc.) difficilement prévisibles. Malgré cette dernière faiblesse, il reste pertinent de mieux comprendre les effets environnementaux de l'enseignement à distance en région Grand Est.

**Note : la littérature mobilisée au sein de cette partie est présentée directement dans les sections dédiées et n'est pas reprise en bibliographie globale de l'étude.**

#### 3.4.2. Revue de littérature

La revue de littérature s'est axée sur la combinaison des termes suivants : « online education », « elearning », « remote learning », « sustainability », « life cycle assessment », « carbon emissions ». Toutes les publications datant de plus de 5 ans n'ont pas été sélectionnées afin d'avoir des systèmes d'éducation en ligne suffisamment proches de la situation actuelle en 2022. De même, les études sur des pays comparables à la France en termes de système éducatif et d'enseignement supérieur ont été préférées.

Année	Titre de la publication	Auteur(s)
2022	A Call for a Systematic Analysis of the Environmental Impact of Education Technologies	Yann Berquin
2021	Carbon footprint in Higher Education Institutions : a literature review and prospects for future research	Karen Valls-Val, María D. Bovea
2021	Exploring sustainable student travel behaviour in The Netherlands: balancing online and on-campus learning	Marieke Versteijlen, Bert van Wee, Arjen Wals
2021	Open-Source Carbon Footprint Estimator: Development and University Declination	Clément Auger, Benoit Hilloulin, Benjamin Boisserie, Maël Thomas, Quentin Guignard, Emmanuel Rozière
2020	Assessing the carbon footprint of a university campus using a life cycle assessment approach	Raeanne Clabeaux, Michael Carbajales-Dale, David Ladner, Terry Walker
2020	The carbon footprint of a UK University during the COVID-19 lockdown	Viachaslau Filimonau, Dave Archer, Laura Bellamy, Neil Smith, Richard Wintrip
2018	Sustainability requirements for eLearning systems: a systematic literature review and analysis	Ahmed D. Alharthi, Maria Spichkova, Margaret Hamilton
2017	Pros and cons of online education as a measure to reduce carbon emissions in higher education in the Netherlands	Marieke Versteijlen, Francisca Perez Salgado, Marleen Janssen Groesbeek, Anda Counotte

Tableau 43 : Synthèse de la revue de littérature pour l'enseignement à distance

#### 3.4.3. Cadre d'évaluation

##### 3.4.3.1. Objectifs de l'évaluation

Cette évaluation vise à définir les effets environnementaux nets liés à l'enseignement à distance en région Grand Est aujourd'hui et dans un futur proche. Cette analyse permet de mieux comprendre les facteurs d'impact de l'enseignement à distance dans un territoire donné. Il s'agit aussi de comprendre comment les caractéristiques de ce même territoire



(transport, population, enseignement, politiques de transition écologique, etc.) influent sur les effets environnementaux de ce service numérique.

### 3.4.3.2. Définition du périmètre

Ce premier cas explore les effets environnementaux liés au passage d'un enseignement présentiel à un enseignement à distance dans les collèges, lycées et universités en région Grand Est, entre 2020 et 2030.

Caractéristiques du périmètre	Définition
Zone géographique	Région Grand Est
Intervalle de temps	2020 - 2030
Service	Enseignement à distance
Public cible	Collégiens, lycéens, étudiants, personnels enseignants et non-enseignants
Unité fonctionnelle	Un jour d'enseignement à distance par personne
Impacts environnementaux ciblés	Potentiel de réchauffement climatique (exprimé en kg CO <sub>2</sub> eq)

Tableau 44 : Définition du périmètre de l'enseignement à distance

## COUPURES

### Type d'établissement

Cette étude ne prend pas en compte l'ensemble des types d'établissements scolaires. Par exemple, sont exclus les écoles et les internats intégrés aux collèges et lycées, les apprentis, et les établissements de recherche (laboratoires, etc.). Cette coupure s'explique car l'enseignement à distance est généralement peu privilégié en écoles primaires. De même, nous ne disposons pas d'assez de données sur les internats pour intégrer cette variable au modèle. Toutefois, le nombre de places d'internes en région Grand Est, semble restreint par rapport au nombre total de collégiens et lycéens dans la région. Nous considérons que les établissements de recherche ne font pas partie du cadre de l'enseignement à distance, toutefois une partie des personnels de recherche (doctorants, etc.) peut-être inclus *de facto* dans les personnels enseignants.

### Type de public

En 2020, les apprentis sont au nombre de 44 000 en région Grand Est et ont des trajets et des rythmes de déplacement sensiblement différents. À défaut de données, nous considérons les apprentis comme des collégiens et lycéens ordinaires (du point de vue des déplacements). La même logique s'applique aux internes. Nous ne prenons pas en compte les déplacements et équipements des personnels dédiés à la recherche car leur activité principale n'est pas l'enseignement à temps plein, faute de données disponibles.

### Type d'enseignement étudié

Allen et Seaman distinguent quatre types de dispositif d'enseignement en fonction de la proportion de contenu fournie en ligne : face-à-face (0%), facilité en ligne (1 à 29%), hybride (30 à 79%) et en ligne (+ de 80% du contenu délivré en ligne). Nous nous intéressons seulement à l'enseignement entièrement en ligne car c'est celui qui inclut la plus grande substitution de trajets, le cas central de cette étude.

### Services connexes

Nous n'intégrons pas les effets environnementaux liés à l'usage de plateformes d'enseignement en ligne (Moodle, etc.) car cela requiert des analyses de cycle de vie dédiés à ces services numériques, ce qui n'est pas possible avec les données fournies et le temps consacré à cette étude. Les manuels pédagogiques numériques ne sont pas inclus car ils sont déployés, que l'usage de l'enseignement à distance se développe ou non.



## SYNTHESE DU PERIMETRE

Caractéristiques du périmètre	Inclus	Non-inclus
Établissements	Collèges, lycées, universités	Écoles primaires, internats, recherche (laboratoires, etc.)
Type de public	Élèves, étudiants, personnel enseignant, personnel non-enseignant	Internes, apprentis, doctorants, chercheurs
Type d'enseignement étudié	Enseignement à distance full remote	Hybride, facilité en ligne, face-à-face
Services connexes		Plateformes d'enseignement en ligne, manuels pédagogiques numérique

Tableau 45 : Synthèse du périmètre de l'enseignement à distance

## DEFINITION DE L'UNITE FONCTIONNELLE

Dans ce cadre, l'étude de cas se focalise sur l'impact d'un jour d'enseignement à distance pour les collégiens, les lycéens, les étudiants, le personnel enseignant et non-enseignant, et, par extension, les établissements scolaires et supérieurs. Ce choix est cohérent avec le type d'enseignement à distance étudié, dit *full remote*, qui suggère une mise à distance complète des élèves et des enseignants. À partir de cette unité fonctionnelle, il est possible d'estimer les effets sur des plus longues périodes ou de plus larges échantillons : 1 jour d'enseignement à distance pour 10 000 étudiants, 20 jours d'enseignement à distance en 1 an pour 50 000 étudiants, etc.

## METHODE D'ATTRIBUTION

À partir de l'unité fonctionnelle, les impacts sont distribués de façon homogène entre chaque profil étudié. La distribution des effets environnementaux positifs et négatifs s'applique au niveau territorial, il n'y a donc pas d'attribution des effets à un acteur précis.

### 3.4.4. Identification des effets

#### 3.4.4.1. Définition du scénario de base

Le scénario de base est défini en 2020 dans la région Grand Est en prenant en compte le nombre de collégiens, lycéens et étudiants indiqués par les académies et universités la même année.

Il est considéré que le scénario de base inclut déjà des équipements numériques car les établissements sont déjà équipés en ordinateurs, tablettes et autres, avec des taux d'équipements à partir de l'académie de Strasbourg. Les politiques d'équipement en ordinateurs portables des lycéens sont aussi prises en compte pour définir les taux d'équipement. Il est aussi considéré que l'ensemble des enseignements dans tous les établissements concernés sont en présentiel.

#### 3.4.4.2. Définition des effets

Les effets environnementaux de l'enseignement à distance ont été abondamment étudiés dans la littérature carbone sous forme de bilans carbone d'établissement universitaires (Clabeaux et al., Filimonau et al., Versteijlen et al., Auger et al.). Karens Valls-Val et Maria Bovea proposent une revue de littérature sur l'empreinte carbone des établissements d'enseignement supérieur à l'échelle internationale. Il existe très peu d'études similaires au niveau des collèges et lycées, nous nous appuyons donc sur la littérature dédiée aux établissements supérieurs pour attribuer les effets environnementaux liés à l'enseignement à distance dans le tableau ci-dessous.

Périmètre	Type d'effet	Effet appliqué à l'enseignement à distance
Effets directs	Fabrication	Equipements numériques dédiés / alloués à l'enseignement à distance
	Usage	Equipements numériques dédiés / alloués à l'enseignement à distance
	Fin de vie	Non étudié
Effets indirects	Efficacité	Amélioration de l'efficacité énergétique des équipements numériques
	Substitution	Remplacement des trajets domicile - lieu d'enseignement par un temps de travail à domicile, possible diminution de la consommation énergétique des établissements (chauffage, etc.), remplacement des déjeuners dans les établissements par des déjeuners à domicile
	Induction	Achat de nouveaux équipements numériques pour permettre aux étudiants et aux personnels enseignants d'utiliser des plateformes d'enseignement en ligne, usage de plateformes d'enseignement en ligne
	Effets rebond directs	Augmentation du chauffage et de la consommation énergétique à domicile

Tableau 46 : Définition des effets de l'enseignement à distance

L'enseignement à distance modifie la façon dont l'enseignement est dispensé et les comportements qui y sont liés. La littérature scientifique sur le sujet montre une part prépondérante de trajets des élèves vers leurs lieux d'enseignement dans le bilan carbone des établissements, ainsi que le transfert de consommation d'énergie des foyers (lié au chauffage et à la consommation d'appareils électriques et électroniques). D'autres effets sont présents sur la modification des repas, ou encore sur les nouvelles activités annexes disponibles grâce au gain de temps. Dans la lignée des travaux de Versteijlen et al. nous nous concentrons principalement sur les trajets des élèves, étudiants et personnels enseignant et non-enseignant. La consommation d'équipements numériques est aussi intégrée à partir des données disponibles dans la région académique du Grand-Est et d'hypothèses concordantes. Les effets sur le chauffage et la consommation électrique des établissements et des foyers ne sont pas intégrés car nous n'avons pas pu obtenir de données sur les collèges, lycées et universités malgré nos demandes. Les effets rebond indirects (rebond de temps et effet de revenu) ne sont pas intégrés du fait de la complexité de la modélisation par rapport au temps imparti pour l'étude.

### 3.4.5. Modélisation

#### 3.4.5.1. Définition des effets significatifs et des données disponibles

La revue de littérature montre clairement les principaux points d'impact sur lesquels l'enseignement à distance à un effet sont :

- la diminution des trajets domicile - lieu d'enseignement ;
- le report de chauffage et de consommation électrique entre lieu d'enseignement et domicile ;
- l'augmentation du taux d'équipements numériques ;
- la gestion des repas.

Nous n'avons pas pu obtenir les données de consommation d'énergie de chauffage des établissements scolaires et d'enseignement supérieur en région Grand Est malgré notre demande auprès des personnes compétentes. L'évolution de la gestion des repas s'appuie sur des comportements individuels sur lesquels aucune donnée n'existe à l'heure actuelle, et n'a donc pas été traitée dans le contexte de cette étude. À défaut de données suffisantes sur les effets significatifs, cette étude se concentre donc sur les transports et les équipements numériques.

	Inclus	Non-inclus
Effets étudiés	Déplacements domicile - lieu d'enseignement, taux d'équipements numériques des établissements et des étudiants / personnel enseignant.	Chauffage, consommation d'énergie, immobilisations, repas, rebond de temps et effet de revenu

Tableau 47 : Périmètre des effets étudiés



### 3.4.5.2. Collecte des données

Catégorie de données	Sous-catégorie	Institutions à l'origine des données
<b>Transports et déplacements</b>	Mobilités quotidiennes	SRADEET (Région Grand-Est)
	Distance parcourue en moyenne par mode de transport	Ministère de la transition écologique
	Parts modales des transports	Ministère de la transition écologique, Observatoire de la vie étudiante
	Intensité carbone des modes de déplacements	<a href="https://monimpacttransport.fr/">https://monimpacttransport.fr/</a>
<b>Enseignements</b>	Distances moyennes domicile – lieu d'enseignement	SRADEET (Région Grand-Est)
	Nombre d'étudiants et personnels	Académie de Reims
	Taux d'équipements électroniques personnels	DEPP (ministère de l'Éducation nationale)
	Taux d'équipements électroniques des établissements	DEPP (ministère de l'Éducation nationale), Académie de Strasbourg
	Intensité carbone des équipements électroniques	ADEME, ARCEP
<b>Prospectives 2030</b>	Évolution des populations	INSEE
	Évolution des parts modales de transports	Région Grand-Est, Agence d'urbanisme de la région mulhousienne
	Évolution des taux d'équipements électroniques des établissements	DEPP (ministère de l'Éducation nationale), Académie de Strasbourg
	Évolution des taux d'équipements électroniques personnels	ARCEP, Baromètre du numérique
	Évolution des gains d'efficacité	Conseil général de l'économie (ministère de l'Économie et des finances)

Tableau 48 : Synthèse des données collectées et des sources associées.

Quelques ajustements ont été effectués pour lier les données entre elles. Les chiffres des personnels étant d'ordre national, leur nombre dans la région Grand-Est a été extrapolé à partir du pourcentage d'étudiants présents dans la région, par rapport au nombre national d'élèves.

Les facteurs d'émissions GES des transports du scénario de base sont obtenus à partir de la base *monimpacttransport.fr*. Contrairement à cette base, nos sources consacrées aux parts modales des transports utilisaient une catégorie générale « Transports en commun ». Dans la preuve de concept fournie, nous avons choisi de construire un facteur d'émissions GES « Transports en commun » à partir de la moyenne des émissions des différents types de transports en commun.

### 3.4.5.3. Hypothèses

Nous considérons une distance moyenne quotidienne parcourue entre le domicile et le lieu d'enseignement de 10,4 km pour les élèves et étudiants, et de 15,4 km pour les personnels et enseignants. Ces données sont issues de l'enquête mobilité des personnes de 2019, l'annexe 2 du schéma régional d'aménagement, de développement durable et d'égalité des territoires de la région Grand-Est, et de l'observatoire des mobilités de l'ADEUS.

Les facteurs de variation pris en compte dans le modèle sont les suivants :

- Part modale des transports ;
- Nombre d'élèves, d'étudiants et de personnels ;
- Taux d'équipement informatique des établissements ;
- Taux d'équipement informatique personnel.

Ces hypothèses sont valables pour l'ensemble des scénarios considérés. La part d'allocation des trajets en voiture des parents liés à un collégien ou lycéen est fixée à 10%. Une première formule faisait le rapport entre la distance moyenne domicile – travail / domicile – lieu d'enseignement et nous donnait une part d'allocation supérieure à 20%, part que nous estimons trop importante.



Le nombre de jours d'enseignement est approximé par défaut à 180 jours pour l'ensemble des niveaux et personnels.

Les facteurs d'émissions des équipements informatiques proviennent de la base ADEME GES. La taille des écrans étant responsable d'une part importante des consommations énergétiques du matériel, nous formulons l'hypothèse que le smartphone moyen fait plus de 5,5 pouces. Faute d'informations plus précises sur leur bilan carbone, nous considérons les tableaux intelligents comme des écrans de 80 pouces.

Les données trouvées sur les équipements informatiques des établissements incluent dans leur typologie une distinction « terminaux fixes », « terminaux mobiles », en fonction de si l'objet restait ou non dans une salle spécifique de l'établissement. Faute d'indications plus précises, nous formulons les hypothèses suivantes : la catégorie « terminaux fixes » est composée à 80% d'ordinateurs fixes et 20% d'ordinateurs portables ; la catégorie terminaux mobiles est composée à 50% d'ordinateurs portables et 50% de tablettes. De plus, en distanciel, nous estimons que le matériel des établissements est mis en veille. Cette hypothèse permet de prendre en compte l'utilisation à distance de ces équipements, par exemple pour permettre aux personnes à distance d'accéder aux licences logicielles possédées par les établissements.

#### 3.4.5.4. Modèle paramétrique

##### *Structure du modèle*

Le modèle se présente sous la forme de différentes feuilles de tableurs au rôle distinct : des feuilles de données contenant les données primaires et secondaires récoltées, ainsi que leurs sources associées ; une feuille de calculateur permettant d'obtenir les valeurs par unité fonctionnelle du modèle ; une feuille de résultats contenant les paramètres modifiables, les résultats et visualisations associées. Une dernière feuille contient les valeurs utilisées par défaut.

Les paramètres structurants exposés pour être modifiés pour chaque profil sont :

- La distance moyenne parcourue par jour ;
- L'allocation d'impacts des équipements personnels au temps de travail ;
- Le taux de personnes à distance ;
- Le pourcentage de jours de téléenseignement ;
- Le taux d'électrification des transports.

Ces derniers ont été retenus car nous les considérons pertinents pour caractériser le passage de l'enseignement en présentiel à l'enseignement à distance.

La distance moyenne parcourue par jour fournit une estimation de l'éloignement moyen entre les personnes et l'établissement d'enseignement. Elle est directement liée aux émissions GES des modes de transports utilisés pour réaliser les trajets domicile – établissement d'enseignement.

L'allocation d'impacts des équipements personnels au temps de travail caractérise le temps passé par les personnes à travailler sur leurs machines personnelles dans le cadre d'un temps d'enseignement à distance.

Le taux de personnes à distance et le pourcentage de jours d'enseignement à distance représentent la part effective d'enseignement à distance déployée au niveau régional. Ils en quantifient les résultats nets.

Le taux d'électrification des transports, utilisé dans le scénario 2030 Optim, caractérise la part de remplacement de véhicules thermiques par des véhicules électriques (voitures et transports en commun).

Pour utiliser le modèle paramétrique, l'utilisateur choisit la valeur de ces paramètres pour chaque scénario et chaque profil. Il observe ensuite l'effet de ses choix sur les émissions évitées par personnes et par jour en enseignement à distance mais aussi à l'échelle de la région sur 180 jours d'enseignements.

#### 3.4.6. Résultats

Cette partie présente des analyses de sensibilité significatives permises par notre modèle. Pour chacune d'entre elles seront exposés les paramètres utilisés, les résultats obtenus pour les différents scénarios et les représentations graphiques associées.

### 3.4.6.1. Configuration des paramètres par défaut

La première analyse utilise les paramètres par défauts du modèle.

## SCENARIO 2020

	Collégien	Lycéen	Etudiant	Personnel
<b>Mode présentiel</b>				
Distance moyenne parcourue par jour (km)	10,4	10,4	10,4	15,4
Taux d'allocation des équipements personnels au temps de travail (%)	10%	10%	50%	50%
<b>Mode distanciel</b>				
Taux d'allocation des équipements personnels au temps de travail (%)	40%	40%	80%	80%
<b>Extrapolation régionale et temporelle</b>				
Taux de personnes à distance (%)	50%	50%	50%	50%
Pourcentage de jours à distance (%)	50%	50%	50%	50%

Tableau 49 : Scénario 2020 avec paramètres par défaut

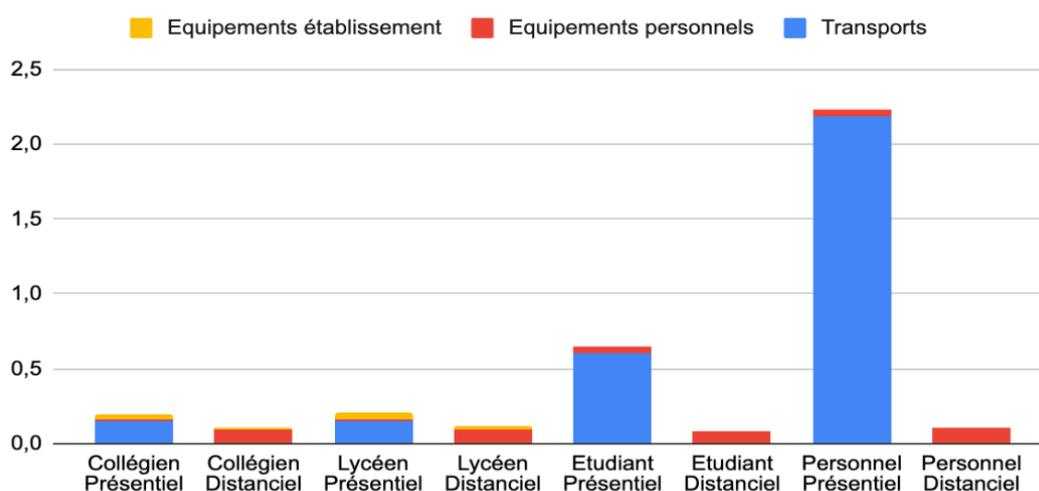


Figure 27 : Émissions de GES par secteur, en fonction du profil et du mode d'enseignement pour le scénario 2020 avec paramètres par défaut, en kg CO<sub>2</sub> eq/personne/jour.

La figure 27 représente les émissions de GES par secteur, en fonction du profil et du mode d'enseignement pour le scénario 2020, avec les paramètres par défaut. Elles sont exprimées selon l'unité fonctionnelle, c'est-à-dire **pour une personne, pour un jour d'enseignement**.

On remarque que la combinaison mode – profil la plus émettrice est celle du **personnel en présentiel avec 2,237 kg CO<sub>2</sub> eq par personne et par jour**. Ces émissions sont principalement dues aux modes de transports utilisés. En effet, d'après l'étude de l'INSEE N° 1835 parue en 2021, la voiture reste majoritaire pour les déplacements domicile-travail, dans plus de 70% des cas, hors aire d'attraction de Paris. Cette importance des émissions liées à la voiture se confirme avec la seconde combinaison la plus émettrice : les **étudiants en présentiel**. Avec une utilisation de la voiture de 22% d'après l'enquête nationale conditions de vie des étudiants et étudiantes 2016, publiée en 2019, les émissions GES de ce profil, en 2020, dans la configuration par défaut, sont de **0,648 kg CO<sub>2</sub>-eq par personne et par jour**.

Les collégiens et lycéens génèrent respectivement **0,197 kg CO<sub>2</sub> eq et 0,214 kg CO<sub>2</sub> eq par personne et par jour** en présentiel. Le pôle le plus important d'émissions pour ces deux profils est celui des transports, avec **0,148 kg CO<sub>2</sub>-eq émis par personne par jour**. À ces profils s'ajoutent les émissions liées aux équipements des établissements, respectivement à **0,037 et 0,053 kg CO<sub>2</sub>-eq**.

À l'échelle de la population, les effets de l'enseignement à distance (scénario 2020) peuvent être illustrés par la figure suivante :

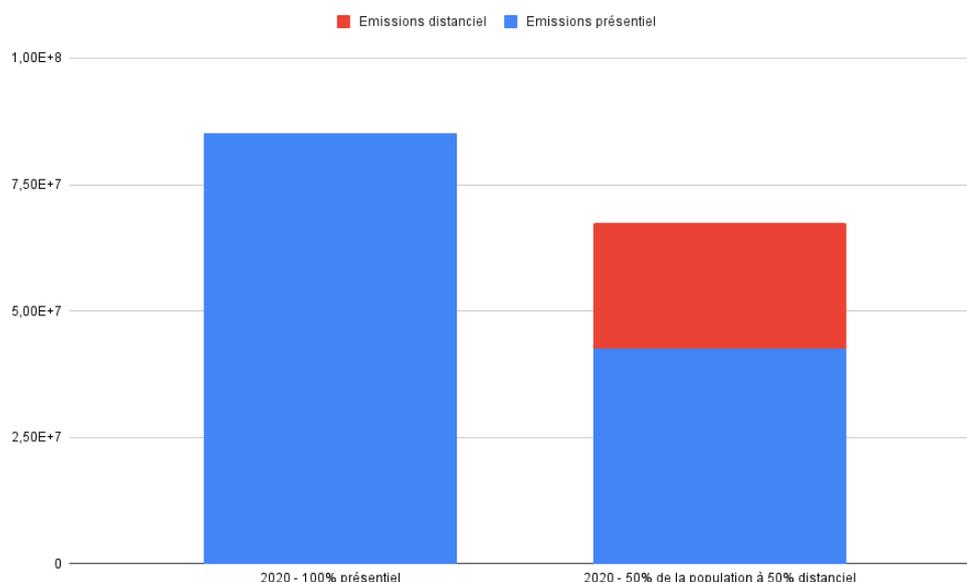


Figure 28 : Comparaison des émissions de GES pour le scénario 2020, avec deux configurations différentes d'enseignement à distance, en kg CO<sub>2</sub> eq/an

Pour le scénario 2020, mettre la moitié de la population générale en télétravail, sur 90 jours d'enseignement (soit 50% du temps total d'enseignement de 180 jours), permet de passer de **85 143 tonnes CO<sub>2</sub>-eq à 67 422 tonnes CO<sub>2</sub>-eq**, soit une réduction de 20,81% des émissions CO<sub>2</sub>-eq. Il est nécessaire de rappeler que cette estimation ne prend pas en compte les reports de chauffage et de consommation d'électricité des lieux d'enseignement vers les foyers.

Par rapport à un scénario de référence où l'on considère l'ensemble des publics concernés en présentiel, le scénario 2020 projette une année scolaire à 50% en enseignement à distance (90 jours) pour 50% de tous les profils confondus (collégiens, lycéens, étudiants, personnel). Il s'agit d'un scénario non-réaliste visant à projeter un potentiel maximisant de l'enseignement à distance. Il semble difficile d'envisager de passer 50% de l'année scolaire à distance sauf pour les instituts et formations spécialisées (CNED, CNAM par exemple) et encore moins pour une part importante (50%) des publics dans l'enseignement du second degré. Vu que les hypothèses sont maximisantes, les gains sont significatifs mais ce scénario reste difficilement réaliste hors situation exceptionnelle comme lors de la crise de la COVID-19.

## SCÉNARIO 2030 BUSINESS-AS-USUAL (BAU)

	Collégien	Lycéen	Etudiant	Personnel
<b>Mode présentiel</b>				
Distance moyenne parcourue par jour (km)	10,4	10,4	10,4	15,4
Taux d'allocation des équipements personnels au temps de travail (%)	10%	10%	50%	50%
<b>Mode distanciel</b>				
Taux d'allocation des équipements personnels au temps de travail (%)	40%	40%	80%	80%
<b>Extrapolation régionale et temporelle</b>				
Taux de personnes à distance (%)	50%	50%	50%	50%
Pourcentage de jours à distance (%)	80%	80%	80%	80%

Tableau 50 : Scénario 2030 BAU avec paramètres par défaut



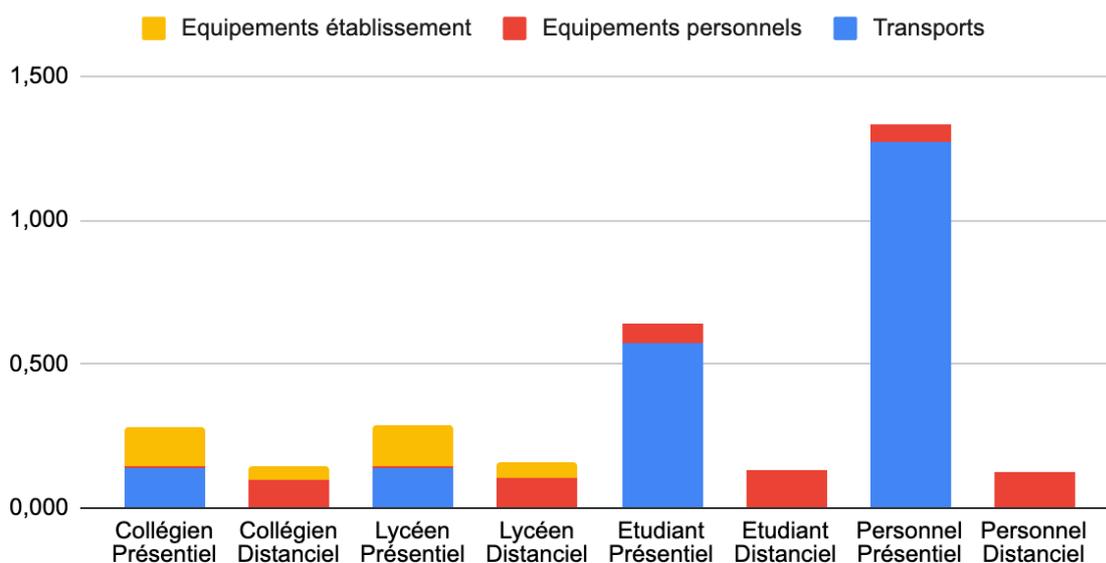


Figure 29 : Émissions de GES par secteur, en fonction du profil et du mode d'enseignement pour le scénario 2030 BAU avec paramètres par défaut, en kg CO<sub>2</sub> eq/personne/jour

La figure 29 représente les émissions de GES par secteur, en fonction du profil et du mode d'enseignement pour le scénario 2030 BAU, avec les paramètres par défaut.

Avec une projection *Business As Usual*, le taux d'équipements informatiques personnel et celui lié aux établissements augmentent globalement pour l'ensemble des profils, entraînant une augmentation des émissions associées. On remarque que l'écart des émissions par profils et par mode a globalement diminué comparé à 2020. La combinaison la plus émettrice est celle du **personnel en présentiel avec 1,335 kg CO<sub>2</sub>-eq par personne et par jour**. La réduction par rapport à 2020 s'explique ici par la **diminution de l'usage de la voiture chez cette population**, passant de plus de 70% à 40% des parts modales d'après des projections de l'Agence d'urbanisme de la région Mulhousienne. Pour les **étudiants en présentiel**, deuxième profil le plus émetteur, les émissions liées au transport stagnent à **0,640 kg CO<sub>2</sub>-eq par personne et par jour**. Cette stagnation est liée à l'absence de changement des modalités de transport, toujours 22% des trajets en voiture, car, faute de données disponibles, nous avons appliqué les mêmes parts modales que le scénario 2020.

Les émissions des collégiens et lycéens sont en légère hausse, est émettent respectivement **0,278 kg CO<sub>2</sub>-eq et 0,288 kg CO<sub>2</sub>-eq par personne et par jour** en présentiel et **0,1 kg CO<sub>2</sub>-eq et 0,107 kg CO<sub>2</sub>-eq par personne et par jour** à distance. Cette augmentation est principalement liée à l'équipement en matériel informatique des établissements, estimé à la hausse comme résultat des plans d'investissements de la région Grand-Est en faveur de l'éducation numérique.

Ainsi, si les émissions des collégiens, lycéens et étudiants, tout mode distinct, sont en légère hausse par rapport à 2020, la baisse des émissions liées au transport en voiture des enseignants en présentiel suffit à faire diminuer les émissions globales par rapport à 2020 dans le scénario 2030 BAU.

## SCÉNARIO 2030 OPTIM

	Collégien	Lycéen	Etudiant	Personnel
<b>Mode présentiel</b>				
Taux d'électrification des transports (%)	50%			
Distance moyenne parcourue par jour (km)	10,4	10,4	10,4	15,4
Taux d'allocation des équipements personnels au temps de travail (%)	10%	10%	50%	50%
<b>Mode distanciel</b>				
Taux d'allocation des équipements personnels au temps de travail (%)	40%	40%	80%	80%
<b>Extrapolation régionale et temporelle</b>				
Taux de personnes à distance (%)	50%	50%	50%	50%
Pourcentage de jours à distance (%)	80%	80%	80%	80%

Tableau 51 : Scénario 2030 Optim avec paramètres par défaut

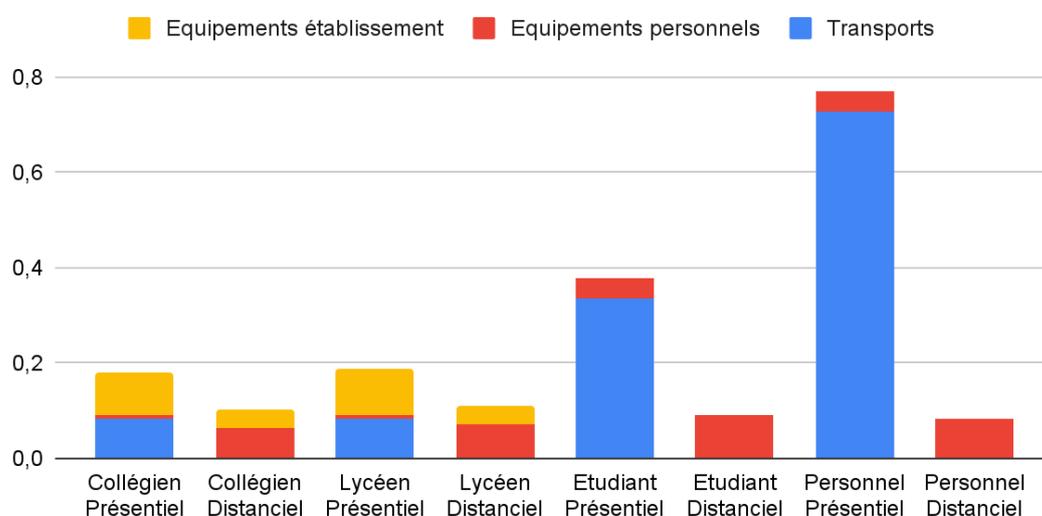


Figure 30 : Émissions de GES par secteur, en fonction du profil et du mode d'enseignement pour le scénario 2030 Optim avec paramètres par défaut, en kg CO<sub>2</sub> eq/personne/jour.

La figure 30 représente les émissions CO<sub>2</sub>-eq par secteur, en fonction du profil et du mode d'enseignement pour le scénario 2030 Optim, avec les paramètres par défaut.

Ce scénario prend en compte non seulement un changement des parts modales en faveur des mobilités douces et transports en commun, mais aussi une électrification des parcs automobile et transports en commun, dans la lignée des objectifs du Schéma régional d'aménagement, de développement durable et d'égalité des territoires (SRADDET) de la région Grand Est et de la Stratégie Nationale Bas Carbone (SNBC). De plus, ce scénario intègre des optimisations énergétiques et l'augmentation de la durée d'usage des équipements électroniques. Dans la configuration par défaut, ce scénario est le moins émetteur.

On observe par rapport à 2020 une diminution générale des émissions liées aux transports. Concernant les équipements personnels, la part des émissions pour les collégiens et personnels diminue légèrement grâce aux optimisations et à l'allongement des durées de vie. Elle augmente légèrement pour les lycéens et étudiants en conséquence des plans d'investissements dédiés à faire en sorte que chaque lycéen possède un ordinateur portable.

Les émissions liées aux équipements des établissements doublent par rapport à 2020, passant d'une moyenne de 0,03 kg CO<sub>2</sub>-eq par personne et par jour à 0,06 kg CO<sub>2</sub>-eq par personne et par jour. Cette augmentation est directement liée à l'augmentation du parc informatique des établissements. Les optimisations matérielles permettent cependant de limiter les émissions en comparaison au scénario 2030 BAU qui voit les émissions triplées par rapport à 2020, avec une moyenne de 0,09 kg CO<sub>2</sub>-eq par personne et par jour.

### 3.4.6.2. Synthèse des résultats par unité fonctionnelle

	Collégien Présentiel	Collégien Distanciel	Lycéen Présentiel	Lycéen Distanciel	Étudiant Présentiel	Étudiant Distanciel
2020	0,197	0,108	0,214	0,122	0,648	0,080
2030 BAU	0,278	0,147	0,288	0,159	0,509	0,130
2030 Optim	0,128	0,102	0,136	0,109	0,140	0,089

Tableau 52 : Unités fonctionnelles obtenues pour les collégiens, lycéens et étudiants, pour les scénarios 2020 et 2030 BAU avec paramètres par défaut, en kg CO<sub>2</sub>-eq/personne/jour.

### 3.4.6.3. Analyse territoriale

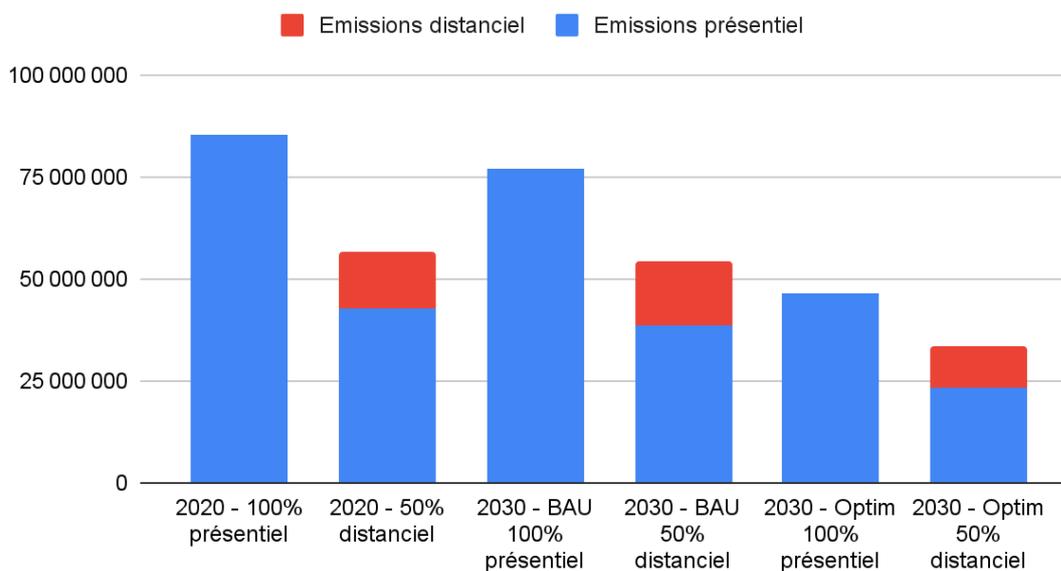


Figure 31 : Émissions de GES totales en fonction des scénarios et des modes utilisés (en kg CO<sub>2</sub> eq/an).

La figure 31 montre les émissions de GES totales des différents scénarios. Elle offre une vision comparée globale des paramètres sélectionnés, pour l'ensemble de la population de la région Grand-Est, et sur 180 jours d'enseignement.

Des scénarios BAU sont modélisés en 2020 et en 2030 avec 100% d'enseignement en présentiel pour tous les publics concernés afin de servir de référence et de dissocier les gains liés à l'enseignement à distance et les gains liés à la réussite des objectifs de transition de la région. Avec les paramètres de référence (50% de la population concernée, à 50% en enseignement à distance), **le scénario 2020 produit un peu plus de 67 000 t CO<sub>2</sub>-eq** à l'échelle de la région, sur 180 jours d'enseignements, **dont environ deux tiers sont liés à l'enseignement présentiel (42 571 t CO<sub>2</sub>-eq), et un tiers à l'enseignement à distance (23 636 t CO<sub>2</sub>-eq), soit 20 000 t CO<sub>2</sub>-eq évitées par rapport à un scénario de base sans distanciel (85 142 t CO<sub>2</sub>-eq)**

Le scénario 2030 BAU produit 54 167 t CO<sub>2</sub>-eq à l'échelle de la région, sur 180 jours d'enseignements, dont 38 536 t CO<sub>2</sub>-eq sont liées à l'enseignement présentiel, et 15 630 t CO<sub>2</sub>-eq liées à l'enseignement à distance, soit 22 905 t CO<sub>2</sub>-eq évitées par rapport à un scénario de base sans distanciel (77 072 t CO<sub>2</sub>-eq). L'augmentation des émissions en présentiel est principalement due à l'augmentation de la population étudiante : de 215 000 étudiants à 257 000 étudiants en 2030. La diminution des émissions de GES liées au distanciel s'explique par l'augmentation du temps de travail à distance, passant de 50% à 80% du temps. Ainsi, si dans le scénario 2030 BAU, les émissions liées au présentiel augmentent légèrement, en partie à cause de l'augmentation générale de la population en région Grand-Est et de l'augmentation du matériel informatique dans la région.

Le scénario 2030 Optim produit 33 392 t CO<sub>2</sub>-eq à l'échelle de la région, sur 180 jours d'enseignements, dont 23 283 t CO<sub>2</sub>-eq sont liées à l'enseignement présentiel, et 10 109 t CO<sub>2</sub>-eq liées à l'enseignement à distance, soit 13 174 t CO<sub>2</sub>-eq évitées par rapport à un scénario de base sans distanciel (46 566 t CO<sub>2</sub>-eq). Comparé au scénario 2030 BAU, les réductions globales du scénario Optim sont principalement dues à l'électrification des transports, à l'optimisation énergétique des équipements électroniques, et à l'allongement de leur durée de vie.

Le modèle par défaut a permis d'exposer une partie des effets des paramètres sur les résultats. Dans les analyses de sensibilités suivantes, nous précisons les modifications de paramètres effectuées et présentons leurs effets sur les émissions totales comparées.

#### 3.4.6.4. Analyse de sensibilité : modification des taux d'électrification de 2030 Optim

Nous reprenons ici les mêmes paramètres que pour le scénario 2030 Optim, à l'exception du taux d'électrification qui est réduit à 20% (au lieu de 50%).

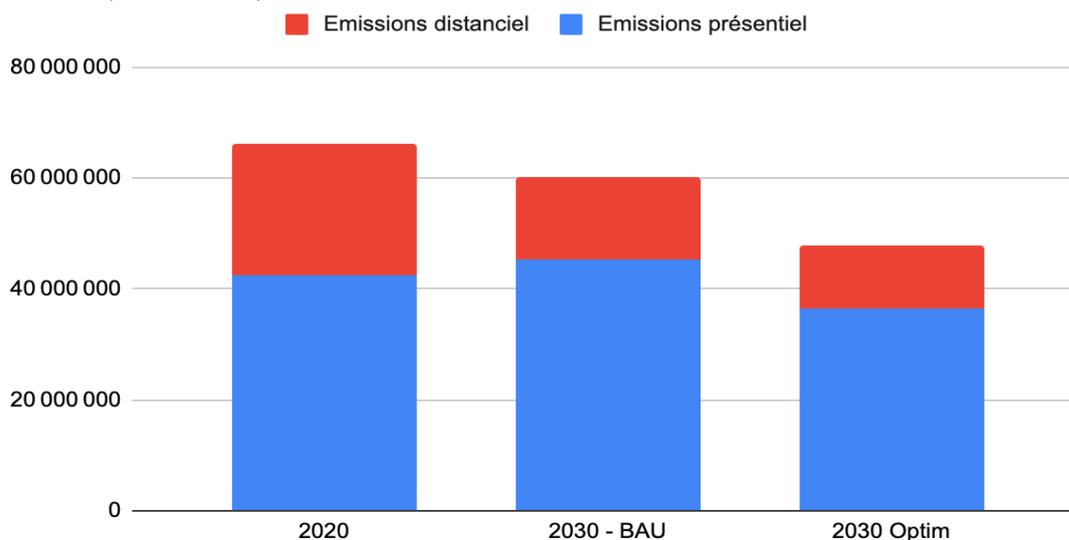


Figure 32 : Émissions de GES totales comparées en fonction des scénarios et des modes utilisés, avec 20% d'électrification des transports pour le scénario 2030 Optim, en kg CO<sub>2</sub> eq/an.

Dans cette configuration, le scénario 2030 Optim produit 42 696 t CO<sub>2</sub>-eq, dont 31 036 pour les émissions en présentiel, et 11 660 pour les émissions à distance. En comparaison avec le scénario 2030 Optim par défaut, ramener le taux d'électrification des transports à 20% augmente les émissions GES de 28%.

L'analyse ici réalisée présente l'électrification des transports comme un levier clé pour réduire les émissions de GES des transports, et par extension celles de l'enseignement à distance.

#### 3.4.6.5. Analyse de sensibilité : modification des conditions d'enseignement à distance

Nous faisons l'hypothèse qu'une faible part des publics concernés passe en enseignement à distance, soit 10% des collégiens, lycéens, étudiants et personnels à 80% de jours en enseignement à distance.



## Emissions présentiel et Emissions distanciel

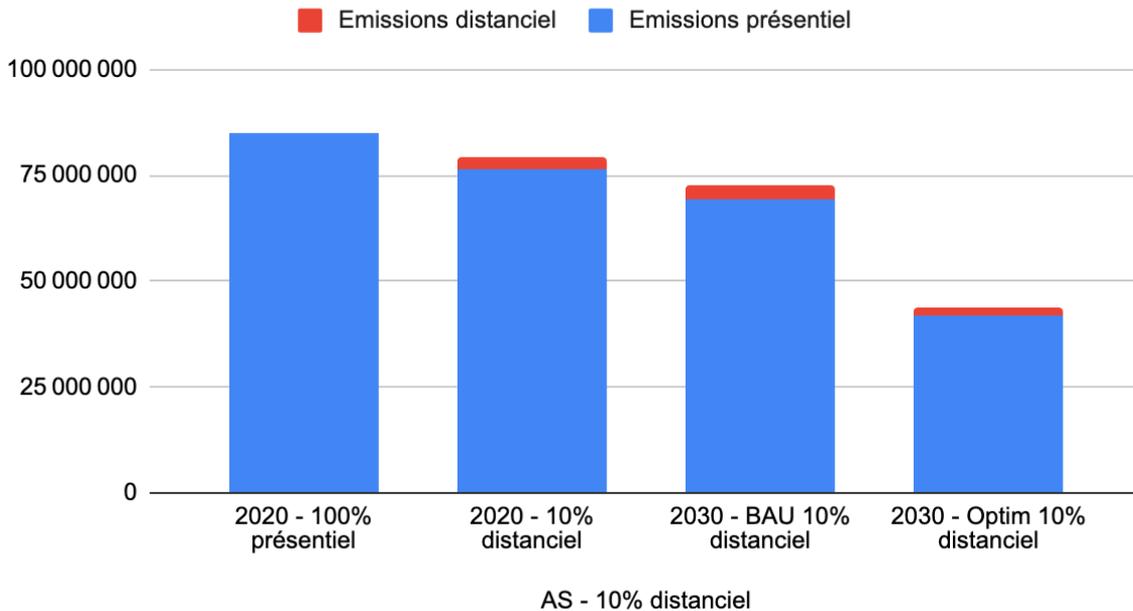


Figure 33 : Émissions de GES totales comparées en fonction des scénarios avec 10% de la population étudiante en enseignement à distance, en kg CO<sub>2</sub> eq/an.

À l'échelle régionale, passer une petite partie des publics en enseignement à distance réduit de façon marginale les émissions de GES, de 85 142 (scénario 100% présentiel) à 79 471 t CO<sub>2</sub>-eq en 2020, soit 6,6% de réduction. Le changement de paramètre modifie peu les résultats pour les scénarios 2030 où le changement des parts modales et l'électrification des transports restent les paramètres les plus structurants.

### 3.4.6.6. Limites

D'après la littérature scientifique étudiée, les grands pôles d'impact direct d'un établissement scolaire sont généralement sa consommation d'énergie (chauffage, électricité), l'immobilisation du bien, la préparation des repas. Le principal pôle d'impact indirect est le déplacement des élèves/étudiants et du personnel enseignant/non-enseignant. Les premières limites de cette analyse se situent au niveau de l'accès aux données régionales pour mieux qualifier le scénario. Nous n'avons pu intégrer qu'une estimation de l'empreinte carbone des déplacements, une allocation des équipements numériques des établissements, et une allocation des équipements numériques personnels lors des jours d'enseignement à distance. Cette analyse n'intègre pas les estimations d'empreinte carbone liées au chauffage des établissements et des transferts de chauffage vers les domiciles lors des jours d'enseignement à distance.

Concernant les déplacements moyens entre le domicile et le lieu d'enseignement, nous nous sommes basés sur l'enquête mobilité des personnes de 2019 (EMP 2019) à défaut d'avoir des valeurs régionales à jour. En effet, la dernière valeur disponible datait de 2008.

Pour les valeurs d'intensité carbone des transports nous n'intégrons pas la part liée à la fabrication des véhicules et des infrastructures.

Au niveau des taux d'équipements informatiques par établissement (ordinateurs fixes et portables, tableaux intelligents, vidéoprojecteurs), il est très complexe d'obtenir des chiffres au niveau régional. Nous nous sommes appuyés sur l'enquête nationale du Baromètre du numérique de l'ARCEP et sur la politique des collèges numériques et des lycées 4.0 pour déterminer des taux d'équipement en 2020 et d'ici 2030. Ces taux d'équipements sont critiques dans les résultats obtenus. Toute mise à jour des hypothèses retenues doit entraîner une réévaluation des résultats présentés ici.

Les deux extrapolations présentées pour 2030 intègrent les gains d'efficacité dans la production et l'usage des équipements numériques, mais aussi la transition des transports régionaux vers des transports publics et des moyens de transport plus

électrifiés. Les résultats de cette prospective et l'impact net de l'enseignement à distance d'ici 2030 dépend de la bonne réalisation des programmes d'efficacité et de transition des transports.

### 3.4.7. Conclusions

Pris individuellement, les gains environnementaux nets de l'enseignement à distance sont importants, notamment pour le profil « Étudiant » et le profil « Personnel ». L'usage accru des équipements numériques personnels ne compense pas les gains obtenus grâce à l'évitement d'un trajet dans les trois scénarios modélisés. Nous constatons toutefois trois éléments : les gains environnementaux obtenus par l'enseignement à distance diminuent dans le temps au fur et à mesure que la région répond à ses objectifs de transition ; la numérisation de l'enseignement crée une empreinte carbone supplémentaire autant dans les scénarios en présentiel qu'en distanciel ; l'optimisation des équipements et l'allongement de leur durée de vie à un effet à la fois en présentiel et à distance sur les émissions GES.

Pris à l'échelle du territoire et pondéré avec les populations de chaque profil, l'obtention de gains environnementaux varie en fonction du nombre de jours et du passage vers l'enseignement à distance. Il est nécessaire de passer un nombre important d'élèves et d'étudiants en enseignement à distance et pour un nombre de jours conséquents afin d'obtenir de forts gains environnementaux annuels. Or, les impacts sociaux sont à évaluer pour comprendre la portée de tels scénarios, il est difficile de placer les collégiens et lycéens en enseignement à distance en fonction des conditions socio-économiques de leurs foyers, de la qualité de l'apprentissage visée et de la nécessité de socialisation à un âge plus jeune.

Comme pour les profils individuels, les gains environnementaux importants obtenus en première année diminuent dans le temps. À ce titre, les plus gros leviers pour diminuer l'empreinte carbone de l'enseignement dans ce modèle sont le taux d'électrification des véhicules (transports en commun et voitures) et l'évolution des parts modales vers une diminution de l'usage de la voiture. Nous notons que dans un scénario où les transports sont décarbonés et plus orientés vers les usages communs, l'augmentation des équipements numériques des établissements tend à compenser les gains obtenus par les trajets évités.

Cette étude donne à voir les différences d'impacts environnementaux entre les gains individuels et les gains agrégés à l'échelle du territoire. De même, la question des impacts environnementaux de l'enseignement à distance pose en creux la question des impacts environnementaux de l'enseignement car les deux coexistent et il sera nécessaire de baisser leurs impacts de façon parallèle. À ce titre, les leviers identifiés sont : le changement des modes de transports pour les trajets domicile - lieu d'enseignement ; la maîtrise du taux d'équipements numériques des établissements ; l'augmentation de la durée de vie fonctionnelle des équipements numériques personnels (parfois fournis par la Région Grand Est) et des établissements. En dernière analyse, il semble important de se rappeler que les gains obtenus dans les conditions actuelles ont tendance à diminuer dans le temps, quels que soient les paramètres choisis.

Nous tenons à rappeler que le déploiement de programmes d'enseignement à distance ne peut être justifié par les seuls gains environnementaux, la qualité pédagogique et les enjeux sociaux liés à ce type de service restent centraux.

## 3.5. Maisons connectées

### 3.5.1. Choix du cas d'étude

Le déploiement de maisons connectées a été sélectionné car il représente un enjeu significatif du secteur résidentiel et de sa numérisation. Par défaut, tout service numérique qui vise le parc résidentiel a un effet potentiel à grande échelle (critère d'échelle). Aujourd'hui, les solutions de maisons connectées n'ont que peu pénétré le marché français mais le déploiement national de compteurs intelligents pose les premières briques pour élargir potentiellement le nombre de capteurs et d'appareils connectés dans les maisons (critère de pertinence territoriale). Du fait de la longévité du bâti résidentiel les solutions de maisons connectées s'intègrent dans le temps, et même si les dispositifs tombent en panne ou ne fonctionnent plus les appareils et équipements restent dans le bâti (critère de temps).

**Note : la littérature mobilisée au sein de cette partie est présentée directement dans les sections dédiées et n'est pas reprise en bibliographie globale de l'étude.**

### 3.5.2. Revue de littérature

La revue de littérature s'est axée sur la combinaison des termes suivants : « smart home », « home automation system », « home energy management system », « sustainability », « life cycle assessment », « carbon emissions ». Les études les plus récentes (moins de 5 ans) ont été privilégiées. Certaines publications plus vieilles ont été intégrées comme « Environmental Impacts and Benefits of Smart Home Automation : Life Cycle Assessment of Home Energy Management System » de Jean Nicolas Louis et al. afin d'avoir une référence antérieure d'analyse de cycle de vie et « A comparison of consumer perceptions towards smart homes in the UK, Germany and Italy: reflections for policy and future research » pour avoir une référence sur les choix de consommation dans des pays voisins.

Année	Titre de la publication	Auteur(s)
2022	Towards Sustainability in Buildings : a Case Study on the Impacts of Smart Home Automation Systems	Siraj Shikhli et al.
2021	Assessing the embodied carbon footprint of IoT edge devices with a bottom-up life-cycle approach	Thibault Pirson et David Bol
2021	Culture, energy and climate sustainability, and smart home technologies : A mixed methods comparison of four countries	Dylan D. Furszyfer Del Rio et al.
2021	A qualitative assessment of the impact of smart homes and environmentally beneficial technologies on the UK 2050 net-zero carbon emission target	Ghasson Shabha et al.
2021	A systematic review of the smart energy conservation system : From smart homes to sustainable smart cities	Hakpyeong Kim et al.
2021	Environmental saving potentials of a smart home system from a life cycle perspective : How green is the smart home?	Johanna Pohl et al.
2020	Should we fear the rebound effect in smart homes ?	Julien Walzberg et al.
2020	Smart home technologies in Europe : A critical review of concepts, benefits, risks and policies	Benjamin K. Sovacool et al.
2020	'Smart' Is Not Free: Energy Consumption of Consumer Home Automation Systems	Chrispin Gray et al.
2020	Smart home technology—comparing householder expectations at the point of installation with experiences 1 year later	Luis Oliveira et al.
2019	Are households ready to engage with smart home technology?	Rory Mulcahy et al.
2019	Optimization methods for power scheduling problems in smart home: Survey	Sharif Naser Makhadmeh et al.
2019	A systematic review of the smart home literature: A user perspective	Marikyan Davit et al.
2019	Assessing behavioural change with agent-based life cycle assessment: Application to smart homes	Julien Walzberg et al.
2018	Smart home technologies in everyday life: do they address key energy challenges in households?	Sergio Tirado Herrero et al.

2017	An agent-based model to evaluate smart homes sustainability potential	Julien Walzberg et al.
2017	Non-intrusive load monitoring through home energy management systems: A comprehensive review	Sayed Saeed Hosseini et al.
2016	Assessing ICT's enabling effect through case study extrapolation – the example of smart metering	Jens Malmodin et Vlad Coroama
2015	Environmental Impacts and Benefits of Smart Home Automation: Life Cycle Assessment of Home Energy Management System	Jean-Nicolas Louis et al.
2014	A comparison of consumer perceptions towards smart homes in the UK, Germany and Italy: reflections for policy and future research	Nazmiye Balta-Ozkan et al.

Tableau 53 : Synthèse de la revue de littérature pour les maisons connectées

Année	Titre de la publication	Auteur(s)
2021	Total Energy Model V2.0 for Connected Devices	IEA 4E EDNA
2019	Smart home and appliances: State of the art	T. Serrenho et P. Bertoldi (JRC EU)

Tableau 54 : Littérature institutionnelle complémentaire pour les maisons connectées

### 3.5.3. Cadre d'évaluation

#### 3.5.3.1. Définition du terme

Nous reprenons ici la typologie de maisons connectées telle que définie par Sovacool et Furszyfer en 2020 :

*Une maison de niveau 1 dispose de quelques appareils domestiques intelligents, tels qu'un téléviseur, un moniteur pour bébé ou un système photovoltaïque, et peut-être de niveaux de rétroaction de base, mais les occupants décident toujours de manière analogique de la manière dont ils s'engagent, et les technologies ne sont pas interconnectées et restent en silos.*

*Dans une maison de niveau 2, les technologies commencent à être regroupées et intégrées pour mieux fournir certains services domestiques, comme le chauffage (par exemple, un compteur intelligent avec affichage à domicile, une pompe à chaleur et un thermomètre avancé) ou les loisirs (par exemple, une télévision intelligente couplée à un routeur Internet, un système audio, un ordinateur portable et un téléphone mobile).*

*Une maison de niveau 3 évolue vers un certain degré d'automatisation, les systèmes commençant à s'interconnecter et même à anticiper certains besoins, comme l'allumage des lumières ou des appareils quelques instants avant le retour d'un occupant. Une maison de niveau 3 peut également être programmée pour répondre à certaines préférences sur plusieurs appareils, notamment des températures différentes dans différentes pièces.*

*Dans une maison de niveau 4, les systèmes commencent à apprendre par eux-mêmes et à adapter leur prestation de services au contexte, par exemple en allumant les lumières à l'approche d'un orage ou en les éteignant à l'arrivée du soleil. C'est à ce niveau que les capteurs et les moniteurs permettent à la technologie de connaître les conditions de la maison, et que les boucles de rétroaction peuvent faciliter l'apprentissage afin que la maison devienne plus autonome et puisse s'adapter à ce qu'elle pense que vous voulez.*

*Une maison de niveau 5 devient presque intelligente et peut répondre automatiquement à tous les besoins du foyer, voire les anticiper. À ce niveau supérieur, la surveillance, le retour d'information et l'apprentissage sont intégrés à de multiples systèmes (chauffage, éclairage, jardinage, mobilité), de sorte que la maison elle-même peut fournir des services de manière transparente. À ce niveau, les maisons commenceraient très probablement à parler à leurs occupants, et peut-être aussi entre elles.*

*Certains répondants ont évoqué un sixième niveau possible, au-delà de la maison individuelle, celui des quartiers, des communautés et des villes intelligentes.*

### 3.5.3.2. Objectif de l'évaluation

Cette deuxième évaluation vise à définir les effets environnementaux nets liés au déploiement de services de maisons connectées en région Grand Est aujourd'hui et dans un futur proche. Cette analyse permet de mieux comprendre les facteurs d'impact du déploiement d'équipements électroniques (compteur intelligent, capteurs) attachés à des solutions logicielles pour les maisons connectées dans un territoire donné. Il s'agit aussi de comprendre comment les caractéristiques de ce même territoire (parc résidentiel, évolution de la consommation, politiques de transition écologique, etc.) influent sur les effets environnementaux de ce service numérique.

### 3.5.3.3. Définition du périmètre

Ce deuxième cas explore les effets environnementaux liés au déploiement de services de maisons connectées sur une partie du parc résidentiel en région Grand Est, entre 2020 et 2030.

Caractéristiques du périmètre	Définition
Zone géographique	Région Grand Est
Intervalle de temps	2020 - 2030
Service	Service de gestion de l'énergie de la maison connectée (Home Energy Management System) et équipements divers (voir profils d'équipements plus bas)
Public cible	Foyers
Unité fonctionnelle	Fonctionnement d'équipements et de solutions de maisons connectées pendant 1 an
Impacts environnementaux ciblés	Potentiel de réchauffement climatique (exprimé en kg CO <sub>2</sub> eq), Consommation d'énergie primaire (exprimée en MJ), Consommation des ressources naturelles abiotiques – éléments - (exprimée en kg Sb eq), consommation d'eau (exprimée en m <sup>3</sup> ), Production de DEEE (exprimée en kg)
Flux ciblés	Consommation d'électricité (exprimée en kWh)

Tableau 55 : Définition du périmètre de l'étude « Maisons connectées »

## COUPURES

### Type d'équipements

La littérature scientifique inclut des équipements liés à la gestion des flux (énergie, chauffage, eau, etc.), des équipements de divertissement, des équipements connectés de type petit et gros électroménager (frigo, four, etc.) et des équipements divers. Cette analyse s'est concentrée sur les solutions connectées pour la gestion de la consommation d'énergie d'une maison (Home Energy Management Systems) ainsi que sur les équipements grand public (enceinte connectée, capteurs, etc.) permettant un minimum d'autonomisation.

### Type d'effets

La littérature scientifique identifie des effets indirects concernant la gestion des flux (énergie, chauffage, eau), le niveau de confort et l'accès à du divertissement. Des effets de plus grand ordre concernent aussi la flexibilité de la gestion du réseau électrique que permettent les compteurs intelligents déployés à grande échelle. Nous nous concentrons ici uniquement sur les effets qui concerne la maison et ses occupants, tout effet hors de ce périmètre (dont la gestion du réseau électrique) n'est pas inclus. Les effets de substitution sont présents dans le calculateur mais ne sont pas intégrés dans le résultat final afin d'éviter une double comptabilité entre la consommation électrique d'équipements déjà présents (ampoules LED, compteur) dans la consommation d'énergie finale des foyers et la consommation d'énergie modélisée dans cette étude.

Les effets indirects de solution unitaire ne sont pas pris en compte. Par exemple, l'effet d'induction d'un compteur intelligent (contrairement à un compteur conventionnel, un modèle intelligent a besoin d'un concentrateur pour récupérer le signal via CPL) ou l'effet de substitution (un compteur intelligent se substitue à la relève des compteurs par un technicien) ne sont pas modélisés.

### Perspective climatique

La projection jusqu'à 2030 implique une évolution des besoins en chaud et en froid du parc résidentiel et ainsi une évolution de la consommation énergétique type d'un foyer en région Grand Est. Faute de données aisément exploitables sur le sujet, nous ne modélisons pas l'évolution de ces besoins d'ici 2030.

## SYNTHESE DU PERIMETRE

Caractéristiques du périmètre	Inclus	Non-inclus
Équipements	Home Energy Management Systems (HEMS), équipements grand public (enceintes), capteurs divers	Petit et gros électroménager connecté
Effets	Réduction d'énergie grâce au HEMS, Effet rebond de confort	Meilleure flexibilité du réseau électrique, substitution (ampoules LED vers ampoules LED connectées ; compteur conventionnel vers compteur intelligent)
Perspective climatique		Évolution des besoins en chaud et en froid du parc résidentiel

Tableau 56 : Synthèse du périmètre de l'étude « Maisons connectées »

### 3.5.3.4. Définition de l'unité fonctionnelle

L'étude de cas se focalise sur l'impact lié à la fabrication et à l'usage d'équipements de « maison connectée » pendant un an en région Grand Est. Cette unité fonctionnelle est mobilisée pour différents profils de maisons avec différents niveaux de connectivité et d'automatisation : « smart low », « smart medium », « smart future ». Ces unités fonctionnelles sont ensuite utilisées à l'échelle du parc résidentiel de la région Grand Est.

### 3.5.3.5. Méthode d'attribution

Chaque profil de maison connectée dispose d'un profil d'impact par an et par maison. La distribution des effets environnementaux positifs et négatifs s'applique au niveau territorial, il n'y a donc pas d'attribution des effets à un acteur précis.

## 3.5.4. Identification des effets

### 3.5.4.1. Définition du scénario de base

Le scénario de base est défini en 2020 dans la région Grand Est en prenant en compte le nombre de résidences principales et leur consommation moyenne d'énergie finale.

Les différents profils d'équipements connectés par maison visent à s'inscrire dans les hypothèses déjà formulées dans la littérature scientifique étudiée mais aussi pour permettre des variations de taux d'équipements suffisamment larges pour observer des différences potentielles d'impacts. Il est considéré en 2020 que très peu de résidences principales en région Grand Est peuvent être qualifiées de maisons connectées. Il est fait l'hypothèse que 5% du parc résidentiel est considéré comme faiblement connecté (smart low) (voir la section Hypothèse pour plus d'informations).

### 3.5.4.2. Définition des effets

Sovacool et al. présentent une liste des bénéfices et de barrières concernant l'usage de solutions de maisons connectées. Les bénéfices environnementaux incluent les économies d'énergie, des gains financiers pour les opérateurs de réseau électrique et divers gains en termes de carbone, pollution et déchets. Les barrières incluent des effets rebond sur la consommation



d'énergie et l'augmentation de l'empreinte matérielle dû à des nouveaux équipements numériques. L'ensemble de la littérature étudiée pointe principalement vers les effets de gestion de l'énergie (energy management), ainsi cette étude se concentre sur cet ensemble d'effets.

Périmètre	Type d'effet	Effet appliqué aux maisons connectées
Effets directs	Fabrication	Equipements numériques dédiés
	Usage	Equipements numériques dédiés
	Fin de vie	Equipements numériques dédiés
Effets indirects	Efficacité	Réduction de la consommation d'énergie de chauffage du foyer à la suite d'un changement de comportement permis par un compteur intelligent, une plateforme de suivi de consommation et un ensemble de capteurs / équipements complémentaires si nécessaires
	Substitution	Remplacement d'équipements non connectés par des équivalents connectés (ampoules, compteur)
	Induction	Achat de nouveaux équipements numériques pour permettre une meilleure gestion de la maison ou une augmentation du confort / divertissement
	Effets rebond directs	Augmentation de la température de chauffe grâce à une meilleure gestion de l'énergie et à cause des économies d'argent effectués
	Effets macro-économiques	L'usage de HEMS permet un meilleur contrôle du réseau électrique si des parts significatives d'une zone urbaine en sont équipés

Tableau 57 : Définition des effets de du déploiement de solutions maisons connectées

Concernant les économies d'énergie, Serrenho et Bertoldi ont publié une étude sur les *smart home* en Europe à la demande du Joint Research Centre de l'Union Européenne. Ils font notamment l'inventaire des économies d'énergie permise par un compteur intelligent et un écran ou un portail donnant accès aux données de consommation d'énergie (chauffage et/ou électricité). De même, Malmodin et Coroama font un exercice similaire à cette étude avec des scénarios de réduction d'énergie à -2%, -4%, -6%. Pohl et al complètent ces scénarios en intégrant des économies potentielles à -10% et -20%. Il semble qu'une estimation conservatrice d'économie d'énergie se situerait aux alentours de -3%. Nous ne disposons pas de données spécifiques à la France sur ce point.

Les effets de substitution dépendent des équipements connectés et leurs équivalents non connectés. Par exemple, une ampoule LED connectée (type Philips Hue) augmente l'empreinte de fabrication de l'ampoule à cause de l'ajout de composants électroniques et implique une consommation d'électricité, même éteinte, avant de pouvoir répondre à une commande à distance. Pour un compteur électrique, les résultats pour l'empreinte environnementale sont généralement plus élevés pour un compteur connecté du fait de l'électronique embarquée et des équipements induits. Cependant les effets indirects varient en fonction des contextes d'analyse (voir Glenn Sias, « Characterization of the Life Cycle Environmental Impacts and Benefits of Smart Electric Meters and Consequences of their Deployment in California » ou, Asfra Rizwan et al., « Environmental sustainability and life cycle cost analysis of smart versus conventional energy meters in developing countries »).

Concernant les effets rebonds directs liés aux économies d'énergie, Belaid et al. ont publié une étude à partir d'un échantillon représentatif de 2356 foyers français pour déterminer un effet rebond entre 72% et 86%. Cela signifie que l'amélioration de l'efficacité énergétique des logements ne se traduit pas nécessairement par une diminution correspondante de la demande d'énergie en termes absolus. D'après Belaid et al, 72 % à 86 % des économies d'énergie réalisées par les foyers de l'échantillon ont été absorbé par d'autres actions et changements de comportement non anticipés (augmentation de la température de chauffe et du confort thermique par exemple, élasticité des prix de l'énergie, etc.).

Les effets rebond indirects, comme l'achat de nouveaux équipements connectés, sont pris en compte dans les différents profils de maison à partir des travaux de Pohl et al., Gray et al. et Malmodin et Coroama.

### 3.5.5. Modélisation

#### 3.5.5.1. Définition des effets significatifs et des données disponibles

La revue de littérature invite à se focaliser sur :

- la gestion de l'énergie grâce aux équipements et solutions de maisons connectées ;
- la substitution d'équipements non-connectés par des équivalents connectés ;
- les effets rebond direct sur la consommation d'énergie ;
- les effets rebond indirect liés à l'achat de nouveaux équipements connectés.

Les données territoriales à disposition ne permettent de savoir quel type d'équipement (ampoule LED, compteur) sont installés en moyenne par foyer en région Grand Est. Nous faisons l'hypothèse que la consommation d'énergie de ce type d'équipement est déjà prise en compte dans la consommation d'énergie finale par foyer renseignée par l'ATMO. À ce titre, nous ne sommes pas capables de déterminer l'effet de substitution entre les équipements existants et ceux connectés d'une maison dans la baseline. Une approche pour estimer cet effet est toutefois fournie dans le calculateur, sans que cela intervienne dans les estimations finales. Cette approche suggère plutôt une augmentation de l'empreinte liée à cette substitution plutôt qu'une diminution.

	Inclus	Non-inclus
<b>Effets étudiés</b>	Économies d'énergie, effet rebond direct de consommation d'énergie, effet rebond indirect d'achat d'équipements supplémentaires	Substitution, Flexibilité du réseau électrique, induction liée aux équipements connectés (réseaux, centre de données, équipements supplémentaires)

Tableau 58 : Périmètre des effets étudiés

#### 3.5.5.2. Collecte des données

Catégorie de données	Sous-catégorie	Institutions à l'origine des données
<b>Population</b>	Population	INSEE
	Nombre de ménages	INSEE
	Evolution de la population jusqu'en 2050 (année de référence 2017)	SRADDET Grand Est
<b>Energie, GES région</b>	Consommation d'énergie finale région Grand Est 2020	SDES
	Consommation d'énergie finale du résidentiel Grand Est 2020	SDES
	Émissions de GES par secteur Grand Est 2020	ATMO Grand Est
	Émissions de GES du secteur résidentiel par énergie Grand Est 2020	ATMO Grand Est
	Objectifs des politiques de transition Grand Est	SRADDET
<b>Logement</b>	Nombre total de logements en 2019 (principales, secondaires, sociaux, vacants)	INSEE, ATMO Grand Est, Banque des Territoires
	Consommation d'énergie finale des résidences principales en 2020 à climat réel en Grand Est	ATMO Grand Est
	Caractéristiques des résidences principales selon leurs étiquettes DPE en GE (pre-2021)	DREAL, ADEME API DPE Logements
	Logements économes en Grand Est	SRADDET, Banque des Territoires
<b>Équipements électroniques et connectés</b>	Empreinte environnementale multicritères	NegaOctet, autres sources
	Évolution du parc résidentiel	Observatoire des Territoires

Tableau 59 : Synthèse des données collectées et des sources associées.



À cause du manque de cohérence entre les caractéristiques des résidences principales selon leurs étiquettes DPE fournies par la DREAL et celles obtenues par l'API de l'ADEME sur le DPE des logements en région Grand Est, les DPE ne sont pas appliqués dans le modèle. L'empreinte environnementale d'autres appareils non connectés nécessaires à la définition d'un scénario de base, comme les ampoules ou les compteurs conventionnels, n'a pas été intégré par manque de cohérence avec les données issues de la base NegaOctet.

### 3.5.5.3. Hypothèses

Les études de marché à disposition montrent un faible volume de ventes de produits « smart home » en France comparé à l'Allemagne et au Royaume-Uni en 2014 et en 2015. Les ventes étaient notamment dominées par les produits de divertissement.

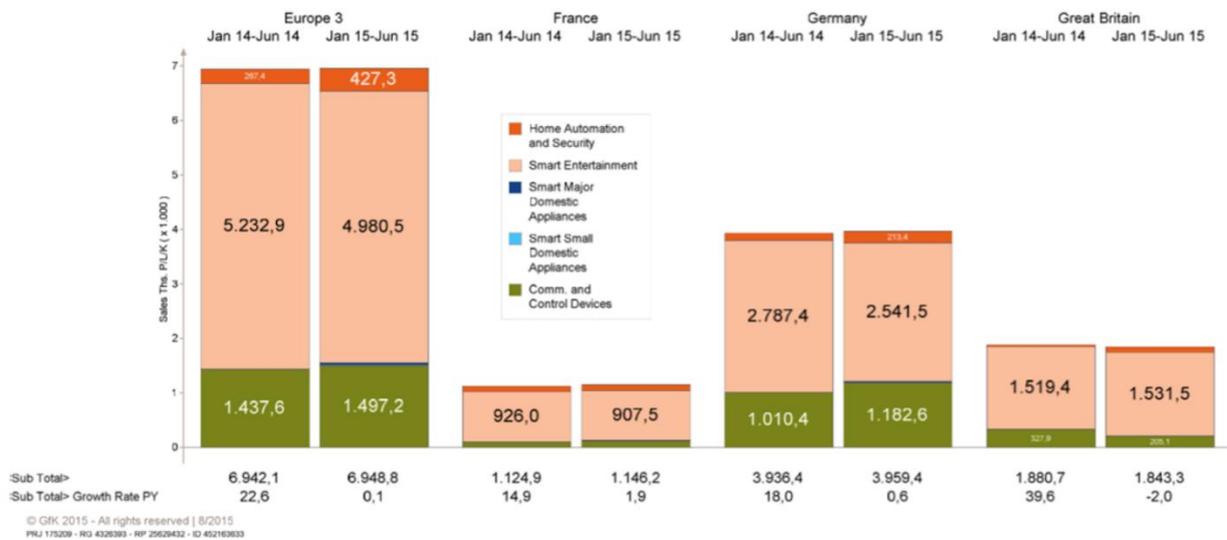


Figure 34 : Volume de ventes des produits « smart home » en Europe, France, Allemagne, Royaume-Uni (2014 & 2015, GfK)

Des études de marché plus récentes, fournies par Statista, projettent une augmentation du taux de pénétration des produits « smart home » en France dans les années à venir. Le taux de pénétration serait à 14,6% en France en 2020 et pourrait atteindre 39,1% d'ici 2027. Le nombre d'utilisateurs est estimé à 1,5 millions de personnes en France en 2020 et pourrait atteindre 12 et 15 millions d'ici 2027.

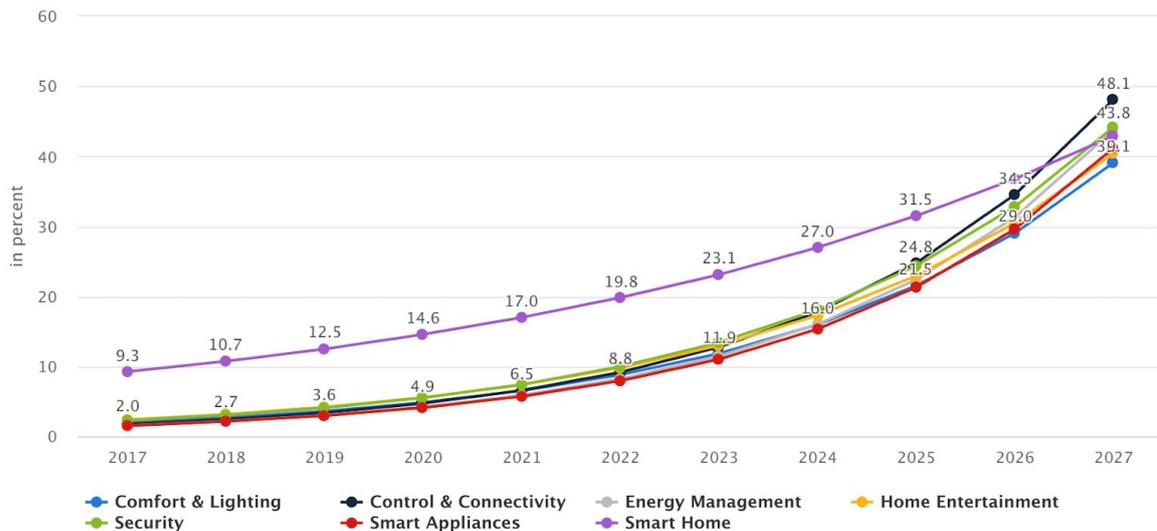


Figure 35 : Taux de pénétration par segment des produits « smart home », par catégorie (Statista, Décembre 2022)



Cette étude exclut une grande partie des équipements de divertissement habituellement mis sous le terme de « smart home » pour nous concentrer sur les équipements d’automatisation et de gestion de l’énergie. Nous considérons donc que le nombre de maisons connectées en région Grand Est en 2020 est de 5%.

## PROFIL DE MAISONS

À partir de ces analyses de marché et des travaux de Malmodin et Coroama (2016), Gray et al. (2020), et Pohl et al. (2020), Nous faisons l’hypothèse de trois profils de maison connectée. Le profil « smart low » dispose suffisamment d’objets connectés pour justifier la dénomination de « maison connectée » mais à un niveau d’automatisation peu élevé. D’après la typologie de Sovacool et Furszyfer le profil smart low correspond à une maison de niveau 2 à 3. Le profil « smart future » intègre un nombre plus important de capteurs, d’actionneurs et d’ampoules, et correspond à une maison de niveau 3 à 4. Le dernier profil, « smart future », correspond à une maison entièrement automatisée et est pris de l’étude faite par Gray et al en 2020.

	Maison « smart low »	Maison « smart medium »	Maison « smart future »	Durée de vie des équipements
Sensors	10	25	43	5
Actuators	4	10	19	5
Smart Light Bulb	4	12	30	5
Smart Water Heater	1	2	5	5
Surveillance Camera	1	2	4	5
IoT Gateway	1	1	1	5
Smart Hub	1	1	1	5
Home Gateway/Modem	1	1	1	5
Smart Meter	1	1	1	5
Smart Plug	4	10	21	5
Enceinte connectée	1	1	2	5

Tableau 60 : Caractéristiques des différents profils de maison connectées modélisés

## DUREE DE VIE

L’hypothèse sur la durée de vie moyenne des équipements connectés de 5 ans est reprise des recommandations du Total Energy Model V2.0 for Connected Devices de l’EDNA Annex (Electronic Devices and Networks Annex) publié par l’Agence Internationale de l’Énergie en février 2021 et utilisée par Pohl et al.

## EFFETS

Au-delà de l’empreinte environnementale des équipements, il est fait l’hypothèse que les effets environnementaux principaux d’une maison connectée sont les économies d’énergie liée au chauffage et les effets rebond directs concernant ces dernières. Cela est aligné avec l’état de la littérature scientifique actuelle et sont les effets environnementaux indirects les plus étudiés. Les trois hypothèses d’économies d’énergie sur le chauffage sont graduées à -2%, -4% et -6% pour suivre les travaux précédents de Malmodin et Coroama et de Pohl et al. Les effets rebond directs sur la consommation d’énergie liée au chauffage sont gradués de 72% à 86% en suivant les travaux de Belaid et al sur un échantillon représentatif de 2356 foyers français.

## HYPOTHESE 2030

Pour projeter les estimations de 2020, les deux principales variables sont le taux d’évolution annuel du nombre de logements de 0,86% fourni par l’Observatoire des Territoires, et la consommation moyenne d’énergie finale du parc résidentiel en région Grand Est. Pour cette dernière nous considérons l’objectif du SRADDET visant à réduire la consommation d’énergie finale du résidentiel en 2030 à 30 050 GWh (année de référence 2012 (56 196 GWh)), et la consommation d’énergie finale 2020 du résidentiel de 42 109 GWh. En supposant que cet objectif sera rempli, nous estimons que la consommation d’énergie finale du parc résidentiel aura baissé de 28% d’ici 2030, par rapport à 2020.



Nous considérons que le taux de déploiement total des différents profils de maisons connectées pourrait atteindre 20% avec une grande majorité de profils « smart low ».

#### 3.5.5.4. Modèle paramétrique

Le modèle se présente sous la forme de différentes feuilles de tableurs au rôle distinct : des feuilles de données contenant les données primaires et secondaires récoltées, ainsi que leurs sources associées ; une feuille de calculateur permettant d'obtenir les valeurs par unité fonctionnelle du modèle ; une feuille de résultats contenant les paramètres modifiables, les résultats et visualisations associées.

Les paramètres structurants exposés pour être modifiés pour chaque profil sont :

- Nombre de logements principaux occupés ;
- Consommation moyenne d'énergie finale (dont part dédiée au chauffage) ;
- Gain d'efficacité pour le chauffage ;
- Effet rebond pour le chauffage ;
- Part de logements « smart low », « smart medium », « smart future » ;
- Taux d'évolution annuel du nombre de logements (hypothèse 2030) ;
- Réduction de la consommation d'énergie finale du résidentiel (hypothèse 2030).

Ces derniers ont été retenus car nous les considérons pertinents pour caractériser différents scénarios de déploiement de maisons connectées et leurs effets principaux sur la consommation d'énergie de ces derniers, notamment sur le chauffage.

Le nombre de logements principaux reprend les données de l'INSEE sur le parc résidentiel en 2019, soit 2 498 044 logements. Nous considérons que ce chiffre donne à voir les logements réellement occupés en soustrayant les résidences secondaires et les logements vacants.

La consommation d'énergie finale d'un logement en région Grand Est est configurée uniquement sur la consommation liée au chauffage avant d'être en cohérence avec les effets pris en hypothèse.

Les économies d'énergie sur le chauffage permises par une maison connectée sont configurées à -2%, -4% et -6%, et les effets rebond directs à 72 et 86%.

Le taux de déploiement de maisons connectées en région Grand Est en 2020 est établi à 5% de « smart low ». Le taux de déploiement pour 2030 est de 15% pour le profil « smart low », 4% pour le profil « smart medium » et 1% pour « smart future ».

### 3.5.6. Résultats

Cette partie présente des analyses de sensibilité significatives permises par notre modèle. Pour chacune d'entre elles seront exposés les paramètres utilisés, les résultats obtenus pour les différents scénarios et les représentations graphiques associées.

#### 3.5.6.1. Synthèse des résultats par unité fonctionnelle

Cette partie présente des analyses de sensibilité significatives permises par notre modèle. Pour chacune d'entre elles seront exposés les paramètres utilisés, les résultats obtenus pour les différents scénarios et les représentations graphiques associées.

Total annualisé des impacts unitaires	Consommation de ressources (kg Sb eq.)	Émissions de GES (kg CO <sub>2</sub> eq.)	Consommation d'eau (m <sup>3</sup> eq.)	Consommation d'énergie primaire (MJ)	Consommation électrique (kWh)	Production de DEEE (kg)
Logement « smart low »	0,002	68,608	333,966	5914,484	376,880	0,226
Logement « smart medium »	0,003	130,167	579,764	11792,142	762,290	1,741
Logement « smart future »	0,006	243,139	1020,947	22773,174	1482,550	3,004

Tableau 61 : Impacts annuels unitaires brut des équipements numériques associées aux différents profils de logements connectés.



### 3.5.6.2. Scénarios 2020

Ce premier ensemble de scénarios présente la configuration suivante :

- 5% du parc résidentiel en « smart low » ;
- Année de référence : 2020.

Transformer 5% du parc résidentiel en « smart low » en région Grand Est a les impacts suivants :

Scénario 2020	Part de logements « smart low » à 5%
Consommation de ressources abiotiques (kg Sb eq.)	226
Émissions de GES (kg CO <sub>2</sub> eq.)	8 569 315
Consommation d'eau (m <sup>3</sup> eq.)	41 713 137
Consommation d'énergie primaire (MJ)	738 732 037
Consommation électrique (kWh)	47 073 139
Production de DEEE (kg)	28 258

Tableau 62 : Impacts annuels brut des équipements numériques, scénario 2020.

Plusieurs scénarios sont appliqués sur les économies d'énergie (EE) et sur les effets rebond (EF) pour observer les variations sur la consommation d'énergie finale d'un logement au profil « smart low ».

Les effets sont modulés de la façon suivante :

- EE = 0%, EF = 0%
- EE = 2%, EF = 0%
- EE = 4%, EF = 0%
- EE = 6%, EF = 0%
- EE = 2%, EF = 72%
- EE = 4%, EF = 72%
- EE = 6%, EF = 72%
- EE = 2%, EF = 86%
- EE = 4%, EF = 86%
- EE = 6%, EF = 86%

Le profil « smart low » représente une consommation électrique annuelle supplémentaire de 377 kWh dû aux équipements ajoutés. Ces équipements permettent des économies d'énergie sur la consommation d'énergie finale liée au chauffage si des comportements vertueux sont adoptés par les habitants d'un foyer.

Cette étude se concentre sur les effets de solutions de maison connectée au niveau du chauffage du logement, qui représente 13 688 kWh/logement en 2020, soit 74% de la consommation de référence. C'est sur cette assiette que sont appliqués les gains d'efficacité énergétique. À ce titre, nous obtenons la consommation d'énergie finale d'un logement en fonction de son profil.

EE = 0%, EF = 0%	Logement de référence	Logement « smart low »	Logement « smart medium »	Logement « smart future »
Consommation d'énergie finale par logement en 2020, en kWh	18 498	18 875	19 260	19 981

Tableau 63 : Consommation énergétique par logement en 2020, par profil de logement connecté.



Les variations permettent d'obtenir l'impact sur la consommation d'énergie finale d'un logement « smart low »

En kWh	Référence	EE= 0% / EF = 0%	EE = -2% / EF = 0%	EE = -4% / EF = 0%	EE = -6% / EF = 0%	EE = -2% / EF = 72%	EE = -4% / EF = 72%	EE = -6% / EF = 72%	EE = -2% / EF = 86%	EE = -4% / EF = 86%	EE = -6% / EF = 86%
Consommation d'énergie finale en 2020 avec 5% de logements « smart low »	18 498	18 875	18 601	18 327	18 054	18 798	18 722	18 645	18 837	18 798	18 760
Différence		102%	101%	99%	98%	102%	101%	101%	102%	102%	101%

Tableau 64 : Consommation énergétique d'un logement smart-low en 2020, en fonction des économies d'énergie et de l'effet rebond

Appliqués au niveau du parc résidentiel régional, les résultats sur la consommation présentent les mêmes variations.

En kWh	EE= 0% / EF = 0%	EE = -2% / EF = 0%	EE = -4% / EF = 0%	EE = -6% / EF = 0%	EE = -2% / EF = 72%	EE = -4% / EF = 72%	EE = -6% / EF = 72%	EE = -2% / EF = 86%	EE = -4% / EF = 86%	EE = -6% / EF = 86%
Consommation d'énergie supplémentaire due à la « smartification »	47 073 139	47 073 139	47 073 139	47 073 139	47 073 139	47 073 139	47 073 139	47 073 139	47 073 139	47 073 139
Gain d'efficacité pour le chauffage	0	-34 193 225	-68 386 450	-102 579 675	-34 193 225	-68 386 450	-102 579 675	-34 193 225	-68 386 450	-102 579 675
Effet rebond pour le chauffage	0	0	0	0	24 619 122	49 238 244	73 857 366	29 406 174	58 812 347	88 218 521
Effet net sur la consommation d'énergie des maisons	47 073 139	12 879 914	-21 313 311	-55 506 536	37 499 036	27 924 933	18 350 830	42 286 088	37 499 036	32 711 985

Tableau 65 : Impact de la « smartification » sur la consommation énergétique du parc résidentiel, scénario 2020.

Les résultats ci-dessus indiquent qu'il faut au moins dépasser les 2 % d'économies d'énergie dans les foyers connectés pour compenser la consommation électrique supplémentaire induite par les dispositifs connectés. Sans aucun effet rebond, des économies d'énergie situées à 4 %, 6 % et au-delà produisent des économies d'énergie nettes mais marginales par rapport à la consommation d'énergie finale du secteur résidentiel (169 GWh de gains par rapport à 42 019 GWh en 2020). Si nous reprenons les résultats de Belaid et al indiquant un effet rebond direct de 72 % et 86 % alors il n'est plus possible d'obtenir des gains nets et les foyers connectés augmentent la consommation énergétique du secteur résidentiel de façon marginale (213 GWh de consommation supplémentaire par rapport à 42 019 GWh en 2020). Le modèle avec les paramètres exposés ci-dessus met en avant la nécessité de réduire la consommation électrique des équipements connectés dans les maisons pour obtenir des gains nets même avec peu d'économies d'énergie réalisées mais aussi la nécessité d'empêcher l'apparition d'effets rebond via des politiques publiques correspondantes. En dernière analyse, les effets positifs et négatifs produits par la solution restent marginaux à l'échelle du secteur résidentiel.

Dans le graphique ci-dessous les barres jaunes permettent de voir le résultat net d'un profil « smart low » sur la consommation d'énergie d'un logement.



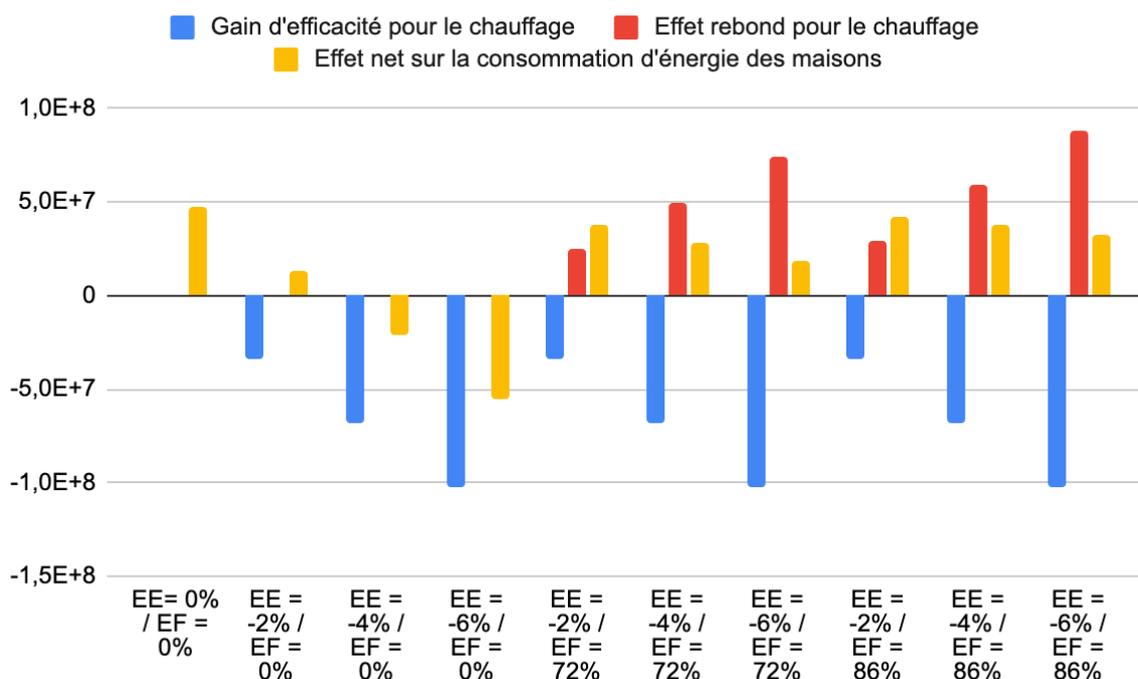


Figure 36 : Impact de la « smartification » sur la consommation énergétique du parc résidentiel, scénario 2020, en kWh

### 3.5.6.3. Scénarios 2030

Ce scénario présente la configuration suivante :

- 15% du parc résidentiel en « smart low »
- 4% du parc résidentiel en « smart medium »
- 1% du parc résidentiel en « smart future »
- Année pour l'évaluation : 2030
- Taux d'évolution annuel du nombre de logements : +0,82%
- Réduction de la consommation d'énergie finale du résidentiel : -28% [par rapport à 2020 (42 019 GWh) en suivant l'objectif du SRADDET (30050 GWh)]

Selon ces paramètres, transformer le parc résidentiel en logements « smart » en région Grand Est en 2030 présente les impacts suivants. Un scénario à 5% en smart low est aussi donné à titre indicatif.

Scénario 2030	Part de logements « smart » (15% SL, 4% SM, 1% SF)	Part de logements « smart low » à 5%
Consommation de ressources abiotiques (kg Sb eq.)	1 245	245
Émissions de GES (kg CO <sub>2</sub> eq.)	48 599 335	9 298 503
Consommation d'eau (m <sup>3</sup> eq.)	226 322 319	45 262 629
Consommation d'énergie primaire (MJ)	4 300 626 408	801 592 906
Consommation électrique (kWh)	276 073 165	51 078 730
Production de DEEE (kg)	362 173	30 662

Tableau 66 : Impacts annuels brut des équipements numériques, scénario 2030 et scénario smart-low 5%.



Plusieurs scénarios sont appliqués sur les économies d'énergie (EE) et sur les effets rebond (EF) pour observer les variations sur la consommation d'énergie finale des logements répondant aux trois profils.

Les effets sont modulés de la façon suivante :

- EE = 0%, EF = 0%
- EE = 2%, EF = 0%
- EE = 4%, EF = 0%
- EE = 6%, EF = 0%
- EE = 2%, EF = 72%
- EE = 4%, EF = 72%
- EE = 6%, EF = 72%
- EE = 2%, EF = 86%
- EE = 4%, EF = 86%
- EE = 6%, EF = 86%

En partant du principe que la région atteint son objectif de consommation d'énergie finale pour le secteur résidentiel en 2030, la consommation d'énergie finale baisse de façon importante et définit un nouveau scénario de base à partir duquel nous projetons les scénarios 2030.

EE = 0%, EF = 0%	Logement de référence	Logement « smart low »	Logement « smart medium »	Logement « smart future »
Consommation d'énergie finale par logement en 2030, en kWh	13 319	13 695	14 081	14 801

Tableau 67 : Consommation énergétique par logement en 2030, par profil de logement connecté.

Les variations permettent d'obtenir l'impact sur la consommation d'énergie finale du parc résidentiel avec la configuration citée plus haut.

En kWh - 2030	Référence	EE= 0% / EF = 0%	EE = -2% / EF = 0%	EE = -4% / EF = 0%	EE = -6% / EF = 0%	EE = -2% / EF = 72%	EE = -4% / EF = 72%	EE = -6% / EF = 72%	EE = -2% / EF = 86%	EE = -4% / EF = 86%	EE = -6% / EF = 86%
Conso. d'énergie finale par logement « smart low »	13 319	13 695	13 422	13 148	12 874	13 619	13 542	13 465	13 657	13 619	13 580
Différence		103%	101%	99%	97%	102%	102%	101%	103%	102%	102%
Conso. d'énergie finale par logement « smart medium »		14 081	13 807	13 533	13 260	14 004	13 928	13 851	14 043	14 004	13 966
Différence		106%	104%	102%	100%	105%	105%	104%	105%	105%	105%
Conso. d'énergie finale par logement « smart future »		14 801	14 527	14 254	13 980	14 724	14 648	14 571	14 763	14 724	14 686
Différence		111%	109%	107%	105%	111%	110%	109%	111%	111%	110%

Tableau 68 : Consommation énergétique d'un logement en 2030, par type de logement et en fonction des économies d'énergie et de l'effet rebond



De façon similaire au scénario 2020, la consommation d'énergie des logements intelligents augmente au niveau régional sauf quand les économies d'efficacité dépassent 4% et s'il n'y a pas d'effet rebond.

En kWh	EE= 0% / EF = 0%	EE = -2% / EF = 0%	EE = -4% / EF = 0%	EE = -6% / EF = 0%	EE = -2% / EF = 72%	EE = -4% / EF = 72%	EE = -6% / EF = 72%	EE = -2% / EF = 86%	EE = -4% / EF = 86%	EE = -6% / EF = 86%
Consommation d'énergie	276 073 165	276 073 165	276 073 165	276 073 165	276 073 165	276 073 165	276 073 165	276 073 165	276 073 165	276 073 165
Gain d'efficacité pour le chauffage	0	-148 411 306	-296 822 612	-445 233 918	-148 411 306	-296 822 612	-445 233 918	-148 411 306	-296 822 612	-445 233 918
Effet rebond pour le chauffage	0	0	0	0	106 856 140	213 712 281	320 568 421	127 633 723	255 267 446	382 901 170
Effet net sur la conso. d'énergie des maisons	276 073 165	127 661 859	-20 749 447	-169 160 753	234 518 000	192 962 834	151 407 668	255 295 583	234 518 000	213 740 417

Tableau 69 : Impact de la « smartification » sur la consommation énergétique du parc résidentiel, scénario 2030.

Dans le graphique ci-dessous les barres jaunes permettent de voir le résultat net sur la consommation d'énergie d'un logement avec le mix de profils renseignés.

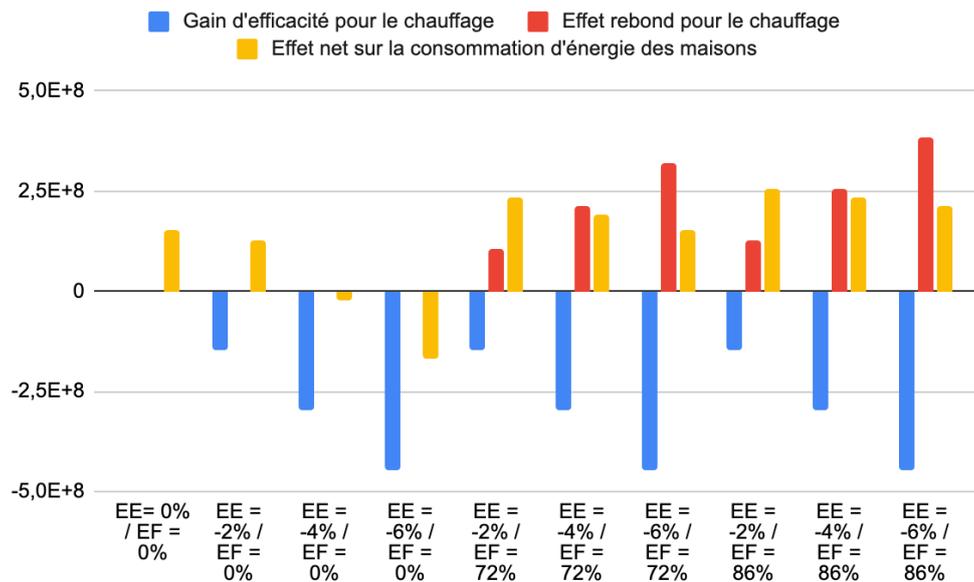


Figure 37 : Impact de la « smartification » sur la consommation énergétique du parc résidentiel, scénario 2030, en kWh

### 3.5.6.4. Comparaison des scénarios

La configuration du parc résidentiel en 2030 inclut des logements type « smart medium » ou « smart future » avec un taux d'équipement connecté et une consommation énergétique plus élevés. Ainsi, les effets nets de la « smartification » sur la consommation d'énergie du parc résidentiel en 2030 impliquent une augmentation bien plus importante que pour les scénarios 2020. Sans effet rebond, des gains peuvent être obtenus à partir de 4% d'économies d'énergie obtenues grâce aux solutions « smart home » dans les deux cas.



## Effet net sur la consommation d'énergie des logements des scénarios 2020 et 2030

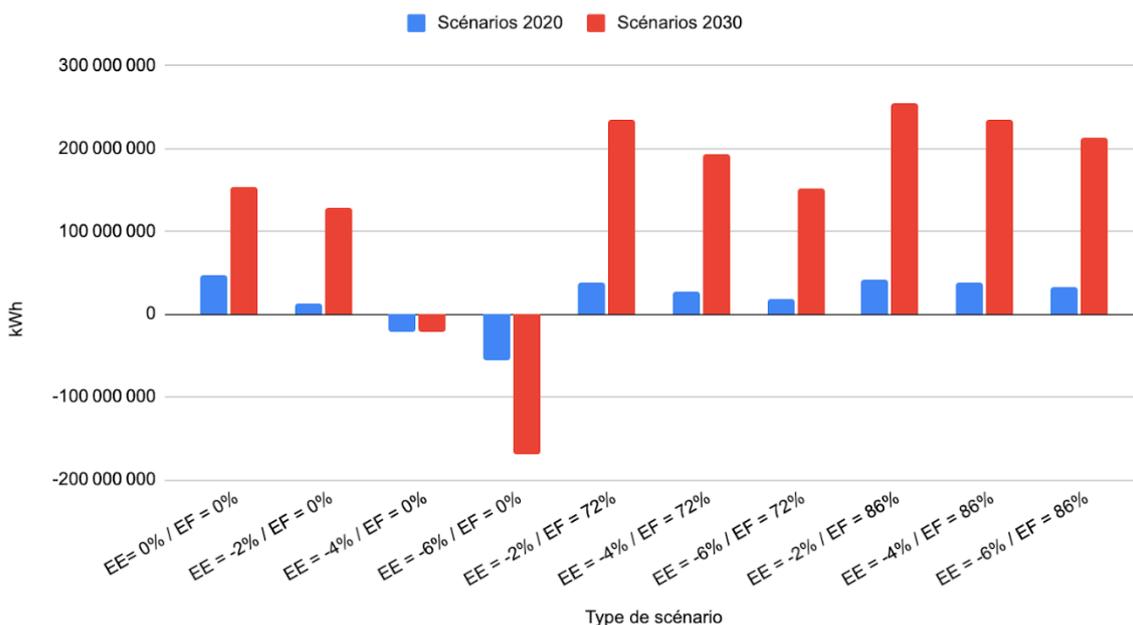


Figure 38 : Impacts net de la « smartification », scénarios 2020 et 2030, en kWh

### 3.5.6.5. Interprétation

Les différents profils de « maisons connectées » mis au point dans cette étude montrent que plus un logement inclut des équipements connectés plus il augmentera son empreinte environnementale sur tous les indicateurs étudiés. Si les gains obtenus se concentrent en grande partie sur la consommation d'énergie finale, certains indicateurs comme la consommation de ressources abiotiques ou la production de DEEE ne pourront pas être compensés, ils constituent des pertes sèches.

En raison de la consommation d'énergie induite par l'ajout de nouveaux équipements, les habitants d'un logement « smartifié » doivent entreprendre des économies d'énergie afin de compenser au moins cette nouvelle consommation. Dans les résultats obtenus, il est nécessaire de dépasser 3,5% d'économies d'énergie afin de compenser la consommation induite par un profil « smart low », 6% pour un profil « smart medium », et presque 10% pour un profil « smart future ». S'il y a des effets rebond alors les économies d'énergie doivent être encore plus élevés afin d'atteindre une consommation d'énergie finale du logement moindre. Dans le modèle, il n'y a pas de gains sur la consommation d'énergie avec les effets rebond renseignés (72 à 86%). À titre indicatif, avec un effet rebond de 50%, il est nécessaire d'avoir 7% d'économies d'énergie pour revenir à la consommation finale du logement « pre-smartification ».

À l'échelle territoriale et pour les scénarios 2020, les interprétations sont similaires. À moins d'obtenir des économies d'énergie importantes et de contrôler les effets rebond, la « smartification » du parc résidentiel en région Grand Est ne semble pas contribuer à une réduction de la consommation d'énergie finale du secteur résidentiel. Avec des économies d'énergie à hauteur de 2 à 6% et sans effet rebond, la « smartification » semble contribuer de façon marginale à cette réduction.

Dans le cadre des scénarios 2030, une plus grande « smartification » du parc résidentiel, notamment avec des profils de logement très connectés (« smart medium », « smart future »), implique une empreinte environnementale plus élevée. Ainsi des gains bien plus élevés doivent être obtenus pour compenser cette nouvelle consommation. De même, si la région Grand Est atteint son objectif de réduction de la consommation d'énergie finale du secteur résidentiel en 2030, les solutions « smart home » représenteront une part relativement plus importante de la consommation électrique des logements.

Les réductions de consommation d'énergie sont possibles à partir du moment où la « smartification » du logement reste faible, si les économies d'énergie réalisées sont importantes (supérieure à 4% en général) et si les effets rebond sont maîtrisés (inférieurs à 50%).

### 3.5.6.6. Limites

Comme expliqué précédemment plusieurs effets sont absents de cette étude : les effets de substitution, d'induction ou ceux sur la flexibilité du réseau électrique. Inclure ces effets pourrait influencer positivement et négativement les résultats.

Cette étude ne prend pas en compte l'évolution du mix énergétique du secteur résidentiel dans la région Grand Est (en 2020, EnR : 9 006 GWh, produits pétroliers : 5 146 GWh, gaz naturel : 14 179 GWh, électricité : 12 593 GWh, chaleur commercialisée : 1 185 GWh). Toutefois, les effets étudiés se concentrent sur la consommation d'énergie finale et non sur les émissions de GES donc cette limite ne modifie pas l'interprétation des résultats. À partir du modèle existant il est possible de rajouter ce paramètre au scénario 2030 si nécessaire.

Les gains d'efficacité et l'évolution des équipements connectés n'ont pas été pris en compte. Cependant la consommation d'électricité des équipements connectés, notamment sur batterie, est relativement basse donc les gains d'efficacité affecteront de façon marginale les résultats obtenus.

### 3.5.7. Conclusions

Le parc résidentiel en région Grand Est à la particularité d'être parmi les plus vieux de France, d'avoir un nombre conséquent de foyers en précarité et vulnérabilité énergétique (1 sur 4) et de disposer d'un taux important de logements vacants (9,74%). De fait, l'amélioration du parc est un enjeu majeur pour opérer les transitions énergétique et écologique dans la région. Les objectifs du SRADDET visent une consommation d'énergie finale du secteur résidentiel à 30 050 GWh (année de référence 2012 (56 196 GWh)), et de rénover 40% des logements à 104 kWhEP/m<sup>2</sup> d'ici 2030. À ce titre, il était opportun d'évaluer le potentiel du déploiement de logements connectés (smart home) pour faciliter ces transitions.

Les résultats de cette étude dépendent fortement des hypothèses d'économies d'énergie et d'effets rebond. Aujourd'hui, les économies d'énergie permises par des solutions « smart home » seraient comprises entre 2 et 6% d'après la littérature scientifique étudiée, mais ces estimations concernent uniquement le chauffage des logements. Les autres économies d'énergie potentielles restent à définir, si elles sont démontrées. Les effets rebond sur l'usage du chauffage illustrent la tension dans la promesse des « smart home » entre économies d'énergie et gain de confort. Dans le cas présent, nous étudions des économies d'énergie (et d'argent) qui amènent les occupants d'un logement à améliorer leur confort, c'est-à-dire d'augmenter la température de chauffe. L'étude française sur le sujet estime que cet effet rebond se situe entre 72 et 86%, et contrebalance une partie conséquente des économies d'énergie sans les annuler.

Avec les profils de « smart home » et les effets étudiés, l'intensité de la « smartification » du logement est un des facteurs les plus importants pour déterminer si des économies d'énergie sont possibles. Plus un logement dispose d'équipements connectés nécessaires aux solutions « smart home », plus la consommation d'énergie ajoutée est importante et plus les économies d'énergie doivent être élevées pour compenser. Pour les logements faiblement connectés (« smart low »), il est nécessaire d'obtenir au moins 3,5% d'économies d'énergie sans effet rebond pour compenser la nouvelle consommation d'énergie induite par les équipements connectés. En intégrant les effets rebond potentiels, les économies d'énergie doivent être encore plus élevées (supérieures à 6%).

Au niveau territorial, les effets des solutions « smart home » restent marginaux, même en enlevant les effets rebond. Dans les scénarios 2020, le plus optimiste permet des économies d'énergie à hauteur de 55 GWh, le plus pessimiste augmente la consommation d'énergie de 42 GWh, par rapport à une consommation du secteur de l'ordre de 42 000 GWh. Dans les scénarios 2030, le plus optimiste permet des économies d'énergie à hauteur de 170 GWh, le plus pessimiste augmente la consommation d'énergie de 255 GWh, par rapport à une consommation du secteur de l'ordre de 30 050 GWh. L'augmentation de l'écart en 2030 est liée à l'augmentation du parc résidentiel « smart ».

En dernière analyse, les logements faiblement connectés sont ceux qui permettent plus facilement d'obtenir des économies d'énergie. Si des effets rebond apparaissent la possibilité d'obtenir des gains se réduit rapidement. Dans tous les cas, les effets ainsi modélisés restent marginaux autant au niveau du logement que du parc résidentiel de la région

## 3.6. Fermes connectées

### 3.6.1. Choix du cas d'étude

Le déploiement de solutions dites de “fermes connectées” (smart farming technologies) a été exploré à la demande de l'ADEME Grand Est car les activités agricoles de tout type (du viticole, au céréalier en passant par le bovin) représentent une part importante de la dynamique régionale (1ère région française pour la production de céréales et d'oléo-protéagineux et pour la production viticole en valeur) avec plus de 40 000 exploitations. Aujourd'hui, ces solutions de nature et d'échelle multiples semblent encore peu déployées en région Grand Est mais de nombreuses offres se structurent, des plus matures (capteurs et récolte/gestion de données biologiques, hydriques ou autres) au plus avant-gardistes (robot viticole, etc.). Toutefois la grande variété de types d'exploitations, d'activités agricoles, d'applications technologiques rend l'exercice d'estimation des effets environnementaux nets particulièrement difficile. De même, très peu de données environnementales sont accessibles ou pertinentes dans le cadre de cet exercice. De façon similaire, les effets positifs ou négatifs estimés dans la littérature scientifique peuvent difficilement être appliqués au contexte agricole et climatique particulier de la région Grand-Est sans fragiliser profondément la méthodologie de cette étude. Il a donc été décidé de fournir, dans le cadre la présente étude, une revue de littérature du sujet et de définir les éléments méthodologiques nécessaires pour estimer les effets environnementaux de la numérisation de l'agriculture en région Grand Est, le jour où les conditions (accès aux données, enquêtes de terrain, etc.) seront réunies.

**Note : la littérature mobilisée au sein de cette partie est présentée directement dans les sections dédiées et n'est pas reprise en bibliographie globale de l'étude.**

### 3.6.2. Revue de littérature

La revue de littérature s'est orientée sur les termes suivants : « smart farming technologies », « SFT », « smart agriculture », « digital agriculture », « agriculture 4.0 », « life-cycle assessment », « sustainability ». Les études les plus récentes (moins de 5 ans) ont été privilégiées. Les plus vieilles publications faisant état des orientations de la numérisation du secteur agricole ont été intégrées afin d'obtenir une vue historique des tendances, des stratégies commerciales et des agendas internationaux à l'œuvre sur le sujet.

Année	Titre de la publication	Auteur(s)	Type
2023	Comparative Assessment of Environmental/Energy Performance under Conventional Labor and Collaborative Robot Scenarios in Greek Viticulture	Tziolas, E., Karapatzak, E., Kalathas, I., Lytridis, C., Mamalis, S., Koundouras, S., ... & Kaburlasos, V. G.	ACV
2022	Modelling soil emissions and precision agriculture in fertilization life cycle assessment-A case study of wheat production in Austria	Medel-Jiménez, F., Piringner, G., Gronauer, A., Barta, N., Neugschwandtner, R. W., Krexner, T., & Kral, I.	ACV
2022	Comparative Life Cycle Assessment of intra-row and inter-row weeding practices using autonomous robot systems in French vineyards	Pradel, M., de Fays, M., & Segueineau, C.	ACV
2022	Adoption of digital technologies in agriculture—an inventory in a european small-scale farming region	Gabriel, A., & Gandorfer, M.	Enquête de terrain
2022	Deep Learning in Controlled Environment Agriculture : A Review of Recent Advancements, Challenges and Prospects	Ojo, M. O., & Zahid, A.	Revue
2022	IoT-equipped and AI-enabled next generation smart agriculture: a critical review, current challenges and future trends	Qazi, S., Khawaja, B. A., & Farooq, Q. U.	Revue
2022	Environmental LCA of Precision Agriculture for Stone Fruit Production. Agronomy	Núñez-Cárdenas, P., Diezma, B., San Miguel, G., Valero, C., & Correa, E. C.	ACV
2022	Mobiliser la méthode de l'Analyse du Cycle de Vie pour évaluer l'impact environnemental des outils numériques en agriculture	Huck, C.	ACV
2021	Life Cycle Assessment of Autonomous Electric Field Tractors in Swedish Agriculture	Lagnelöv, O., Larsson, G., Larssolle, A., & Hansson, P.-A	ACV
2021	Machine Learning Applications for Precision Agriculture : A Comprehensive Review	Sharma, A., Jain, A., Gupta, P., & Chowdary, V.	Revue
2021	Review of the internet of things communication technologies in smart agriculture and challenges	Tao, W., Zhao, L., Wang, G., & Liang, R.	Revue



2021	Digital twins in smart farming	Verdouw, C., Tekinerdogan, B., Beulens, A., & Wolfert, S.	Apport méthodologique
2021	Digital agricultural technologies for food loss and waste prevention and reduction: Global trends, adoption opportunities and barriers	Benyam, A. A., Soma, T., & Fraser, E.	Revue
2021	Precision agriculture: Where do we stand? A review of the adoption of precision agriculture technologies on field crops farms in developed countries	Nowak, B.	Revue
2020	Role of IoT technology in agriculture: A systematic literature review	Farooq, M. S., Riaz, S., Abid, A., Umer, T., & Zikria, Y. B	Revue
2020	Experience versus expectation : Farmers' perceptions of smart farming technologies for cropping systems across Europe	Kernecker, M., Knierim, A., Wurbs, A., Kraus, T., & Borges, F.	Enquête de terrain
2020	Smart farming technology trends: economic and environmental effects, labor impact, and adoption readiness	Balafoutis, A. T., Evert, F. K. V., & Fountas, S.	Revue
2020	Life Cycle Assessment of Variable Rate Fertilizer Application in a Pear Orchard	Vatsanidou, A., Fountas, S., Liakos, V., Nanos, G., Katsoulas, N., & Gemtos, T.	ACV
2019	The LCA4CSA framework : Using life cycle assessment to strengthen environmental sustainability analysis of climate smart agriculture options at farm and crop system levels	Acosta-Alba, I., Chia, E., & Andrieu, N.	Apport méthodologique
2019	Development of IoT for smart agriculture a review	Lakhwani, K., Gianey, H., Agarwal, N., & Gupta, S.	Revue
2019	Cloud computing for IoT applications in climate-smart agriculture: A review on the trends and challenges toward sustainability	Symeonaki, E. G., Arvanitis, K. G., & Piromalis, D. D.	Revue
2019	A review of social science on digital agriculture, smart farming and agriculture 4.0: New contributions and a future research agenda	Klerkx, L., Jakku, E., & Labarthe, P.	Revue
2019	Uncertain impacts of new technologies : The case of digital agriculture and blockchains	Lemeilleur, S., Maître-d'Hôtel, É., Lepiller, O., & Hobeika, A.	Article
2018	Advances in greenhouse automation and controlled environment agriculture : A transition to plant factories and urban agriculture	R Shamshiri, R., Kalantari, F., Ting, K. C., Thorp, K. R., Hameed, I. A., Weltzien, C., ... & Shad, Z. M.	Revue
2014	A European perspective of innovations towards mitigation of nitrogen-related greenhouse gases	Winiwarter, W., Leip, A., Tuomisto, H. L., & Haastrup, P.	Revue

Tableau 70 : Liste des articles étudiés dans le cadre de la revue de littérature scientifique

## RESUME DES ARTICLES REVUES (PAR ANNEE DE PUBLICATION, DU PLUS RECENT AU PLUS ANCIEN)

**Tziolas et al.** présentent une ACV comparative des robots collaboratifs dans quatre vignobles grecs focalisée sur l'impact de la consommation d'énergie et des émissions de gaz à effet de serre. Les résultats montrent que les scénarios de robots collaboratifs pouvaient avoir un impact positif sur l'environnement et l'énergie par rapport aux stratégies conventionnelles. La consommation de combustibles fossiles et l'efficacité des robots sélectionnés sont les principales raisons de cet impact réduit, bien qu'il y ait des limites concernant leur fonctionnalité, leur durée de vie et leur production.

**Medel-Jiménez et al.** font une ACV comparative d'un système conventionnel de production de blé d'hiver avec et sans l'utilisation d'un capteur de culture pour le VRNA (Variable Rate Nitrogen Application), appliquée à une étude de cas autrichienne. Le potentiel de réchauffement climatique du processus de fertilisation était de 1 662,8 kg CO<sub>2</sub> eq/ha avec l'application conventionnelle d'azote contre 1 518,8 kg CO<sub>2</sub> eq/ha pour le plus faible des deux résultats VRNA, soit une réduction de 8,6 % due à la diminution de l'application d'engrais. Le système numérique a contribué pour moins de 1 % à l'ensemble des impacts évalués (changement climatique, particules fines, eutrophisation, acidification, toxicité).

**Pradel et al.** proposent une ACV comparative des pratiques de désherbage intra-rang et inter-rang à l'aide de systèmes robotiques autonomes dans trois vignobles français par rapport à un système conventionnel (tracteur). Cette étude montre que l'utilisation de solutions robotisées pour le désherbage en viticulture a un impact environnemental globalement plus important que les solutions conventionnelles en raison de : 1) la fabrication du robot, en particulier celle des moteurs et des câbles électriques, ainsi que des composants électroniques actifs et passifs ; 2) la durée de vie des robots, en particulier lorsque cette durée de vie est supposée courte, 3) la fonctionnalité des robots, 4) le transport du robot entre la ferme et la zone de culture.



**Gabriel et Gandorfer** étudient le taux d'adoption et d'usage des technologies numériques dans les fermes européennes de petite taille. À partir d'une enquête en ligne auprès des agriculteurs recueillant un total de 2 390 observations, dont 1 820 concernent l'agriculture de plein champ et 1 376 l'élevage, ils identifient trente technologies numériques ainsi que leur taux d'adoption. Les résultats obtenus auprès des agriculteurs en Bavière montrent des taux d'adoption potentiels de 15 à 20 % au cours des cinq prochaines années pour des technologies telles que la robotique d'étable, le contrôle des sections, les applications à taux variable et les cartes établies à partir de données satellitaires. L'utilisation établie des technologies d'entrée (par exemple, les systèmes de traite automatique, les enregistrements numériques sur le terrain, les systèmes de conduite automatique) a augmenté la probabilité d'adoption de technologies supplémentaires.

Application agricole	Application technologique	Taux d'adoption dans les petites exploitations (35 ha en moyenne) (solution achetée et utilisée)
Tous	Modèles de prévision et apps (météo, nuisibles)	38%
	Plateformes de communication et d'échange	23%
Cultures	Enregistrement numérique des champs	21%
	Système de pilotage automatique	17%
	FMIS (Farm Management Information Systems) - culture	13%
	Cartes depuis des données satellites	14%
	Contrôle de section (pulvérisateur, épandeur)	13%
	Systèmes lightbar	10%
	Production végétale à taux variable	<5%
	Fertilisant (azote) à taux variable	<5%
	Cartographie des rendements	<5%
	Drones	<5%
	Echantillonnage géo-référencé des sols	<5%
	Fertilisant à taux variable (basique)	<5%
	Ensemencage à taux variable	<5%
	Télémétrie	<5%
	Capteurs infrarouge (NIR) pour déterminer la qualité de la récolte	<5%
	Système de gestion des flottes	<5%
	Pilotage automatique des équipements de labour	<5%
	Capteurs infrarouge (NIR) pour épandage du lisier	<1%
	Technologies intelligentes (type Google Glass)	<1%
	Capteurs de test des sols	<1%
Robots agricoles (autonomes ou non)	<1%	
Elevage	Caméras (Grange)	17%
	FMIS (Farm Management Information Systems) - élevage	16%
	Capteurs de suivi du comportement	12%
Production laitière et de bovin	Approvisionnement automatique en fourrage	<5%
	Systèmes de traite automatique	15%
	Robot de nettoyage des lattes	7%
	Robot de poussée du fourrage	7%

Tableau 71 : Liste et taux d'adoption des applications technologiques par type d'application agricole d'après Gabriel et Gandorfer



**Ojo et al.** proposent une revue systématique des méthodes d'apprentissage profond (DL pour Deep Learning) appliquées à l'agriculture en environnement contrôlé (CEA pour Controlled Environment Agriculture). Les auteurs constatent que la majorité des études se concentrent sur les applications de DL dans les serres (82%), l'application principale étant l'estimation du rendement (31%) et le suivi de la croissance (21%).

**L'étude de Qazi et al.** proposent : 1) un résumé sur les avancées disponibles dans le domaine des systèmes d'agriculture intelligente grâce aux technologies de l'IoT et aux techniques d'IA ; 2) un examen critique de ces deux technologies disponibles et des défis liés à leur déploiement à grande échelle ; et 3) une discussion approfondie sur les tendances futures, y compris technologiques et sociales.

**Núñez-Cárdenas et al.** évaluent les performances environnementales et économiques des pratiques d'agriculture de précision sur la production de nectarines en faisant une ACV et en considérant un champ d'application cradle-to-farm (de la préparation des plants à la récolte en passant par toute la gestion de l'exploitation). Les résultats ont été comparés à l'application uniforme traditionnelle. La réduction des besoins en intrants associée à l'application des techniques d'application variable s'est traduite par une baisse significative des coûts économiques et des économies environnementales tout au long du cycle de vie du système de production. Ces économies se situent en moyenne entre 12 et 26 %.

**Huck** réalise l'ACV d'un système d'autoguidage pour tracteur utilisé pour le désherbage en viticulture. Il en résulte que le désherbage mécanique autoguidé a un bilan environnemental plus important que les autres pratiques de désherbage, mais surtout à cause du passage répété d'outils mécaniques dans la parcelle, l'outil numérique ne représentant qu'un faible impact comparé à l'ensemble du système étudié.

**L'ACV de Lagnelöv et al.** comparent les impacts de deux petits tracteurs électriques autonomes à batterie à ceux d'un tracteur conventionnel. Cette analyse comparée est faite sur onze facteurs de caractérisation, trois catégories de dommages et un score unique pondéré. Les résultats ont montré que, par rapport au tracteur conventionnel, le tracteur électrique à batterie avait un impact plus important dans toutes les catégories au cours de la phase de production, la production de la batterie étant le facteur le plus important, toutefois, sur l'ensemble du cycle de vie, son impact est moindre. Le potentiel de réchauffement climatique au cours du cycle de vie du tracteur électrique à batterie était de 102 kg CO<sub>2</sub> eq.ha/an contre 293 kg CO<sub>2</sub> eq.ha/an pour le système conventionnel.

**Sharma et al.** étudient l'usage d'apprentissage machine (ML, Machine Learning) au sein des technologies d'agriculture de précision. Les domaines concernés sont la prédiction des paramètres du sol tels que le carbone organique et la teneur en eau, la prédiction du rendement des cultures, la détection des maladies et des mauvaises herbes dans les cultures et la détection des espèces. Le ML et la vision par ordinateur sont examinés pour la classification d'un ensemble différent d'images de cultures afin de contrôler la qualité des cultures et d'évaluer le rendement. Cette approche peut être intégrée pour améliorer la production animale en prédisant les schémas de fertilité, en diagnostiquant les troubles alimentaires, le comportement du bétail sur la base de modèles ML utilisant les données collectées par les capteurs des colliers, etc. L'irrigation intelligente, qui comprend l'irrigation au goutte-à-goutte, et les techniques de récolte intelligentes sont également examinées.

**Tao et al.** font une revue permettant d'identifier les défis associés aux applications existantes d'agriculture intelligente basées sur l'IoT sous quatre aspects, à savoir le coût, les données, le système et l'appareil.

**Verdouw et al.** proposent de définir le concept de jumeaux numériques dans l'agriculture numérique et développe une typologie des différents types de jumeaux ainsi qu'un cadre d'analyse.

**Tomlinson et Kantar** comparent deux scénarios pour évaluer le concept de "ferme intelligente" : les fermes intérieures (indoor farming) (agriculture en environnement contrôlé, comme les fermes verticales) et les fermes extérieures (outdoor farming) (dans lesquelles l'environnement est moins contrôlé, mais géré par l'agriculture de précision). Ils estiment qu'il est peu probable qu'elles modifient fondamentalement le système alimentaire mondial, ou même de contribuer de manière substantielle à l'alimentation des populations.

**Benyam et al.** visent à définir le potentiel des technologies numériques dans le secteur agricole pour la prévention ou la réduction des pertes et des déchets alimentaires. Les résultats de l'étude montrent que les coûts d'investissement prohibitifs et la fracture numérique entre les adaptateurs de technologies limitent l'adoption à grande échelle des technologies numériques dans le secteur agricole. Là où l'adoption était évidente, la logique était centrée sur l'augmentation des gains économiques, la réduction des coûts de production alimentaire et/ou l'atténuation de l'insécurité alimentaire. La prévention des pertes et des gaspillages alimentaires a rarement été le principal moteur de l'adoption des technologies.

**Benjamin Nowak** fait une revue de l'agriculture de précision appliquée aux grandes cultures dans les pays développés. L'auteur estime que les systèmes de GPS sont utilisés à hauteur de 60 à 80% en Europe en 2016. Il note aussi que les taux d'adoption sont plus élevés en Amérique du Nord qu'en Europe et fait trois hypothèses pour expliquer cette différence : l'adoption successive des technologies, le rejet des technologies complexes et la préférence pour les technologies améliorant les conditions de travail.

Farooq et al. proposent de synthétiser la littérature sur l’IoT dédiée au secteur agricole. À partir des 67 articles sélectionnés, les auteurs établissent une catégorisation de l’IoT à partir de leurs fonctions et de leurs applications.

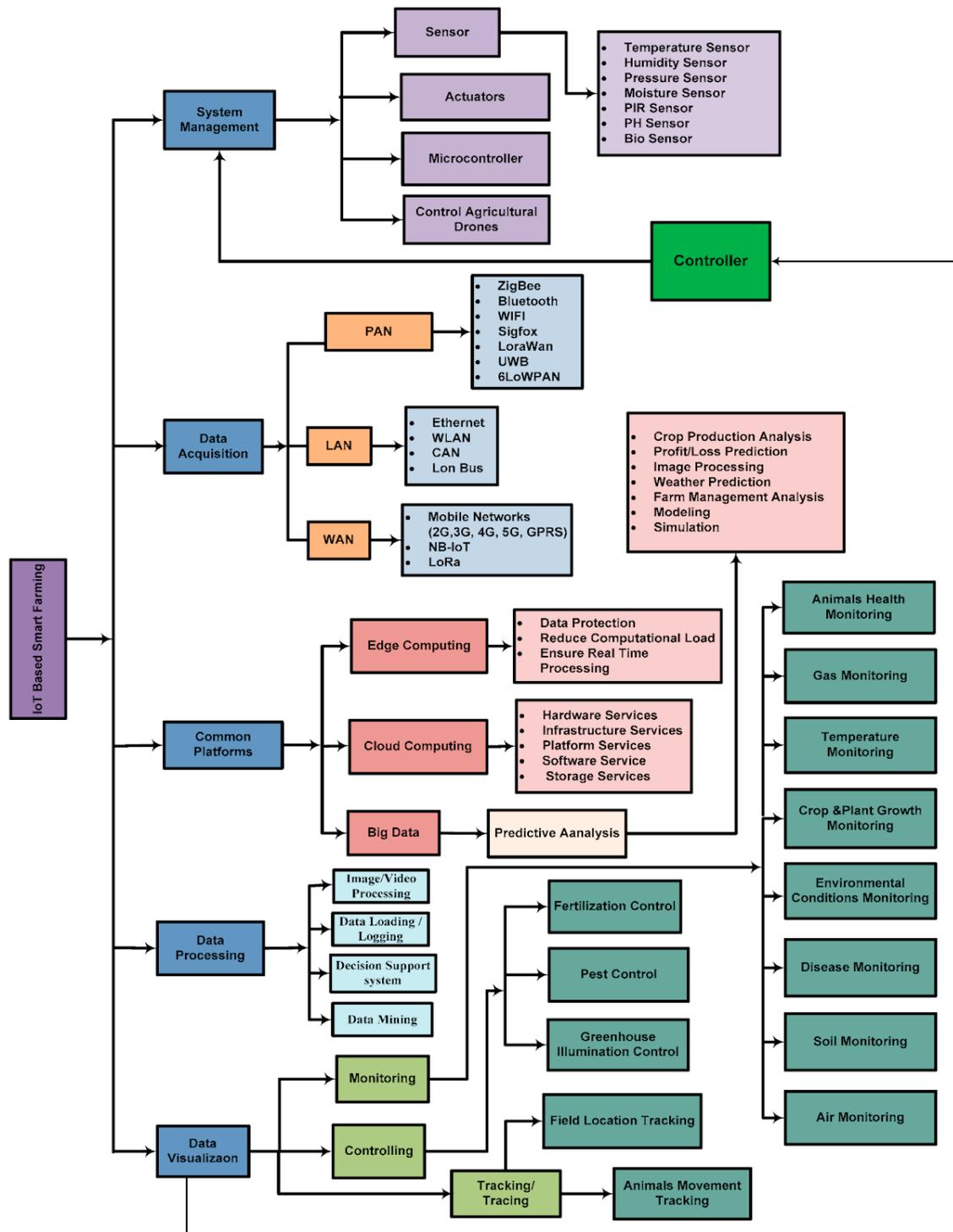


Figure 39 : IoT smart farming framework d’après Farooq et al. (2020)

Kernecker et al. ont étudié le taux d’adoption des Smart Farming Technologies (SFT) au sein des fermes européennes. D’après les entretiens de 287 agriculteurs issus de 7 pays européens, 50% ont adopté des SFT et 50% se sont abstenus. Il y a toutefois un manque de confiance dans les SFT au sein des deux groupes et les experts ont tendance à être plus optimistes sur l’usage et la pertinence des SFT que les agriculteurs.

L’étude de Balafoutis et al. vise à synthétiser l’ensemble des Smart Farming Technologies (SFT) présent dans la littérature scientifique et les produits mis sur le marché. Ils distinguent 1064 SFT répartis selon les besoins du secteur agricole.



Finalement, ils regroupent aussi un ensemble d'indicateurs de performance (KPI) associés à des catégories d'impacts et soulignent le manque de recherches lié à la quantification de ces impacts.

Challenge	Relevant Smart Farming Technologies
Resource efficiency (e.g., water, nutrients, pesticides, labor)	sensors and networks big data analytic tools DSS (Decision Support System) FMIS (Farm Management Information System) intelligent water application systems VRA fertilization/pesticides systems RFID tags
Management/prevention of diseases, weeds, etc.	early warning sensors and networks specific farm machines FMIS DSS for infestation management VRA spraying system
Risk management (e.g., food safety, pesticide residue elimination and emission of agro-chemicals, etc.)	sensors (e.g., weather station, multispectral cameras, thermal cameras, etc.) traceability technology barcodes, QR codes, RFID real-time recording systems
Compliance with legislation and standards (greening of CAP; regulations on soil management, pesticide, fertilizer, and water use)	recording technologies web-based, open, and interoperable standards for end-to-end tracking systems
Collaboration across the supply chain (supply chain of companies and processors)	smart traceability system smart logistics system various analytical tools

Tableau 72 : Défis et SFT associés d'après Balafoutis et al. (2020)

Facteurs environnementaux	Facteurs économiques	Facteurs liés au travail
Biodiversité des sols	Productivité	Temps de travail
Biodiversité	Qualité du produit	Stress des fermiers
Utilisation de fertilisants	Revenu	Travail lourd
Utilisation de pesticides	Coûts des intrants	Blessures liées au travail
Utilisation d'eau pour l'irrigation	Coûts variables	Accidents
Emissions de CH <sub>4</sub>	Gaspillage des cultures	
Emissions de CO <sub>2</sub>	Consommation d'énergie	
Emissions de N <sub>2</sub> O		
Emissions de NH <sub>3</sub>		
Lessivage NO <sub>3</sub>		
Résidus de pesticides		
Pression des adventices, nuisibles et des maladies		

Tableau 73 : Indicateurs clés de performance des facteurs économiques, environnementaux et liés au travail d'après Balafoutis et al. (2020)



**L'ACV de Vatsanidou et al.** compare les effets environnementaux liés à différents taux d'applications de fertilisants dans une culture de poiriers. Un système Cradle-to-Gate avec une unité fonctionnelle (UF) de 1 kg de poires a été analysé en incluant des données primaires sur deux années de récolte, ainsi que toutes les émissions pendant la culture des poires et les chaînes d'approvisionnement de tous les intrants, en les projetant sur la durée de vie du verger. Les résultats ont montré que le changement climatique, la pénurie d'eau, les combustibles fossiles et la formation de particules étaient les catégories d'impact qui contribuaient le plus à l'impact environnemental global de la durée de vie des vergers de poiriers.

**Acosta-Alba et al.** proposent une méthode d'ACV adaptée à la climate-smart agriculture. Ils proposent un double niveau d'analyse : l'exploitation agricole et le principal système de production de cultures de rente/élevage. Ils insistent sur la définition d'un scénario de référence auquel comparer différentes alternatives en cohérence avec une stratégie d'atténuation, d'adaptation et de productivité.

**Lakhwani et al.** listent les applications IoT dans le secteur agricole. Ils distinguent 6 types d'application : capteurs, technologie RFID, technologies de transmission radio, technologies d'irrigation intelligente, technologies de contrôle qualité et sécurité, techniques de semis et de pulvérisation de précision. Leur revue synthétise aussi cinq bénéfices liés à l'usage de l'IoT en agriculture : efficacité des intrants (amélioration de l'efficacité des intrants agricoles tels que le sol, l'eau, les engrais, les pesticides, etc.), réduction des coûts (coûts de production), rentabilité, durabilité, sécurité alimentaire, protection de l'environnement.

**Symeonaki et al.** étudient l'intégration de solutions IoT basées sur le cloud dans l'agriculture. D'après les auteurs, ces solutions présentent de nombreux avantages (gestion efficace des données, mise à disposition de ces dernières aux parties prenantes, communication et interaction efficace, aide à la maintenance, possibilités de transférer des emplois ruraux vers des emplois urbains grâce au cloud, soutien à la croissance économique). Les limites de ces solutions sont liées aux enjeux de sécurité, à l'hétérogénéité des infrastructures télécom pour couvrir les zones agricoles, la complexité des services actuels, le manque d'homogénéité des jeux de données, et la formation à grande échelle des fermiers et du personnel agricole.

**Dans leur revue de littérature Klerkx et al.** identifient cinq groupes thématiques : 1) adoption, utilisation et adaptation des technologies numériques dans les exploitations agricoles ; 2) effets de la numérisation sur l'identité, les compétences et le travail des agriculteurs ; 3) pouvoir, propriété, vie privée et éthique dans la numérisation des systèmes de production agricole et des chaînes de valeur ; 4) numérisation et systèmes de connaissances et d'innovation agricoles (AKIS) ; 5) économie et gestion des systèmes de production agricole et des chaînes de valeur numérisées. Grâce à cette cartographie, d'autres thématiques de recherche, pour l'instant peu développées, sont mises en avant : 1) conceptualisations des systèmes socio-cyber-physiques-écologiques de l'agriculture numérique ; 2) processus politiques de l'agriculture numérique ; 3) voies de transition de l'agriculture numérique ; 4) géographie mondiale du développement de l'agriculture numérique.

**Lemeilleur et al.** étudient l'intégration possible de technologies blockchain dans le monde agricole, notamment pour le suivi des chaînes d'approvisionnement, des titres de propriété ou pour l'obtention de crédits. Ils notent que l'intégration de ces technologies entraîne de nombreux risques économiques et sociaux dans les pays en développement. Vu qu'une connexion internet est requise, une grande partie des zones de production agricole sont exclues de facto ainsi que les fermiers qui ne disposent pas des ressources ou des compétences nécessaires. La généralisation de tels systèmes dans les pays en développement est pour l'instant peu probable d'après les auteurs.

**Shamshiri et al.** passent en revue les différentes techniques d'agriculture urbaine et d'agriculture en environnement contrôlé (CEA). Ils listent les facteurs permettant de produire tout au long de l'année avec ce type de procédés : la forme de la structure, le paysage, la topographie, le sol, les conditions climatiques, le système de contrôle du microclimat, la luminosité, le rayonnement solaire intercepté, les brise-vent, la disponibilité de l'électricité, des routes et de la main-d'œuvre. Ils soulignent que le coût de l'augmentation du niveau d'automatisation par rapport à l'augmentation de la rentabilité est un élément clé à prendre en compte car il est aujourd'hui sous-étudié.

Lors de leur revue des innovations technologiques permettant de réduire l'utilisation d'azote en 2014, **Winiwarter et al.** soulignent que de nombreuses technologies sont potentiellement accessibles mais auront des effets secondaires importants et pourraient augmenter la demande en énergie. Les chercheurs impliquent qu'un changement de modèle agricole sera nécessaire quelle que soit la direction prise.

Type of innovation	Land requirement	Energy need	Costs	N-release to environment	N <sub>2</sub> O and CH <sub>4</sub> emissions saved	Time until could be deployed widely in Europe (in technology generations)
Precision farming	Small reduction	Small reduction	Small savings	Medium reduction	Small N <sub>2</sub> O reductions	2 generations
Genetically modified crops	Small reduction	Small reduction	Modest savings	Small reduction	Small N <sub>2</sub> O reductions	2 generations
Urban gardening	Small reduction	Small reduction	Modest savings	No change	No change	1 generation
Vertical farming	Immense reduction	Immense increase	High costs	Immense reduction	Medium N <sub>2</sub> O reductions	3 generations
Cultured meat	Immense reduction	Medium increase	Modest increase	Considerable reduction	Medium N <sub>2</sub> O/CH <sub>4</sub> reductions	3 generations
Diet change	Considerable reduction	Small reduction	Modest savings	Medium reduction	Medium N <sub>2</sub> O/CH <sub>4</sub> reductions	1 generation
Measures in industry and combustion	–	Small increase	Small costs	Considerable reduction	Small N <sub>2</sub> O reductions	2 generations
COMBINATION OF ABOVE	Immense reduction	Considerable increase	High costs	Considerable reduction	Considerable N <sub>2</sub> O/CH <sub>4</sub> reductions	estimate for late 21st century

Tableau 74 : Effets des innovations technologiques visant à réduire l'utilisation d'azote (Winiwarter et al., 2014)

## LITTÉRATURE INSTITUTIONNELLE COMPLÉMENTAIRE

Au-delà de la revue de littérature scientifique, il a semblé important de compléter cette approche avec une revue du positionnement politique et institutionnel en Europe sur la question de l'agriculture numérique. Cela permet de comprendre en partie l'orientation des investissements publics et privés et des cas d'usage mis en avant et offre ainsi d'autres indices sur l'adoption potentielle de ces technologies.

Année	Titre de la publication	Auteur(s)	Type
2022	Towards a green and digital future	Muench, S., Stoermer, E., Jensen, K., Asikainen, T., Salvi, M. and Scapolo, F.	Document d'orientation politique
2022	Usages du numérique en agriculture : enquête auprès de 98 exploitations ayant des grandes cultures en région Occitanie	Schnebelin, E., Valiente, C., Touzard, J-M., Labarthe, P.	Enquête de terrain / Rapport
2022	Aligning Digitalization with Agroecological Principles to Support a Transformation Agenda	Hilbeck, A., McCarrick, H., Tisselli, E., Pohl, J., & Kleine, D.	Document d'orientation politique
2020	The future (s) of digital agriculture and sustainable food systems: An analysis of high-level policy documents	Lajoie-O'Malley, A., Bronson, K., van der Burg, S., & Klerkx, L.	Analyse des orientations politiques

Tableau 75 : Liste des articles étudiés dans le cadre de la revue de littérature complémentaire



Towards a green and digital future est un document d'orientation politique visant à présenter la gestion réussie des transitions verte et numérique comme la pierre angulaire d'un avenir durable, équitable et compétitif pour l'Union Européenne. À ce titre, ce rapport propose un résumé des technologies numériques appliquées à une agriculture durable jusqu'en 2050.

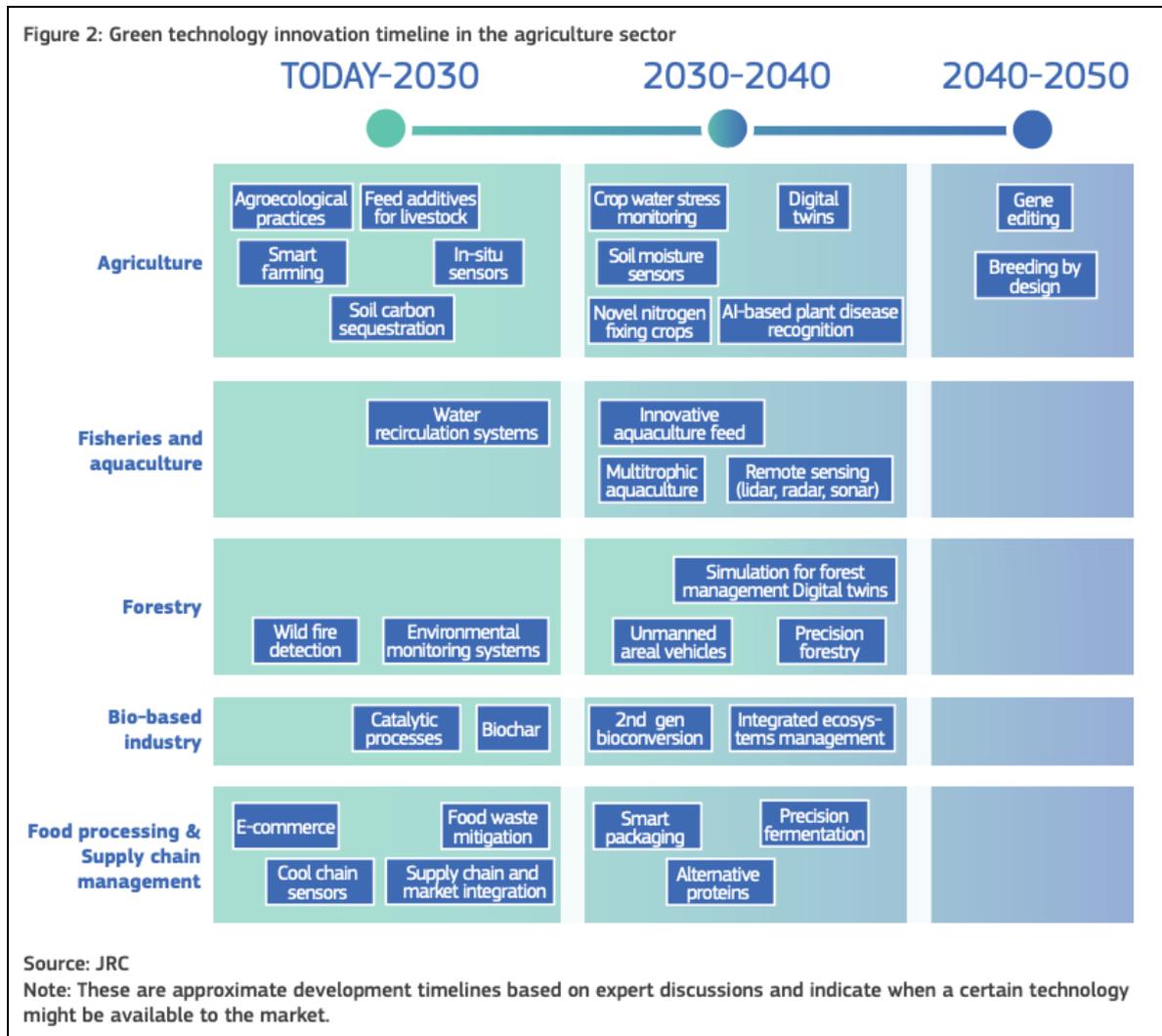


Tableau 76 : Calendrier des innovations en matière de technologies vertes dans le secteur agricole (JRC, 2022)



Schnebelin et al. rendent compte de l'usage des technologies numériques par les agriculteurs en Occitanie sur un échantillon de 98 exploitations avec une surface moyenne de 162 hectares. Le rapport montre une utilisation répandue des outils numériques.

Application technologique	Taux d'adoption dans des exploitations de 162 ha en Occitanie
GPS	60%
Autoguidage	44%
Techniques de coupure de tronçons	39%
Station météo connectée	32%
Cartes de modulation	33%
Modulation d'azote	27%
Modulation de semence	6%
Tensiomètres connectés	14%
Contrôleur de rendement	18%
OAD pour traitements	11%
Technologies d'irrigation connectée	15%
Logiciel de gestion	63%

Tableau 77 : Panorama de l'usage des technologies numériques et internet (Schnebelin et al. 2021)

Le rapport d'Hilbeck et al. critique les formes actuelles de numérisation de l'agriculture industrielle et ses outils TIC (technologies de l'information et de la communication) mis en œuvre en promettant des gains d'efficacité et des objectifs de durabilité. Ils étudient ensuite comment les outils TIC pourraient soutenir la transformation de ces formes industrielles d'agriculture en formes agroécologiques véritablement durables. Ils considèrent que les technologies numériques peuvent avoir des effets positifs s'elles suivent un modèle agroécologique et relèvent les barrières à cette orientation.

Lajoie-O'Malley et al. étudient les rôles imaginés pour ces technologies par les acteurs internationaux ayant la capacité d'influencer l'avenir des systèmes alimentaires. Les auteurs analysent des documents politiques ainsi que des actes de conférences sur l'agriculture numérique produits par la Banque mondiale, l'Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO) et l'Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE). Ils constatent que le récit dominant dans leur jeu de données soutient le statu quo de l'agriculture et des systèmes alimentaires industriels mondiaux.

### 3.6.3. Définition des besoins méthodologiques

Il manque aujourd'hui trop d'éléments et de données pour faire une évaluation des effets environnementaux de l'agriculture numérique en région. L'objet de cette étude est donc d'identifier les clés et les éléments nécessaires pour qu'une telle évaluation puisse avoir lieu plus tard à partir d'une base méthodologique solide.

#### 3.6.3.1. Définition du terme

Derrière le terme "fermes connectées", un grand nombre d'appellations sont mobilisées dans la littérature scientifique et les documents industriels ou politiques : Digital Agriculture (DigiAg), Climate-Smart Agriculture (CSA), Precision Agriculture (PA), Smart Farming Technologies (SFT), smart agriculture, agriculture 4.0, Controlled Environment Agriculture (CEA). Ces termes recouvrent des positionnements politiques ou industriels, des discours marketing, des spécialisations de recherche, etc. Dans le cadre d'une étude sur les effets environnementaux de la numérisation en agriculture, il est recommandé d'utiliser les termes les plus agnostiques possibles et les moins utilisés comme doctrine industrielle ou politique. Dans ce cadre, le terme **Smart Farming Technologies** (SFT) permet de regrouper un ensemble assez vaste de solutions, de dispositifs et de services numériques appliqués au monde agricole.

Les SFT peuvent être définies par différentes catégorisations : par type de technologie, par fonction, par application technologique ou agricole, et par usage dans les phases agricoles. En effet, dans la littérature étudiée, les SFT regroupent



différents blocs technologiques : IoT (capteurs, caméras, tag RFID, etc.), robots (drone, traite, désherbage, etc.), réseaux de télécommunications, logiciels (enregistrement et analyse d'images, gestion, traçabilité, automatisation, etc.), voire des techniques d'apprentissage machine (Deep Learning / Machine Learning). L'ensemble de ces blocs et applications technologiques visent des besoins agricoles généralistes ou spécialisés (culture céréalière, élevage bovin/ovin, production laitière, viticulture, etc.) qui interviennent à différents moments dans une exploitation agricole (production, transformation, vente, transport, etc.).

### 3.6.3.2. Définition du cadre

Afin de comprendre les effets environnementaux des services numériques appliqués au secteur agricole, il est nécessaire de qualifier plusieurs facteurs. Ces facteurs définissent le cadre d'analyse et le périmètre des systèmes étudiés :

- Type d'application agricole :
  - Type de culture et/ou d'élevage
  - Taille d'exploitation
  - Surface exploitée
  - Nombre d'employés
  - Type d'équipements mécaniques et numériques utilisés
- Type de territoire (si approche territoriale) :
  - Type de culture
  - Nombre d'exploitations par type de culture
- Surface agricole utilisée (SAU) par type de culture et d'exploitation
- Nombre d'employés par exploitation
- Politiques régionales (économiques, environnementales, etc.) concernant le secteur agricole
- Objectifs de transition du secteur à différents horizons (actuel, 2030, 2050)
- Evolution climatique et environnementale
- Modèle agricole (actuel/visé)
- Agroindustrie
- Agroécologie
- Agriculture urbaine
- Autres modèles
- Effets attendus (synthèse d'après Balafoutis et al. 2018)
- Efficacité des ressources (eau, nutriments, pesticides, main-d'œuvre)
- Gestion/prévention des maladies, des mauvaises herbes, etc.
- Gestion des risques (sécurité alimentaire, élimination des résidus de pesticides et émissions de produits agrochimiques, etc.)
- Respect de la législation et des normes (écologisation de la PAC ; réglementations sur la gestion des sols, l'utilisation des pesticides, des engrais et de l'eau)
- Collaboration tout au long de la chaîne d'approvisionnement (chaîne d'approvisionnement des entreprises et des transformateurs)
- Type d'application technologique (synthèse d'après Balafoutis et al. 2020 et Gabriel et Gandorfer, 2022)
- Modèles de prévision et apps (météo, nuisibles)
- Plateformes de communication et d'échange
- Enregistrement numérique des champs
- Système de pilotage automatique
- FMIS (Farm Management Information Systems) - culture
- Cartes depuis des données satellites
- Contrôle de section (pulvérisateur, épandeur)
- Systèmes lightbar
- Production végétale à taux variable
- Fertilisant (azote) à taux variable (VRA)
- Cartographie des rendements
- Drones
- Échantillonnage géo-référencé des sols
- Fertilisant à taux variable (basique)
- Ensemencement à taux variable (VRA)
- Télémétrie
- Capteurs infrarouge (NIR) pour déterminer la qualité de la récolte
- Système de gestion des flottes



- Pilotage automatique des équipements de labour
- Capteurs infrarouge (NIR) pour épandage du lisier
- Technologies intelligentes (type Google Glass)
- Capteurs de test des sols
- Robots agricoles (autonomes ou non)
- Caméras (Grange)
- FMIS (Farm Management Information Systems) - élevage
- Capteurs de suivi du comportement
- Approvisionnement automatique en fourrage
- Systèmes de traite automatique
- Robot de nettoyage des lattes
- Robot de poussée du fourrage
- Systèmes d'aide à la décision
- Outils d'analyse de big data
- Systèmes d'irrigation intelligents
- Système d'enregistrement en temps réel
- Systèmes intelligents de traçabilité
- Systèmes intelligents de logistique

Cette liste de facteurs et de leurs paramètres n'est pas exhaustive mais elle définit un cadre pour un travail d'analyse fin. Il s'agit ici de qualifier des situations concrètes et de les situer dans un contexte territorial précis. Cette approche considère en creux que l'extrapolation ou la généralisation d'effets environnementaux de services numériques est difficilement possible du fait de la complexité du monde agricole. Par exemple, l'usage de robots autonomes pour le désherbage des plants de vigne ne peut pas être extrapolé à l'ensemble des vignobles car l'adoption d'une telle technologie dépend, entre autres, des capitaux disponibles et de la taille d'exploitation, des pratiques agricoles dans le vignoble ou encore de sa géographie. Une étude large sur les effets environnementaux de l'agriculture numérique doit donc construire une grande variété de profils d'exploitation et de profils d'application technologiques, et décrire un territoire précis, et ce, avant même de commencer à qualifier les effets environnementaux de tel ou tel service. Plutôt que de définir et propager un modèle général et uniforme, il s'agit ici alors de construire le cadre d'une archipélisation de systèmes de petite taille, correspondant mieux à la nature du monde agricole.

### 3.6.3.3. Exemple de la diversité de l'agriculture en région Grand Est

En 2020, la région Grand Est compte 40 989 exploitations agricoles et une surface agricole utilisée (SAU) de 3 024 683 hectares (soit 54% du sol régional). La viticulture représente 35% des exploitations agricoles mais ne représente que 1% de l'occupation des sols régionale. La production végétale représente 32% des exploitations et occupe 38% du sol régional. Finalement, la production animale (bovin et porcin) représente 33% des exploitations agricoles. La filière bovine est de loin la plus importante avec 1 707 784 têtes recensées en 2015 (laitier et viande). Ainsi, si le nombre d'exploitations se divise plus ou moins à parts égales entre la viticulture, la production végétale et animale, c'est bien la production végétale qui représente la plus grande occupation des sols.

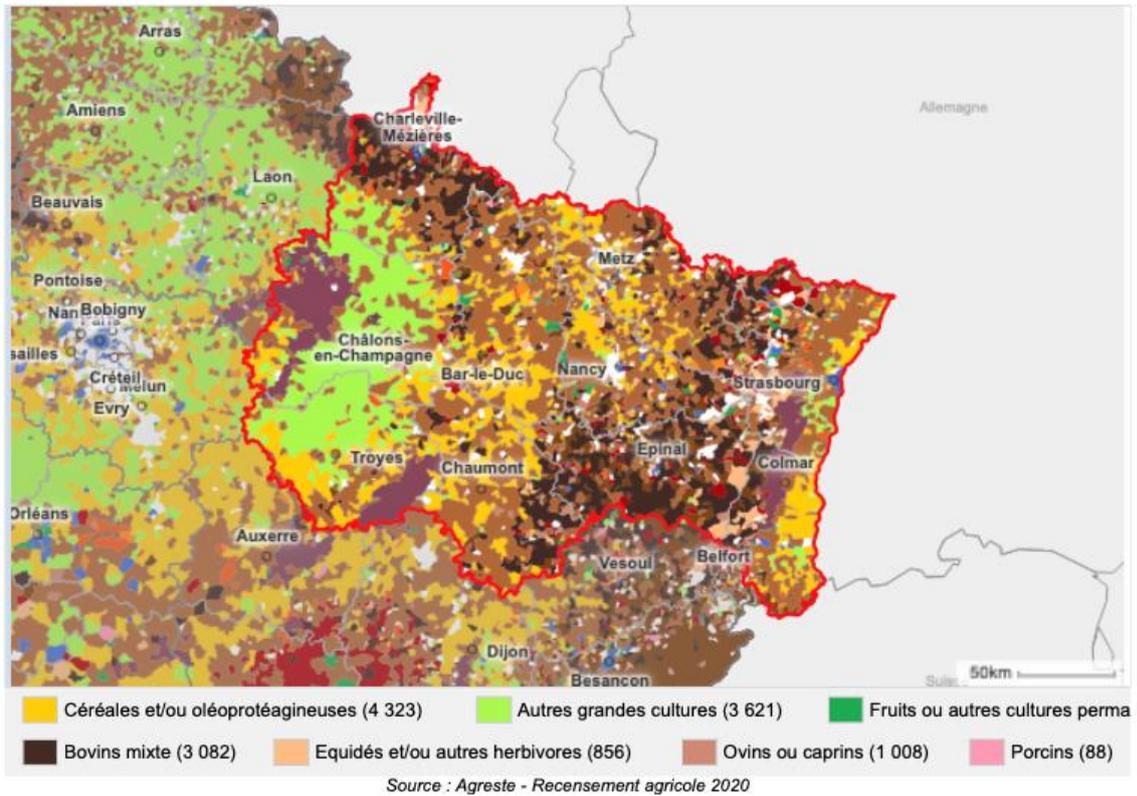


Figure 40 : Spécialisation territoriale de la production agricole en 2020 – région Grand Est

Les caractéristiques du secteur agricole dans la région sont les suivantes :

Profil agricole (sources : Agreste, SRADET)	Nombre
Nombre d'exploitations	40 989
Surface Agricole Utile (ha)	3 024 683
Dont céréales, oléagineux, protéagineux (ha)	1 689 632
Dont prairies (ha)	926 280
Dont viticulture (ha)	54 309
SAU moyenne (ha/établissement)	74

Tableau 78 : Caractéristiques des exploitations agricoles en région Grand Est



Type d'exploitation	OTEX par commune (Orientation technico économique des exploitations)	en %	Nb d'exploitations
Grandes cultures	1412	27,6	13400
Maraichage, horticulture	45	0,9	700
Viticulture	338	6,6	14400
Fruits	32	0,6	400
Bovin lait	374	7,3	2600
Bovin viande	164	3,2	2200
Bovin mixte	667	13	900
Ovins, caprins et autres herbivores	147	2,9	1500
Porcins, volailles	58	1,1	500
Polyculture, polyélevage	1616	31,6	4200
Exploitations non classées	0	0	N/A
Sans exploitation	267	5,2	N/A

Tableau 79 : Répartition des communes de la région Grand Est par OTEX

### 3.6.3.4. Définition de l'impact environnemental des équipements et services numériques et non-numériques dans le secteur agricole

L'ensemble des applications technologiques listées plus haut correspondent ainsi à des profils d'équipements numériques et de logiciels plus ou moins standardisés. Il est donc nécessaire d'établir ces profils et de qualifier leur impact environnemental, si possible avec une approche multicritère.

La synthèse des publications de Gabriel et Gandorfer, Farooq et al., Balafoutis et al. et Schnebelin et al. permet de construire une première liste d'équipements et de composants pour construire des profils d'applications technologiques :

- Équipements
  - Capteurs
    - Capteurs de température
    - Capteur d'humidité
    - Capteur de pression
    - Capteur d'humidité du sol
    - Capteur infrarouge (PIR)
    - Capteur de pH
    - Capteurs biologiques
  - Actionneurs
  - Microcontrôleurs
  - Drones agricoles
  - Robots (autonomes ou non)
    - Robot de nettoyage des lattes
    - Robot de poussée du fourrage
    - Robot de désherbage
    - Robot d'épandage
    - Robot de traite
  - Caméras
  - Equipements spécifiques
    - Système d'autoguidage
    - Système lightbar
    - Station météo
    - Console
  - Autres équipements

- Ordinateurs
  - Smartphones
  - Ecran
  - Tablette
- Réseaux
  - PAN / LAN
    - Modem
    - Antenne
    - Base fixe
  - WAN
    - Réseaux d'accès mobile (2G, 3G, 4G, 5G, GPRS, satellite)
    - Réseaux d'accès fixe (RTC, fibre)
    - Réseaux cœur
- Centres de données
  - On premise
    - Serveur
    - Routeur
    - Equipement énergie
    - Equipement refroidissement
  - Cloud / coloc
    - Virtual machine (vCPU, RAM, SSD)

Ces équipements seront mobilisés par des services numériques. Ainsi évaluer l'impact environnemental des services numériques revient à évaluer l'impact des phases du cycle de vie des équipements (extraction, fabrication, distribution, usage, fin de vie) qui les composent. Les familles de services agricoles pour le secteur agricole peuvent être les suivantes, sans que cette liste ait un caractère exhaustif. :

- Services
  - Services météo
  - Plateformes de communication et d'échange
  - Enregistrement numérique des champs
  - Farm Management Information Systems (FMIS)
  - Services de cartographie satellite (avec diverses fonctionnalités : rendement, etc)
  - Système de gestion et de contrôle de capteurs et d'objets connectés
  - Service de contrôle des applications à taux variable (VRA)
  - Systèmes de pilotage automatique des engins de labour
  - Systèmes de conduite autonome des engins agricoles
  - Télémétrie
  - Système de gestion de flottes
  - Systèmes d'aide à la décision
  - Outils d'analyse big data
  - Système d'enregistrement en temps réel (caméras, etc)

Il s'agit alors d'estimer les équipements nécessaires à chaque service et ainsi constituer des profils. Par exemple un système de pilotage automatique (type autoguidage) est composé, d'après Huck, de :

- Base fixe
- Accès au réseau satellite
- Modem
- Capteur d'angle
- Console
- Antenne
- Volant électrique
- Accès au réseau 2G
- Serveurs

Il est important de noter que plusieurs services peuvent se superposer ou s'assembler pour former un ensemble de services plus important. Par exemple, un FMIS peut inclure de la télémétrie, des systèmes d'aide à la décision, des systèmes d'enregistrement, etc.

À partir de là, le processus d'analyse de cycle de vie peut continuer avec ses règles et ses modélisations habituelles (choix d'une unité fonctionnelle, hypothèses de durée de vie, d'usage, etc.). Les analyses de cycle de vie sur les solutions numériques



à usage agricole sont très peu nombreuses. Le tableau ci-dessous montre les ACV identifiées par Clémence Huck, complété et trié ici par application technologique et pratique agricole.

Application agricole	Application technologique	Analyses de cycle de vie disponibles	Pertinent en région Grand Est
Toutes applications	Tracteurs électriques autonomes	Lagnelöv et al 2021	Partiellement
Viticulture	Robot autonome pour désherbage, épandage, etc.	Pradel et al 2022 ; Tziolas et al 2023	Oui
Viticulture	Autoguidage de tracteur pour désherbage	Huck 2022	Oui
Viticulture	Capteur de sols pour gérer l'apport en fertilisants	Balafoutis et al 2017	Oui
Production végétale	FMIS pour l'irrigation	Canaj et al 2022	Oui
Production végétale (blé)	Capteur de sols pour gérer l'apport en fertilisants	Medel-Jiménez et al 2022	Oui
Production végétale (nectarine)	Agriculture de précision (système de guidage, enregistrement des champs, etc.)	Núñez-Cárdenas et al 2022	Non
Production végétale	FMIS	Fotia et al 2021	Oui
Production végétale (poire)	Agriculture de précision (système de guidage, enregistrement des champs, etc.)	Vatsanidou et al 2020	Non
Production végétale (riz)	Capteur de sols pour gérer l'apport en fertilisants	Bacenetti et al 2020	Non
Production végétale	Capteurs d'humidité pour gérer l'apport d'eau	El Chami et al 2019	Non
Production végétale (maïs)	Capteur de sols pour gérer l'apport en fertilisants	Li et al 2016	Oui
Production de fourrage à destination du bétail	Guidage automatique du tracteur	Ashworth et al 2022	Oui

Tableau 80 : Liste des ACV d'équipements et services numériques dans le secteur agricole (d'après Huck, 2022).

La plupart des ACV revues dans le cadre de cette étude ne prennent pas en compte l'empreinte des technologies numériques déployées ou mobilisent des données génériques ou des données confidentielles non communiquées. De même, les données d'ACV permettent de définir les bénéfices environnementaux par rapport à des scénarios qui ne sont pas toujours pertinents avec les exploitations agricoles en région Grand Est.

À ce jour, le manque des données environnementales sur les nouveaux équipements et services numériques ne permet pas d'avoir des ACV robustes et donc d'avoir une vue nette sur les impacts environnementaux de ces solutions.

À titre de rappel, il est nécessaire de répéter que pour évaluer les effets liés à la substitution d'anciens équipements par des solutions numériques, il est nécessaire d'estimer l'impact environnemental des solutions et équipements non-numériques. Ces équipements peuvent être par exemple des tracteurs, si substitués par un engin de labour ou un robot autonome, des équipements agricoles comme les pulvérisateurs, si substitués par un désherbage mécanique ou optique, etc, parfois même des outils de labour.

### 3.6.3.5. Définition des catégories d'impact

Comme toute ACV, les catégories d'impact suivent la méthodologie européenne EF 3.0 :

- Changement climatique
- Destruction de la couche d'ozone
- Radiation ionique
- Formation d'oxydants photochimiques
- Particules fines



- Toxicité humaine cancérigène
- Acidification
- Eutrophisation, eaux douces
- Eutrophisation marine
- Eutrophisation terrestre
- Ecotoxicité, eaux douces
- Utilisation des sols
- Consommation d'eau
- Epuisement des ressources fossiles
- Epuisement des ressources minérales

Il est important de garder les catégories d'impact liées au secteur agricole comme l'usage de produits chimiques (pesticides, désherbants, fertilisants, etc.), à l'utilisation d'eau ou à l'utilisation des sols. De même, l'usage de tracteurs à essence/diesel implique des catégories d'impact sur l'épuisement des ressources fossiles et des particules fines qui ne doivent pas être écartées. Ces catégories correspondent aux facteurs environnementaux identifiés par Balafoutis et al.

### 3.6.3.6. Définition du scénario de base

Toute étude sur les effets environnementaux d'un service numérique vise toujours à comparer un scénario de base sans le service numérique à un scénario où ce dernier est implémenté. La comparaison des résultats entre ces deux scénarios permet de définir les effets du service.

Dans le cas de l'agriculture, définir ce scénario de base est particulièrement difficile pour deux raisons. Premièrement, les exploitations agricoles utilisent déjà des équipements et des services numériques qu'il est nécessaire d'identifier et dont le taux d'adoption doit être évalué à l'échelle du territoire étudié. Deuxièmement, il faut qualifier l'usage de ces équipements et services par rapport à un type d'exploitation agricole. À la connaissance de l'auteur, il n'y a pas de données accessibles à ce sujet en région Grand Est.

Les travaux menés par Schnebelin et al. en région Occitanie (voir tableau ci-dessous) définissent le contour d'un tel travail de production de données. Les profils agricoles des deux régions étant différents, il semble peu pertinent d'exploiter directement ces données mais l'enquête peut être répétée à plus grande échelle dans un département de la région Grand Est.

Application technologique	Taux d'adoption dans des exploitations de 162 ha en Occitanie
GPS	60%
Autoguidage	44%
Techniques de coupure de tronçons	39%
Station météo connectée	32%
Cartes de modulation	33%
Modulation d'azote	27%
Modulation de semence	6%
Tensiomètres connectés	14%
Contrôleur de rendement	18%
OAD pour traitements	11%
Technologies d'irrigation connectée	15%
Logiciel de gestion	63%

Tableau 81 : Panorama de l'usage des technologies numériques et internet (Schnebelin et al. 2021)



La définition de ce scénario de base invite à deux scénarisations différentes :

- la continuité future de ce scénario de base où les exploitations agricoles poursuivent de s'équiper en solutions numériques déjà identifiées (comme dans le tableau ci-dessus) et où il est nécessaire d'en identifier les effets environnementaux maintenant et dans le scénario de base futur (tel que cela est préconisé dans la norme ITU-T L.1480) ;
- un scénario où les équipements et services numériques nouvellement déployés se substituent et/ou s'empilent avec l'ancien.

Il y a ici un risque méthodologique important. Le scénario de base inclut de fait les effets indirects (optimisation, gestion, communication, etc.) des équipements et services numériques déjà utilisés. Ainsi, si le scénario avec le nouveau service numérique étudié se substitue à un service numérique similaire plus ancien alors ses effets sont moindres car en partie fournis par le service précédent dans le scénario de base. La non-prise en compte de ce facteur peut entraîner une inflation des effets positifs et négatifs, voire un double comptage.

En résumé, définir un scénario de base revient à définir les éléments suivants :

- le type d'équipements et de services numériques déjà utilisés dans les exploitations agricoles étudiées ;
- leur taux d'adoption ;
- l'association de ces équipements et services, et leur taux d'adoption, à un profil d'exploitation agricole ;
- définir les effets actuels de ces équipements et services afin de permettre leur extrapolation future ;
- la part de ces effets déjà mobilisée dans le scénario de base.

### 3.6.3.7. Définition des effets

Les effets de solutions numériques peuvent s'appliquer sur plusieurs facteurs, qu'ils soient environnementaux, économiques, sanitaires ou liés au travail. Pour estimer si une solution numérique permet à une exploitation agricole, et plus généralement une région agricole, d'aller dans le sens de ces objectifs de transition écologique, il est nécessaire d'identifier les effets qui correspondent à ces objectifs, soit au 2e ordre (second order effect) et au plus grand ordre (higher order effect) pour reprendre la taxonomie utilisée dans les études précédentes.

Dans la synthèse de Balafoutis et al., les facteurs présentés ne sont pas triés en fonction de leur type d'effet. Ces facteurs sont parfois liés entre eux, voire entremêlés : la consommation d'énergie est un facteur économique qui modifie directement les émissions de gaz à effet de serre. De même, la réduction de l'usage de pesticides (effet de second ordre) permet d'améliorer la biodiversité des sols et la diversité en général (effet de plus grand ordre).

La catégorisation de ces effets entre ceux de second ordre et ceux de plus grand ordre dépend du type d'exploitation, il est donc nécessaire de refaire une évaluation préliminaire de la classification des effets pour chaque étude. Il est conseillé ici de reprendre les éléments méthodologiques de la norme ITU-T L.1480 ou de la méthodologie EGDC est d'établir un arbre de conséquences pour déterminer les types d'effets. Il est nécessaire de rappeler que la méthodologie EGDC stipule que les effets qui demandent un changement de comportement sont par défaut des effets de plus grand ordre.

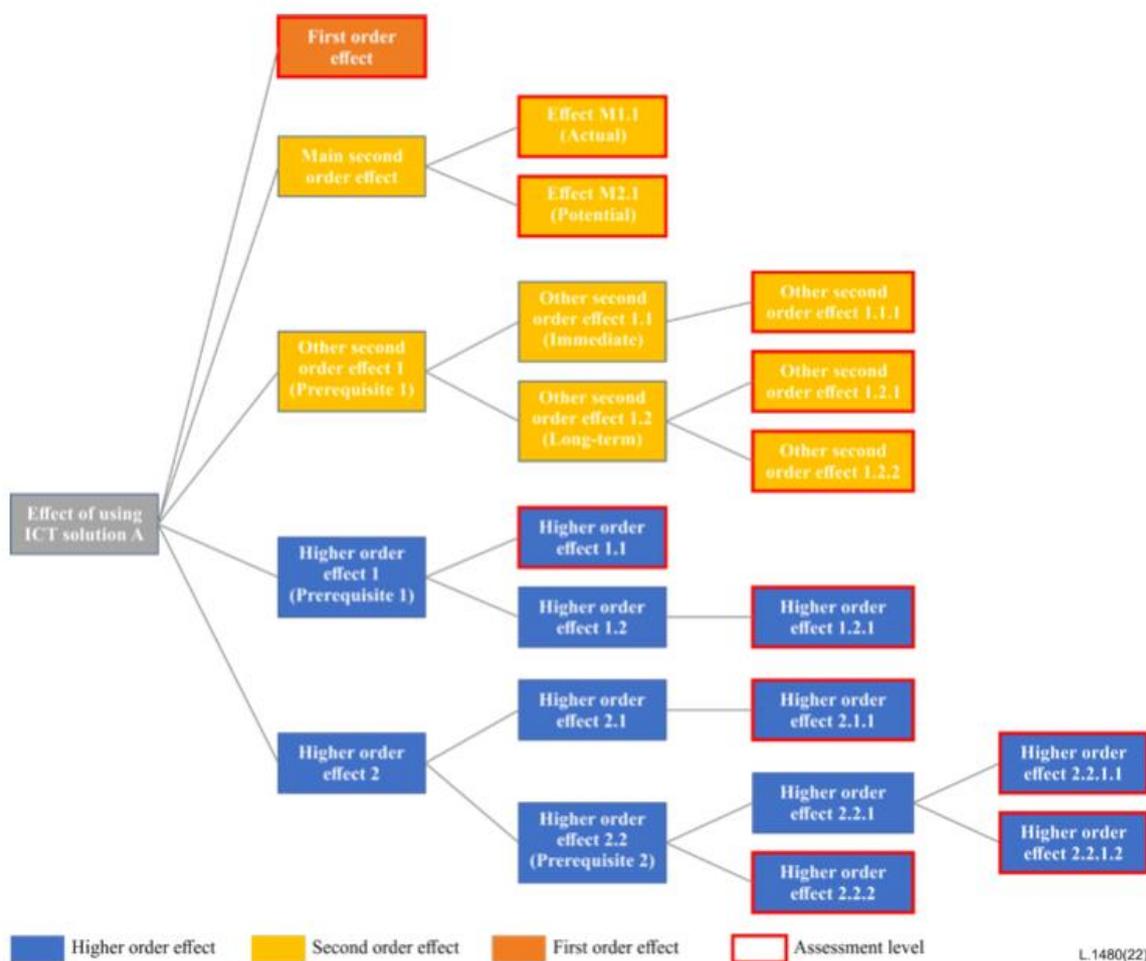


Figure 41 : Illustration d'un arbre de conséquence d'après l'ITU-T .1480

Plusieurs clés méthodologiques doivent être considérées. Il faut toujours intégrer l'empreinte environnementale (en cycle de vie complet) du nouveau service étudié et ainsi que tous les services connexes liés à son fonctionnement. Ensuite, certains effets tiennent de la substitution d'un système par un nouveau système numérique, d'autres de l'ajout d'un service numérique supplémentaire à un système existant. Dans les deux cas, prendre en compte l'empreinte environnementale de ce nouveau service ou système est crucial pour comparer à un plus ancien ou inclure son ajout. De même, est-ce que les effets de second ordre donnés par la littérature scientifique existante peuvent être extrapolés au contexte agricole de l'étude.

Par exemple, Medel-Jiménez et al. estiment dans leur étude sur la production de blé en Autriche que grâce à des capteurs de sol : "Le CC [les émissions de gaz à effet de serre] du processus de fertilisation était de 1 662,8 kg CO<sub>2</sub> eq./ha avec l'application conventionnelle d'azote contre 1 518,8 kg CO<sub>2</sub> eq./ha pour le plus faible des deux résultats VRNA [Variable Rate Nitrogen Application], soit une réduction de 8,6 % due à la diminution de l'application d'engrais." Ou encore, Núñez-Cárdenas et al. concluent dans leur étude sur la production de nectarines que : "la réduction des besoins en intrants associée à l'application des techniques d'AV [application variable] s'est traduite par une baisse significative des coûts économiques et des économies environnementales tout au long du cycle de vie du système de production, qui se situaient en moyenne entre 12 et 26 %." Est-ce que les types d'exploitations sont les mêmes ? Est-ce le même climat ou les mêmes pratiques de culture ? Est-ce que l'unité fonctionnelle choisie est pertinente ? Quelle est la qualité des données de l'inventaire du cycle de vie ? Quel est le périmètre de leur étude et est-ce que l'empreinte environnementale du nouveau service a été incluse ?

De même, les études sur les effets rebond liés à l'usage de solutions numériques dans le secteur agricole sont très limitées voire inexistantes. De ce fait, tout un champ de la littérature est absent. Ceci est un facteur très limitant pour toute étude visant à comprendre les effets environnementaux de ce type de solutions.

Il est particulièrement important dans les études ayant pour objet l'agriculture de ne pas extrapoler directement les effets observés dans d'autres contextes car les facteurs ayant permis les résultats présentés sont nombreux et très complexes et ne garantissent en rien une application similaire dans des contextes très divers et peu standardisés. Par exemple, dans l'étude de Pradel et al. sur les robots de désherbage en vignoble, le robot doit être transporté sur 4 km entre l'exploitation et le

vignoble par tracteur. Cette hypothèse explique en partie pourquoi l'usage de robots dans cette étude a plus d'impact que l'usage conventionnel. Dans ce cas, la distance entre l'exploitation et le champ est donc un facteur important pour déterminer la variabilité d'un effet et son application dans un autre contexte. Du fait de cette incertitude, il est conseillé de prendre des hypothèses conservatrices lors de l'estimation des effets.

### 3.6.3.8. Définition des scénarios futurs

Si la plupart de la littérature compare deux scénarios à un instant présent, la poursuite de ces scénarios dans un futur proche est incertaine. Plusieurs questions doivent être posées :

- Est-ce que les effets modélisés peuvent tenir dans le temps et dans l'espace ?
- Est-ce que la modification du climat et de l'environnement permet de maintenir les effets dans le temps ?
- Est-ce qu'un changement de modèle agricole est prévu ou à prévoir (agroécologie, etc.) ?
- Quels sont les objectifs de transition écologique pour le secteur agricole dans la région visée ?
- Quelle est la durée de vie de la solution étudiée et quel est le rythme de remplacement du matériel ?
- Comment évolue mon scénario de base dans une perspective future ?

Même dans une projection future, il est nécessaire de comparer un scénario futur sans intégration de la solution numérique et un scénario futur avec. La norme ITU-T L.1480 donne une illustration de ce type de projection ci-dessus. Le graphique suggère que le scénario de base futur va en s'accroissant, toutefois il ne faut pas considérer ça comme une hypothèse normale. Le scénario de base peut tout à fait avoir une tendance à la baisse dans une projection future. Il est donc nécessaire de déterminer la tendance d'évolution du scénario de base à partir d'éléments factuels explicités (tendances de marché, effets des politiques de transition, contraintes externes, etc.)

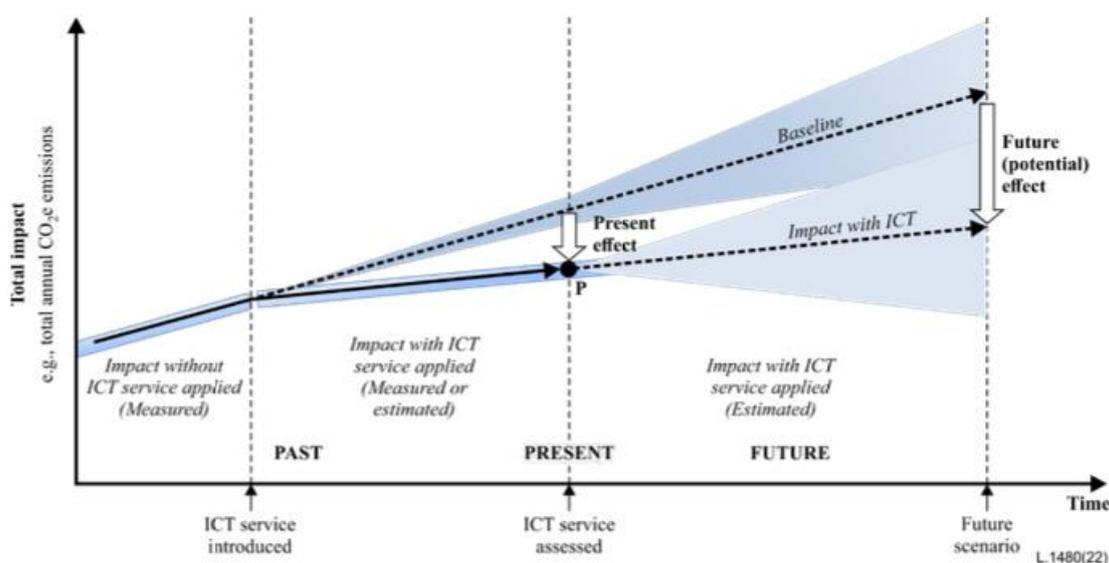


Figure 42 : Illustration des effets induits liés à la projection d'un scénario de référence d'après l'ITU-T .1480

Par exemple, dans un scénario de base où une partie de la région étudiée se convertit à l'agroécologie, on peut supposer que l'usage d'intrants se réduit dans tous les cas, que la solution numérique soit implémentée ou non. Ainsi, l'impact lié aux pesticides et fertilisants dans le scénario de base futur sera à la baisse, voire peut-être même avec moins d'impacts que le nouveau scénario avec la solution numérique dans un modèle conventionnel. De même, si les effets du changement climatique s'amplifient rapidement dans la zone étudiée, ce stress induira peut-être un changement de pratiques agricoles allant voir l'usage plus ou moins intensif d'intrants pour maintenir les rendements. Ainsi les effets modélisés dans les scénarios "présent" doivent être aussi réévalués ou présenter différentes trajectoires. La projection de scénarios "futurs" n'a pas la continuation de tendances déterminées dans les scénarios "présents" et nécessite un travail de modélisation conséquent.

### 3.6.3.9. Perspectives possibles pour l'évaluation de la région Grand Est

S'il n'est aujourd'hui pas possible de mener ce type d'évaluation sur le secteur agricole de la région Grand Est. Plusieurs barrières importantes peuvent être soulevées avec les actions suivantes :

- Mener une enquête de terrain sur un échantillon représentatif d'exploitations agricoles dans la région pour déterminer les solutions numériques déjà utilisées, leur taux d'adoption et leurs effets ;
- Déterminer les solutions et technologies numériques ayant le plus grand potentiel dans la région en fonction de son profil agricole, et celles qui seront a priori rejetées, aujourd'hui et demain ;
- Déterminer les infrastructures électriques et numériques nécessaires pour faire fonctionner ces solutions dans la région étudiée ;
- Obtenir des données environnementales (inventaires de cycle de vie) pour les nouveaux équipements numériques agricoles (robots, drones, etc.) et améliorer leur qualité ;
- Mener des études sur les effets indirects des solutions numériques agricoles, notamment sur les effets négatifs, en suivant la taxonomie proposée en introduction de ce rapport ;
- Déterminer la trajectoire prise par le modèle agricole de la région en fonction des types de cultures ou d'exploitations.

Ces cinq points constituent les prochaines étapes pour mener à bien une évaluation de suffisamment bonne qualité sur les effets environnementaux de la numérisation du secteur agricole. Une partie de ces études peut être prise en charge par l'ADEME et/ou des partenaires de recherche (INRAE, INRIA, etc.) et/ou peut faire l'objet de commandes à des cabinets ou bureaux d'études indépendants.



## 4. Analyse prospective 2030 de l'impact environnemental du numérique en Grand Est

---

### 4.1. Introduction

La première phase des travaux, dont les résultats sont présentés dans la partie 2.7 du présent rapport, délivre une vision « statique » (à un instant donné) de l'impact environnemental du numérique en région Grand Est (année de référence : 2020). La démarche d'analyse prospective, dont la méthodologie et les résultats sont présentés dans cette section, vise à établir une vision dynamique, à horizon 2030, des potentialités d'évolution de ces impacts environnementaux. Cette analyse prospective a été réalisée à partir des évolutions potentielles qu'il est possible d'anticiper à l'heure actuelle. Ces évolutions sont de plusieurs types : technologiques (évolutions des équipements sur les trois tiers, évolution des caractéristiques environnementales des équipements et produits), comportementales (évolutions des usages individuels des usagers, individus et organisations) ou encore sociétales (évolution des cadres réglementaires ou politiques, en particulier à l'échelle de la région Grand Est). Cette analyse prospective ne constitue donc pas une prévision en sens strict du terme, mais présente plutôt les futurs possibles (mais non exhaustifs), en fonction de l'évolution d'un ensemble de paramètres et de conditions socio-technico-économiques.

Pour incarner ces différentes possibilités pour l'avenir, des scénarios variés ont été établis et seront présentés et analysés dans la suite de cette partie. Ces scénarios s'appuient en partie sur les imaginaires développés par l'ADEME dans le cadre du projet Transitions 2050<sup>2</sup>. Ce dernier présente quatre scénarios permettant d'atteindre la neutralité carbone à horizon 2050, chaque scénario proposant un chemin, qui porte ses propres caractéristiques technico-économiques et sociétales, permettant d'associer un récit de société aux évolutions des principaux indicateurs quantitatifs. Les scénarios développés dans cette étude reposent également sur la littérature existante, en particulier sur le troisième rapport de l'*Evaluation de l'impact environnemental du numérique en France et analyse prospective* de l'ADEME et l'Arcep [1], et les politiques publiques régionales pertinentes.

### 4.2. Méthodologie

#### 4.2.1. Objectifs et méthodologie de l'analyse prospective

Comme expliqué ci-dessus, l'analyse prospective des impacts environnementaux du numérique en région Grand Est a pour but d'anticiper l'évolution de ces derniers à court terme, en fonction des évolutions technologiques, de gouvernance et des modèles économiques du numérique en région Grand Est. Dans la continuité de la cohérence souhaitée entre l'état des lieux de cette étude et les résultats présentés dans le second volet de l'étude ADEME-Arcep [1], l'analyse prospective à l'échelle de la région Grand Est s'appuie en partie sur les déterminants identifiés dans le troisième volet de cette étude. Elle en propose une déclinaison à l'échelle régionale, visant à prendre en compte les spécificités de développement propres à la région, lorsque cela était pertinent et possible. Pour ce faire, les objectifs territoriaux définis dans le Schéma Régional d'Aménagement, de Développement Durable et d'Égalité des Territoires (SRADDET) de la région Grand Est ont été étudiés, ainsi que ceux inclus dans le Plan Régional d'Action en faveur de l'Économie Circulaire (PRAEC). Un atelier des parties prenantes a également été organisé, regroupant différents acteurs du numérique en région Grand Est, afin de développer une réflexion collective sur deux sujets :

- La place du numérique en région Grand Est en 2030 ;
- Les leviers de réduction de l'impact environnemental du numérique actionnables plus spécifiquement dans la région.

Ce travail de prospective s'articule autour d'un **premier scénario dit « tendanciel »**, basé sur les tendances actuelles des paramètres et variables clés de l'état des lieux des impacts environnementaux (en 2020). Deux déclinaisons contrastées de ce scénario tendanciel ont par la suite été réalisées, s'appuyant sur deux visions différentes de développement du numérique sur le territoire et en lien avec les scénarios Transitions 2050 : un scénario dit « **Sobriété Numérique** » et un scénario dit « **Technologies Vertes** ». Les noms de ces scénarios ne sont cependant pas repris puisque la prospective présentée ici s'arrête un horizon temporel 2030.

---

<sup>2</sup> Les travaux engagés par l'ADEME à travers l'étude « Transition 2050, Choisir maintenant, Agir pour le Climat » propose quatre scénarios pour atteindre la neutralité carbone à l'horizon 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 ». <https://transitions2050.ademe.fr/>



### 4.2.2. Indicateurs étudiés

Afin de faciliter la compréhension des résultats (notamment avec la comparaison de plusieurs scénarios) les impacts des scénarios prospectifs n'ont été évalués que sur une sélection d'impacts environnementaux clés pour le secteur du numérique : potentiel de réchauffement climatique, contribution à l'épuisement des ressources naturelles abiotiques – éléments, consommation d'énergie primaire, production de déchets. Ces indicateurs, inclus dans le set plus large utilisé dans le cadre de l'état des lieux 2020, sont présentés ci-dessous :

#### Changement climatique

- Type d'indicateur : Indicateur d'impact orienté problème (mid-point)
- Unité : t CO<sub>2</sub> équivalent (t CO<sub>2</sub> eq.)
- Méthode d'évaluation : IPCC 2013 méthode

Définition : Les gaz à effet de serre (GES) sont des composés gazeux qui absorbent le rayonnement infrarouge émis par la surface de la Terre. L'augmentation de leur concentration dans l'atmosphère terrestre contribue au réchauffement climatique.

#### Épuisement des ressources naturelles abiotiques (minéraux et métaux) – dit « éléments »

- Type d'indicateur : Indicateur d'impact orienté problème (mid-point)
- Unité : kg Sb équivalent (kg Sb eq.)
- Méthode d'évaluation : CML 2002

Définition : L'exploitation industrielle entraîne une diminution des ressources disponibles dont les réserves sont limitées. Cet indicateur évalue la quantité de ressources minérales et métalliques extraites de la nature comme s'il s'agissait d'antimoine.

#### Masse de déchets

- Type d'indicateur : Indicateur de flux
- Unité : kg

Définition : Quantité de déchets générés tout au long du cycle de vie, y compris les déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE), ainsi que les déchets liés à l'extraction des matières premières

#### Consommation d'énergie primaire

- Type d'indicateur : Indicateur de flux
- Unité : MJ

Définition : L'énergie primaire est la première forme d'énergie directement disponible dans la nature avant toute transformation : bois, charbon, gaz naturel, pétrole, vent, rayonnement solaire, énergie hydraulique, géothermique, etc.

### 4.2.3. Atelier sur les impacts du numérique en région Grand Est

L'atelier de réflexion mené en janvier 2023 avec divers acteurs du numérique de la région (entreprises, institutions etc.) a permis d'évaluer la place que pourrait avoir le numérique en 2030 et de faire émerger les leviers d'action de réduction de l'impact environnemental qui seraient les plus pertinents ou les plus probablement déployés sur le territoire. Pour ce faire, les participants, répartis en plusieurs groupes ont dû dans un premier temps positionner leurs visions du numérique en région Grand Est sur une échelle sobriété-technologie, tout en listant les exemples qui illustreraient cette position.

Voici un exemple du contenu qui est ressorti de l'atelier :



# La place du numérique en Grand Est en 2030

## Quelle sera la place du numérique en région Grand-Est en 2030 dans les institutions ?

- Les agents effectueront un mélange entre le télétravail et le présentiel ;
- Les terminaux professionnels et personnels seront mutualisés ;
- Les institutions achèteront des appareils reconditionnés ;
- Les services poursuivront le déploiement de la dématérialisation tout en proposant des possibilités physiques ;
- Par le reconditionnement et le réemploi, les institutions combleront la fracture numérique ;
- Les institutions encourageront le local (production de terminaux, data centers régionaux...) en tissant un lien de confiance avec les consommateurs et les producteurs ;
- Le numérique occupera une plus grande place dans le domaine de la santé ;
- Des lois encadreront les utilisations du numérique dans le secteur public.

## Réponse moyenne des groupes sur l'échelle sobriété-technologie



## Quelle sera la place du numérique en région Grand-Est en 2030 chez les ménages ?

- Grâce à la contrainte dans certains domaines ainsi que la sensibilisation :
  - Les équipements seront moins surdimensionnés par rapport aux besoins ;
  - On changera de terminaux moins souvent ;
  - La population aura compris que la performance des terminaux est stable depuis plusieurs années et que les gains en performance ne sont pas nécessaire dans leur vie quotidienne (sauf certains technophiles qui continueront à acheter des produits neufs).
- L'évolution vers une sobriété numérique chez les ménages sera freinée car il n'y a pas beaucoup de temps pour sensibiliser la population d'ici 2030. Cela contribuera au fait que certaines personnes se lanceront dans la sobriété et d'autres continueront à consommer.

## Réponse moyenne des groupes sur l'échelle sobriété-technologie



Figure 43 : Slide 1 de restitution de l'atelier du 26/01/2023 avec les parties prenantes, à Metz.

Ensuite, il a été question de réfléchir aux leviers d'actions de réduction de l'impact environnemental du numérique qui pourront être mobilisés dans la région ainsi qu'au niveau d'ambition à laquelle ils pourront être portés. Les participants ont donc dû prioriser une liste de leviers d'action et détailler comment ils envisageaient le déploiement de ces derniers.

## Evaluation des leviers

Levier	Faible priorité	Haute priorité
11. Maîtrise (et diminution) de la taille des écrans	★ ★ ☆ ☆ ☆	★ ★ ★ ★ ★
12. Interdiction/Maîtrise du déploiement des grands écrans publicitaires	★ ★ ★ ★ ☆	★ ★ ★ ★ ★
13. Mutualisation de certains équipements (box, consoles etc.) et développement de l'économie de la fonctionnalité	★ ★ ★ ★ ☆	★ ★ ★ ★ ★
14. Accroissement de la durée d'utilisation des équipements et maîtrise de l'obsolescence sociétale des équipements	★ ★ ★ ★ ★	★ ★ ★ ★ ★
15. Encouragement de l'utilisation des réseaux fixes par rapport aux réseaux mobiles	★ ★ ★ ☆ ☆	★ ★ ★ ★ ★
16. Encadrement de l'effet rebond de la 5G en maîtrisant les volumes de données consommées	★ ★ ★ ★ ★	★ ★ ★ ★ ★



Figure 44 : Slide 2 de restitution de l'atelier du 26/01/2023 avec les parties prenantes, à Metz.



## Actions pour décliner les leviers

Pour décliner opérationnellement les leviers identifiés comme prioritaires, les participants ont proposé une série d'actions :

Leviers 1 & 2	Action : Contraindre la commercialisation des produits grâce à un indice de durabilité	
Qui porte l'action ?	Avec quels partenaires ?	
L'Etat avec des acteurs de régulation comme l'Arcep	Fabricants, Institution Numérique Responsable (INR), Green IT et l'UE	
Dans quel périmètre ?	Avec quel calendrier ?	
En lien avec tous les matériaux IT	Horizon 2028 en France	
Comment ça marche concrètement ?		
Les producteurs sont tenus d'éco-concevoir leurs produits, qui sont ensuite évalués selon un indice de durabilité. Si le produit reçoit plus de 5 points sur 10, il peut être commercialisé, et s'il reçoit plus de 8 points sur 10, il bénéficie d'un bonus.		

Levier 6	Action : Eco-concevoir les services numériques	
Qui porte l'action ?	Avec quels partenaires ?	
Les développeurs, les sociétés de développeurs et les donneurs d'ordres	L'Etat, Greenforce, Greenspector, Ecometer, etc...	
Dans quel périmètre ?	Avec quel calendrier ?	
Utilisation de ces méthodes à l'échelle mondiale en utilisant les développeurs	Dès à présent	
Comment ça marche concrètement ?		
Un outil évalue les effets des codes sur l'empreinte carbone des logiciels et permet aux développeurs de connaître les effets de leur code (si, par exemple, l'algorithme n'est pas performant, ce qui fait qu'il prend plus de temps et plus d'énergie). Cet outil et des bonnes pratiques seraient introduits dans les formations et dans les écoles d'ingénieurs.		

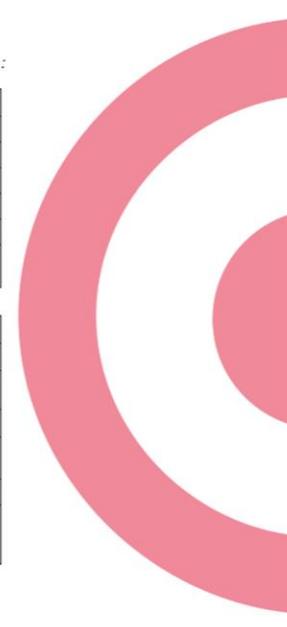



Figure 45 : Slide 3 de restitution de l'atelier du 26/01/2023 avec les parties prenantes, à Metz.

Ces travaux de projection de la région vis-à-vis du numérique, avec des acteurs proches du secteur, ont permis de confirmer les principes du scénario tendanciel développé dans l'étude nationale pour la région Grand Est mais surtout d'identifier les leviers prioritaires qui seront utilisés pour décliner ce scénario tendanciel en un de sobriété numérique un autre de pari technologique.

Les sous-parties suivantes détaillent la méthodologie utilisée pour les différents tiers étudiés, déclinant l'étude nationale et utilisant les spécificités de la région identifiées et exploitables.

## 4.2.4. Présentation des scénarios étudiés

### 4.2.4.1. Tendanciel

Le scénario tendanciel étudié ici à l'échelle de la région Grand Est décline celui de l'étude nationale. Il tente donc de modéliser l'impact des évolutions technologiques, de l'évolution des usages et des comportements liés au numérique qui sont prévues d'ici à 2030, grâce aux tendances observées jusqu'à aujourd'hui. Ce travail, à l'échelle de la région Grand Est, reprend les principes du scénario tendanciel de l'étude nationale (Cf chapitres 4 et 5 du volet 3 de l'étude ADEME-Arcep [1]), dont le résumé des paramètres est disponible dans la partie 4.3 Hypothèses et données utilisées ci-après.

### 4.2.4.2. Sobriété Numérique

Le scénario Sobriété Numérique de cette étude reprend en grande partie les principes du scénario homonyme de l'étude nationale (Cf chapitre 7.1.1 du volet 3 de l'étude ADEME-Arcep [1]), dont voici les points clés :

« Tier 1 – Equipements des usagers :

- Une nécessité de stabilisation du volume des équipements des usagers à son niveau de 2020 ;
- Une substitution vers des équipements moins consommateurs en énergie : une hypothèse de réduction forte des consommations d'énergie est effectivement évaluée à travers une division par deux de la consommation pour ces équipements numériques.
- Un rallongement de la durée de vie des équipements de l'ordre de deux ans o Une baisse du parc des téléviseurs au profit des vidéoprojecteurs

#### Tier 2 – réseaux :

- Une stabilisation des équipements réseaux, notamment au niveau des équipements des réseaux mobiles : le nombre de sites mobiles (supports) n'évolue pas par rapport à 2021. En conséquence, le nombre d'antennes baisse par rapport à 2020.
- Une substitution vers des équipements moins consommateurs en énergie : une hypothèse de réduction forte des consommations d'énergie est effectivement évaluée à travers une division par deux de la consommation énergétique pour ces équipements numériques.

#### Tier 3 – centres de données :

- Pour les centres de données, ce sont surtout les consommations énergétiques des équipements de refroidissements et des serveurs hébergés avec une hypothèse de réduction forte des consommations à travers une division par deux de la consommation énergétique pour ces équipements. » (ADEME-Arcep, rapport 3/3, page 86 [1]).

Des ajouts ou modifications de paramètres ont été entrepris à la suite de l'atelier de réflexion mené à Metz, pour entrevoir un scénario plus adapté à la région et à la vision des acteurs régionaux. Ces différences seront explicitées dans la partie 4.3 *Hypothèses et données utilisées* de cette étude.

### 4.2.4.3. Technologies vertes

A l'inverse des scénarios « tendanciel » et « sobriété numérique », ce troisième scénario, plus axé sur une vision nettement différente de la sobriété, est une version hybride et revisitée des scénarios « éco-conception modérée » et « éco-conception généralisée » de l'étude nationale (Cf chapitre 7.1.2 et 7.1.3 du volet 3 de l'étude ADEME-Arcep [1]). Voici, par exemple, les points clés du scénario « éco-conception généralisée » :

#### « Tier 1 – Equipements des usagers :

- Une croissance du nombre d'équipements usagers en conformité avec les hypothèses du scénario tendanciel 2030 ;
- Substitution vers des équipements moins consommateurs en énergie : une hypothèse de réduction forte des consommations d'énergie est effectivement posée (division par deux de la consommation énergétique pour ces équipements numériques).
- Un rallongement de la durée de vie des équipements de l'ordre de deux ans.

#### Tier 2 – réseaux :

- Une évolution du nombre d'équipements réseaux en conformité avec les hypothèses du scénario tendanciel 2030 ;
- Une substitution vers des équipements moins consommateurs en énergie : une hypothèse de réduction forte des consommations d'énergie est effectivement posée (division par deux de la consommation énergétique pour ces équipements numériques).

#### Tier 3 – centres de données :

- Pour les centres de données, ce sont surtout les consommations énergétiques des équipements de refroidissements et des serveurs hébergés avec une hypothèse de réduction forte des consommations (division par deux de la consommation énergétique pour ces équipements). » (ADEME-Arcep, rapport 3/3, page 87-88 [1]).

Nous avons souhaité utiliser plutôt le nom « Technologies vertes » pour ce scénario afin de souligner qu'il s'appuie uniquement sur des gains d'efficacité (énergétique et matière), aux côtés des démarches d'éco-conception, sans questionnement des tendances d'évolution des modes de consommation, à l'inverse du scénario « sobriété numérique » (qui conjugue éco-conception et évolution des usages mais ne laisse que très peu de place aux gains d'efficacité et améliorations technologiques). Globalement, nous tentons d'appréhender ici une perspective mélangeant les narratifs « Technologies vertes » et « Pari réparateur » issus de Transitions(s) 2050, contrairement à une approche ressemblant à « Génération frugale » pour le scénario « Sobriété numérique ». Nous utilisons ces concepts uniquement pour les idées générales, les scénarios de notre étude en région Grand Est restent à horizon 2030 et n'ont pas vocation à atteindre la neutralité carbone, seulement d'appréhender les évolutions de deux approches distinctes du numérique sur le territoire. Certains paramètres de ce dernier sont donc propres à notre étude, ils seront explicités dans la partie 4.3 *Hypothèses et données utilisées*.

## 4.2.5. Présentation des paramètres étudiés

### 4.2.5.1. Tiers 1 – Equipements utilisateurs

Du fait de leur nombre, de leur fabrication, de leur utilisation et de leur fin de vie, les équipements utilisateurs sont la source principale des impacts du numérique. Plusieurs paramètres sont donc importants à considérer pour faire fluctuer leurs impacts sur l'environnement. Dans ce travail nous suivrons l'évolution dans le temps, et jusqu'à 2030 :

- Du nombre d'équipements présents en région Grand Est (ordinateurs, téléphones, écrans, télévisions etc.) ;
- De la durée de vie moyenne des équipements ;
- Consommation annuelle d'électricité des équipements.

Ces paramètres sont liés à différents leviers d'actions tels que :

- L'amélioration des performances environnementales des équipements, via leur éco-conception matérielle ou leur meilleure efficacité énergétique ;
- L'allongement de la durée de vie des équipements, grâce à des évolutions comportementales ou le développement de la réparabilité des équipements et de la filière de réparation ;

Uniquement pour les téléviseurs, équipements à fort impact, un composant évoluera aussi, c'est le type de technologie (LED LCD ou OLEC) répandu dans le parc. En effet, la fabrication et la consommation d'électricité sont plus conséquentes dans le cas de la technologie OLED qui se développe de plus en plus ces dernières années.

### 4.2.5.2. Tiers 1 – Objets connectés (IoT)

La prise en compte des impacts des objets connectés suit la même logique que ceux des équipements utilisateurs. Les paramètres étudiés pour prévoir l'évolution des impacts associés à l'IoT sont donc :

- Le nombre d'équipements présents en région Grand Est (ordinateurs, téléphones, écrans, télévisions etc.) ;
- La durée de vie moyenne des équipements ;
- La consommation annuelle d'électricité des équipements.

En fonction des scénarios, ils évoluent jusqu'en 2023 selon différentes hypothèses ou sources externes qui seront explicitées dans la partie 4.3 *Hypothèses et données utilisées*.

### 4.2.5.3. Tiers 2 – Réseaux

Pour le tiers 2, la donnée de parc des équipements n'a pas pu être collectée pour l'état des lieux (Cf. 4.6.1.6.1 Fabrication, distribution et fin de vie du volet 2 de l'étude ADEME-ARCEP [1]). Une approche scindée a donc été employée, pour la fabrication, la distribution et la fin de vie, nous avons considéré le nombre d'équipements installés sur l'année 2020. Tandis qu'une approche par données transférées a été employée pour la phase d'utilisation.

## FABRICATION, DISTRIBUTION ET FIN DE VIE

Les impacts liés à la fabrication, distribution et fin de vie des infrastructures et équipements spécifiques aux réseaux sont ceux de la partie « Access ». Ces impacts sont définis ici par leur nombre et leur répartition en fonction des technologies. La xDSL mobilise des câbles en cuivre et un certain type de box (IAD/CPE) et la FFTx des fibres optiques et d'autres types de box (IAD/CPE avec et sans ONT). Voici les paramètres qui vont être modulés en fonction de l'évolution du déploiement des technologies fixes sur le territoire de la région :

- Nombre de câbles cuivre installés ;
- Nombre de fibres installées (par type) ;
- Nombre de box achetées/installées (par type) :

- Nombre des autres composants Accès / Agrégation / Backbone et cœur de réseau.

L'évolution de la composition et du maillage des réseaux fixes en région Grand Est est explicitée en fonction des scénarios dans la partie 4.3 *Hypothèses et données utilisées*.

## UTILISATION

Les impacts de l'utilisation des réseaux fixes sont liés à la consommation d'électricité des différents équipements et infrastructures intervenant dans la transmission des données. Pour calculer et faire évoluer ces consommations au sein de la prospective, plusieurs paramètres sont considérés en fonction des technologies fixes et mobiles (fixe : FFTx, xDSL ; Mobile : xG)

- Le nombre d'abonnés ;
- La consommation mensuelle de données par abonnés ;
- La consommation électrique des réseaux fixes (par ligne) et des réseaux mobiles (par Go transférés) ;
- La consommation des box.

Ainsi, le nombre et la répartition des abonnés en fonction des technologies fixes va évoluer jusqu'en 2030, tout comme la consommation mensuelle va changer en fonction des habitudes de consommation et celle des box et de la transmission selon les potentiels gains en efficacité énergétique de ces dernières. Le détail de ces évolutions prévues en fonction des scénarios sera détaillé dans la partie 4.3 *Hypothèses et données utilisées*.

### 4.2.5.4. Tiers 3 – Centres de données

Le tiers 3 a été modélisé en accord avec la méthodologie de l'étude nationale expliquée dans la partie 4.7.5 de l'étude ADEME-Arcep [1]. Ainsi, les paramètres pris en compte dans cette prospective et évoluant jusqu'en 2030 sont :

- Superficie des salles informatiques ;
- La consommation d'énergie des salles informatiques (pour l'utilisation) ;
- Les équipements présents dans les salles informatiques (pour la fabrication, la distribution et la fin de vie).

L'approche consommation expliquée et utilisée dans l'état des lieux de cette étude (partie 2.3.3.) est celle retenue ici mais une différence a néanmoins été entreprise dans l'exercice de prospective. En effet, par soucis de cohérence avec la méthodologie « top-down » utilisée par l'approche « consommation », l'état des lieux n'a pas utilisé les données primaires de superficie des salles informatiques (public et entreprises) en région Grand Est. Afin de faire évoluer ces surfaces de salles informatiques de la manière la plus appropriée à la situation de la région tout en étudiant l'approche « consommation », nous avons ici scindé le tiers 3 en deux parties :

- Une partie « bottom-up », avec des données primaires des infrastructures en propres des organisations publiques et des entreprises ;
- Une partie « top-down », extrapolée à partir de l'étude nationale pour les centres données en colocation en France, les HPC ou encore les besoins informatiques en Cloud extérieurs à la France.

Comme expliqué dans l'Etat des lieux 2020 de cette étude, l'approche consommation a été utilisée pour évaluer les impacts liés au Cloud dans la région. Ces derniers représentent par exemple presque la moitié des émissions de GES du numérique en région grand Est. Ceci est majoritairement due à l'électricité utilisée dans les centres de données en dehors de France qui est plus carbonée. C'est la raison pour laquelle un enjeu clé sur ce tiers est la relocalisation des besoins d'hébergement externe en France via notamment le développement d'un cloud français souverain. Différents taux de relocalisation des besoins en France ont donc été projetés en fonction des scénarios, ils seront explicités dans la partie 4.3 *Hypothèses et données utilisées*.

## 4.3. Hypothèses et données utilisées

### 4.3.1. Tiers 1 – Equipements utilisateurs

#### 4.3.1.1. Scénario tendanciel

Pour l'évolution tendancielle des paramètres liés aux équipements utilisateurs, les hypothèses et données utilisées sont identiques à celles de l'étude ADEME-Arcep [1]. La plupart des données utilisées sont des taux de croissance annuels moyens (TCAM) pour chaque année entre 2020 et 2030 issus de diverses sources telles que :

- European Commission, ICT Impact study, Final report, prepared by VHK and Viegand Maagøe for the European Commission, July 2020 [20] ;
- Empreinte carbone du numérique en France : des politiques publiques suffisantes pour faire face à l'accroissement des usages ?, Citizing pour le Sénat, 2020 [8] ;
- Le modèle USES 2 [36] ;
- Des hypothèses établies par l'ADEME et l'Arcep [1], après consultation avec des experts.

Pour résumer les projections du scénario tendanciel, certains équipements voient leur nombre drastiquement diminuer avec les progrès technologiques continus et l'évolution des usages du numérique, voici quelques changements notables de certains paramètres :

- Nombre d'équipements : Entre 2020 et 2030, le nombre de features phones et de projecteurs baissent d'environ 90%. Les périphériques de stockage se voient eux chuter de 60% et es ordinateurs fixes, équipements aux impacts conséquents, de 17%. Une explosion du nombre des casques AR/VR et des enceintes connectées est prévue entre 2020 et 2030 avec une augmentation respective de +685% et +380%. Pour ce qui est des équipements aux impacts unitaires importants, le nombre d'écrans de signalisation et d'ordinateurs portables continuent d'augmenter +44% et + 33%.
- Durée de vie : Les durées de vie sont supposées stables pour la très grande majorité des équipements, sauf pour les écrans de signalisation et les enceintes connectées qui diminuent de -19% et -13,5%.
- Consommation unitaire d'électricité : Des gains d'efficacité énergétiques sont prévus sur de nombreux équipements tels que les ordinateurs portables, les télévisions ou encore les casques AR/VR avec des consommations d'électricité qui diminuent respectivement de -18,6%, -36,2% et -44,2%. Des hausses de consommation sont projetées pour certains équipements notamment à cause des probables ajouts de fonctionnalités. Par exemple, les consommations unitaires des smartphones augmentent presque d'un tiers et les tablettes de +22%.

Les tableaux 82, 83 et 84 récapitulent et comparent les évolutions de ces paramètres pour chaque équipement entre 2020 et 2030.

#### 4.3.1.2. Scénario « sobriété numérique »

Dans le scénario « sobriété numérique », une grande partie de l'évolution des paramètres étudiés pour les équipements utilisateurs suivent les mêmes hypothèses et utilisent les mêmes sources que celles de l'étude nationale. Voici donc les quelques évolutions des paramètres envisagés dans ce scénario :

- Nombre d'équipements : Grâce à des efforts collectifs sur les usages et la consommation d'équipements, le nombre d'équipements est projeté stable jusqu'en 2030 pour la majeure partie des équipements, sauf pour :
  - *Les projecteurs et les télévisions* : il est supposé ici que, dans un objectif de sobriété, les projecteurs se substituent dans certains cas aux télévisions. Entre 2020 et 2030, les télévisions diminuent en nombre de -35,6% et les projecteurs augmentent de +470%.
  - *Les panneaux publicitaires* : vu l'importance accordée au sujet lors de l'atelier mené à Metz et grâce au contrôle que peut avoir la Région sur l'aménagement de son territoire, une diminution de 25% du nombre de panneaux publicitaires a été projetée.
  - *Les casques AR/VR* : la technologie de réalité augmentée ou virtuelle est relativement récente et l'augmentation de son utilisation est encore peu contrôlable. C'est la raison pour laquelle nous avons laissé le nombre de casques augmenter jusqu'en 2025 en suivant le

taux de croissance annuel tendanciel. Nous avons ensuite arrêté cette croissance du parc des casques AR/VR, une fois que le développement de cette technologie ait, par supposition, été questionnée et raisonnée dans une perspective de sobriété. Il en résulte une augmentation de 390% entre 2020 et 2030.

- Durée de vie : Grâce au développement des filières de réparation et de reconditionnement mais aussi l'écoconception matérielle et des changements de comportement, la durée de vie est rallongée pour tous les équipements de 2 ans à horizon 2030.
- Consommation unitaire d'électricité : Grâce aux progrès de conception des équipements, des gains d'efficacité énergétiques importants sont projetés pour tous les équipements. Ces derniers voient ici leur consommation électrique unitaire divisée par deux.

Identiquement au scénario tendanciel, les tableaux 82, 83 et 84 rassemblent l'évolution des paramètres considérée pour le scénario « sobriété numérique ».

#### 4.3.1.3. Scénario technologies vertes

Comme expliqué précédemment, le scénario « technologies vertes » est une version hybride et retravaillée des scénarios « éco-conception modérée » et « éco-conception généralisée » de l'étude ADEME -Arcep [1]. Certains paramètres sont donc propres à cette étude, et d'autres sont repris de l'étude nationale. Voici donc les évolutions considérées pour chacun des paramètres :

- Nombre d'équipements : De la même manière que les deux scénarios « éco-conception » de l'étude nationale, et dans une perspective « business as usual », l'évolution du nombre d'équipements suit le scénario tendanciel (Cf 4.3.1.1). Les nouvelles fonctionnalités ou les nouveaux besoins ne sont pas questionnés, le nombre d'équipements continuent donc d'augmenter.
- Durée de vie : Nous projetons ici un développement modéré de la filière reconditionné et de réparation ainsi qu'une légère meilleure robustesse des équipements grâce aux travaux d'éco-conception matérielle. Un peu différemment des deux scénarios éco-conception de l'étude nationale, nous allongeons ici la durée de de vie tous les équipements de 0,5 ans.
- Consommation unitaire d'électricité : Pareillement au scénario Sobriété Numérique, les consommations électriques unitaire sont divisées par deux.

Identiquement au scénario tendanciel, les tableaux 82, 83 et 84 rassemblent l'évolution des paramètres considérée pour le scénario « technologies vertes ».

#### 4.3.1.4. Comparaison des paramètres des scénarios

Les tableaux ci-dessous synthétisent les hypothèses considérées dans l'étude pour chacun des scénarios. Ils concernent l'évolution des différents parcs d'équipements : nombre, durée de vie, consommation unitaire.

### NOMBRE D'EQUIPEMENTS

Le tableau ci-dessous récapitule l'évolution des différents parcs d'équipements en fonction des scénarios. Le scénario tendanciel et technologies vertes modélisent une croissance de parc conforme aux évolutions projetées dans une perspective de « business as usual ». Le scénario de sobriété numérique projette quant à lui une stabilisation du parc informatique et une favorisation des projecteurs aux télévisions.

	2020-2030 Scénario tendanciel	2020-2030 Scénario sobriété numérique	2020-2030 Scénario technologies vertes
Smartphone	11,2%	0,0%	11,2%
Feature phone	-90,0%	0,0%	-90,0%



Téléphone fixe	5,5%	0,0%	5,5%
Tablette	16,7%	0,0%	16,7%
Ordinateur portable	32,6%	0,0%	32,6%
Station d'accueil	32,6%	0,0%	32,6%
Ordinateur fixe	-17,0%	0,0%	-17,0%
Ecran d'ordinateur	17,7%	0,0%	17,7%
Ecran de signalisation	44,4%	-25%	44,4%
TV	6,0%	-35,6%	6,0%
Projecteur	-92,2%	469,5%	-92,2%
SSD externe	-61,1%	0,0%	-61,1%
HDD externe	-61,1%	0,0%	-61,1%
Clefs USB et cartes SD	-61,1%	0,0%	-61,1%
Box TV	0,0%	0,0%	0,0%
Console de jeu fixe	26,1%	0,0%	26,1%
Console de jeu portable	-4,9%	0,0%	-4,9%
Enceinte connectée	379,5%	0,0%	379,5%
Imprimante	-23,4%	0,0%	-23,4%
Casques AR/VR	685,1%	390%	685,1%

Tableau 82 : Comparaison de l'évolution du parc d'équipements en région Grand Est en fonction des scénarios

## DUREE DE VIE

	2020-2030 Scénario tendanciel	2020-2030 Scénario sobriété numérique	2020-2030 Scénario technologies vertes	
Smartphone	Identique	+ 2 ans	+ 0,5 ans	
Feature phone				
Téléphone fixe				
Tablette				
Ordinateur portable				
Station d'accueil				
Ordinateur fixe				
Ecran d'ordinateur				
Ecran de signalisation				- 1,4 ans
TV				Identique
Projecteur				
SSD externe				
HDD externe				
Clefs USB et cartes SD				
Box TV				
Console de jeu fixe				
Console de jeu portable	- 0,67 ans			
Enceinte connectée	Identique			
Imprimante				
Casques AR/VR				

Tableau 83 : Comparaison de l'évolution de la durée de vie des équipements en région Grand Est en fonction des scénarios



## CONSOMMATION UNITAIRE DES EQUIPEMENTS

	2020-2030 Scénario tendanciel	2020-2030 Scénario sobriété numérique	2020-2030 Scénario technologies vertes
Smartphone	30,5%	-50%	-50%
Feature phone	0,0%		
Téléphone fixe	-30,7%		
Tablette	22,1%		
Ordinateur portable	-18,3%		
Station d'accueil	0,0%		
Ordinateur fixe	-36,2%		
Ecran d'ordinateur	0,0%		
Ecran de signalisation	0,0%		
TV	-36,2%		
Projecteur	-21,6%		
SSD externe	0,0%		
HDD externe	0,0%		
Clefs USB et cartes SD	0,0%		
Box TV	0,0%	-50%	-50%
Console de jeu fixe	-10,7%		
Console de jeu portable	-12,1%		
Enceinte connectée	0,0%		
Imprimante	7,8%		
Casques AR/VR	-44,2%		

Tableau 84 : Comparaison de l'évolution de la consommation unitaire des équipements en région Grand Est en fonction des scénarios

## REPARTITION DES CONFIGURATIONS DE TELEVISEURS

		Scénario tendanciel	Scénario technologies vertes	Scénario sobriété numérique
LCD LED	2020	98,6%		98,6%
	2030	50%		80,0%
OLED	2020	1,4%		1,4%
	2030	50%		20,0%

Tableau 85 : Comparaison de l'évolution de la répartition des technologies de téléviseur au sein du parc en région Grand Est

### 4.3.2. Tiers 1 – Objets connectés (IoT)

#### 4.3.2.1. Scénario tendanciel

Pour l'évolution tendancielle des paramètres liés aux équipements utilisateurs, les hypothèses et données utilisées sont identiques à celles de l'étude ADEME-Arcep [1]. Les taux de croissance annuels moyens (TCAM) sont déduits des données d'inventaires 2020, respectivement issues de :

- IEA, *Total Energy Model for Connected Devices*, IEA 4E EDNA, 2019 [24]
- CBI, *IDC's Worldwide Internet of Things Spending Guide* [31].



Pour résumer les projections du scénario tendanciel, le parc d'équipement des objets connectés ne fait globalement qu'augmenter, à l'exception de la catégorie « lampadaires connectés ». Voici quelques changements notables des paramètres :

- **Nombre d'équipements :** Comme dit précédemment, le parc de presque tous les équipements augmente. Certains plus que d'autres, par exemple, les objets connectés liés aux volets et fenêtres voient leur nombre multiplié par 40 ou encore certains capteurs des smart buildings, comme les RES – LE, sont multipliés par 10. D'autres augmentent de manière moins significative, tels que les serrures intelligentes dont le nombre d'équipements augmente de 19,5% entre 2020 et 2030.
- **Durée de vie :** Similairement à l'étude nationale, l'évolution de la durée de vie des équipements IoT est supposée être la même que celle des enceintes connectées. Les équipements de l'IoT voient donc leur durée de vie diminuer de -13,5% entre 2020 et 2030.
- **Consommation unitaire d'électricité :** Similairement à l'étude nationale et à partir de la source de l'IEA [24], l'amélioration de l'efficacité énergétique des objets connectés est de 5% par an entre 2020 et 2030. La consommation unitaire des objets connectés diminue donc de 40% sur la période.

#### 4.3.2.2. Scénario sobriété numérique

Les hypothèses du scénario de sobriété numérique sont similaires à celles utilisées pour les équipements utilisateurs. Ainsi, voici le résumé de l'évolution des paramètres :

- **Nombre d'équipements :** Grâce à des efforts collectifs sur les usages et la consommation d'équipements, le nombre d'équipements est projeté stable jusqu'en 2030 pour tous l'IoT.
- **Durée de vie :** Grâce au développement des filières de réparation et de reconditionnement mais aussi l'écoconception matérielle et des changements de comportement, la durée de vie est rallongée pour tous les équipements de 2 ans à horizon 2030.
- **Consommation unitaire d'électricité :** Grâce aux progrès de conception des équipements, des gains d'efficacité énergétiques importants sont projetés pour tous les équipements. Ces derniers voient ici leur consommation électrique unitaire divisée par deux.

#### 4.3.2.3. Scénario technologies vertes

Les hypothèses du scénario technologies vertes sont similaires à celles utilisées pour les équipements utilisateurs. Voici donc les évolutions considérées pour chacun des paramètres :

- **Nombre d'équipements :** De la même manière que les deux scénarios « éco-conception » de l'étude nationale, et dans une perspective « business as usual », l'évolution du nombre d'équipements suit le scénario tendanciel (Cf 4.3.1.1). Les nouvelles fonctionnalités ou les nouveaux besoins ne sont pas questionnés, le nombre d'équipements continuent donc d'augmenter.
- **Durée de vie :** Nous projetons ici un développement modéré de la filière reconditionné et de réparation ainsi qu'une légère meilleure robustesse des équipements grâce aux travaux d'éco-conception matérielle. L'hypothèse d'allongement de la durée de vie des équipements est de 0,5 ans.
- **Consommation unitaire d'électricité :** Pareillement au scénario Sobriété Numérique, les consommations électriques unitaire sont divisées par deux.

#### 4.3.2.4. Comparaison des paramètres des scénarios

Les tableaux ci-dessous synthétisent les hypothèses considérées dans l'étude pour chacun des scénarios. Ils concernent l'évolution des différents parcs d'équipements : nombre, durée de vie, consommation unitaire.

#### NOMBRE D'EQUIPEMENTS

	2020-2030 Scénario tendanciel	2020-2030 Scénario sobriété numérique	2020-2030 Scénario technologies vertes
Sécurité Vidéo	258%	0%	258%
Sécurité Contrôle	20%		20%
Automatisation - Chauffage de l'eau	72%		72%
Automatisation - Lampadaires	0%		0%
Automatisation - Climatisation	202%		202%
Automatisation - Lumières	301%		301%
Automatisation - Cuisson	41%		41%
Automatisation - Audio	69%		69%
Automatisation - Appareils électroménagers	519%		519%
Compteurs intelligents	68%		68%
Capteurs : Res - Wi-Fi	402%		402%
Capteurs : Res - LE	1071%		1071%
Capteur : Industrie - LE	479%		479%
Capteurs : Santé - LE	264%		264%
Passerelle : Bus	901%		901%
Passerelle : LE to Wi-Fi	601%	601%	
Communication de Contrôle bâtiment	179%	0%	179%
Volets et fenêtres	3897%		3897%

Tableau 86 : Comparaison de l'évolution du parc d'objets connectés en région Grand Est en fonction des scénarios

#### DUREE DE VIE

	2020-2030 Scénario tendanciel	2020-2030 Scénario sobriété numérique	2020-2030 Scénario technologies vertes
Sécurité Vidéo	-13,5% (soit de - 0,7 à -2 ans en fonction des catégories)	+ 2 ans	+ 0,5 ans

Tableau 87 : Comparaison de l'évolution de la durée de vie des objets connectés en région Grand Est en fonction des scénarios

#### CONSOMMATION UNITAIRE

	2020-2030 Scénario tendanciel	2020-2030 Scénario sobriété numérique	2020-2030 Scénario technologies vertes
Tous équipements	-40,1%	-50%	-50%

Tableau 88 : Comparaison de l'évolution de la consommation unitaire des objets connectés en région Grand Est en fonction des scénarios



### 4.3.3. Tiers 2 – Réseaux

#### 4.3.3.1. Fixes

Etant donné le nombre réduit de leviers d'action dont dispose la Région sur ces sujets, les scénarios de sobriété et technologies vertes suivent les changements induits par le tendancier au niveau de l'évolution du nombre et des types de lignes fixes projetés dans la région. Ainsi, la partie qui suit explicite les hypothèses et données utilisées pour les trois scénarios.

##### 4.3.3.1.1. *Fabrication, distribution et fin de vie*

Quelques paramètres de la prospective du tiers 2 sont identiques à ceux de l'étude ADEME-Arcep [1] mais plusieurs d'entre eux sont propres à cette étude. Par exemple, si l'étude ADEME-Arcep [1] prévoit l'extinction des lignes cuivre horizon 2030, annoncée par Orange, l'étude de la région Grand Est intègre l'objectif du SRADDET [32] avec 100% des ménages avec la fibre horizon 2023. Ce changement s'illustre par le transfert progressif des abonnés xDSL vers des abonnements FTTx, tout en comprenant une croissance du nombre de lignes fixes, basée sur des données de croissance du parc installé des résidences principales selon l'INSEE [33]. Ceci comprend donc le changement des boîtes et l'installation de nouvelles lignes. Identiquement à l'étude nationale, le nombre d'équipements de l'accès, l'agrégation et du backbone est supposé identique sur la période 2020-2030. Ainsi, les impacts associés à cette partie du tiers 2 sont constants entre 2020 et 2030.

##### 4.3.3.1.2. *Utilisation*

Pour la phase d'usage des réseaux fixes, cette étude se base sur l'évolution utilisée dans l'étude ADEME-Arcep [1], modélisant le caractère moins énergivore des fibres optiques (FTTx) par rapport aux connexions xDSL. Ainsi, la consommation des réseaux fixes diminue de 33% entre 2020 et 2030 à l'échelle nationale [1], avec un passage à 100% vers la technologie fibre. La Région Grand Est s'étant fixé l'objectif d'atteindre cette cible à horizon 2024, la réduction de 33% de la consommation d'électricité des réseaux fixes (à nombre d'abonnés constants) est appliquée entre 2020 et 2024.

#### 4.3.3.2. Mobiles

De la même manière que pour les réseaux fixes, la Région Grand Est dispose d'un faible nombre de leviers d'action pour limiter les impacts liés aux réseaux mobiles sur son territoire. Les paramètres qui concernent les phases de fabrication, distribution et fin de vie sont donc communs aux trois scénarios. Il n'y a que la phase d'utilisation qui contient une légère différenciation entre le scénario « sobriété numérique » et les scénarios tendancier et « technologies vertes ». En effet, le scénario « sobriété numérique », modélise une remise en question de l'évolution exponentielle de la consommation de données du scénario tendancier.

##### 4.3.3.2.1. *Fabrication, distribution et fin de vie*

Par manque de granularité dans les données reçues pour les inventaires d'équipements mobiles installés en 2020, nous n'avons pu différencier les équipements entre les technologies qu'ils concernaient. Par exemple, les BBU 2G, BBU 3G et BBU 4G ont tous été rassemblés sous le l'item BBU 2G-5G disponible dans NegaOctet. Ainsi, nous n'avons pu adopter aucune approche spécifique pour ce sujet. Il a donc été considéré que le nombre d'équipements installés par année resterait constant par hypothèse de renouvellement. Cette approche implique une forte incertitude.

##### 4.3.3.2.2. *Utilisation*

La phase d'utilisation est modélisée dans cette étude grâce à 3 paramètres : le nombre d'abonnés mobiles, la consommation de données mensuelle moyenne et la quantité d'électricité consommée par quantité de données transférée. Les évolutions de ces paramètres sont les suivantes :

- Nombre d'abonnés (commun au 3 scénarios) : entre 2020 et 2030, il évolue selon le TCAM moyen des cartes SIM professionnelle et personnelle observé entre 2018 et 2022 par l'Arcep [34], respectivement 5,2% et 1,7%.
- Consommation d'électricité du transfert de données (commun au 3 scénarios) : le Shift Project [5] établit une prévision de l'évolution de la consommation énergétique par Go de données transférées via les réseaux mobiles. Cette dernière passe de 0,180 kWh/Go en 2020 à 0,032 kWh/Go en 2025. Ce chiffre est ensuite considéré constant entre 2025 et 2030. Par soucis de cohérence avec l'étude nationale ADEME-Arcep [1], nous avons utilisé une



consommation énergétique de 0,237 kWh/Go en 2020. Nous avons donc appliqué à ce chiffre l'évolution du Shift Project jusqu'en 2025, puis maintenu le résultat obtenu jusqu'en 2030. Ainsi, la consommation d'énergie par Go transféré via réseau mobile passe de 0,237 kWh en 2020 à 0,0427 kWh en 2030.

- Consommation mensuelle de données :

- Scénario tendanciel & Scénario technologies vertes : Un taux de croissance annuel moyen des données mobiles consommées en France en 2020 et 2030 a été utilisé en extrapolant l'évolution de la quantité de données utilisées par les réseaux mobiles observée entre 2015 et 2022 par l'ETNO [35]. Ainsi, le volume moyen de données consommées mensuellement par les habitants de la région Grand Est passe de 6 Go en 2020 à 32 Go en 2030.
- Scénario sobriété numérique : Dans une optique de remise en question des modes de consommation du numérique, nous avons projeté ici une consommation de données stable sur la période (6 Go).

### 4.3.4. Tiers 3 – Centres de données

#### 4.3.4.1. Besoins en salles informatiques

De la même manière que l'étude ADEME-Arcep [1], l'évolution des besoins en salles informatiques est commune aux différents scénarios et utilise les mêmes hypothèses :

« Pour ce qui concerne les centres de données traditionnels, ils [les taux de croissance annuels moyens] sont de 4% pour les centres de données publics et les entreprises de moins de 250 salariés, de 6% pour les ETI et de 8% pour les grandes entreprises. Pour les centres de données à vocation commerciale, il est de 8% entre 2020 et 2030 [...]. Les centres de données HPC évoluent sur la tendance constatée de 4% » (ADEME-Arcep, rapport 3/3, page 60 [1]).

En parallèle de l'évolution des besoins des organisations et individus, le taux de migration vers l'hébergement externe (Cloud ou Edge) évoluent également. Les centres de données Edge étant considéré comme principalement mobilisés pour les projets relatifs à l'IoT, il est considéré que seules les organisations publiques et les entreprises de plus de 50 salariés migreront une partie de leurs besoins (5%, sauf pour les grandes entreprises, 10%) vers des infrastructures Edge. Les taux de migration vers le cloud évoluent de la sorte :

Type	Taux de migration Cloud – 2020	Taux de migration Cloud - 2030
Conseil régionaux, départementaux, SDIS	70%	90% (+5% Edge)
COMUE (Communauté Universitaire et d'établissements)	10%	70% (+5% Edge)
Agglomérations	30%	90% (+5% Edge)
Mairie (plus de 30 000 habitants)	70%	90% (+5% Edge)
CHRU, CHU et Centres Hospitaliers	10%	70% (+5% Edge)
Ministères	0%	30% (+5% Edge)
EPIC/ODAC	10%	70% (+5% Edge)
MIC (1 -9 salariés)	100%	100%
PME (10-49 salariés)	90%	100%
PME (50-99 salariés) & PME (100- 249 salariés)	80%	95% (+5% Edge)
ETI (250-5000 salariés)	70%	95% (+5% Edge)
Grandes Entreprises (> 5000 salariés)	70%	90% (+5% Edge)

Tableau 89 : Evolution des taux de migration cloud & edge pour les organisations publiques et privées.

Au global, voilà l'évolution des besoins en salles informatiques projetée à l'échelle de la région Grand Est :

	2020	2021	2022	...	2028	2029	2030
<b>Datacenters public local</b>	8 198	7 868	7 498	...	4 295	3 567	2 774
<b>Datacenters public national</b>	1 890	1 824	1 749	...	1 092	942	777
<b>Datacenters entreprises</b>	39 941	37 643	35 041	...	11 578	6 066	0
<b>Cloud (dont Colocation &amp; HPC)</b>	121 314	129 656	138 554	...	205 882	219 869	234 794
<b>Edge Computing</b>	-	649	1 360	...	7 214	8 509	9 914
<b>Total</b>	171 343	177 640	184 203	...	230 062	238 953	248 258

Tableau 90 : Evolution des besoins informatiques en infrastructures propres en région Grand Est (m<sup>2</sup>)



#### 4.3.4.2. Consommation électrique des équipements par m<sup>2</sup> de centre de données

L'évolution des consommations électriques par m<sup>2</sup> des centres de données est identique à celle des scénarios ST, S1 et S2 (respectivement pour le scénario, tendanciel, sobriété numérique, technologies vertes) de l'étude Ademe-Arcep [1] : le scénario « sobriété numérique » voit la consommation unitaire des équipements (kWh/m<sup>2</sup>) divisée par deux et celle du scénario « technologies vertes » réduit de -33%.

	2020			2030		
	Scénario tendanciel	Scénario sobriété numérique	Scénario technologies vertes	Scénario tendanciel	Scénario sobriété numérique	Scénario technologies vertes
<b>Datacenters public local</b>	4205			5451	2101	2795
<b>Datacenters public national</b>	5519			7154	2758	3669
<b>Datacenters entreprises</b>	7008			9085	3503	4569
<b>Edge Computing</b>	8760			11356	4378	5823
<b>Colocation</b>	31536			40883	15762	20966
<b>HPC</b>	7008			9085	3503	4659

Tableau 91 : Evolution des consommations des équipements par m<sup>2</sup> des différents types de salles informatiques

En parallèle de ces évolutions liées aux équipements, une amélioration globale des PUE commune à tous les scénarios est projetée pour 2030, issue des hypothèses de l'étude nationale.

	2020	2030
<b>Datacenters public local</b>	1,93	1,55
<b>Datacenters public national</b>	1,93	1,55
<b>Datacenters entreprises</b>	1,93	1,55
<b>Edge Computing</b>	1,55	1,32
<b>Colocation (conso)</b>	1,17	1,11
<b>HPC (conso)</b>	1,93	1,60

Tableau 92 : Evolution des PUE des différents types de salles informatiques

Enfin, chacun des scénarios de la prospective prend en compte un certain niveau de relocalisation des besoins en Cloud externe. Ainsi, le scénario tendanciel projette en 2030 la relocalisation de 10% des surfaces Cloud Monde (hors France) en France, le scénario « technologies vertes » 20% et le scénario « sobriété numérique » 30%. En parallèle de cela, une décarbonation de l'électricité mondiale a été projetée, sur la base d'une prospective de l'IEA (scénario 2DS) [36].



## 4.4. Résultats des différents scénarios

### 4.4.1. Principaux enseignements

#### 4.4.1.1. Scénario tendanciel

Le scénario tendanciel projette le prolongement des usages du numérique selon les évolutions observées ces dernières années, sans remettre en question les tendances associées. Ce faisant, il montre un numérique incapable de s'adapter à une maîtrise, désormais nécessaire, des ressources et de l'énergie ainsi qu'à une limitation des émissions de gaz à effet de serre qui y sont associés. Ainsi, sans rationaliser les probables évolutions futures des équipements numériques et de leurs usages, le scénario tendanciel met en lumière des impacts croissants qui se traduiraient comme suit :

- L'empreinte carbone du numérique en région Grand Est augmente de 31% entre 2020 et 2030. En effet, elle passe de 2,30E+06 t CO<sub>2</sub> eq. à 3,0E+06 Mt eq CO<sub>2</sub>.
  - Cette hausse est majoritairement causée par l'augmentation du nombre d'équipements utilisateurs dans la région, le développement de l'IoT et la hausse du nombre de télévisions OLED, étant plus impactantes que les LCD. Le tiers 1, essentiellement à cause de ces trois raisons, est responsable de 5,4E+05 Mt CO<sub>2</sub> eq. en plus comparé à 2020 (+ 48%). Certains gains d'efficacité énergétique permettent une diminution des gaz à effet de serre émis lors de d'utilisation. Mais ces efforts sont supplantés par l'augmentation du nombre de plusieurs équipements, dont la phase de fabrication est bien plus impactante.
  - Le tiers 3 est aussi responsable d'une hausse conséquente des émissions de GES. En effet, l'augmentation des besoins informatiques des organisations présentes dans la région, dont la migration vers de l'hébergement externe augmente aussi, se fait majoritairement vers des prestataires non-français (à 90%), dont l'électricité est plus carbonée. Les centres de données émettent, en 2030, 2,4E+05 t CO<sub>2</sub> eq. de plus qu'en 2020 (+22%).
  - La Région a inscrit dans son SRADDET un objectif de 100% des ménages ayant la fibre à horizon 2024. La technologie FTTx utilise des box qui consomment en moyenne moins et dont la phase de fabrication est moins impactante que les réseaux xDSL. Ces derniers utilisent aussi des DSLAM, des multiplexeurs d'accès DSL dont la phase de fabrication est conséquente (environ 1 700 kg CO<sub>2</sub> eq.). Leur « disparition » à horizon 2024 implique 64E+03 t CO<sub>2</sub> eq. en moins. De plus, la fibre requiert moins de puissance que la xDSL pour la transmission de données. C'est la raison pour laquelle, le scénario tendanciel démontre une réduction des émissions de gaz à effet de serre liées au tiers 2. Les réseaux mobiles, moins impactants en valeur absolu, voient leurs émissions augmenter étant donné la croissance de leur utilisation. Mais cette hausse est largement contrée et inversée par la réduction des émissions des réseaux fixes. Ainsi le tiers 2 divise par deux ses émissions en 2030 (-51%, - 67E+03 t CO<sub>2</sub> eq.). Cependant, au global, cette diminution est largement supplantée par la hausse des émissions liée au fort développement de l'IoT qui implique 106 kt eq CO<sub>2</sub> en plus en 2030.
- L'épuisement des ressources abiotiques naturelles augmente légèrement d'ici 2030 avec +1 100 kg Sb eq. (+1,2%). Les tiers 1 et 3 continuent de contribuer de manière significative à cet épuisement des ressources abiotiques naturelles (respectivement +4 600 et +4 400 kg Sb eq.) à cause de la croissance du parc d'équipements et des besoins informatiques. C'est le passage de la technologie xDSL vers la fibre optique qui permet d'importantes et rapides réductions de cet indicateur, notamment grâce à la disparition des DSLAM, équipements dont la fabrication est très impactante. Néanmoins la réalité de ce bénéfice reste dépendante de la réelle mise en œuvre de cette politique de la Région sur les réseaux fixes.
- Si rien n'est fait pour l'enrayer elle aussi, la production de déchets, augmente significativement entre 2020 et 2030. En effet, ce sera environ 337 000 tonnes de déchets en plus qui seront générés comparé à 2020 (+19%). Cela est principalement dû à :
  - L'augmentation importante du déploiement et de l'utilisation des objets connectés qui implique + 128 000 tonnes de déchets (+350% des déchets de l'IoT en 2020).
  - L'augmentation des besoins informatiques impliquant un besoin croissant en infrastructures informatiques matérielles. + 175 000 tonnes de déchets (+54%).
  - L'augmentation du parc d'équipements utilisateurs impliquant + 35 000 tonnes de déchets (+3%).
- La consommation d'énergie primaire se voit elle aussi croître de manière significative dans le scénario tendanciel. Elle augmente d'environ 32% et implique une consommation de 28,8E+06 GJ en plus comparé à 2020. Cela est dû à une hausse globale de la consommation de produits et de services numériques, via le parc grossissant

d'équipements utilisateurs, la demande croissante en besoins informatiques et le développement de l'IoT. Dans un contexte énergétique plus que complexe et risqué, comme cela a pu être constaté en 2022 et encore aujourd'hui, il paraît impératif de limiter cette consommation incessamment croissante d'énergie.

	Changement climatique - t CO <sub>2</sub> eq.	Epuisement des ressources abiotiques naturelles - éléments - kg Sb eq.	Production de déchets - tonnes	Consommation d'énergie primaire - GJ
<b>Tiers 1 - équipements + IoT</b>	1 666 285	76 876	1 576 718	61 752 819
<b>Tiers 2 - réseaux</b>	65 514	3 870	2 228	5 917 072
<b>Tiers 3 - centres de données</b>	1 281 804	12 332	498 723	52 436 752
<b>TOTAL</b>	<b>3 013 604</b>	<b>93 078</b>	<b>1 921 754</b>	<b>120 106 643</b>

Tableau 93 : Tableau récapitulatif des impacts environnementaux du scénario tendanciel, en 2030

	Changement climatique - t CO <sub>2</sub> eq.	Epuisement des ressources abiotiques naturelles - éléments - kg Sb eq.	Production de déchets - tonnes	Consommation d'énergie primaire - GJ
<b>Tiers 1 - Equipements + IoT</b>	+48%	+7%	+12%	+27%
<b>Tiers 2 - réseaux</b>	-51%	-69%	-39%	-27%
<b>Tiers 3 - centres de données</b>	+22%	+55%	+54%	+53%
<b>TOTAL</b>	<b>+31%</b>	<b>+1%</b>	<b>+15%</b>	<b>+32%</b>

Tableau 94 : Tableau récapitulatif de l'évolution des impacts environnementaux du scénario tendanciel, entre 2020 et 2030

#### 4.4.1.2. Scénario « sobriété numérique »

Le scénario « sobriété numérique » pose les bases d'une réflexion et d'une prise d'action sur les usages du numérique au sein de la région Grand Est, du côté professionnel comme personnel. Grâce à des mesures concrètes et ambitieuses, détaillées dans les parties précédentes, c'est le seul scénario qui parvient à limiter et même réduire les impacts environnementaux du numérique dans la région :

- Les émissions de GES liées au numérique en région Grand Est baissent de -3,3E+05 t CO<sub>2</sub> eq. en 2030, soit une diminution de - 14%. Celle-ci est notamment expliquée par :
  - La stabilisation du parc, l'allongement des durées de vie et l'amélioration de l'efficacité énergétique des équipements utilisateurs qui baissent de -31% les émissions du tiers 1.
  - La relocalisation des besoins informatiques externalisés permet, elle, de limiter l'explosion des impacts liés au Cloud externe. L'obtention de 30% de ces besoins en Cloud souverain français permet ici d'éviter 1,4E+05 t CO<sub>2</sub> eq. comparé au scénario tendanciel mais ne suffit pas à compenser l'augmentation des émissions liée à la hausse des besoins informatiques. Les émissions du tiers 3 augmentent donc de 9% (+ 1E+05 t CO<sub>2</sub> eq.
  - Le transfert des technologies xDSL vers de la fibre et la rationalisation de la consommation de données mobiles permettent de diminuer les émissions du tiers 2 de 61% en 2030 (-8 E+04 t CO<sub>2</sub> eq.).
- Aux bénéfices du scénario tendanciel permis par le tiers 2, s'ajoutent dans ce scénario la stabilisation du parc d'équipements et l'allongement des durées de vie qui permettent de réduire très significativement l'épuisement des ressources abiotiques naturelles lié au tiers et à la phase de fabrication (-25 400 kg Sb eq.). Le tiers 3 implique quant à lui la même augmentation à cause de l'augmentation des besoins informatiques commune aux trois



scénarios. L'épuisement des ressources abiotiques naturelles diminue donc au global de -32% en 2030 (-29 600 kg Sb eq.).

- La production de déchets diminue de -19% comparé à 2030, cela représente 321 000 tonnes de déchets en moins. Cette réduction est très majoritairement permise par l'évolution des paramètres du tiers 1. En effet, toutes les mesures projetées pour limiter la taille du parc et allonger la durée de vie des équipements, permettent d'éviter la production de 495 000 tonnes de déchets. Cependant, l'augmentation des besoins informatiques, qu'ils soient externalisés en France ou ailleurs, impliquent une augmentation du volume de déchets produits par le tiers 3. Ce sont environ 175 000 tonnes de déchets qui sont produits en plus en 2030 par les centres de données.
- La consommation d'énergie primaire diminue d'environ -18% en 2030 (- 16,8E+06 GJ).
  - De la même manière que pour la production de déchets, le tiers 1 est là où réside la majorité de ces réductions, et ce pour les mêmes raisons. Cependant, à la différence des déchets, un levier important aide à d'autant plus réduire la consommation d'énergie primaire des équipements, c'est l'amélioration de leur efficacité énergétique qui permet de diviser par deux leurs consommations unitaires.
  - Le tiers 2 lui aussi contribue à cette amélioration grâce à la réduction de -41% de sa consommation d'énergie primaire en 2030. Cela est permis par l'utilisation généralisée de technologies fixes moins consommatrices (fibre) et par la limitation de la consommation de données mobiles.
  - Le tiers 3 est quant à lui une source d'augmentation de la consommation d'énergie primaire. La croissance des besoins informatiques implique une hausse de cette consommation que l'amélioration de l'efficacité énergétique des infrastructures n'arrive pas à supplanter. Il en résulte une consommation additionnelle d'environ 8,5E+06 GJ comparé en 2030 (+ 25%).

	Changement climatique - t CO <sub>2</sub> eq.	Epuisement des ressources abiotiques naturelles - éléments - kg Sb eq.	Production de déchets - tonnes	Consommation d'énergie primaire - GJ
<b>Tiers 1 - Equipements + IoT</b>	777 674	46 212	918 059	26 672 909
<b>Tiers 2 - réseaux</b>	52 084	3 867	2 228	4 767 831
<b>Tiers 3 - centres de données</b>	1 145 114	12 311	498 723	42 921 294
<b>TOTAL</b>	<b>1 974 873</b>	<b>62 390</b>	<b>1 263 096</b>	<b>74 362 034</b>

Tableau 95 : Tableau récapitulatif des impacts environnementaux du scénario sobriété numérique, en 2030

	Changement climatique - t CO <sub>2</sub> eq.	Epuisement des ressources abiotiques naturelles - éléments - kg Sb eq.	Production de déchets - tonnes	Consommation d'énergie primaire - GJ
<b>Tiers 1 - Equipements + IoT</b>	-31%	-35%	-35%	-45%
<b>Tiers 2 - réseaux</b>	-61%	-69%	-39%	-41%
<b>Tiers 3 - centres de données</b>	9%	55%	54%	25%
<b>TOTAL</b>	<b>-14%</b>	<b>-32%</b>	<b>-24%</b>	<b>-18%</b>

Tableau 96 : Tableau récapitulatif de l'évolution des impacts environnementaux du scénario sobriété numérique, entre 2020 et 2030



#### 4.4.1.3. Scénario Technologies Vertes

Le scénario Technologies Vertes ne questionne pas les habitudes et tendances de consommation du numérique. Au contraire, cette projection compte sur le numérique comme outil clé du développement futur des activités humaines via le progrès technologique. Ainsi, presque toutes les tendances de consommation du numérique observées et modélisées dans le scénario tendanciel sont réutilisées ici. Cependant, dans l'optique d'un progrès technologique au service de l'optimisation énergétique et environnemental des activités liées au numérique, certains paramètres, comme cela a été décrit dans la partie *Hypothèses et données utilisées*, s'améliorent à horizon 2030 et permettent de réduire, dans une certaine mesure, les impacts croissants du scénario tendanciel. En effet, l'amélioration de l'efficacité énergétique des équipements et la légère amélioration de leur durée d'utilisation, atténuent l'intensité de la croissance des impacts du numérique dans la région mais cela ne s'avère pas suffisant pour infléchir cette croissance. Ainsi, les évolutions constatées du scénario « technologies vertes » sont les suivantes :

- Les émissions de gaz à effet de serre continuent d'augmenter significativement avec 4,1E+05 t CO<sub>2</sub> eq. émises en plus en 2030, soit une augmentation de + 18%. Celle-ci est causée par :
  - Les émissions croissantes du tiers 1 (+ 29%) dues à la forte augmentation du parc d'équipements utilisateurs et IoT qui supplantent tous les gains permis par l'amélioration des consommations électriques unitaires. En effet, comme il a de nombreuses fois été évoqué à propos du numérique, la phase de fabrication des équipements concentre la majeure partie des émissions de GES du tiers 1 (encore plus dans un pays comme la France dont l'électricité est peu carbonée).
  - Les émissions de GES impliquées par le développement des objets connectés qui viennent annuler les bénéfices permis par l'évolution des technologies réseaux (tiers 2), environ 7E+04 t CO<sub>2</sub> eq.
  - Le tiers 3 qui voit ses émissions augmenter comme dans tous les scénarios, mais ce dans une moindre mesure que le scénario tendanciel puisqu'une meilleure relocalisation des besoins en cloud y est projetée. Les centres de données sont responsables ici de 1,5E+05 t CO<sub>2</sub> eq. en plus comparé à 2020.
- L'évolution de l'épuisement des ressources abiotiques naturelles du scénario technologies vertes suit la même dynamique que celle du scénario sobriété numérique, à l'exception que l'allongement des durées de vie des équipements est moins importante et que le parc d'équipements utilisateurs continue de s'accroître. Les tiers 2 et 3 évoluent de manière quasi identique avec le scénario tendanciel (respectivement en baisse de 8 500 kg Sb eq. et en hausse de 4 400 kg Sb eq.). Le scénario technologies vertes voit donc l'épuisement des ressources abiotiques naturelles diminuer de -7,8% en 2030.
- La production de déchets, au global, augmente de 9% à cause de :
  - La hausse importante des déchets générés par l'utilisation généralisée des objets connectés et ceux issus du tiers 3 avec comme déjà mentionné, la croissance des besoins informatiques. Ces deux sources de déchets supplémentaires impliquent environ 270 000 tonnes de déchets additionnels.
  - Cette hausse précédemment expliquée est en partie contrebalancée par les réductions permises par la décroissance tendancielle du parc de certains équipements (ordinateurs fixes, feature phones). Les +9% d'évolution globale des déchets produits est le résultat de ces deux évolutions particulières.
- La consommation d'énergie primaire, au global, augmente aussi (+ 6,2%). Cela est le résultat de quelques grosses augmentations atténuées par certaines réductions :
  - Le tiers 3 est le principal responsable de cette consommation croissante d'énergie primaire. De la même manière que pour le scénario de sobriété, les besoins informatiques croissants impliquent, indépendamment de la provenance de l'hébergement, une hausse de la consommation d'énergie primaire de l'ordre de 10E+06 GJ.
  - La consommation d'énergie primaire du tiers 1 diminue globalement grâce aux consommations unitaires des équipements qui ont été divisées par deux grâce aux gains d'efficacité énergétique (- 10E+06 GJ hors télévisions). Les télévisions, dont le nombre augmente et dont le mix technologique évolue vers des consommations unitaires plus importantes, consomme 5E+06 GJ d'énergie primaire en plus comparé à 2020.

	Changement climatique - t CO <sub>2</sub> eq.	Epuisement des ressources abiotiques naturelles - kg Sb eq.	Production de déchets - tonnes	Consommation d'énergie primaire - GJ
<b>Tiers 1 - Equipements + IoT</b>	1 444 334	68 648	1 398 063	46 335 759
<b>Tiers 2 - réseaux</b>	65 514	3 870	2 216	5 916 727
<b>Tiers 3 - centres de données</b>	1 198 948	12 314	498 723	44 644 318
<b>TOTAL</b>	<b>2 708 796</b>	<b>84 832</b>	<b>1 743 087</b>	<b>96 896 805</b>

Tableau 97 : Tableau récapitulatif des impacts environnementaux du scénario technologies vertes, en 2030

	Changement climatique - t CO <sub>2</sub> eq.	Epuisement des ressources abiotiques naturelles - kg Sb eq.	Production de déchets - tonnes	Consommation d'énergie primaire - GJ
<b>Tiers 1 - Equipements + IoT</b>	29%	-4%	-1%	-5%
<b>Tiers 2 - réseaux</b>	-51%	-69%	-39%	-27%
<b>Tiers 3 - centres de données</b>	15%	55%	54%	30%
<b>TOTAL</b>	<b>18%</b>	<b>-8%</b>	<b>5%</b>	<b>6%</b>

Tableau 98 : Tableau récapitulatif de l'évolution des impacts environnementaux du scénario technologies vertes, entre 2020 et 2030



## 4.4.2. Comparaison des scénarios

### 4.4.2.1. Vision globale (tous tiers)

Les résultats détaillés par la suite présentent l'impact global en 2030 du numérique en région Grand Est selon nos 3 scénarios étudiés. Ils abordent successivement les résultats d'impacts en termes d'émissions de gaz à effet de serre ; d'épuisement des ressources naturelles abiotiques, de production de déchets et de consommation d'énergie primaire. Les résultats concernent les 3 tiers étudiés.

### EMISSIONS DE GAZ A EFFET DE SERRE

En 2030, les émissions de gaz à effet de serre du numérique augmentent dans le scénario tendanciel et le scénario technologies vertes. Celui de sobriété numérique est le seul qui réussit à les réduire. En fonction des scénarios, les émissions évoluent ainsi :

- Scénario tendanciel : +31%
- Scénario technologies vertes : +18%
- Scénario sobriété numérique : -14%

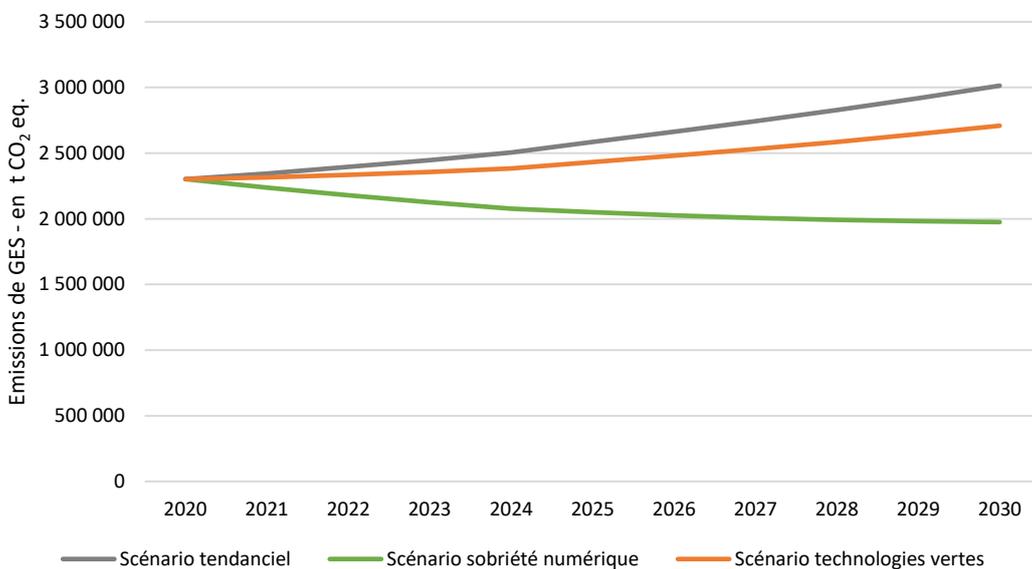


Figure 46 : Evolution des émissions de GES entre 2020 et 2030 dans les trois scénarios modélisés

La part des tiers au sein de l'impact total évolue de manière différente en fonction des scénarios, en fonction des hypothèses de chacune des projections (cf. partie 4.3).



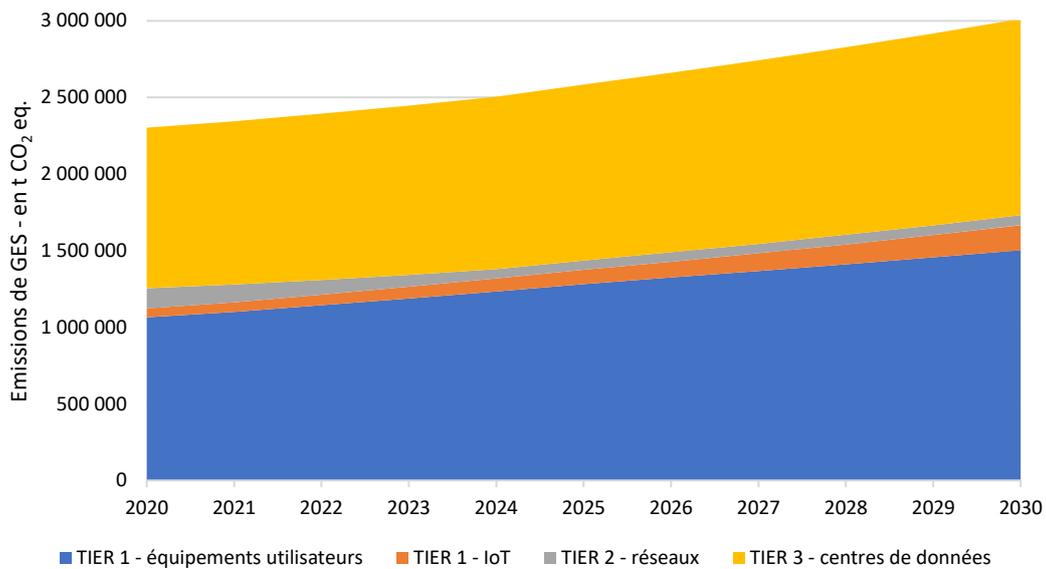


Figure 47 : Répartition des émissions de GES par tiers – scénario tendanciel (2020-2030).

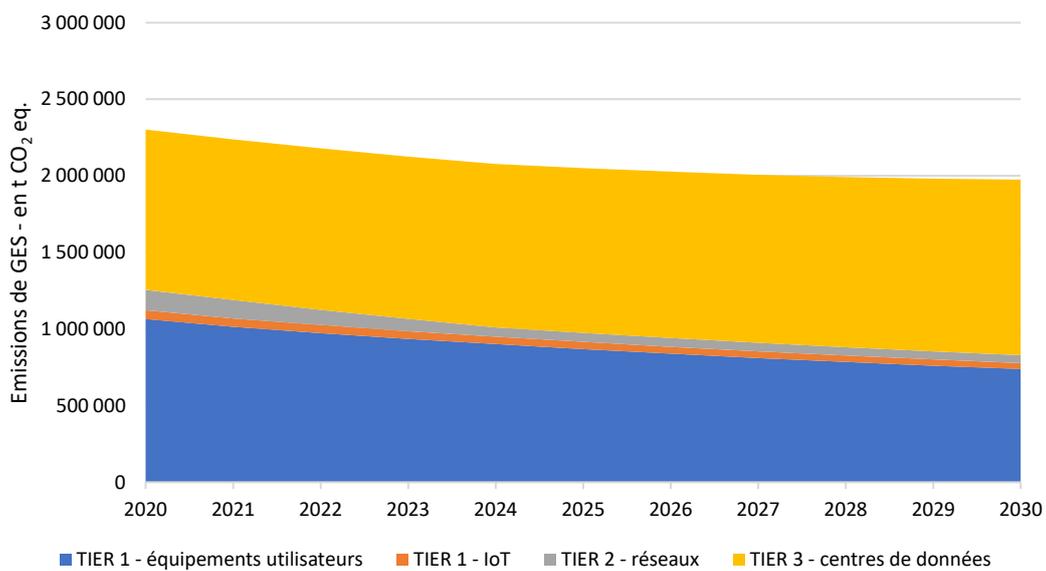


Figure 48 : Répartition des émissions de GES par tiers – scénario « sobriété numérique » (2020-2030).



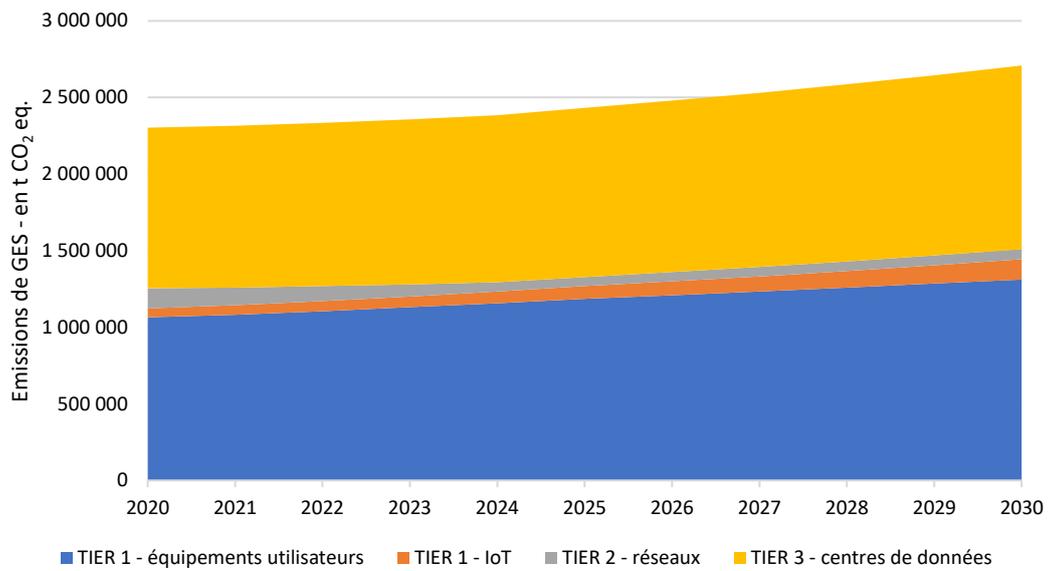


Figure 49 : Répartition des émissions de GES par tiers – scénario « technologies vertes » (2020-2030).



## ÉPUISEMENT DES RESSOURCES NATURELLES ABIOTIQUES

En 2030, l'épuisement des ressources abiotiques naturelles augmente dans le scénario tendanciel et diminue légèrement dans le scénario technologies vertes. Celui de sobriété numérique est le seul qui réussit à réduire cet impact de manière significative. Les variations de ce dernier calculées en 2030 sont comme suit :

- Scénario tendanciel : +1%
- Scénario technologies vertes : -8%
- Scénario sobriété numérique : -32%

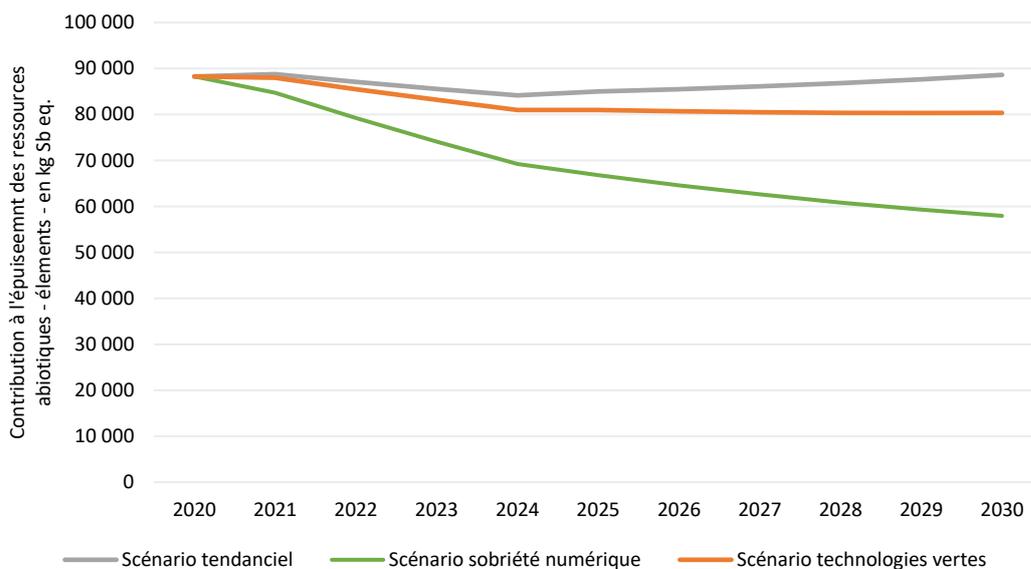


Figure 50 : Evolution de la contribution à l'épuisement des ressources naturelles abiotiques – éléments – entre 2020 et 2030 dans les trois scénarios modélisés

L'épuisement des ressources abiotiques naturelles diminue de manière considérable jusqu'à 2024, du fait du passage à la fibre pour le tiers 2. C'est ensuite majoritairement la fabrication des équipements et plus précisément celle des équipements utilisateurs qui évolue. Leur durée de vie et les technologies (plus ou moins impactantes) sur lesquelles ils reposent sont donc des paramètres qui influent beaucoup sur l'évolution de cet indicateur. Les différents scénarios, dont les hypothèses sous-jacentes sont explicitées dans la partie précédente, projettent donc 3 évolutions possibles :

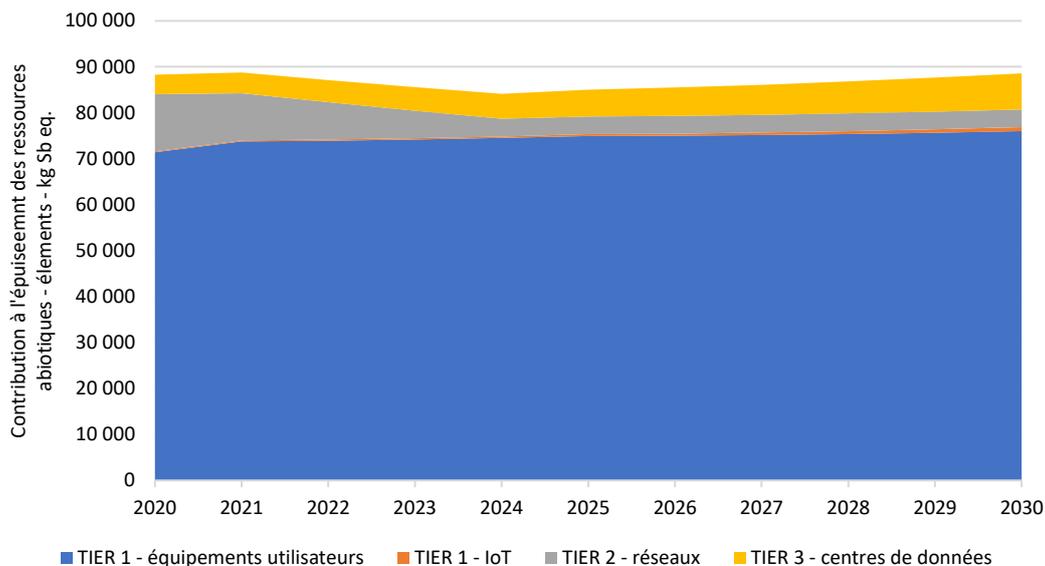


Figure 51 : Répartition de la contribution à l'épuisement des ressources naturelles abiotiques – éléments – par tiers – scénario tendanciel (2020-2030).

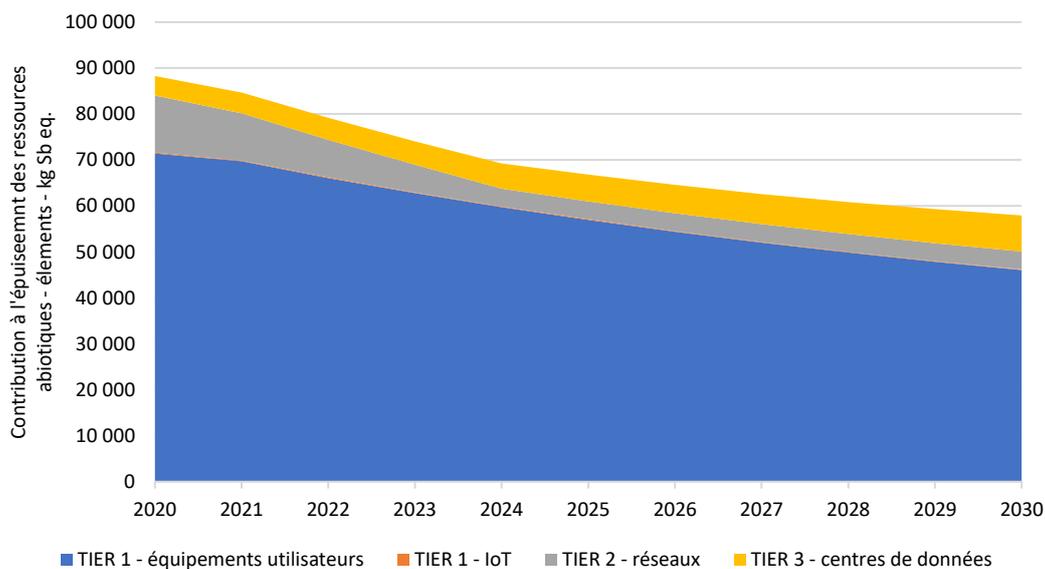


Figure 52 : Répartition de la contribution à l'épuisement des ressources naturelles abiotiques – éléments – par tiers – scénario « sobriété numérique » (2020-2030).



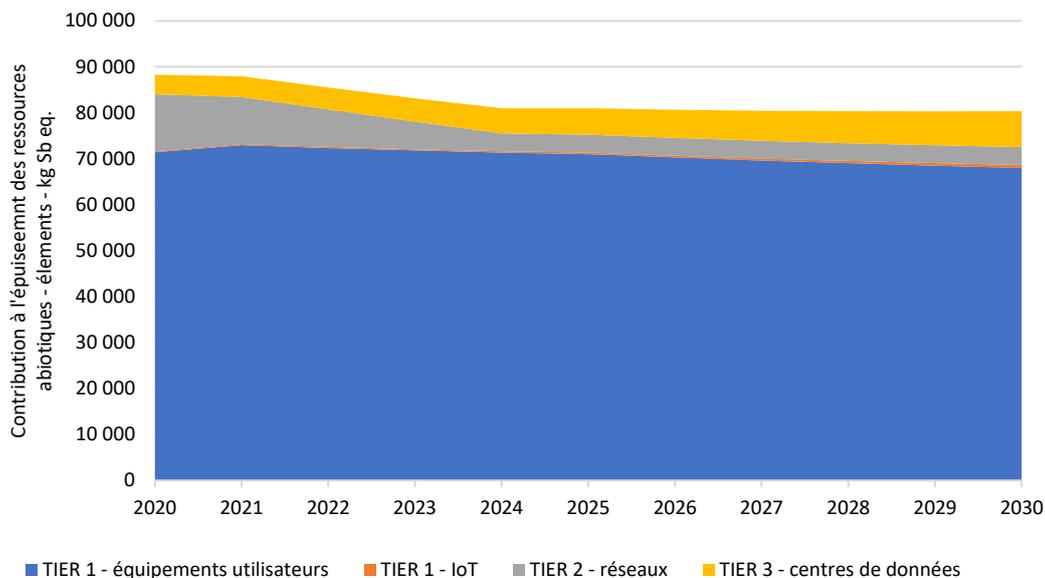


Figure 53 : Répartition de la contribution à l'épuisement des ressources naturelles abiotiques – éléments – par tiers – scénario « technologies vertes » (2020-2030).

## PRODUCTION DE DECHETS

En 2030, la production de déchets causée par le numérique augmente dans le scénario tendanciel et le scénario technologies vertes. Celui de sobriété numérique est le seul qui réussit à réduire cet impact de manière significative. Les variations de ce dernier calculées en 2030 sont comme suit :

- Scénario tendanciel : +19%
- Scénario technologies vertes : +9%
- Scénario sobriété numérique : -18%

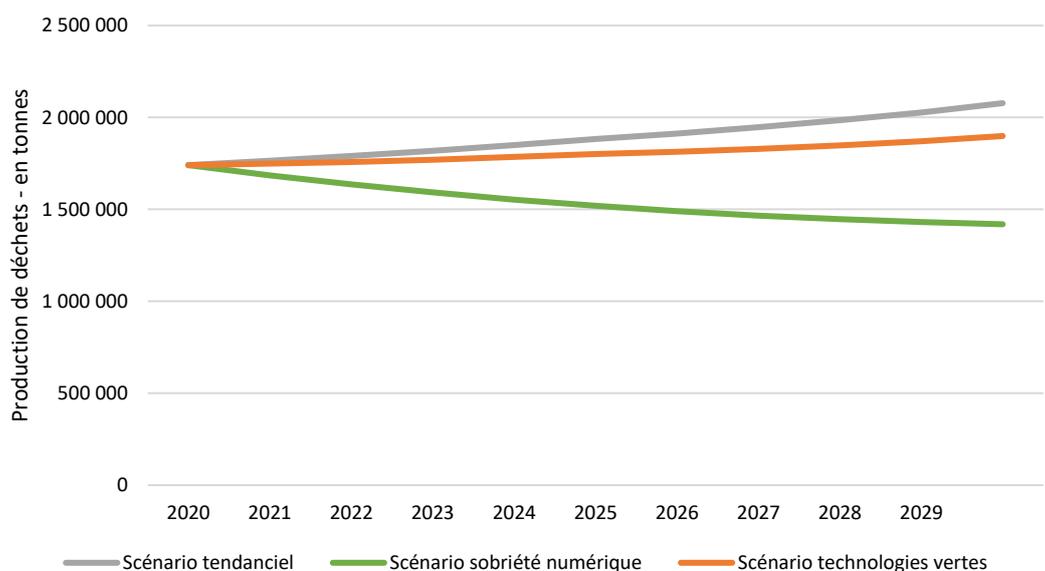


Figure 54 : Evolution de la production de déchets entre 2020 et 2030 dans les trois scénarios modélisés



De la même manière que pour l'épuisement des ressources, une grande partie de la production de déchets liée au numérique est causée par la fabrication (et dans une moindre mesure de la fin de vie) du tiers 1. Les évolutions de cet indicateur pour les 3 Tiers sont donc assez similaires aux précédentes, à l'exception de l'IoT qui, du fait des volumes d'équipements impliqués en fonction des scénarios, peut avoir une influence conséquente sur le volume de déchets produits.

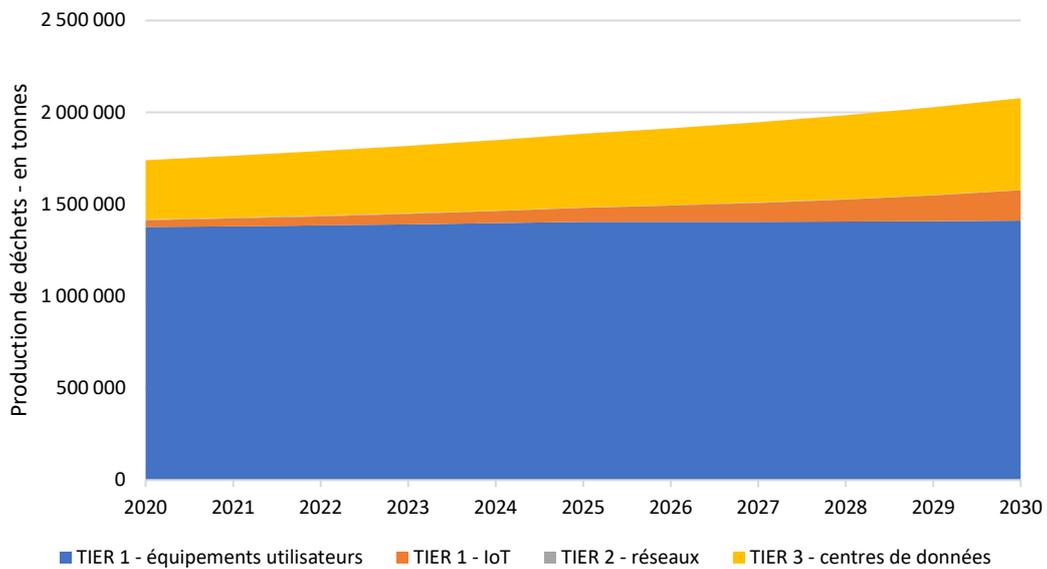


Figure 55 : Répartition de la production de déchets par tiers – scénario tendanciel (2020-2030).

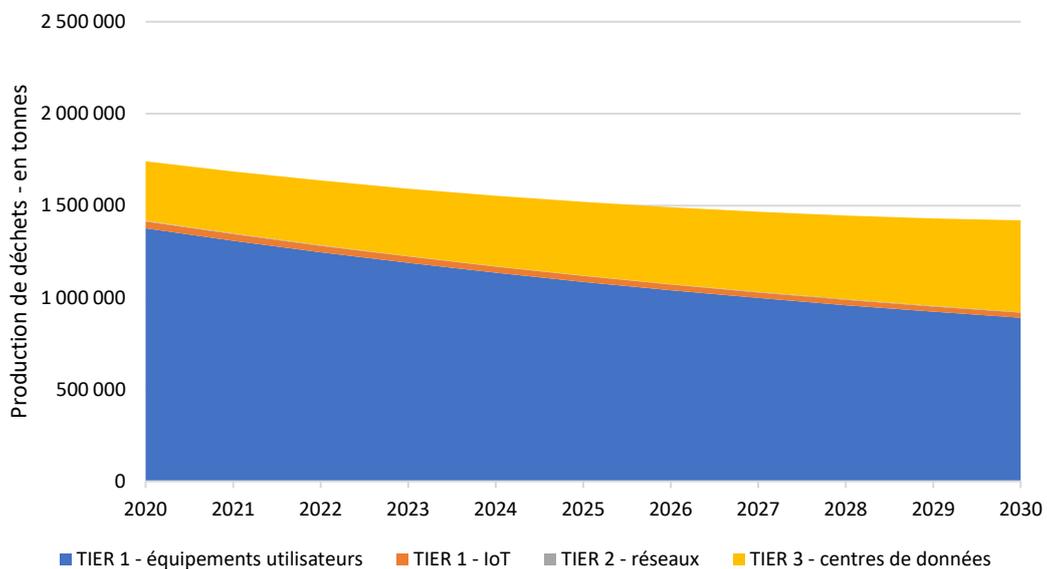


Figure 56 : Répartition de la production de déchets par tiers – scénario « sobriété numérique » (2020-2030).



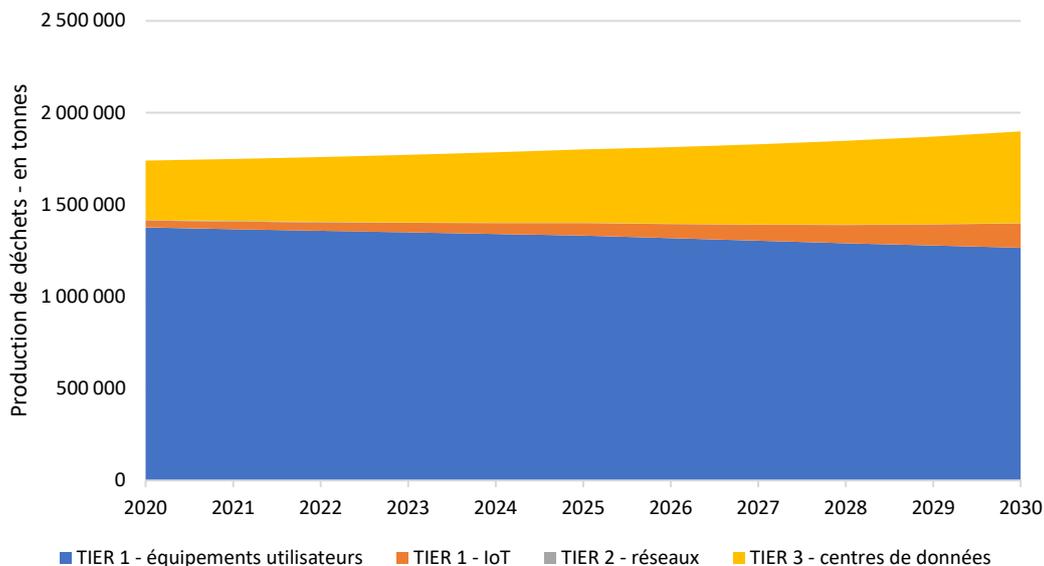


Figure 57 : Répartition de la production de déchets par tiers – scénario « technologies vertes » (2020-2030).

## CONSOMMATION D'ÉNERGIE PRIMAIRE

En 2030, la production de déchets causée par le numérique augmente dans le scénario tendanciel et le scénario technologies vertes. Celui de sobriété numérique est le seul qui réussit à réduire cet impact de manière significative. Les variations de ce dernier calculées en 2030 sont comme suit :

- Scénario tendanciel : +32%
- Scénario technologies vertes : +6%
- Scénario sobriété numérique : -18%

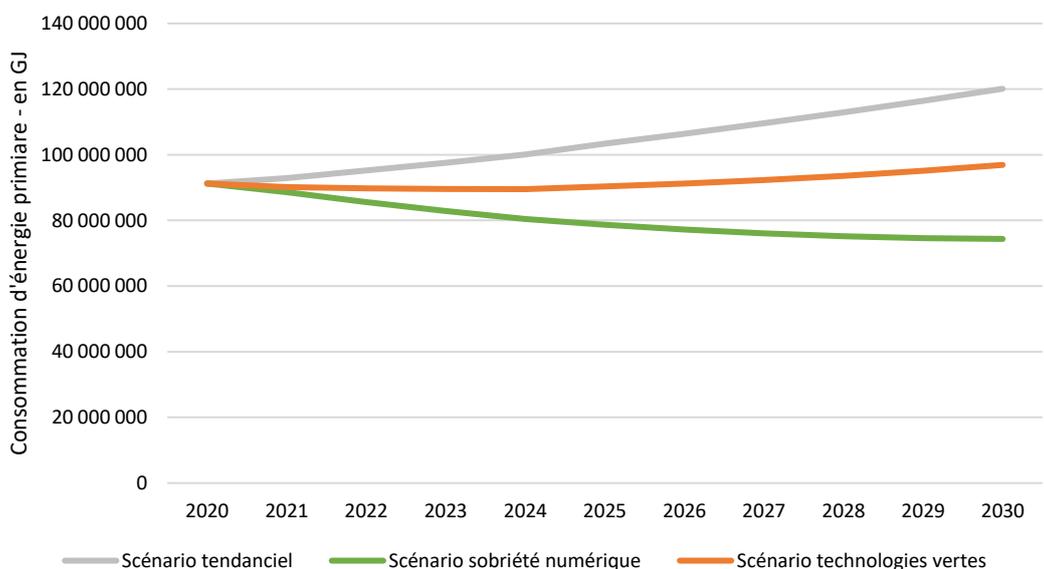


Figure 58 : Evolution de la consommation d'énergie primaire entre 2020 et 2030 dans les trois scénarios modélisés

La consommation d'énergie primaire est, parmi les quatre indicateurs, celui qui est le plus lié à la phase d'utilisation des équipements. Il évolue donc de différentes manières sur tous les scénarios en fonction des différents gains d'efficacité énergétique projetés mais aussi en fonction de des parcs d'équipements (la phase de fabrication est aussi conséquente sur la consommation d'énergie primaire).



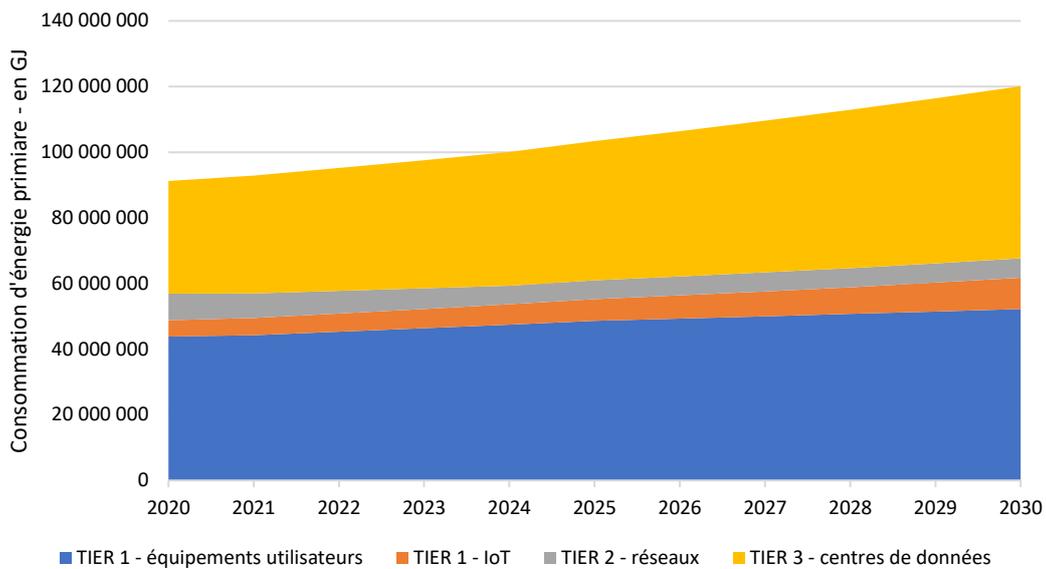


Figure 59 : Répartition de la consommation d'énergie primaire par tiers – scénario tendanciel (2020-2030).

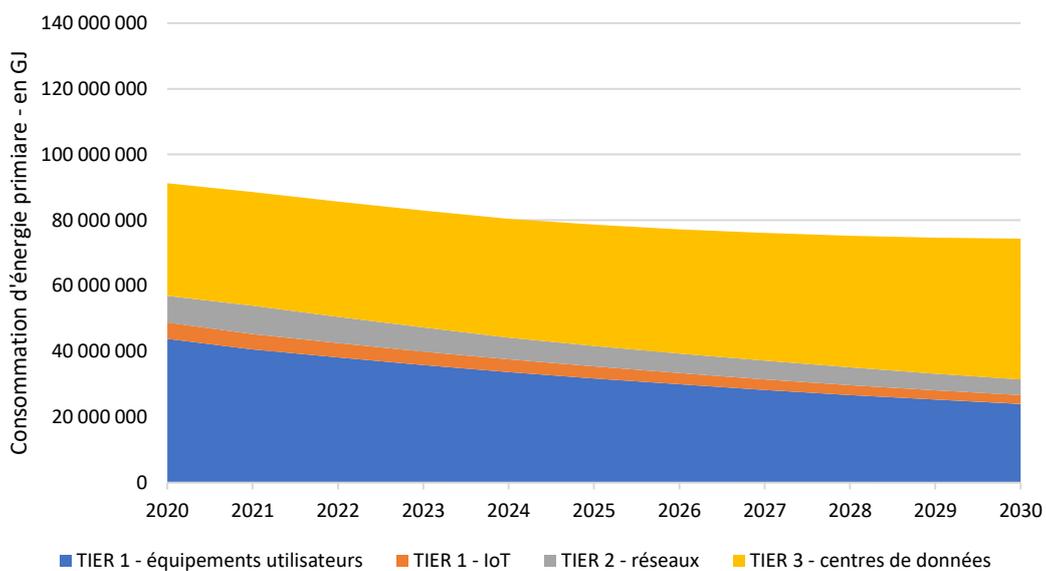


Figure 60 : Répartition de la consommation d'énergie primaire par tiers – scénario « sobriété numérique » (2020-2030).



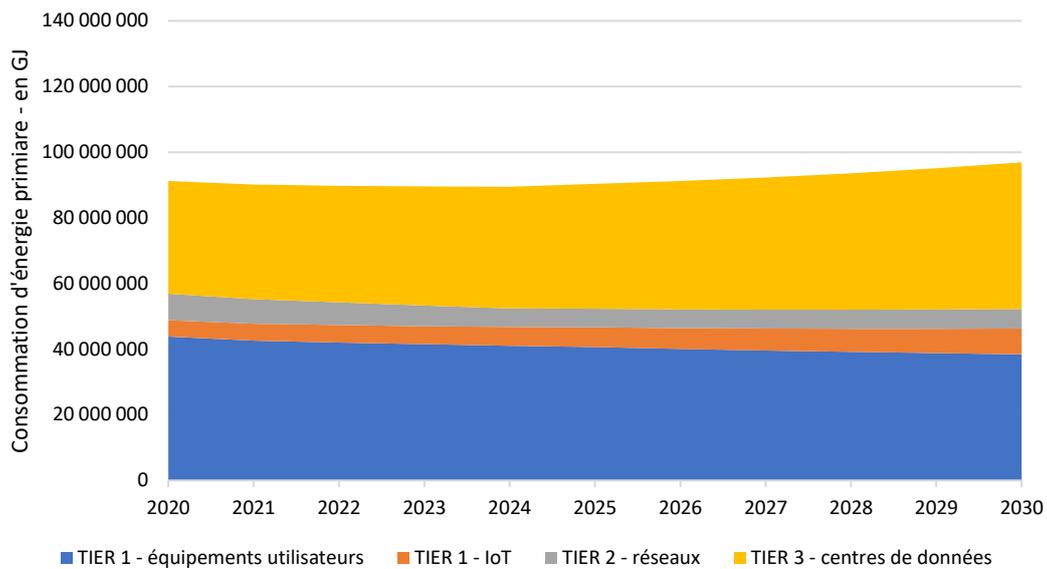


Figure 61 : Répartition de la consommation d'énergie primaire par tiers – scénario « technologies vertes » (2020-2030).



#### 4.4.2.2. Tiers 1 - Equipements utilisateurs

Les résultats détaillés par la suite présentent l'impact pour le tiers 1 « équipements utilisateurs » en 2030 du numérique en région Grand Est selon nos 3 scénarios étudiés. Ils abordent successivement les résultats d'impacts en termes d'émissions de gaz à effet de serre ; d'épuisement des ressources naturelles abiotiques, de production de déchets et de consommation d'énergie primaire.

### EMISSIONS DE GAZ A EFFET DE SERRE

Le tiers 1 est celui qui concentre la majeure partie des émissions de GES en 2020, mais cela évolue en fonction des scénarios à horizon 2030. Voici la comparaison des émissions de gaz à effet de serre du tiers 1 en fonction des catégories d'équipements suivantes :

- Ordinateurs : ordinateurs fixes, ordinateurs portables, tablettes.
- Afficheurs électroniques : écrans d'ordinateur, télévisions, projecteurs, écrans de signalisation, box TV.
- Téléphones : smartphones, téléphones fixes, feature phones.
- Périphériques externes : HDD externe, SDD externe, clés USB et cartes SD, imprimantes et stations d'accueil.
- Loisirs : Consoles de jeu (fixes et portables), enceintes connectées, casques AR/VR.

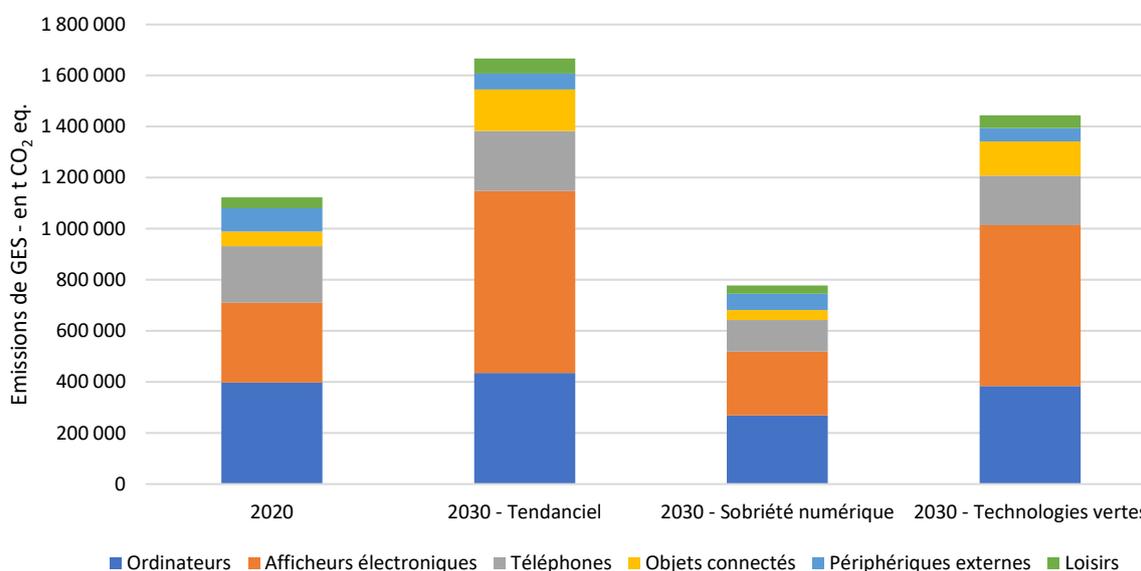


Figure 62 : Répartition des émissions de GES du tiers 1 entre les différents types d'équipements en fonction des scénarios

Dans le scénario tendanciel et technologies vertes, les afficheurs électroniques voient leurs émissions nettement augmenter tout comme leur proportion dans les émissions du tiers 1. Ceci est majoritairement dû à l'utilisation répandue des technologies OLED à la défaveur des LCD.

### ÉPUISEMENT DES RESSOURCES ABIOTIQUES NATURELLES – ELEMENTS

Voici la comparaison de l'épuisement des ressources abiotiques naturelles du tiers 1 en fonction des mêmes catégories d'équipements :

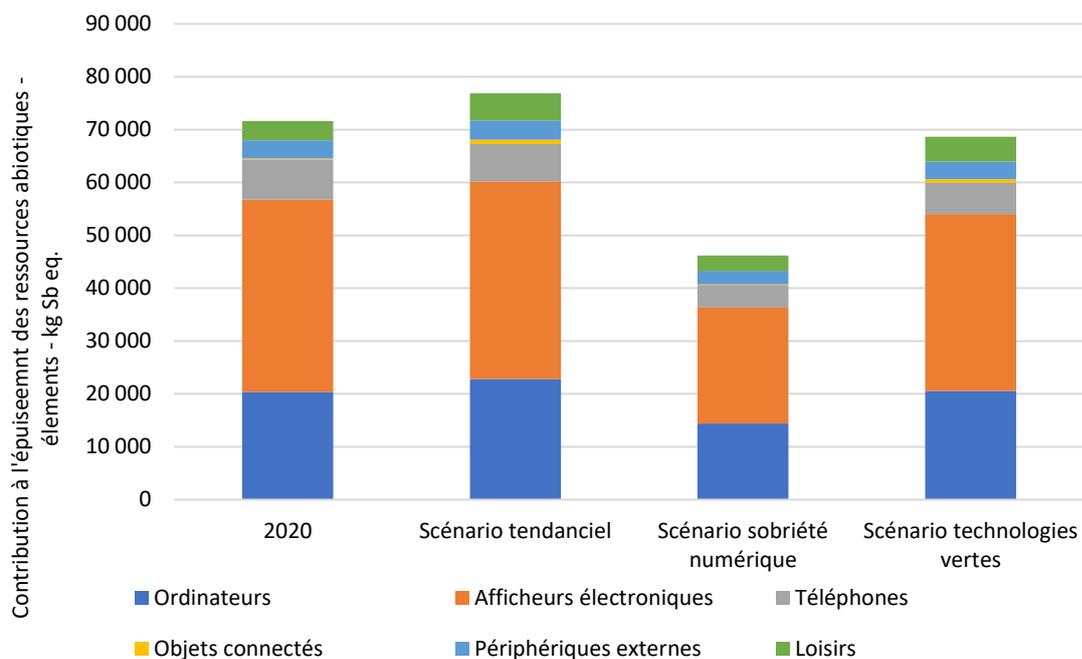


Figure 63 : Répartition de la contribution à l'épuisement des ressources naturelles abiotiques – éléments – du tiers 1 entre les différents types d'équipements en fonction des scénarios

C'est le même mécanisme que celui pour les émissions de GES qui intervient dans la hausse significative de l'impact sur les ressources des afficheurs électroniques.

## PRODUCTION DE DECHETS

Voici la comparaison du volume de déchets produits par le tiers 1 en fonction des mêmes catégories d'équipements. Son évolution en fonction des scénarios est exclusivement corrélée à l'évolution du parc de chaque catégorie d'équipements.

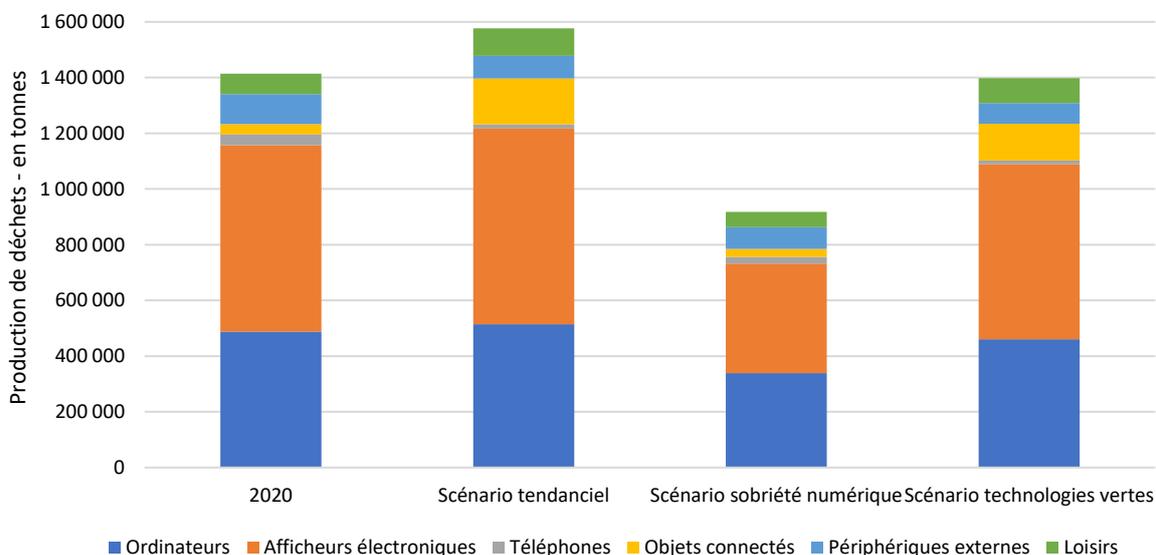


Figure 64 : Répartition de la production de déchets du tiers 1 entre les différents types d'équipements en fonction des scénarios

## CONSOMMATION D'ÉNERGIE PRIMAIRE

Voici la comparaison de l'énergie primaire consommée par le tiers 1 en fonction des mêmes catégories d'équipements. Son évolution en fonction des scénarios est corrélée à l'évolution du parc de chaque catégorie d'équipements ainsi qu'en grande partie à leur consommation unitaire, s'améliorant plus ou moins en fonction des scénarios et des gains en efficacité énergétique considérés.

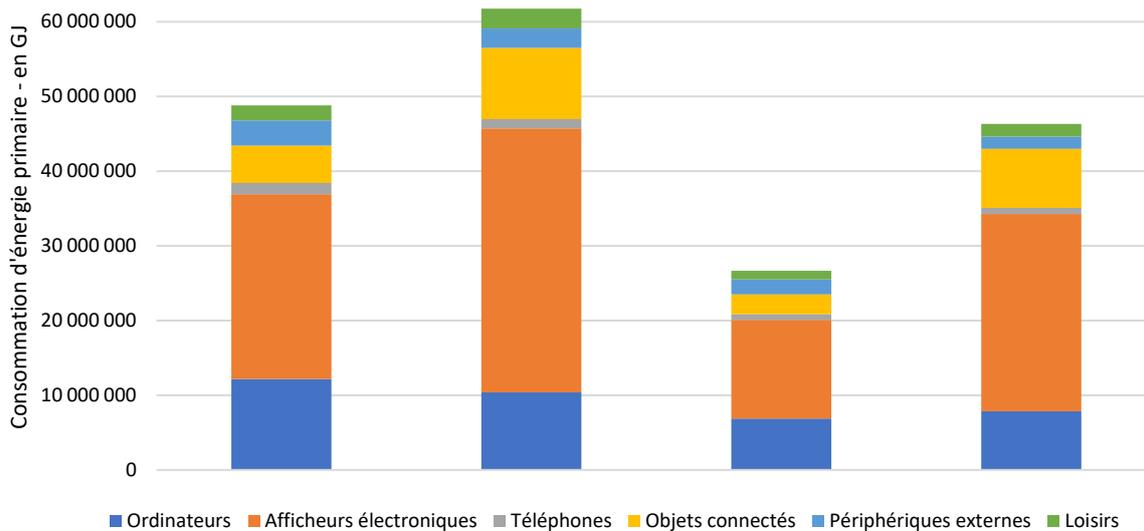


Figure 65 : Répartition de la consommation d'énergie primaire du tiers 1 entre les différents types d'équipements en fonction des scénarios



### 4.4.2.3. Tiers 2 – Réseaux

Les résultats détaillés par la suite présentent l'impact pour le tiers 2 « réseaux » en 2030 du numérique en région Grand Est selon nos 3 scénarios étudiés. Ils abordent successivement les résultats d'impacts en termes d'émissions de gaz à effet de serre ; d'épuisement des ressources naturelles abiotiques, de production de déchets et de consommation d'énergie primaire.

Les impacts environnementaux des réseaux sont les moins importants des 3 tiers. Cependant, il existe tout de même des manières d'amoindrir ces impacts. Les 3 scénarios sont assez similaires pour le tiers 2, du fait de la politique territoriale de déploiement généralisé de la fibre optique à horizon 2024, meilleure sur les quatre indicateurs environnementaux que la technologie xDSL. C'est ce changement majeur qui guide l'évolutions des quatre indicateurs du tiers 2. En plus de cela, il y a la quantité de données consommées via réseaux mobiles qui est aussi utilisés comme paramètres modulant les impacts des réseaux mais les ordres de grandeur en jeu sont largement dépassés par ceux de la transition xDSL / FTTx. Voici donc l'évolution des 4 indicateurs en fonction des scénarios et avec la répartition fixe / mobile.

## EMISSIONS DE GAZ A EFFET DE SERRE

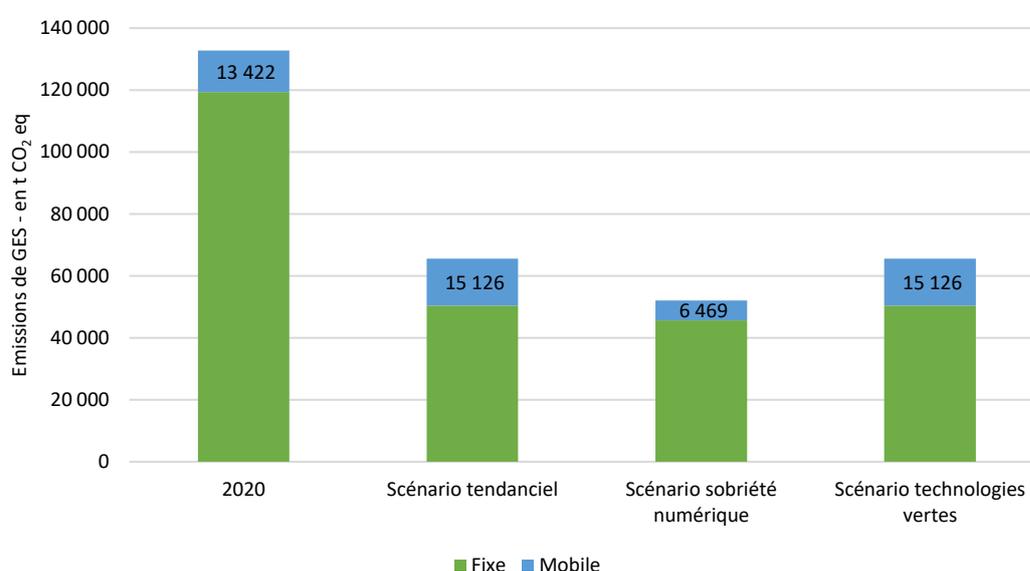


Figure 66 : Répartition des émissions de GES du tiers 2 entre les deux types de réseaux en fonction des scénarios

## ÉPUISEMENT DES RESSOURCES ABIOTIQUES NATURELLES - ELEMENTS

Il n'y a quasiment aucune différence entre l'épuisement des ressources lié au scénario sobriété et celui des autres scénarios. En effet la transition de la technologie xDSL vers FTTx est commune aux trois et la limitation de la consommation de données mobiles implique uniquement un changement d'impact sur la phase d'utilisation, qui est très marginale sur l'indicateur de l'épuisement des ressources abiotiques naturelles.



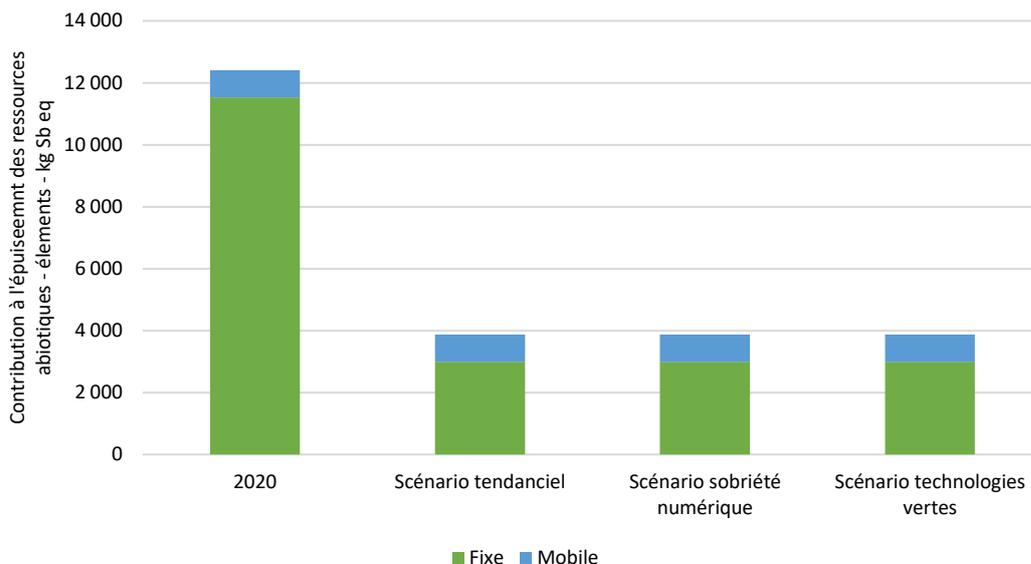


Figure 67 : Répartition de la contribution à l'épuisement des ressources abiotiques naturelles -éléments- du tiers 2 entre les deux types de réseaux en fonction des scénarios

## PRODUCTION DE DECHETS

De la même manière que pour l'épuisement des ressources abiotiques naturelles, les bénéfices de la limitation de la consommation de données mobiles ne se voit pas sur la production de déchets puisque que c'est sur la phase d'utilisation qu'elle permet des économies et cette dernière n'a pas d'impact sur la production de déchets.

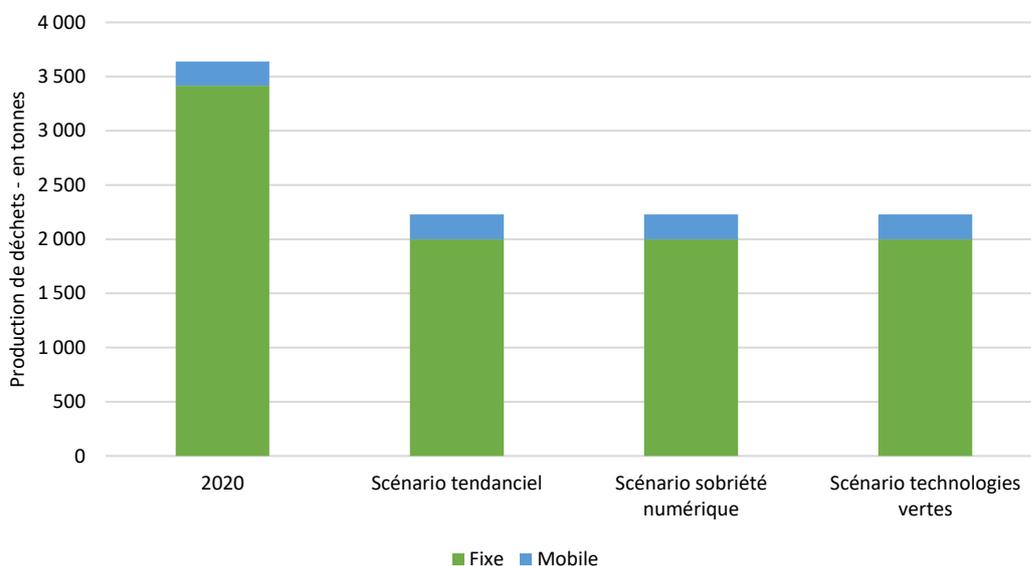


Figure 68 : Répartition de la production de déchets du tiers 2 entre les deux types de réseaux en fonction des scénarios

## CONSUMMATION D'ÉNERGIE PRIMAIRE

L'utilisation d'énergie primaire parvient à diminuer dans les trois scénarios grâce à la transition xDSL / FTTx et elle diminue d'autant plus dans le scénario de sobriété numérique grâce à la limitation de la consommation de données mobiles.

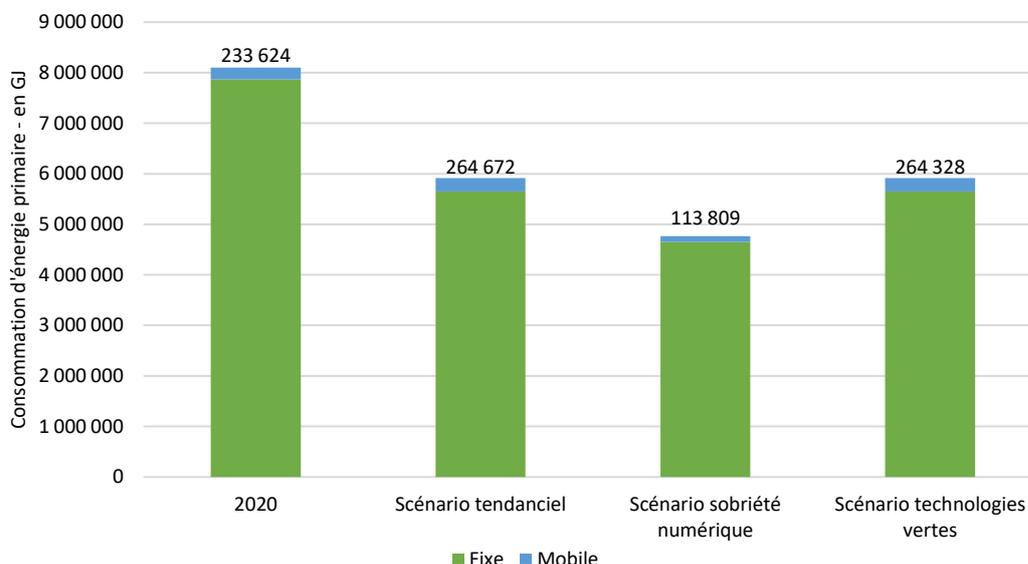


Figure 69 : Répartition de la consommation d'énergie primaire du tiers 2 entre les deux types de réseaux en fonction des scénarios

### 4.4.2.4. Tiers 3 – Centre de données

Les résultats détaillés par la suite présentent l'impact pour le tiers 3 « centre de données » en 2030 du numérique en région Grand Est selon nos 3 scénarios étudiés. Ils abordent successivement les résultats d'impacts en termes d'émissions de gaz à effet de serre ; d'épuisement des ressources naturelles abiotiques, de production de déchets et de consommation d'énergie primaire.

Au sein du tiers 3, les impacts environnementaux évoluent différemment en fonction des catégories de centre de données analysés. Voici les différentes évolutions observées pour ces derniers :

- Datacenters « traditionnels » (privés) : l'externalisation des besoins informatiques vers des prestataires de Cloud externes continue d'augmenter dans les trois scénarios, ce qui diminue les impacts de cette catégorie. En parallèle de cela, les scénarios de sobriété numérique et de technologies vertes tablent sur une amélioration de l'efficacité énergétique des équipements, ce qui permet de diminuer d'autant plus les impacts liés à la phase d'utilisation (celle de fabrication restant identique à celle du scénario tendanciel). Ceci se remarque donc particulièrement sur les émissions de GES et la consommation d'énergie primaire ; l'épuisement des ressources abiotiques et la production de déchets étant pour leur part principalement corrélés à la fabrication des équipements donc moins affectés. Ces diverses raisons font diminuer de plus de 95% les quatre impacts environnementaux de cette catégorie de centre de données.
- Centres de données Cloud sur le territoire de la région grand Est : Conformément aux hypothèses nationales, les surfaces des centres de données Cloud (type colocation, HPC ou Edge computing) augmentent dans la région Grand Est de manière uniforme à travers les trois scénarios. L'unique différence réside dans l'efficacité des équipements, qui s'améliore dans les scénarios « sobriété numérique » (consommation des équipements divisée par deux) et « technologies vertes » (consommation des équipements réduite de 33%), tandis que la consommation par m<sup>2</sup> augmente d'environ 30% dans le scénario tendanciel. Néanmoins, ces gains d'efficacité énergétique ne compensent pas l'augmentation des surfaces de salles informatiques. Les quatre indicateurs de cette catégorie de centre de données augmentent donc dans les trois scénarios, dans différentes proportions représentées ci-après.
- Centres de données Cloud « extérieurs » (hors territoire régionale) : Dans les trois scénarios, les besoins en hébergement Cloud extérieur augmentent proportionnellement à l'évolution des besoins externalisés des centres de données traditionnels. La différence entre les 3 scénarios réside dans le taux de relocalisation de ces besoins en Cloud français. Cette relocalisation est, dans les trois cas, insuffisante pour contrebalancer la forte croissance

des besoins informatiques externes. En plus de cela, ce levier d'action ne permet d'atténuer que les émissions de gaz à effet de serre puisque l'énergie française à une consommation d'énergie primaire par kWh légèrement supérieure à la moyenne monde et que l'épuisement des ressources abiotiques naturelles et la production des déchets sont majoritairement liés à la phase de fabrication plutôt qu'à la phase d'utilisation.

## EMISSIONS DE GAZ A EFFET DE SERRE

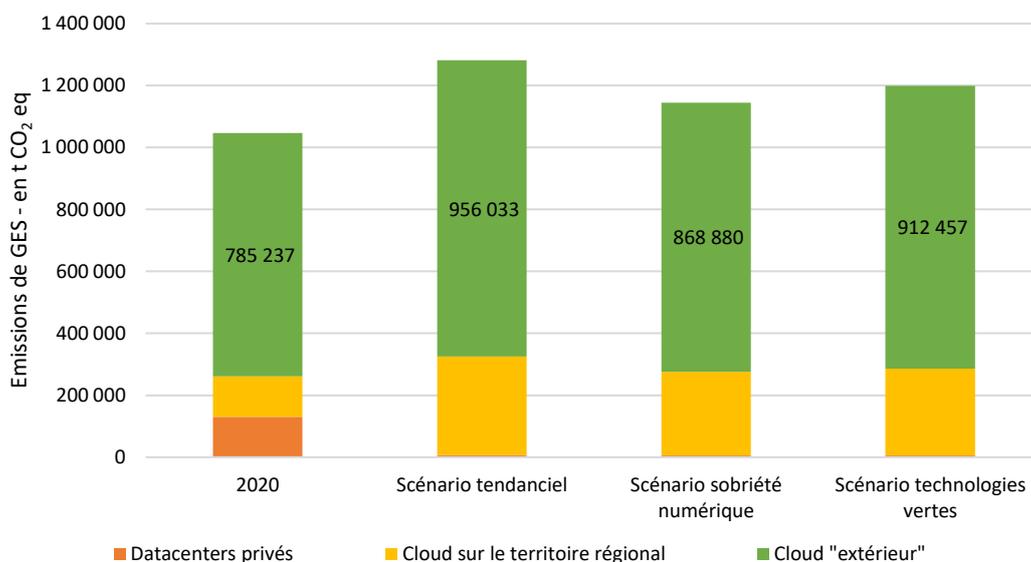


Figure 70 : Répartition des émissions de GES du tiers 3 entre les types de datacenters en fonction des scénarios

## ÉPUISEMENT DES RESSOURCES ABIOTIQUES NATURELLES - ÉLÉMENTS

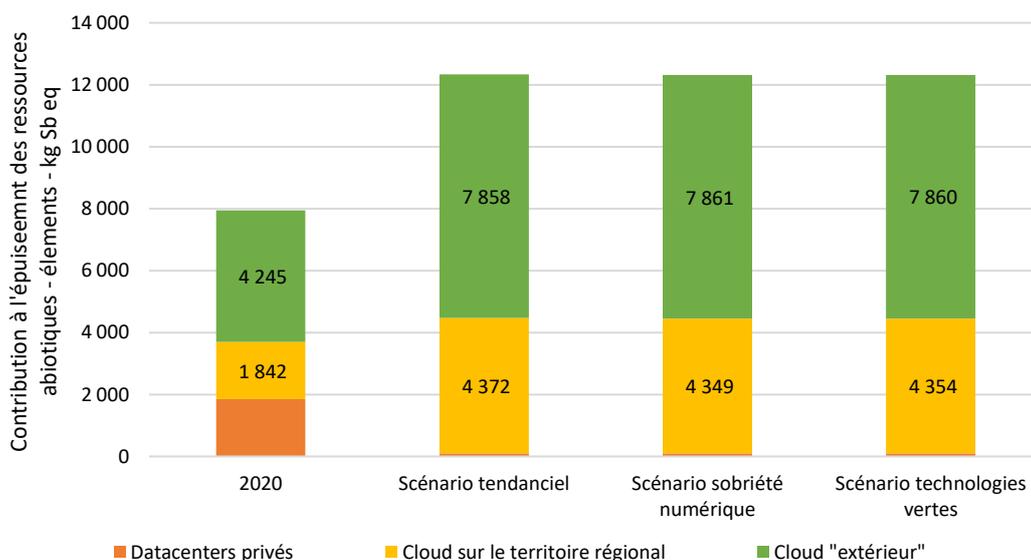


Figure 71 : Répartition de la contribution à l'épuisement des ressources abiotiques naturelles – éléments – du tiers 3 entre les types de datacenters en fonction des scénarios



## PRODUCTION DE DECHETS

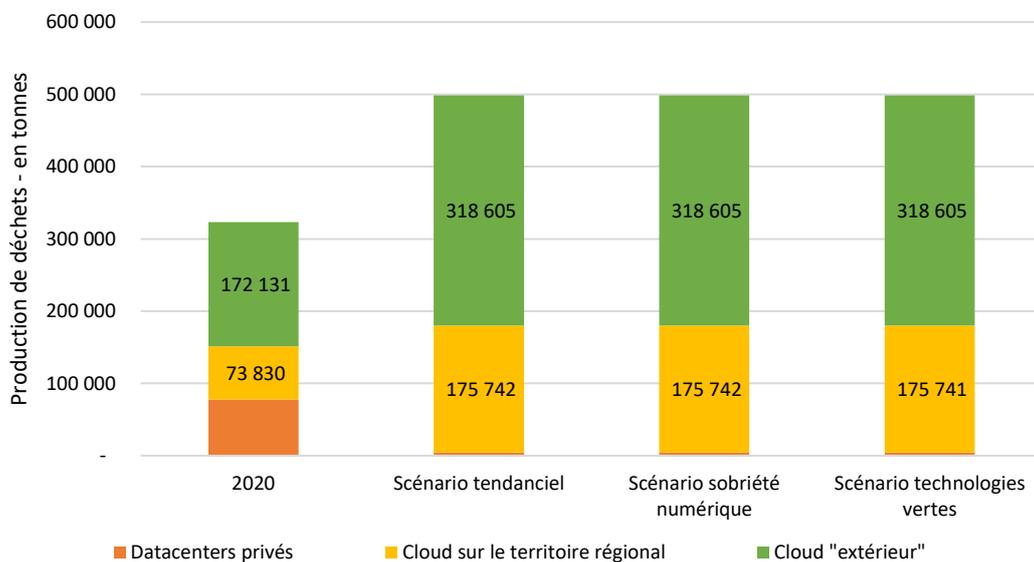


Figure 72 : Répartition de la production de déchets du tiers 3 entre les types de datacenters en fonction des scénarios

## CONSOMMATION D'ÉNERGIE PRIMAIRE

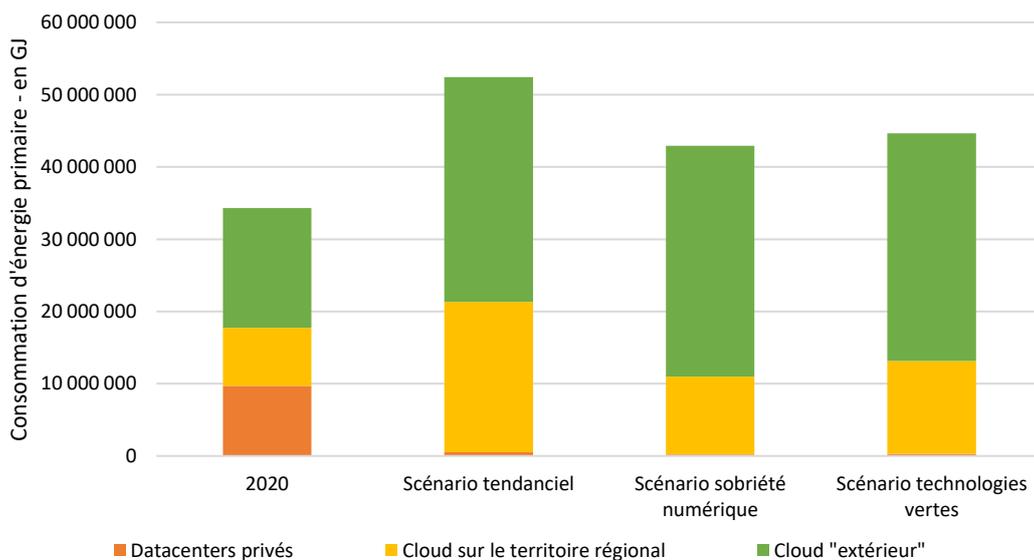


Figure 73 : Répartition de la consommation d'énergie primaire du tiers 3 entre les types de datacenters en fonction des scénarios



## 4.5. Conclusions et limites de l'étude

### 4.5.1. Conclusions de la prospective

Cette vision prospective de l'impact environnemental du numérique en région Grand Est met en lumière la nécessité de mettre en place une politique visant à limiter les impacts environnementaux du secteur du numérique, accompagnée d'actions concrètes et ambitieuses, si l'on veut que celui-ci s'aligne avec les objectifs de transition de notre société. En effet, le scénario tendanciel illustre que la croissance à venir des usages du numérique et de la consommation d'équipements informatiques implique une hausse des impacts pour les quatre indicateurs environnementaux considérés dans cette étude (jusqu'à +31% d'émissions de GES à horizon 2030 par rapport à 2020), témoignant de l'incompatibilité d'une trajectoire "business as usual" avec le respect des limites planétaires. Le scénario « technologies vertes » permet uniquement de limiter l'augmentation des impacts environnementaux liés au numérique (18% d'émissions de GES en plus en 2030), sans pour autant permettre de les réduire. En effet, les gains d'efficacité énergétique et les légères évolutions des pratiques relatives à la durée d'utilisation des équipements informatiques sont compensés par une croissance des usages et des besoins qui reste soutenue, ce qui ne permet donc pas de réellement inverser la tendance et d'atteindre des réductions des impacts. En définitive, il n'y a que le scénario « sobriété numérique », incluant donc une remise en question significative de la croissance soutenue des usages, qui permette une réelle réduction des impacts, notamment grâce au développement de la filière du reconditionnement/réparation des équipements, aux changements des modes de consommation du numérique et à la relocalisation de certains besoins informatiques.

### 4.5.2. Limites de l'étude

L'incertitude liée à la projection des données ici analysées est inhérente à l'exercice de prospective. En effet, ce travail de visualisation des impacts potentiels du numérique en région Grand Est en 2030 a principalement pour but d'anticiper les tendances qui pourraient être à l'origine d'un accroissement ou d'une réduction de ces derniers. Ainsi, plusieurs limites sont à prendre en compte lors de l'analyse des résultats de cette étude, ce sont les suivantes :

- **Equipements et réseaux exclus :** Plusieurs types d'équipements ou de réseaux, pour lesquels des données d'inventaire n'ont pas pu être rassemblées, n'ont pas pu être pris en compte dans cette étude (ex : lecteurs DVD, équipements audio personnel, caméras, puces RFID, imprimantes 3D, réseaux d'entreprise, réseaux téléphoniques fixe etc.).
- **Données primaires :** Peu de données utilisées ici sont propres à la région Grand Est, une grande partie est extrapolée à la région à partir de données françaises ou européennes, souvent issues de l'étude ADEME-Arcep [1]. Cela est dû à la faible quantité de données primaires renseignées par les acteurs du territoire mais aussi, sur le sujet de la prospective, à l'existence limitée de données régionales.
- **Nouvelles technologies :** Cette étude prospective ne considère pas le développement spécifique des nouvelles technologies du numérique, parfois déjà présentes dans notre société, telles que l'intelligence artificielle, le machine learning, le métavers, la blockchain, les technologies nécessaires aux voitures autonomes etc. Il est uniquement projeté ici un besoin croissant global en besoins informatiques.
- **Incertitude sur la caractérisation des équipements :** L'inventaire des équipements utilisateurs est global et ne prend pas en compte les spécificités de performance ou de marques qui existent entre ces derniers (plus ou moins haut de gamme, performant etc.). Ceci est lié à la granularité disponible dans les inventaires mais aussi aux données d'impacts à disposition (notamment via la base données NegaOctet). Ainsi, les consommations moyennes des équipements et leur impacts lors des phases de fabrication, distribution et fin de vie, sont aussi en proie à des incertitudes, intrinsèques à ce genre d'exercice.
- **Approche pour les réseaux :** Contrairement aux tiers 1 et 3, l'inventaire du tiers 2 est basée sur le flux d'équipements installés en France en 2020. Cela implique plus d'incertitude que l'approche par parc d'équipements, mais c'est celle qui était disponible grâce à l'étude ADEME-Arcep [1]. L'évaluation de la consommation électrique des réseaux mobiles comporte de l'incertitude puisqu'elle repose sur le flux croissant de données consommées par les utilisateurs et non pas sur l'évolution du nombre d'amplificateurs de puissance comme il a été fait dans l'étude nationale. Cela a été entrepris pour modéliser les impacts induits par la consommation raisonnée ou décomplexée de données mobiles.



## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

---

- [1] Etienne Lees Perasso (Bureau Veritas), Caroline Vateau (APL-datacenter), Firmin Domon (Bureau Veritas), avec les contributions de Yasmine Aiouch (Deloitte), Augustin Chanoine (Deloitte), Léo Corbet (Deloitte), Pierrick Drapeau (Deloitte), Louis Ollion (Deloitte), Valentine Vigneron (Deloitte), Damien Prunel (Bureau Veritas), Georges Ouffoué (APL-datacenter), Romain Mahasenga (APL-datacenter), Julie Orgelet (DDemain), Frédéric Bordage (GreenIT.fr) et Prune Esquerre (IDATE) pour ADEME & ARCEP. 2022. Evaluation environnementale des équipements et infrastructures numériques en France. 262 pages
- [2] In Extenso Innovation Croissance, Marion JOVER, Mathilde BORIE. ADEME, Sandrine MORICEAU. Novembre 2021. Équipements électriques et électroniques : données 2020 – Rapport annuel. 105 pages.
- [3] Green IT. Septembre 2019. Empreinte environnementale du numérique mondial. 40 pages.
- [4] Green IT. Juin 2020. Impacts environnementaux du numérique en France. 21 pages.
- [5] The Shift Project. Octobre 2018. Lean ICT – pour une sobriété numérique. 88 pages.
- [6] The Shift Project. Juillet 2019. Climat : l’insoutenable usage de la vidéo en ligne. 36 pages.
- [7] The Shift Project Octobre 2020. Déployer la sobriété numérique. 117 pages.
- [8] Citizing et Virtus Management pour Sénat. Juin 2020. Empreinte carbone du numérique en France : des politiques publiques suffisantes pour faire face à l’accroissement des usages ? 128 pages.
- [9] Haut Conseil pour le Climat. Décembre 2020. Maitriser l’impact carbone de la 5G. 32 pages.
- [10] NegaOctet pour ScoreLCA. 2021. Impacts environnementaux des objets connectés et des services basés sur leur utilisation : Ordres de grandeurs et recommandations méthodologiques.
- [11] International Telecommunication Union. Septembre 2018. Methodologies for the assessment of the environmental impact of the information and communication technology sector. 58 pages.
- [12] INSEE, <https://www.insee.fr/fr/statistiques/3709802#titre-bloc-4>.
- [13] <https://www.zoneadsl.com/couverture/region/grand-est/>
- [14] [https://actu.fr/sciences-technologie/carte-grand-est-5g-4g-fibre-vivez-vous-dans-un-departement-bien-couvert-voici-les-chiffres\\_41423023.html](https://actu.fr/sciences-technologie/carte-grand-est-5g-4g-fibre-vivez-vous-dans-un-departement-bien-couvert-voici-les-chiffres_41423023.html)
- [15] <https://maconnexioninternet.arcep.fr> (accédé le 15/02/2023)
- [16] [zoneadsl.com/couverture/region/grand-est/](https://www.zoneadsl.com/couverture/region/grand-est/) (accédé le 15/02/2023)
- [17] [https://www.eib.org/attachments/pj/financing\\_the\\_future\\_of\\_supercomputing\\_en.pdf](https://www.eib.org/attachments/pj/financing_the_future_of_supercomputing_en.pdf)
- [18] Sofies et BioInnovationService pour Afnm. Juillet 2019. Étude du marché et parc de téléphones portables français en vue d’augmenter durablement leur taux de collecte. 79 pages.
- [19] Ipsos Public Affairs. 2016. Quantification des équipements électriques et électroniques au sein des ménages.
- [20] VHK and Viegand Maagøe pour Commission européenne. Juillet 2020. ICT Impact study. 292 pages.
- [21] VGChartz, Yearly Europe hardware data grouped by platform. [https://www.vgchartz.com/tools/hw\\_date.php?reg=Europe&ending=Yearly](https://www.vgchartz.com/tools/hw_date.php?reg=Europe&ending=Yearly) (accédé le 21/02/2023)
- [22] GreenIT. Aout 2021. Benchmark GreenIT. 36 pages.
- [23] ADEME. 2015. Livre blanc - Consommation énergétique des équipements informatiques en milieu professionnel.
- [24] IEA. 2019. Total Energy Model for Connected Devices, IEA 4E EDNA. [https://www.iea-4e.org/wp-content/uploads/publications/2019/06/A2b\\_-\\_EDNA\\_TEM\\_Report\\_V1.0.pdf](https://www.iea-4e.org/wp-content/uploads/publications/2019/06/A2b_-_EDNA_TEM_Report_V1.0.pdf)
- [25] Masanet, E., Shehabi, A., Lei, N., Smith, S., and J.G. Koomey, 2020. Recalibrating global data center energy use estimates. (Science, Vol 367, Iss 6481).
- [26] ARCEP. Juin 2021. Services fixes haut et très haut débit : abonnements et déploiements - 1er trimestre 2021 – résultats provisoires.
- [27] ARCEP. Décembre 2020. Les services de communication électronique : le marché entreprise – Résultats définitifs – Année 2019.
- [28] ARCEP. Aout 2021. Services mobiles – 2ème trimestre 2021.
- [29] Equinix : [https://www.equinix.nl/content/dam/eqxcorp/en\\_us/documents/insights/eqix\\_gxi\\_2023\\_en.pdf](https://www.equinix.nl/content/dam/eqxcorp/en_us/documents/insights/eqix_gxi_2023_en.pdf)
- [30] CBRE. 2021 : <https://www.datacenterplatform.com/wp-content/uploads/2021/08/Europe-Data-Centres-Q4-2020-FINAL.pdf>
- [31] CBI, IDC’s Worldwide Internet of Things Spending Guide. <https://www.cbi.eu/market-information/outsourcing-itobpo/industrial-internet-things/market-potential>
- [32] SRADDET Grand Est, Stratégie du Grand Est en 30 objectifs. : <https://www.grandest.fr/wp-content/uploads/2016/01/sraddet-ge-objectifs-nov2019.pdf>
- [33] INSEE. <https://www.insee.fr/fr/statistiques/4985385>



- [34] ARCEP, 2022. Observatoire des marchés des communications électroniques : [https://www.arcep.fr/fileadmin/cru-1677573101/reprise/observatoire/obs-mobile/2022/t4-2022/obs-mobile-t4-2022\\_090223.pdf](https://www.arcep.fr/fileadmin/cru-1677573101/reprise/observatoire/obs-mobile/2022/t4-2022/obs-mobile-t4-2022_090223.pdf)
- [35] ETNO, 2022. <https://etno.eu/component/attachments/attachments.html?task=download&id=8340>
- [36] Modèle USES 2, ADEME, 2021. <https://librairie.ademe.fr/urbanisme-et-batiment/5753-modele-uses-2-notice-technique.html>
- [36] IEA, 2017. Energy Technology Perspectives 2017, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/energy-technology-perspectives-2017>



## INDEX DES TABLEAUX & FIGURES

### FIGURES

Figure 1 : Evolution du nombre d'équipements électriques et électroniques mis sur le marché entre 2006 et 2019 [2].	9
Figure 2 : Carte du territoire de la région Grand Est.	12
Figure 3 : Taux de locaux éligibles - Fibre, Au 30 septembre 2022, ARCEP [15]	13
Figure 4 : Couverture Fibre de la région Grand Est [16]	14
Figure 5 : Taux de couverture fibre par département du Grand Est au 4 <sup>e</sup> trimestre 2020 [13, 14]	14
Figure 6 : Taux de couverture 4G par département Grand Est au 4 <sup>e</sup> trimestre 2020 [14].	14
Figure 7 : Différence entre les approches Production et Consommation	16
Figure 8 : Comparaison des approches « production » et « consommation »	28
Figure 9 : Modèle de consommation « Trafic France »	28
Figure 10 : Répartition des impacts environnementaux du numérique en Grand Est en 2020 par tiers, en fonction des indicateurs, approche production.	32
Figure 11 : Répartition des impacts environnementaux du numérique en Grand Est en 2020 par tiers, en fonction des indicateurs, approche consommation.	33
Figure 12 : Répartition des impacts environnementaux du numérique en Grand Est en 2020, tiers 1, par type d'équipements.	35
Figure 13 : Répartition des impacts environnementaux du numérique en Grand Est en 2020, tiers 1, par type d'usage.	35
Figure 14 : Répartition des impacts environnementaux du numérique en Grand Est en 2020, tiers 1, par étape du cycle de vie.	36
Figure 15 : Répartition des impacts environnementaux du numérique en Grand Est en 2020, tiers 2, par type de réseau.	37
Figure 16 : Répartition des impacts environnementaux du numérique en Grand Est en 2020, tiers 2, par type d'usage.	38
Figure 17 : Répartition des impacts environnementaux du numérique en Grand Est en 2020, tiers 3, approche production, par type de data center.	40
Figure 18 : Répartition des impacts environnementaux du numérique en Grand Est en 2020, tiers 3, approche production, par phase du cycle de vie.	41
Figure 19 : Répartition des impacts environnementaux du numérique en Grand Est en 2020, tiers 3, approche consommation, par type de data center.	43
Figure 20 : Répartition des impacts environnementaux du numérique en Grand Est en 2020, tiers 3, approche production, par phase du cycle de vie.	44
Figure 21 : Répartition des impacts environnementaux du numérique en Grand Est en 2020, tiers 3, approche production, par phase du cycle de vie.	45
Figure 22 : Répartition des impacts environnementaux du numérique en Grand Est en 2020, tiers 3, analyse de sensibilité sur le mix électrique, approche consommation.	47
Figure 23 : Répartition des impacts environnementaux du numérique en Grand Est en 2020, tiers 3, analyse de sensibilité sur la proportion de datacenters « importés », approche consommation.	48
Figure 24 : Répartition des impacts environnementaux du numérique en Grand Est en 2020, tous tiers, analyse de sensibilité sur la proportion de datacenters « importés », approche consommation.	49
Figure 25 : Impacts environnementaux du numérique en Grand Est en 2020, répartition des impacts par tiers en fonction des scénarios.	50
Figure 26 : Rappel du cadre méthodologique (type EGDC)	54
Figure 27 : Émissions de GES par secteur, en fonction du profil et du mode d'enseignement pour le scénario 2020 avec paramètres par défaut, en kg CO <sub>2</sub> eq/personne/jour.	64
Figure 28 : Comparaison des émissions de GES pour le scénario 2020, avec deux configurations différentes d'enseignement à distance, en kg CO <sub>2</sub> eq/an.	65
Figure 29 : Émissions de GES par secteur, en fonction du profil et du mode d'enseignement pour le scénario 2030 BAU avec paramètres par défaut, en kg CO <sub>2</sub> eq/personne/jour.	66
Figure 30 : Émissions de GES par secteur, en fonction du profil et du mode d'enseignement pour le scénario 2030 Optim avec paramètres par défaut, en kg CO <sub>2</sub> eq/personne/jour.	67
Figure 31 : Émissions de GES totales en fonction des scénarios et des modes utilisés (en kg CO <sub>2</sub> eq/an).	68
Figure 32 : Émissions de GES totales comparées en fonction des scénarios et des modes utilisés, avec 20% d'électrification des transports pour le scénario 2030 Optim, en kg CO <sub>2</sub> eq/an.	69
Figure 33 : Émissions de GES totales comparées en fonction des scénarios avec 10% de la population étudiante en enseignement à distance, en kg CO <sub>2</sub> eq/an.	70
Figure 34 : Volume de ventes des produits « smart home » en Europe, France, Allemagne, Royaume-Uni (2014 & 2015, GFK)	78
Figure 35 : Taux de pénétration par segment des produits « smart home », par catégorie (Statista, Décembre 2022)	78
Figure 36 : Impact de la « smartification » sur la consommation énergétique du parc résidentiel, scénario 2020, en kWh	83
Figure 37 : Impact de la « smartification » sur la consommation énergétique du parc résidentiel, scénario 2030, en kWh	85
Figure 38 : Impacts net de la « smartification », scénarios 2020 et 2030, en kWh	86
Figure 39 : IoT smart farming framework d'après Farooq et al. (2020)	92



Figure 40 : Spécialisation territoriale de la production agricole en 2020 – région Grand Est .....	100
Figure 41 : Illustration d'un arbre de conséquence d'après l'ITU-T .1480.....	106
Figure 42 : Illustration des effets induits liés à la projection d'un scénario de référence d'après l'ITU-T .1480.....	107
Figure 43 : Slide 1 de restitution de l'atelier du 26/01/2023 avec les parties prenantes, à Metz.....	111
Figure 44 : Slide 2 de restitution de l'atelier du 26/01/2023 avec les parties prenantes, à Metz.....	111
Figure 45 : Slide 3 de restitution de l'atelier du 26/01/2023 avec les parties prenantes, à Metz.....	112
Figure 46 : Evolution des émissions de GES entre 2020 et 2030 dans les trois scénarios modélisés .....	130
Figure 47 : Répartition des émissions de GES par tiers – scénario tendanciel (2020-2030).....	131
Figure 48 : Répartition des émissions de GES par tiers – scénario « sobriété numérique » (2020-2030).....	131
Figure 49 : Répartition des émissions de GES par tiers – scénario « technologies vertes » (2020-2030).....	132
Figure 50 : Evolution de la contribution à l'épuisement des ressources naturelles abiotiques – éléments – entre 2020 et 2030 dans les trois scénarios modélisés.....	133
Figure 51 : Répartition de la contribution à l'épuisement des ressources naturelles abiotiques – éléments – par tiers – scénario tendanciel (2020-2030).....	134
Figure 52 : Répartition de la contribution à l'épuisement des ressources naturelles abiotiques – éléments – par tiers – scénario « sobriété numérique » (2020-2030).....	134
Figure 53 : Répartition de la contribution à l'épuisement des ressources naturelles abiotiques – éléments – par tiers – scénario « technologies vertes » (2020-2030).....	135
Figure 54 : Evolution de la production de déchets entre 2020 et 2030 dans les trois scénarios modélisés .....	135
Figure 55 : Répartition de la production de déchets par tiers – scénario tendanciel (2020-2030).....	136
Figure 56 : Répartition de la production de déchets par tiers – scénario « sobriété numérique » (2020-2030).....	136
Figure 57 : Répartition de la production de déchets par tiers – scénario « technologies vertes » (2020-2030).....	137
Figure 58 : Evolution de la consommation d'énergie primaire entre 2020 et 2030 dans les trois scénarios modélisés .....	137
Figure 59 : Répartition de la consommation d'énergie primaire par tiers – scénario tendanciel (2020-2030).....	138
Figure 60 : Répartition de la consommation d'énergie primaire par tiers – scénario « sobriété numérique » (2020-2030).....	138
Figure 61 : Répartition de la consommation d'énergie primaire par tiers – scénario « technologies vertes » (2020-2030).....	139
Figure 62 : Répartition des émissions de GES du tiers 1 entre les différents types d'équipements en fonction des scénarios .....	140
Figure 63 : Répartition de la contribution à l'épuisement des ressources naturelles abiotiques – éléments – du tiers 1 entre les différents types d'équipements en fonction des scénarios .....	141
Figure 64 : Répartition de la production de déchets du tiers 1 entre les différents types d'équipements en fonction des scénarios .....	142
Figure 65 : Répartition de la consommation d'énergie primaire du tiers 1 entre les différents types d'équipements en fonction des scénarios.....	142
Figure 66 : Répartition des émissions de GES du tiers 2 entre les deux types de réseaux en fonction des scénarios .....	143
Figure 67 : Répartition de la contribution à l'épuisement des ressources abiotiques naturelles -éléments- du tiers 2 entre les deux types de réseaux en fonction des scénarios .....	144
Figure 68 : Répartition de la production de déchets du tiers 2 entre les deux types de réseaux en fonction des scénarios .....	144
Figure 69 : Répartition de la consommation d'énergie primaire du tiers 2 entre les deux types de réseaux en fonction des scénarios .....	145
Figure 70 : Répartition des émissions de GES du tiers 3 entre les types de datacenters en fonction des scénarios.....	146
Figure 71 : Répartition de la contribution à l'épuisement des ressources abiotiques naturelles – éléments – du tiers 3 entre les types de datacenters en fonction des scénarios.....	146
Figure 72 : Répartition de la production de déchets du tiers 3 entre les types de datacenters en fonction des scénarios .....	147
Figure 73 : Répartition de la consommation d'énergie primaire du tiers 3 entre les types de datacenters en fonction des scénarios .....	147

## TABLEAUX

Tableau 1 : Données de caractérisation du territoire de la région Grand Est et sources associées .....	15
Tableau 2 : facteurs d'impact utilisés pour l'électricité FR. source : ecoinvent.....	19
Tableau 3 : Ratio Grand Est/France utilisés & sources associées.....	20
Tableau 4 : détail des équipements utilisateurs pris en compte dans le tiers 1.....	20
Tableau 5 : dénombrement des équipements utilisateurs pris en compte dans le tiers 1 et sources associées .....	21
Tableau 6 : hypothèses d'usage des équipements utilisateurs pris en compte dans le tiers 1 et sources associées.....	22
Tableau 7 : hypothèses de consommation électrique des équipements utilisateurs pris en compte dans le tiers 1 et sources associées .....	23
Tableau 8 : dénombrement, hypothèses de durée de vie et de consommation électrique des équipements IoT pris en compte dans le tiers 1.....	24
Tableau 9 : dénombrement des abonnés internet pris en compte dans le tiers 2. Sources : ARCEP [26], [27] et [28].....	25
Tableau 10 : dénombrement des abonnés internet pris en compte dans le tiers 2 Sources : European Commission [20], ARCEP [26].....	25
Tableau 11 : consommation électrique annuelle des box en fonction des usages.....	25



Tableau 12 : consommation électrique des réseaux. Sources ; European Commission [20], IEA [24] .....	25
Tableau 13 : hypothèses de besoin unitaire et de pourcentage de migration vers de l'hébergement externe par typologie d'acteurs.....	27
Tableau 14 : Synthèse des besoins en surface de salles serveurs prises en compte.....	27
Tableau 15 : Modèle de consommation « Energie Monde » .....	29
Tableau 16 : Modèle de consommation « Energie Monde » - agrégé.....	29
Tableau 17 : Modèle de production – données étude ADEME- Arcep.....	29
Tableau 18 : Modèle de consommation « Energie » - appliqué à l'échelle France .....	30
Tableau 19 : Impacts environnementaux du numérique en Grand Est en 2020, tous tiers, approche production.....	31
Tableau 20 : Impacts environnementaux du numérique en Grand Est en 2020, par tiers, approche production. ....	31
Tableau 21 : Impacts environnementaux du numérique en Grand Est en 2020, tous tiers, approche consommation. ....	32
Tableau 22 : Impacts environnementaux du numérique en Grand Est en 2020, par tiers, approche consommation. ....	33
Tableau 23 : Impacts environnementaux du numérique en Grand Est en 2020, tiers 1. ....	34
Tableau 24 : Impacts environnementaux du numérique en Grand Est en 2020, tiers 1, par type d'équipements. ....	34
Tableau 25 : Impacts environnementaux du numérique en Grand Est en 2020, tiers 1, par type d'usage.....	35
Tableau 26 : Impacts environnementaux du numérique en Grand Est en 2020, tiers 1, par étape du cycle de vie. ....	36
Tableau 27 : Impacts environnementaux du numérique en Grand Est en 2020, tiers 2. ....	37
Tableau 28 : Impacts environnementaux du numérique en Grand Est en 2020, tiers 2, par type de réseau. ....	37
Tableau 29 : Impacts environnementaux du numérique en Grand Est en 2020, tiers 2, par type d'usage.....	38
Tableau 30 : Impacts environnementaux du numérique en Grand Est en 2020, tiers 3, approche production. ....	39
Tableau 31 : Impacts environnementaux du numérique en Grand Est en 2020, tiers 3, approche production, par type de data center.....	39
Tableau 32 : Impacts environnementaux du numérique en Grand Est en 2020, tiers 3, approche production, par phase du cycle de vie.....	40
Tableau 33 : Impacts environnementaux du numérique en Grand Est en 2020, tiers 3, approche consommation. ....	42
Tableau 34 : Impacts environnementaux du numérique en Grand Est en 2020, tiers 3, approche consommation, par type de datacenter.....	42
Tableau 35 : Impacts environnementaux du numérique en Grand Est en 2020, tiers 3, approche consommation, par phase du cycle de vie.....	43
Tableau 36 : Impacts environnementaux du numérique en Grand Est en 2020, tiers 3, comparaison des approches production et consommation.....	45
Tableau 37 : Impacts environnementaux du numérique en Grand Est en 2020, tiers 3, analyse de sensibilité sur le mix électrique, approche consommation. ....	46
Tableau 38 : définition des scénarios pour l'analyse de sensibilité sur la proportion de data centers « importés ». ....	47
Tableau 39 : Impacts environnementaux du numérique en Grand Est en 2020, tiers 3, analyse de sensibilité sur la proportion de datacenters « importés », approche consommation. ....	48
Tableau 40 : Impacts environnementaux du numérique en Grand Est en 2020, tous tiers, analyse de sensibilité sur la proportion de datacenters « importés », approche consommation. ....	49
Tableau 41 : Impacts environnementaux du numérique en Grand Est en 2020, répartition des impacts par tiers en fonction des scénarios.....	50
Tableau 42 : Synthèse des différents types d'effets environnementaux de la numérisation .....	56
Tableau 43 : Synthèse de la revue de littérature pour l'enseignement à distance .....	58
Tableau 44 : Définition du périmètre de l'enseignement à distance .....	59
Tableau 45 : Synthèse du périmètre de l'enseignement à distance.....	60
Tableau 46 : Définition des effets de l'enseignement à distance.....	61
Tableau 47 : Périmètre des effets étudiés.....	61
Tableau 48 : Synthèse des données collectées et des sources associées.....	62
Tableau 49 : Scénario 2020 avec paramètres par défaut.....	64
Tableau 50 : Scénario 2030 BAU avec paramètres par défaut .....	65
Tableau 51 : Scénario 2030 Optim avec paramètres par défaut .....	67
Tableau 52 : Unités fonctionnelles obtenues pour les collégiens, lycéens et étudiants, pour les scénarios 2020 et 2030 BAU avec paramètres par défaut, en kg CO <sub>2</sub> eq/personne/jour .....	68
Tableau 53 : Synthèse de la revue de littérature pour les maisons connectées .....	73
Tableau 54 : Littérature institutionnelle complémentaire pour les maisons connectées .....	73
Tableau 55 : Définition du périmètre de l'étude « Maisons connectées ».....	74
Tableau 56 : Synthèse du périmètre de l'étude « Maisons connectées ».....	75
Tableau 57 : Définition des effets de du déploiement de solutions maisons connectées.....	76
Tableau 58 : Périmètre des effets étudiés.....	77
Tableau 59 : Synthèse des données collectées et des sources associées.....	77
Tableau 60 : Caractéristiques des différents profils de maison connectées modélisés .....	79
Tableau 61 : Impacts annuels unitaires brut des équipements numériques associées aux différents profils de logements connectés.....	80
Tableau 62 : Impacts annuels brut des équipements numériques, scénario 2020. ....	81
Tableau 63 : Consommation énergétique par logement en 2020, par profil de logement connecté. ....	81
Tableau 64 : Consommation énergétique d'un logement smart-low en 2020, en fonction des économies d'énergie et de l'effet rebond .....	82



Tableau 65 : Impact de la « smartification » sur la consommation énergétique du parc résidentiel, scénario 2020. ....	82
Tableau 66 : Impacts annuels brut des équipements numériques, scénario 2030 et scénario smart-low 5%.....	83
Tableau 67 : Consommation énergétique par logement en 2030, par profil de logement connecté. ....	84
Tableau 68 : Consommation énergétique d'un logement en 2030, par type de logement et en fonction des économies d'énergie et de l'effet rebond .....	84
Tableau 69 : Impact de la « smartification » sur la consommation énergétique du parc résidentiel, scénario 2030. ....	85
Tableau 70 : Liste des articles étudiés dans le cadre de la revue de littérature scientifique .....	89
Tableau 71 : Liste et taux d'adoption des applications technologiques par type d'application agricole d'après Gabriel et Gandorfer .....	90
Tableau 72 : Défis et SFT associés d'après Balafoutis et al. (2020) .....	93
Tableau 73 : Indicateurs clés de performance des facteurs économiques, environnementaux et liés au travail d'après Balafoutis et al. (2020) .....	93
Tableau 74 : Effets des innovations technologiques visant à réduire l'utilisation d'azote (Winiwarter et al., 2014).....	95
Tableau 75 : Liste des articles étudiés dans le cadre de la revue de littérature complémentaire .....	95
Tableau 76 : Calendrier des innovations en matière de technologies vertes dans le secteur agricole (JRC, 2022) .....	96
Tableau 77 : Panorama de l'usage des technologies numériques et internet (Schnebelin et al. 2021) .....	97
Tableau 78 : Caractéristiques des exploitations agricoles en région Grand Est .....	100
Tableau 79 : Répartition des communes de la région Grand Est par OTEX.....	101
Tableau 80 : Liste des ACV d'équipements et services numériques dans le secteur agricole (d'après Huck, 2022). ....	103
Tableau 81 : Panorama de l'usage des technologies numériques et internet (Schnebelin et al. 2021) .....	104
Tableau 82 : Comparaison de l'évolution du parc d'équipements en région Grand Est en fonction des scénarios.....	118
Tableau 83 : Comparaison de l'évolution de la durée de vie des équipements en région Grand Est en fonction des scénarios .....	118
Tableau 84 : Comparaison de l'évolution de la consommation unitaire des équipements en région Grand Est en fonction des scénarios .....	119
Tableau 85 : Comparaison de l'évolution de la répartition des technologies de téléviseur au sein du parc en région Grand Est .....	119
Tableau 86 : Comparaison de l'évolution du parc d'objets connectés en région Grand Est en fonction des scénarios.....	121
Tableau 87 : Comparaison de l'évolution de la durée de vie des objets connectés en région Grand Est en fonction des scénarios .....	121
Tableau 88 : Comparaison de l'évolution de la consommation unitaire des objets connectés en région Grand Est en fonction des scénarios .....	121
Tableau 89 : Evolution des taux de migration cloud & edge pour les organisations publiques et privées. ....	123
Tableau 90 : Evolution des besoins informatiques en infrastructures propres en région Grand Est (m <sup>2</sup> ).....	123
Tableau 91 : Evolution des consommations des équipements par m <sup>2</sup> des différents types de salles informatiques .....	124
Tableau 92 : Evolution des PUE des différents types de salles informatiques .....	124
Tableau 93 : Tableau récapitulatif des impacts environnementaux du scénario tendanciel, en 2030.....	126
Tableau 94 : Tableau récapitulatif de l'évolution des impacts environnementaux du scénario tendanciel, entre 2020 et 2030 .....	126
Tableau 95 : Tableau récapitulatif des impacts environnementaux du scénario sobriété numérique, en 2030.....	127
Tableau 96 : Tableau récapitulatif de l'évolution des impacts environnementaux du scénario sobriété numérique, entre 2020 et 2030 .....	127
Tableau 97 : Tableau récapitulatif des impacts environnementaux du scénario technologies vertes, en 2030 .....	129
Tableau 98 : Tableau récapitulatif de l'évolution des impacts environnementaux du scénario technologies vertes, entre 2020 et 2030 .....	129



## GLOSSAIRE

---

- **Analyse de cycle de vie (ACV) complète** : ACV qui tient compte de l'ensemble des aspects du système. Le périmètre d'étude précis et les frontières du système varient d'une ACV à une autre.
- **Analyse de cycle de vie (ACV) hybride** : méthode qui combine l'approche de l'ACV fondée sur l'analyse économique des entrées-sorties avec les spécificités de l'approche ACV process-based (basée sur les processus).
- **Analyse de cycle de vie (ACV) - Screening<sup>3</sup>** : il n'existe pas de définition officielle de ce terme, mais de nombreuses études s'accordent pour dire qu'il s'agit d'une ACV dite complète qui n'a pas pour objectif de quantifier les impacts environnementaux, mais d'identifier les zones du système et/ou les aspects clés du cycle de vie qui contribuent de manière significative à l'impact et qui ne doivent pas être négligés dans une étude d'ACV complète. Une ACV screening peut s'appuyer sur des facteurs d'émissions issus de la littérature sans considération d'homogénéité et de base de données d'inventaire du cycle de vie.
- **Analyse de cycle de vie (ACV) simplifiée<sup>3</sup>** : il n'existe pas de définition officielle de ce terme, mais il s'agit généralement d'une ACV non complète, dont la portée est plus étroite, incluant moins de processus et/ou moins de catégories d'impact. On peut retrouver en anglais les termes « simplified » ou encore « streamlined » pour qualifier ce type d'ACV.
- **ACV-A, attributionnelle (ou analyse par attributs)<sup>4</sup>** : ACV dont le système à l'étude est composé de processus élémentaires liés par des flux issus de la technosphère directement attribuables au système. Le système est considéré comme établi (en régime permanent). Les conséquences induites par les alternatives comparées ne remettent pas massivement en cause les chaînes des fournisseurs.
- **ACV-C, conséquentielle (ou analyse par conséquences)<sup>4</sup>** : ACV dont le système à l'étude est composé de processus élémentaires liés par des flux économiques, mais aussi des processus affectés indirectement par la mise en place du cycle de vie du produit étudié ou par son changement.
- **Ecoconception** : l'écoconception consiste à concevoir un produit, un bien ou un service numérique, qui prend en compte, afin de les réduire, ses effets négatifs sur l'environnement au long de son cycle de vie, en s'efforçant de préserver ses qualités ou ses performances.
- **JRC (Joint Research Center)** : le JRC est le service de connaissances scientifiques de la Commission Européenne, qui emploie des scientifiques pour mener des travaux afin de fournir des avis de indépendants à la Commission.
- **Méthode (d'évaluation environnementale)<sup>5</sup>** : ensemble des règles et étapes de calcul permettant d'aboutir à l'évaluation de l'impact environnemental d'un système, qui a pour objet de mesurer et d'analyser les effets sur l'environnement.
- **Méthode d'analyse de cycle de vie (ACV)<sup>6</sup>** : compilation et évaluation des intrants, des extrants et des impacts environnementaux potentiels d'un système de produits au cours de son cycle de vie.
- **MtoM / M2M** : *Machine to Machine* (de la machine à la machine), se réfère aux communications entre machines, par opposition aux communications entre humains, ou entre humain et machine.
- **PCR - Product Category Rule (Règles spécifiques des catégories de produits)** : ensemble de règles, d'exigences et de lignes directrices spécifiques prévues pour l'élaboration de déclarations environnementales de Type III et de communications d'empreintes carbone pour une ou plusieurs catégories de produits.
- **Référentiel** : ensemble structuré de recommandations, normatives ou non et de bonnes pratiques utilisées pour la mise en œuvre d'une méthode dans un contexte, pour une catégorie de produit, ou pour un objectif particulier.
- **TIC - Technologies de l'Information et de la Communication<sup>7</sup>** : ensemble d'outils et de ressources technologiques permettant de transmettre, enregistrer, créer, partager l'information, d'accéder à l'internet (sites Web, logiciels, blogs et messagerie électronique), les technologies (centres de données, serveurs, etc.), les appareils de diffusion

---

<sup>3</sup> Gradin, K.T., Björklund, A. (2021). *The common understanding of simplification approaches in published LCA studies—a review and mapping*. Int J Life Cycle Assess 26, 50–63. <https://doi.org/10.1007/s11367-020-01843-4>

<sup>4</sup> European Commission Joint Research Center (JRC), ILCD handbook – The International Reference Life Cycle Data System, 2012.

<sup>5</sup>ADEME. (2020, 07 Octobre). *L'évaluation environnementale dans l'industrie et les services. Outils et méthodes*.

<sup>6</sup> International Organization for Standardization (ISO). (2006). *ISO 14040:2006(fr) - Management environnemental — Analyse du cycle de vie — Principes et cadre*.

<sup>7</sup> UNESCO. (n.d). *Technologies de l'information et de la communication (TIC)*.

en direct (radio, télévision et diffusion sur l'internet) et en différé (podcast, lecteurs audio et vidéo et supports d'enregistrement) et la téléphonie (fixe ou mobile, satellite, visioconférence, etc.).

- **Sobriété Numérique** : selon la définition de l'ADEME, la sobriété numérique est une démarche qui consiste, dans le cadre d'une réflexion individuelle et collective, à questionner le besoin et l'usage des produits et services numériques dans un objectif d'équité et d'intérêt général. Cette démarche vise à concevoir, fabriquer et utiliser les équipements et services numériques en tenant compte des besoins sociaux fondamentaux et des limites planétaires.
- **Service Numérique**<sup>8</sup> : Un service numérique est une association :
  - D'équipements permettant de stocker, manipuler, afficher des octets (serveurs, terminaux utilisateurs, box ADSL, etc.) ;
  - D'infrastructures qui hébergent et relient les équipements (réseaux opérateurs et centres de données notamment) ;
  - De plusieurs logiciels empilés les uns sur les autres, qui s'exécutent au-dessus des équipements ;
  - D'autres services numériques tiers éventuels

Il répond à un besoin spécifique exprimé par l'utilisateur via une ou plusieurs fonctionnalités.

---

<sup>8</sup> Western Australian Government. (n.d). *Digital services definition and examples*.

## L'ADEME EN BREF

À l'ADEME - l'Agence de la transition écologique -, nous sommes résolument engagés dans la lutte contre le réchauffement climatique et la dégradation des ressources.

Sur tous les fronts, nous mobilisons les citoyens, les acteurs économiques et les territoires, leur donnons les moyens de progresser vers une société économe en ressources, plus sobre en carbone, plus juste et harmonieuse.

Dans tous les domaines - énergie, économie circulaire, alimentation, mobilité, qualité de l'air, adaptation au changement climatique, sols... - nous conseillons, facilitons et aidons au financement de nombreux projets, de la recherche jusqu'au partage des solutions.

À tous les niveaux, nous mettons nos capacités d'expertise et de prospective au service des politiques publiques.

L'ADEME est un établissement public sous la tutelle du ministère de la Transition écologique et du ministère de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de l'Innovation.

### LES COLLECTIONS DE L'ADEME



#### FAITS ET CHIFFRES

L'ADEME référent : Elle fournit des analyses objectives à partir d'indicateurs chiffrés régulièrement mis à jour.



#### CLÉS POUR AGIR

L'ADEME facilitateur : Elle élabore des guides pratiques pour aider les acteurs à mettre en œuvre leurs projets de façon méthodique et/ou en conformité avec la réglementation.



#### ILS L'ONT FAIT

L'ADEME catalyseur : Les acteurs témoignent de leurs expériences et partagent leur savoir-faire.



#### EXPERTISES

L'ADEME expert : Elle rend compte des résultats de recherches, études et réalisations collectives menées sous son regard.



#### HORIZONS

L'ADEME tournée vers l'avenir : Elle propose une vision prospective et réaliste des enjeux de la transition énergétique et écologique, pour un futur désirable à construire ensemble.



## IMPACT ENVIRONNEMENTAL DES USAGES DU NUMERIQUE EN GRAND EST

Complémentaire à l'étude ADEME-Arcep publiée en 202 et 2023 au sujet des impacts environnementaux du numérique en France, cette étude évalue ces impacts à l'échelle de la région Grand Est.

Complétée d'une approche méthodologique relative aux impacts environnementaux « importés » sur le volet des datacenters (datacenters situés hors du territoire mais utilisés au profit d'usage ayant lieu sur le territoire), l'étude s'appuie sur la méthodologie d'Analyse de Cycle de Vie (ACV) multicritères.

L'état des lieux, dressé sur l'année 2020, est décliné dans une vision prospective, coconstruite avec les acteurs du territoire régional Grand Est, à horizon 2030, via un scénario tendanciel et deux scénarios de rupture. Les scénarios de rupture mobilisent, à différents niveaux, les leviers technologiques et humains permettant de contribuer à la réduction de ces impacts environnementaux.

En complément, le potentiel de contribution du numérique à la décarbonation de la société (« émissions évitées ») est évalué sur trois cas d'usages. Ce potentiel apparaît comme très dépendant du contexte d'application des solutions potentiellement décarbonantes, difficilement généralisable, et extrêmement sensible aux potentiels effets rebonds.

