

ÉNERGIE & CLIMAT

QUELS MONDES VIRTUELS POUR QUEL MONDE *RÉEL* ?

RAPPORT FINAL - MARS 2024



Illustration couverture : Virgile Bellaïche

Avant-propos

Au sein de son programme de travail consacré aux **enjeux des technologies numériques vis-à-vis de la double contrainte carbone (réduire nos émissions carbonées, s'affranchir de notre dépendance aux énergies fossiles)** The Shift Project a publié, au cours des dernières années, cinq études portant sur l'impact environnemental du numérique :

- **Lean ICT – Pour une sobriété numérique (2018)**
Rapport évaluant des impacts environnementaux (notamment carbone et énergie) du numérique à l'échelle mondiale, actuels et à horizon 2025.
- **L'insoutenable usage de la vidéo en ligne (2019)**
Rapport traçant les liens entre construction sociologique des usages numériques et les dynamiques de nos infrastructures, sur la base de l'exemple de la vidéo en ligne.
- **Déployer la sobriété numérique (2020)**
Cadres méthodologiques que les acteurs publics et privés doivent s'approprier afin d'entamer les transformations opérationnelles qui mèneront à un numérique compatible avec les objectifs de décarbonation.
- **Impact environnemental du numérique - tendances à 5 ans et gouvernance de la 5G (2021)**
Mise à jour des trajectoires à 2025 de l'impact énergie-carbone du numérique. Il revient également sur la manière dont le débat sur la 5G s'est cristallisé, et sur les éléments qui en font un cas d'étude des dynamiques décrites dans les rapports précédents du Shift : l'évolution des usages et son interaction avec le développement des infrastructures.
- **Planifier la décarbonation du système numérique en France : cahier des charges (2023)**
Note dressant l'état des lieux des dynamiques observées sur le numérique en France (consommation électrique, carbone), des risques et enjeux posés aux acteurs de la planification énergie-carbone du pays (RTE, SGPE etc.) et décrivant les familles de leviers à mobiliser pour rendre le numérique résilient à partir de sa description systémique.

De nombreuses initiatives sont nées parmi les acteurs du numérique, qui sont rapidement et fortement montés en compétence sur le sujet de l'impact carbone et énergie des biens et services connectés. L'ambition des travaux menés dans notre programme de travail est ainsi de **construire une vision globale de ce qu'implique un numérique sobre et résilient, a minima au niveau européen, et d'éclairer la question centrale de ce défi : « Comment faire du numérique un véritable outil pour repenser les modes de production et de consommation plutôt qu'un simple levier d'optimisation des modes actuels ? ».**

La phase en cours de ces travaux comporte deux axes, menés en parallèle :

- Notre travail sur les conditions de pertinence des mondes virtuels au vu des contraintes énergie-climat, dont l'ambition est de documenter la manière dont les promesses et projections de nouveaux usages peuvent enclencher le déploiement de certaines trajectoires dans les choix de développement d'infrastructures numériques ;
- Notre travail sur les infrastructures réseaux, l'impact des choix de déploiement qui y sont faits et les stratégies à mettre en œuvre pour les rendre résilientes à la double contrainte carbone, dont le présent document est le rapport final.

À propos du think tank The Shift Project

Le Shift Project est un think tank qui œuvre en faveur d'une économie libérée de la contrainte carbone. Association loi 1901 reconnue d'intérêt général et guidée par l'exigence de la rigueur scientifique, sa mission est d'éclairer et d'influencer le débat sur la transition énergétique et climatique en Europe.

Le Shift Project constitue des groupes de travail autour des enjeux les plus décisifs de la transition, produit des analyses robustes et chiffrées sur ces enjeux et élabore des propositions rigoureuses et innovantes. Il mène des campagnes d'influence pour promouvoir les recommandations de ses groupes de travail auprès des décideurs politiques et économiques. Il organise également des événements qui favorisent les discussions entre parties prenantes et bâtit des partenariats avec des organisations professionnelles et académiques, en France et à l'étranger.

Le Shift Project a été fondé en 2010 par plusieurs personnalités du monde de l'entreprise ayant une expérience de l'associatif et du public. Il est soutenu par plusieurs grandes entreprises françaises et européennes ainsi que par des organismes publics, des associations d'entreprises et, depuis 2020, par des PME et des particuliers. Il est épaulé par un réseau de plusieurs dizaines milliers de bénévoles présents sur tout le territoire : The Shifters.

Depuis sa création, le Shift Project a initié plus de 50 projets d'étude, participé à l'émergence de deux manifestations internationales (Business and Climate Summit, World Efficiency) et organisé plusieurs centaines de colloques, forums, ateliers et conférences. Il a pu influencer significativement plusieurs débats publics et décisions politiques importantes pour la transition énergétique, en France et au sein de l'Union européenne.

L'ambition du Shift Project est de mobiliser les entreprises, les pouvoirs publics et les corps intermédiaires sur les risques, mais aussi et surtout sur les opportunités engendrées par la « double contrainte carbone » que représentent ensemble les tensions sur l'approvisionnement énergétique et le changement climatique. Sa démarche est marquée par un prisme d'analyse particulier, fondé sur la conviction que l'énergie est un facteur de développement de premier ordre : dès lors, les risques induits par le changement climatique, intimement liés à l'usage de l'énergie, relèvent d'une complexité systémique et transdisciplinaire particulière. Les enjeux climat-énergie conditionnent l'avenir de l'humanité ; il est donc nécessaire d'intégrer cette dimension le plus rapidement possible à notre modèle de société.

Il est épaulé par un réseau de dizaines de milliers de bénévoles regroupés au sein d'une association loi 1901 : The Shifters, créée en 2014 pour apporter un soutien bénévole au Shift Project. Initialement conçu comme une structure permettant d'accueillir toute personne souhaitant aider le Shift par un travail de recherche, de relais ou de soutien, les Shifters réalisent de plus en plus de travaux indépendants, mais toujours avec un objectif : contribuer efficacement à la sortie des énergies fossiles à l'échelle française et européenne.

Comité de rédaction

Le groupe de travail

Ingrid BUQUICCHIO (Experte Associée, The Shift Project)

Joris COUDREAU (Consultant et formateur, Eleutheria Consulting)

Marlène DE BANK (Ingénieure de recherche, The Shift Project)

Benoît DURAND (Consultant numérique responsable & sustainability)

Maxime EFOUI-HESS (Coordinateur du programme « Numérique », The Shift Project)

Landia EGAL (Projet CEPiR, Réalisatrice et productrice immersive, Fondatrice de Tiny Planets)

Hugues FERREBOEUF (Chef de projet « Numérique », The Shift Project)

Arnaud GUEGUEN (Consultant bas-carbone, Enseignant vacataire en grandes écoles)

Hugo JEANNINGROS (Enseignant-chercheur, Université de technologie de Troyes)

Adélaïde KISSI (Université Clermont Auvergne, Institut du Numérique Responsable)

Amaury LA BURTHE (Projet CEPiR, Réalisateur d'expériences immersives, Fondateur de Novelab, Associé de Tiny Planets)

Benjamin NINASSI (Adjoint au responsable du programme Numérique et Environnement, Inria)

Alexis SOUCHET (Chercheur post-doctoral, IRT SystemX)

Alexandre THEVE (Tech Impact Manager, Davidson consulting)

Les interprétations, positions et recommandations figurant dans ce rapport ne peuvent être attribuées ni aux contributeurs, ni aux relecteurs, ni aux membres du groupe de travail cités ci-dessus. Le contenu de ce rapport n'engage que The Shift Project.

Partenaires mécènes

Un grand merci aux mécènes engagés à nos côtés en faveur de la sobriété numérique, qui rendent possible la publication de ce travail :



Partenaires techniques

Les travaux présentés dans ce rapport ont également été accompagnés par d'autres partenaires, dont l'apport d'expertise et les contributions techniques ont permis de réaliser ces travaux : Cas d'Etude Pour un Immersif Responsable (CEPIR) :



Les interprétations, positions et recommandations figurant dans ce rapport ne peuvent être attribuées ni aux contributeurs, ni aux relecteurs, ni aux membres du groupe de travail cités ci-dessus. Le contenu de ce rapport n'engage que The Shift Project.

Table des matières

À propos du think tank The Shift Project	3
Comité de rédaction	4
Partenaires mécènes	5
Table des matières	6
Table des figures	9
Table des tableaux.....	9
INTRODUCTION	10
Le numérique, à la fois outil et défi pour la décarbonation de l'économie	10
Une trajectoire insoutenable à infléchir	11
Pourquoi travailler sur l'empreinte énergie-climat des mondes virtuels ?	12
DIRECTIONS TECHNOLOGIQUES ET TRAJECTOIRES ENERGIE-CLIMAT DES MONDES VIRTUELS	14
Le métavers et les mondes virtuels : contexte	14
Qualification de l'impact énergie-climat du continuum de mondes virtuels sur le système numérique	16
Approche des mondes virtuels par « cas d'usage »	17
Approche des mondes virtuels par directions technologiques	21
La Matrice « usages – systèmes numériques » : un outil pour traduire la proposition de services en impacts physiques	24
Quantification de l'impact énergie-climat d'un déploiement indifférencié et d'une adoption généralisée des mondes virtuels : scénario Méta-métavers	29
Quantification de l'impact énergie-climat d'un déploiement capacitaire et d'une adoption généralisée des mondes virtuels : impact sur l'infrastructure réseaux mobiles française	34
Méthodologie de pondération des directions technologiques pour les mondes virtuels : étude du cas de la métaconférence	37
CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS	43
Quelles sont les modalités de mondes virtuels discriminantes du point de vue énergie-climat ?	43

Conclusion de l'analyse par directions technologiques.....	44
Conclusion de l'analyse par « cas d'usages »	45
Recommandations méthodologiques.....	46
Mesure et transparence	46
Optimisation	47
Réorganisation collective vers la sobriété.....	47
Formation et compétences.....	48
Orienter nos choix technologiques vers la sobriété numérique.....	48
RÉFÉRENCES	49

Table des figures

Figure 1 - Distribution de l'empreinte carbone du numérique mondial en 2019, par poste pour les phases de production (40%) et d'utilisation (60%) Source : (The Shift Project, 2021)	10
Figure 2 - Matrice de définition de l'objet en trois niveaux Source : (Musso P. et al., 2014) mis en forme dans le cadre de ce rapport	17
Figure 3 - Matrice« usages des mondes virtuels et effets induits directs sur le système numérique » Source : The Shift Project, dans le cadre de ce rapport	25
Figure 5 - Evolution 2016-2030 des émissions de gaz à effets de serre du numérique : Scénarios Conservative et Growth 2016-2025 (The Shift Project, 2021) prolongés à 2030 et scénario Meta-métavers Source : The Shift Project, dans le cadre de ce rapport	31
Figure 6 -Evolution 2016-2030 des émissions de gaz à effets de serre de la production de terminaux et des consommations électriques pour chacun des 3 tiers : Scénarios Conservative et Growth 2016-2025 (The Shift Project, 2021) prolongés et scénario Meta-métavers. Source : The Shift Project, dans le cadre de ce rapport.....	33
Figure 7 - Evolution 2020-2035 des émissions de gaz à effets de serre des réseaux mobiles pour 4 scénarios de trafics contrastés Périmètre et méthode de calcul détaillés dans (The Shift Project, 2024b) Source : The Shift Project dans le cadre de ce rapport et (The Shift Project, 2024b)...	36
Figure 8 - Evolution 2020-2035 de la consommation d'électricité et des émissions embarquées (méthode stock) de gaz à effets de serre des réseaux mobiles pour 4 scénarios aux trafics contrastés Périmètre et méthode de calcul détaillés dans (The Shift Project, 2024e) Source : The Shift Project dans le cadre de ce rapport et (The Shift Project, 2024e)	36

Table des tableaux

Tableau 1 – Caractéristiques structurantes des mondes virtuels Source : The Shift Project, dans le cadre de ce rapport, approche appuyée sur celle de (Weinberger M. & Gross D., 2023).....	22
Tableau 2 - La sélection de « cas d'usage » réalisée dans le cadre de ce rapport permet d'étudier l'ensemble des caractéristiques des mondes virtuels.....	24
Tableau 3 - Evaluation du caractère essentiel des directions technologiques pour le « cas d'usage » de la conférence en ligne Source : The Shift Project, dans le cadre de ce rapport ...	39
Tableau 4 - La métaconférence : quelle tendance en termes de coût énergie et coût carbone ? Source : The Shift Project dans le cadre de ce rapport	40

Introduction

Le numérique, à la fois outil et défi pour la décarbonation de l'économie

Les technologies de l'information, aujourd'hui centrales et essentielles pour nos sociétés, jouent de fait un rôle crucial dans la transformation de notre économie. Si ces équipements numériques et les usages qu'ils permettent et promettent semblent être conçus pour relever des défis toujours plus grands, cela ne les affranchit cependant pas d'une réflexion sur leur pertinence environnementale. Dans un monde où les ressources sont finies, il est important de se souvenir que chaque transformation physique et donc chaque action réclame de l'énergie. Y compris celle d'envoyer une information. Les technologies numériques ne sont ainsi pas des outils virtuels, mais bien des supports physiques, même si nous n'en percevons pas directement la matérialité au travers des actions qu'ils permettent.

Les technologies numériques forment un système d'envergure mondiale : les terminaux (smartphones, ordinateurs, tablettes etc.) se connectent entre eux via des infrastructures réseaux (câbles terrestres et sous-marins, antennes de réseaux mobiles, fibres optiques etc.) afin d'échanger des informations stockées et traitées dans les centres de données, cœurs battants de ce système. Or chacun de ces éléments nécessite de l'énergie non seulement pour fonctionner (phase d'utilisation) mais également, avant cela, pour être produit : extraction minière des matières premières, processus industriels de fabrication puis livraison aux consommateurs et consommatrices nécessitent des ressources biotiques et abiotiques conséquentes.

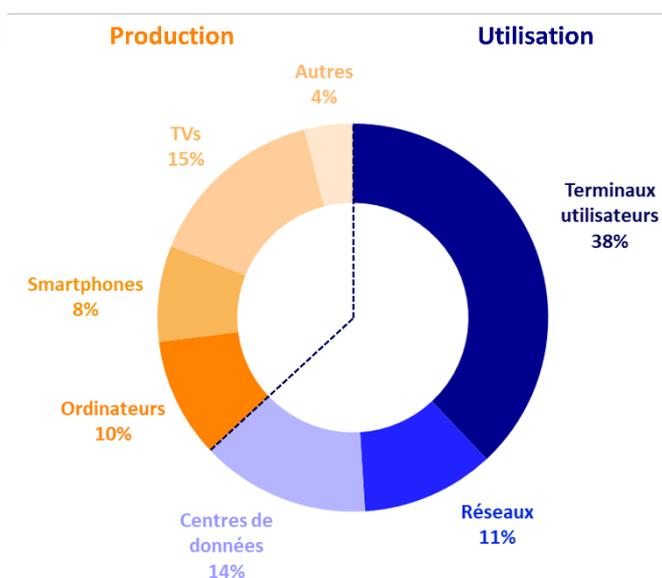


Figure 1 - Distribution de l'empreinte carbone du numérique mondial en 2019, par poste pour les phases de production (40%) et d'utilisation (60%)
Source : (The Shift Project, 2021)

Chaque service numérique s'appuie sur des infrastructures physiques dont la résilience et la pertinence vis-à-vis de la **double contrainte carbone (réduire les émissions carbonées de nos activités, s'affranchir de notre dépendance aux énergies fossiles)** doivent être interrogées. Le numérique est un catalyseur : là où il est déployé, il permet d'optimiser, accélérer, fluidifier, paralléliser... Le déployer sans stratégie (ou plutôt, sans stratégie conçue à l'aune de cette double contrainte) mène donc à l'accélération de toutes les dynamiques, y compris celles les plus éloignées de nos objectifs de résilience. En faire un véritable outil de réinvention de nos activités pour les rendre compatibles avec les contraintes planétaires réclame une compréhension systémique des impacts du numérique et une stratégie adaptée.

Une trajectoire insoutenable à infléchir

Le numérique représente déjà près de 4 % des émissions mondiales (The Shift Project, 2021), soit du même ordre que l'intégralité des véhicules utilitaires lourds dans le monde (IEA, 2021). A l'échelle française, le numérique représente 2,5 % de l'empreinte carbone du pays (ADEME & Arcep, 2023).

Sa particularité tient aux tendances que suivent ses émissions, qui croissent selon une dynamique particulièrement rapide et incompatible avec sa décarbonation : + 6 %/an en moyenne au niveau mondial (The Shift Project, 2021) et + 2 à 4 %/an en France (ADEME & Arcep, 2023; HCC, 2020; Sénat, 2020). **Les optimisations techniques et opérationnelles ne parviennent pas à compenser le développement soutenu de ses infrastructures, parcs et flux** (ADEME & Arcep, 2023; Bol et al., 2020; European Commission, 2020; GreenIT.fr, 2019; IEA, 2022; The Shift Project, 2023). Ce constat continue de se vérifier et s'est illustré au cours des cinq dernières années, qui devaient pourtant selon certaines études marquer un plafonnement de ces impacts grâce au progrès technologique (IEA, 2019; ITU-T, 2020; Masanet et al., 2020).

A l'échelle de la France comme à l'échelle mondiale, le numérique représente en 2022 environ 10 % de la consommation électrique totale (The Shift Project, 2021, 2023). Dans un contexte d'électrification intense des usages (mobilité, bâtiment, industrie etc.), on comprend qu'il se trouve lui aussi au cœur des enjeux de planification de la transformation de nos systèmes et de priorisation d'accès aux ressources désormais en tension, dont l'électricité fait partie (The Shift Project, 2023).

Rendre le numérique compatible avec la double contrainte carbone consiste donc non pas à accélérer ses leviers d'optimisation déjà déployés, mais à le placer sur une trajectoire fondamentalement différente de celle qu'il suit actuellement. **Au même titre que les autres secteurs de l'économie, il doit ainsi atteindre son objectif de décarbonation**, que les acteurs industriels (GSMA, GeSI¹) se sont eux-mêmes fixés par le biais de l'initiative SBTi et sur la base d'une recommandation de l'ITU (SBTi et al., 2020, p. 9) à **- 45 % en 2030 par rapport à 2020 au niveau mondial**².

The Shift Project propose de prendre cet objectif comme base de la construction de trajectoire nationale, en l'adaptant aux spécificités de la décarbonation déjà importante du mix électrique du pays. **The Shift Project préconise de construire la trajectoire française autour de cet**

¹ GSMA : GSM Association, association rassemblant les acteurs internationaux de la connectivité mobile (constructeurs, opérateurs etc.). | GeSI : Global enabling Sustainability Initiative, groupement d'acteurs internationaux du numérique et des télécommunications, dont la mission est d'œuvrer sur le numérique durable.

² Ou dans le cadre d'engagements nationaux similaires à ceux pris par les industriels français dans le cadre des feuilles de routes de décarbonation du secteur du numérique.

objectif SBTi recalculé pour l'adapter au cas français, de - 30 % des émissions du secteur à 2030 par rapport à 2020.

La construction de notre système numérique se fait au travers d'interactions multiples entre le système technique et les usages qu'il sous-tend. L'analyse au prisme de l'énergie et du climat, avec une approche systémique, permet de comprendre que **maîtriser les impacts de nos technologies ne se fera pas sans réflexion sur les déploiements d'offres et les adoptions d'usages que nous encourageons ou non**. L'inflexion des volumes de terminaux et de données étant même la **condition sine qua non à la maîtrise de la consommation énergétique grâce aux gains d'efficacité énergétique** (The Shift Project, 2023).

Pourquoi travailler sur l'empreinte énergie-climat des mondes virtuels ?

L'annonce d'investissements massifs dans les métavers en 2021 (Facebook, 2021; L'usine digitale, 2021) et l'engouement à l'échelon national et européen pour les technologies immersives (Basdevant A., François C., Ronfard R., 2022; Direction Générale des Entreprises, 2022; European Commission, 2023) interpellent, les mondes virtuels proposant de nouveaux usages pour un système numérique déjà soumis dans son ensemble à l'épreuve de la contrainte énergétique et climatique³. Le simple cas des technologies immersives laisse présager que **les empreintes énergétiques des trois tiers du système numérique (terminaux, centre de données, infrastructure réseaux) sont vouées à prendre de concert des directions insoutenables** :

- **Du côté des terminaux**, l'extension de l'offre de terminaux immersifs, dont l'intensité énergétique se renforce, vise à séduire un public toujours plus large (Gartner, 2022).
- **Du côté des centres de données**, les terminaux immersifs facilitent la génération et la collecte de volumes croissants de données, à stocker ou à exploiter, d'ailleurs essentiels pour alimenter de puissants modèles d'affaires. A cela s'ajoute d'autres dynamiques, comme le déport de puissance de calcul vers des centres de données distribués (edge computing) ou le streaming dédié de contenu haute définition pour optimiser l'interaction avec les terminaux immersifs, ou encore le déploiement de l'intelligence artificielle générative en tant qu'outil de création de contenu mis à disposition des utilisateurs.
- **Du côté des infrastructures réseau**, les exigences en termes de latences, mais aussi de débits descendants et surtout montants mettent sous pression le développement des réseaux.

Effets d'offre et effets d'usage se mêlent à différents niveaux et coconstruisent une dynamique qui, si elle venait à s'entériner dans l'écosystème numérique sous l'impulsion de politiques publiques (ou, au contraire, de l'absence de politiques publiques) et des stratégies économiques des acteurs dominants (les Big Tech), aboutirait à accentuer l'incompatibilité de la tendance actuelle avec la double-contraainte carbone.

Après la mise en place d'un cadre d'analyse incluant à la fois les enjeux d'usages et les enjeux techniques, plusieurs analyses sont proposées : une analyse qualitative permettant une représentation visuelle conséquentielle des effets induits (directs) sur le système numérique

³ Le scénario tendanciel ADEME-Arcep indique + 45 % d'émissions de gaz à effets de serre entre 2020 et 2030 (Weinberger M. & Gross D., 2023). La recommandation de l'ITU indique - 45 % entre 2020 et 2030. (SBTi et al., 2020).

selon les usages de mondes virtuels puis une analyse quantitative évaluant l'impact environnemental d'un déploiement généralisé et indifférencié des mondes virtuels. Un approfondissement est mené sur les réseaux mobiles à l'aide de notre méthodologie et outil documentés dans notre rapport "Energie, climat : Des réseaux sobres pour des usages connectés résilients" (The Shift Project, 2024b), ceci afin de renforcer la compréhension des effets d'offre et d'usage sur notre infrastructure réseau, en cherchant à répondre à la question : « Quel impact les mondes virtuels ont-ils sur le déploiement de notre infrastructure réseau mobile ? ». Une dernière partie vient décliner sur le cas d'usage de la « métaconférence » une réflexion méthodologique sur l'identification de conditions de pertinence pour bénéficier d'apports énergie-climat nets et sur la mise en arbitrage des modalités de mondes virtuels afin d'identifier les options de développement technologique et les « cas d'usage » cohérents avec un système numérique sobre et résilient.

Directions technologiques et trajectoires énergie-climat des mondes virtuels

Le métavers et les mondes virtuels : contexte

Le reflet de l'engouement passé pour les développements des mondes virtuels par les industries du numérique peut s'observer dans les cycles de « hype » des technologies émergentes publiés par la société de conseil et analyses Gartner entre 1995 et 2023 : sont mentionnés successivement la « réalité virtuelle » (3 occurrences), la « réalité augmentée » (12 occurrences), la « téléprésence » (2 occurrences), les « mondes virtuels » (3 occurrences), les « mondes virtuels publics » (3 occurrences), à nouveau la « réalité virtuelle » (5 occurrences) et la « réalité mixte » (1 occurrence) (Gartner, 1995-2023) (« Annexe – Contexte et historique »). Notamment, la période 2016-2019 a connu une intensification des développements technologiques des casques de réalité virtuelle par des entreprises commerciales (voir graphiques en « Annexe – Contexte et historique »).

Dans le même temps, **la culture populaire et les jeux vidéo et films** tels que Tron (1982, 2010), Snow Crash (1992), Matrix (1999), Avatar (2009), Ready Player One (2018), Les Sims (2000), Second Life (2003), Grand Theft Auto (2003), Roblox (2006) ou Pokemon Go (2016) **illustrent la présence forte des mondes virtuels dans les développements des industries créatives et des secteurs culturels, tant dans leurs imaginaires⁴, représentations et contenu que dans leur forme.**

En octobre 2021, l'engouement pour les mondes virtuels augmente après **l'annonce retentissante de la structuration par la renommée entreprise Meta d'un monde virtuel généralisé, le « métavers »** (Meta, 2021a, 2021b). Plutôt que la promesse d'une mise à disposition effective d'un nouveau service de rupture à court terme, **cette annonce doit sans doute davantage être interprétée comme un signal envoyé à l'écosystème numérique afin de structurer les orientations technologiques et les réglementations prises, dans une direction permettant l'avènement d'un métavers à terme.** Si la communication et le marketing grand public s'articulent généralement autour du service ou de l'équipement révolutionnaire, il ne s'agit cependant pas de disruption d'un acteur unique mais bien plutôt de la continuité de l'approche incrémentale des trente années précédentes (« Annexe – Contexte et historique »),

⁴ En retour, la multiplication des fictions et des récits facilite la socialisation des techniques en promouvant commercialement des usages, en y donnant un sens ou en inscrivant à large échelle des imaginaires associés à ces techniques (Musso P. et al., 2014).

dans laquelle plusieurs industries (créatives, software et hardware, infrastructures) amènent chacune leur brique technologique avec la volonté de converger (comme Disney et Epic Games en 2024 (L'usine digitale, 2024) ou Apple, Pixar, Adobe, Autodesk et Nvidia (L'usine digitale, 2023)).

Le signal est pris au sérieux en France et en Europe (Basdevant A., François C., Ronfard R., 2022; Direction Générale des Entreprises, 2022; European Commission, 2023) **avec un surcroît d'annonces, d'investissements, de créations d'entreprises et de structurations autour des technologies immersives et à l'échelle de l'Union européenne avec l'intention que la 6G permette l'avènement de ce type de mondes virtuels** (European Commission, 2023; European Parliament, Committee on the Internal Market and Consumer Protection, 2023; L'usine digitale, 2023a).

La vision de ce que proposent concrètement ces technologies est floue notamment car hétérogène pour plusieurs raisons : Meta développe plusieurs briques technologiques en parallèle⁵, adopte une approche incrémentale, propose de multiples applications possibles⁶, et conçoit plusieurs environnements avec des directions artistiques différentes⁷. Le seul point distinct étant la promesse d'un « métavers » comme « prochain chapitre d'Internet » ou « Internet du futur » (Meta, 2021b), parachevé par la mise en scène d'une dématérialisation complète dans les vidéos marketing Meta. A cette vision, s'ajoutent les déclinaisons d'autres acteurs s'engouffrant sur le sujet et produisant chacun leurs définitions, visions, spéculations et produits⁸ (voir « Annexe – Multiplicité des définitions des mondes virtuels »).

La vision floue, multiple et hétérogène qui en résulte rend non seulement complexe l'appréciation environnementale mais complique également la réfutabilité (au sens épistémologique⁹) de déclarations telles que « le métavers est compatible avec l'Accord de Paris ». L'objet concret « métavers » ou « mondes virtuels » n'ayant pas de définition claire, les réflexions sur ses implications peuvent en effet ne mener qu'à des débats relativistes sur les potentiels services que pourraient rendre le métavers, ou bien sur les modalités de métavers qui seraient moins émissives que les autres. Une telle démarche évacuerait le questionnement de la place des mondes virtuels dans un numérique sobre et adapté à la double contrainte carbone.

C'est précisément pour éviter cet écueil que The Shift Project propose une double-définition, à la fois par caractéristiques technologiques et à la fois par cas d'usage. Ceci afin de détourner au mieux le continuum de mondes virtuels et en décrire les implications énergétiques et climatiques. Mais aussi pour en fonction des directions technologiques concrètes choisies, identifier les conditions de pertinence des modalités de mondes virtuels en les prenant au sein de leur contexte de déploiement et d'usage.

Le terme « métavers » est peu employé dans la suite de ce rapport, si ce n'est dans le titre donné à notre scénario « Méta-métavers » de déploiement indifférencié et d'adoption généralisée de mondes virtuels. Il est plutôt remplacé par la dénomination « mondes virtuels » ou « continuum de mondes virtuels » englobant l'ensemble des formes de formes de mondes virtuels proposées, déjà existantes ou non, ceci afin d'aller vers des approches technologiquement segmentées.

⁵ Casques de réalité virtuelle, lunettes intelligentes, jeu vidéo en ligne de réalité virtuelle, application de collaboration et environnements de travail, avatar photoréaliste, reconstruction 3D, IA (Meta, 2024)

⁶ Liens sociaux, divertissement, jeux, fitness, travailler mieux et faire plus, éducation et commerce (Meta, 2021b).

⁷ Par exemple, les environnements Meta Horizon Workrooms, Horizon Worlds, la vidéo de communication (Meta, 2021b) ont des directions artistiques différents.

⁸ Comme la vision Apple avec son casque Apple Vision Pro.

⁹ Concept en épistémologie introduit par Karl Popper, qui caractérise les hypothèses ou énoncés pouvant être contredits par un raisonnement logique appuyé sur une expérience, observation ou réalité empirique.

Il est à noter que si le métavers et les mondes virtuels ont été imposés à l'agenda collectif¹⁰ (économique, médiatique, politique¹¹), ce rapport ne les considère pas comme un passage incontournable. Les considérations environnementales, dont **les considérations énergétiques et climatiques que nous étudions ici, doivent jouer un rôle essentiel dans les décisions de développement et déploiement de ces technologies et services**, que ce soit en amont ou en parallèle de la mobilisation de l'écosystème d'acteurs sur les choix stratégiques.

Qualification de l'impact énergie-climat du continuum de mondes virtuels sur le système numérique

Dans l'écosystème numérique, soumis à plusieurs lignes de force en termes de visions et de tendances (dont celle de Meta), plusieurs gammes de technologies et de produits se mettent en place, à vocation de se compléter mutuellement pour donner lieu à de **multiples modalités de mondes virtuels**. C'est justement parce que les modalités de mondes virtuels sont et pourraient être multiples que **la qualification et la quantification de leurs impacts énergétiques et climatiques requièrent une caractérisation adaptée**. Deux axes d'analyse complémentaires le permettent :

- **Les « cas d'usages »**, qui permettent de caractériser la variété d'usages et d'utilisations possibles ;
- **L'approche par diversité d'orientations technologiques, et degré d'avancement de chaque orientation technologique.**

Cette double approche a plusieurs résonances :

- Elle est similaire à celle proposée par le think tank Renaissance Numérique dans sa publication « Gouverner le Métavers et l'internet de demain » (Renaissance Numérique, 2023), en ce qu'elle **décrit à la fois les usages et les représentations et à la fois leur rattachement et interaction permanente à des systèmes techniques**. Le Métavers y est caractérisé comme **un objet frontière** (proche de la notion de promesse comme celle mise en place par Meta en 2021) à savoir « un catalyseur de représentations diverses et variées, qui met en mouvement et agrège autour de lui des écosystèmes d'acteurs hétérogènes qui évoluent initialement dans des mondes différents » (Renaissance Numérique, 2023) ;

¹⁰ Comme le montreront les références considérées dans la construction des narratifs (dont l'objectif est de décrire les tendances dans l'écosystème numérique) dans la partie suivante : Approche des mondes virtuels par « cas d'usage ». Cette partie pouvant être complétée avec les « Annexe – « Cas d'usage » et narratifs » et « Annexe – Analyse bibliographique de la construction des offres de mondes virtuels » à vocation bibliographique.

¹¹ (Basdevant A., François C., Ronfard R., 2022; Direction Générale des Entreprises, 2022; European Commission, 2023, European Commission, 2023; European Parliament, Committee on the Internal Market and Consumer Protection, 2023; L'usine digitale, 2023a).

- Elle est **duale « usages – technologies »**, de même que sur chacun des trois niveaux de l'approche de l'objet par (Musso P. et al., 2014) reproduite en (Figure 2) ;
- Dans le champ des sciences de l'ingénieur, l'analyse du besoin et l'analyse fonctionnelle sont des étapes où les usages sont spécifiquement pris en compte, pour être déclinées en spécifications techniques.

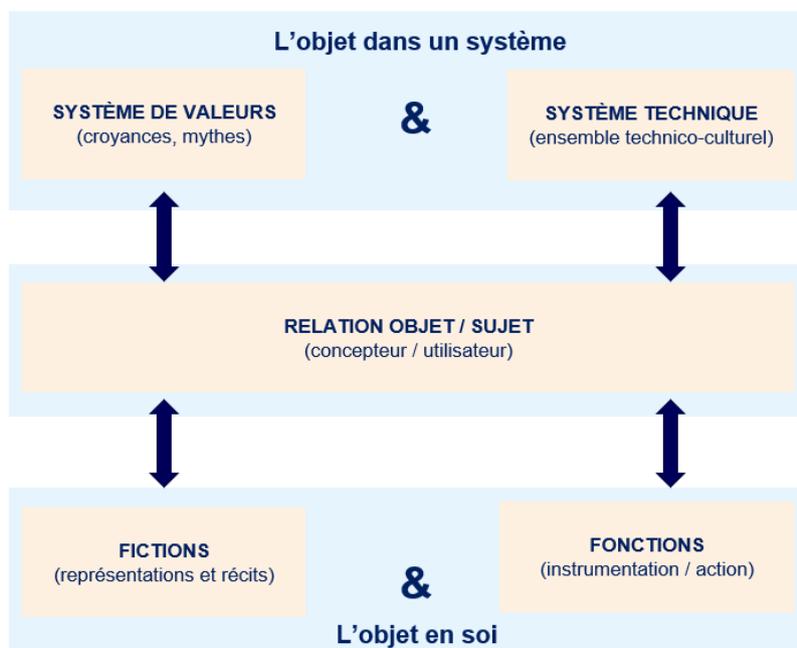


Figure 2 - Matrice de définition de l'objet en trois niveaux
 Source : (Musso P. et al., 2014) mis en forme dans le cadre de ce rapport

Approche des mondes virtuels par « cas d'usage »

Six « cas d'usage » ont été sélectionnés de manière à être représentatifs, à date, des offres des grands acteurs de l'écosystème numérique, puisque ces offres sont structurantes sur l'empreinte carbone du numérique mondial.

Leur **transcription en narratif** est la première étape de la démarche développée dans ce rapport avec pour objectif **d'agréger les différentes offres en vigueur dans l'écosystème et de traduire les services proposés en nécessités techniques et infrastructurelles (terminaux, réseaux, centres de données)**. Sur la base de la caractérisation concrète des usages représentés dans ces cas d'étude, chacun d'eux pourra ensuite faire l'objet d'une analyse systématique.

Parmi les applications sélectionnées certaines sont sociales ou ludiques, d'autres professionnelles. L'étude « Représentations et usages du métavers » (Renaissance Numérique & L'Observatoire Société & Consommation, 2023) expose que pour les *early adopters*¹² le divertissement est au centre des usages ; et côté professionnel, la progression des usages est déjà en vigueur dans le milieu industriel.

¹² Early adopters : entendu au sens d'une communauté spécifique d'utilisateurs qui, en plus d'être précurseurs dans l'adoption d'une technologie ou l'achat d'un dispositif, sont généralement à l'aise avec les objets techniques et servent parfois de relais dans la massification des usages. Définition du Glossaire de (Renaissance Numérique, 2023).

Les six cas d'étude sélectionnés sont les suivants¹³ :

- **Les conférences et réunions immersives en ligne :**
 - Narratif : **La métaconférence**
 - Ce narratif décrit l'évolution d'un service de téléconférence, des outils et fonctionnalités de productivité et des logiciels de collaboration vers des services immersifs et intelligents.
 - Exemple d'application existante : salles de travail en réalité virtuelle, outils de visioconférence
 - Type de terminaux : écrans, casque de réalité virtuelle¹⁴
 - Publics cible : entreprises, particuliers

- **Les jeux vidéo et les univers sociaux :**
 - Narratif : **Le « je » dans le jeu**
 - Ce narratif décrit l'intégration de réseaux sociaux et de producteurs de services à des jeux vidéo.
 - Exemples de types de jeux concernés : jeux bacs à sable, jeux d'aventure, jeux de rôle (World of Warcraft, Half Life Alyx, Zenith : the last City, Roblox, Decentraland, The Sandbox) à domicile ; jeux mobiles, jeux « battle-royale » (Pokemon Go, Fortnite) en mobilité
 - Type de terminaux : console de jeux, casque de réalité virtuelle, écrans à domicile ; terminaux portables de réalité augmentée¹⁵ de type « lunettes », visiocasque de réalité mixte¹⁶ en mobilité
 - Publics cible : joueurs et particuliers

- **Les achats en ligne :**
 - Narratif : **Un commerce pas si virtuel**
 - Ce narratif propose une extension des plateformes de ventes en ligne. Le modèle décrit est celui de la collecte, de l'archivage et des traitements de données adaptés au marketing (marketing géolocalisé et émotionnel), l'abondance de données étant permis par des terminaux immersifs.
 - Exemple de services concernés : plateforme dédiée de commerce en ligne, plateforme en ligne de grandes enseignes etc.
 - Type de terminaux : écrans, casque de réalité mixte

¹³ Pour chaque narratif, les références utilisées sont listées. En complément, en « Annexe – Analyse bibliographique de la construction des mondes virtuels », un tableau référence des études de différents corpus sur ces cas d'usage parmi lesquels ceux des produits industriels, marketing industrie, prédiction intelligence économique, culture, institutions, presse généraliste, recherche scientifique.

¹⁴ Réalité virtuelle : technologie informatique qui simule la présence physique d'un utilisateur dans un environnement artificiellement généré par des logiciels. La réalité virtuelle crée un environnement avec lequel l'utilisateur peut interagir. Définition (Wikipédia, 2024a).

¹⁵ Réalité augmentée : technologie permettant l'ajout d'éléments numériques (2D ou 3D) sur la réalité perçue grâce à des dispositifs numériques (smartphone, tablette, casque, lunettes intelligentes...). Définition du Glossaire de (Renaissance Numérique, 2023).

¹⁶ La réalité étendue peut servir à englober l'ensemble des expressions « réalité virtuelle, augmentée et mixte ». Définition du Glossaire de (Renaissance Numérique, 2023).

- Publics cible : particuliers
- **Les expériences culturelles :**
 - Narratif : ***Le métavers culturel***
 - Un premier narratif « en présentiel » décrit des dispositifs de réalité augmentée dans les musées permettant des expériences immersives et divertissantes. Un second narratif « en distanciel » décrit des dispositifs de réalité virtuelle afin de bénéficier de visites ou d'événements à distance.
 - Exemple d'expérience : expériences immersives (« Eternelle Notre-Dame »)
 - Publics cible : particuliers
- **Les jumeaux numériques :**
 - Narratif : ***Le métavers industriel***
 - Ce narratif décrit l'utilisation de jumeau numérique, principalement dans les secteurs industriels.
 - Exemples existants : systèmes d'information (solutions déployées dans l'industrie), BIM (Building Information Model), jumeau numérique (applications dans l'industrie de l'énergie, de l'automobile)
 - Type de terminaux : lunettes de réalité augmentée
 - Public cibles : industries, réseaux (d'électricité, ferroviaire)
- **La pornographie :**
 - Narratif : ***La pornographie immersive***
 - Ce narratif intègre les vidéos 360°, la collecte de données pour un marketing individualisé éventuellement permis par des algorithmes intelligents.
 - Exemple de terminaux : équipements haptiques

La bonne compréhension de l'utilisation des « *cas d'usage* » dans ce rapport nécessite quelques clarifications théoriques et méthodologiques :

- **La sélection des cas d'usages présentés dans ce rapport vise à rendre compte d'une diversité d'usages des mondes virtuels d'un point de vue technologique et matériel, elle n'est pas exhaustive**¹⁷. La complémentarité avec l'approche par directions technologiques (partie ci-dessous) offre une certaine robustesse contrebalançant le caractère non-exhaustif de la sélection de cas retenus (table 2).
- Les cas présentés ici sont des scénarios élaborés sur la base de références produites dans des cadres journalistiques, commerciaux ou académiques. Ils reflètent ainsi des visions produites principalement par les concepteurs et promoteurs des mondes virtuels.
- Les cas présentés servent de base pour la production de modélisations. Ils n'ont pas vocation à constituer des prédictions de diffusion technologique. La littérature

¹⁷ Par exemple, les cas suivants n'ont pas été retenus, sans que cela ne signifie quoi que ce soit sur leur capacité ou probabilité à advenir, sur le fait de les en dissuader ou de les y encourager : la formation et l'apprentissage, la santé, l'administration et les services en ligne et l'informatique ubiquitaire.

académique sur les usages des technologies d'information et communication nous invite à cet égard à la prudence.

- Bien que l'expression « *cas d'usage* » soit consacrée, elle ne reflète pas nécessairement l'existence d'un usage puisque ce ne sont que des projections possibles, des tendances et des offres assemblées dont il est question ici.
- Comme tout dispositif, les mondes virtuels feront l'objet de processus d'appropriation et de pratiques de détournement par les utilisateurs. Les usages futurs sont ainsi difficilement prévisibles.

A titre d'exemple le narratif **Un commerce pas si virtuel** est présenté ci-dessous ; l'ensemble des narratifs construits est à retrouver en « Annexe – « Cas d'usage » et narratifs ».

Un commerce pas si virtuel

En 2024, chaque acteur de la distribution a son métavers-vitrine, comme Amazon en Inde [1]. Une expérience dans un monde virtuel est proposée, quelquefois immersive, souvent promotionnelle, il s'agit avant tout de promettre de nouvelles expériences d'achat et d'encourager le changement des habitudes client.

En 2027, Amazon envoie à ses 300 millions d'abonnés Amazon Prime un casque de réalité virtuelle ; produit d'appel permettant de réaliser ses courses dans un magasin virtuel avec étagères reconstitués et personnalisés [2]. Dans le même temps, l'adoption massive de lunettes connectées permettent aux plateformes de mieux cerner l'environnement et les habitudes du consommateur.

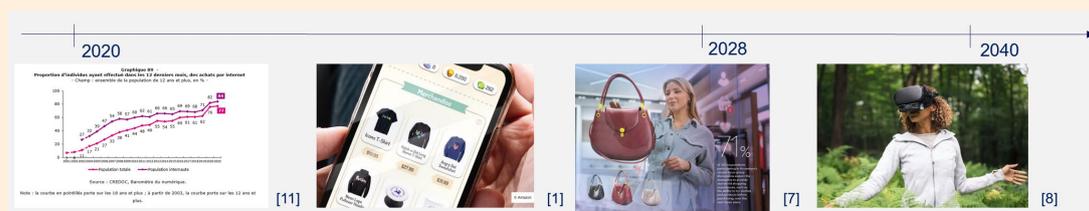
Les assistants de shopping virtuels, véritable personification de l'UX (User Experience) et des parcours d'achat, décuplent les ventes grâce à leur potentiel de persuasion permis à la fois par des données cérébrales, corporelles et visuelles collectées en temps-réel, et à la fois un historique persistant de ces données.

Le marketing géolocalisé et le marketing émotionnel ont fait du chemin depuis les algorithmes de compréhension d'émotions dans les centres d'appel et jeux vidéo ; et depuis le jeu Pokemon Go qui déplaçait ses joueurs dans les centres commerciaux [3,4].

Les expériences d'achat en réalité augmentée se sont aussi multipliées : dans les magasins [5,6] ou à domicile où un scanner LIDAR est désormais nécessaire à quiconque compte concevoir sa cuisine [7].

Ce ne sont pas des biens virtuels qui sont vendus et achetés mais des biens réels [1].

En 2040, sentir virtuellement l'odeur du cuir d'un sac à main ou pouvoir en évaluer sa texture est permis par de nouveaux terminaux haptiques et sensoriels [8,9] et la sixième génération de réseaux mobiles [10].



Références

[1] Amazon takes big metaverse step with immersive shopping experience, Chain Store Age, 5 septembre 2023, <https://chainstoreage.com/amazon-takes-big-metaverse-step-immersive-shopping-experience>

- [2] How the metaverse will remake your strategy, BCG, juillet 2022, <https://www.bcg.com/publications/2022/impact-of-metaverse-on-business>
- [3] Métavers : ce jeu dont qui sera le héros?, LINC, CNIL, 24 janvier 2022, <https://linc.cnil.fr/metavers-ce-jeu-dont-qui-sera-le-heros>
- [4] Métavers : réalités virtuelles ou collectes augmentées?, LINC, CNIL, 4 novembre 2021, <https://linc.cnil.fr/metavers-realites-virtuelles-ou-collectes-augmentees>
- [5] Projet de développement immobilier en Arabie Saoudite, consulté le 24/11/2023, <https://newmurabba.com/#inside-mukaab>
- [6] Metaverse : evolution then revolution, consulté le 24/11/2023 : <https://www.accenture.com/content/dam/accenture/final/accenture-com/document/Accenture-Metaverse-Evolution-Before-Revolution.pdf>
- [7] Apple unveils new iPad Pro with breakthrough LiDAR Scanner and brings trackpad support to iPadOS, Apple, 18 mars 2020, <https://www.apple.com/pl/newsroom/2020/03/apple-unveils-new-ipad-pro-with-lidar-scanner-and-trackpad-support-in-ipados/>
- [8] Produit de technologie olfactive portable, consulté le 24/11/2023, <https://ovrtechnology.com/>
- [9] Réalité virtuelle : un masque génère des odeurs synthétiques, Le Monde, 17 mai 2023, https://www.lemonde.fr/sciences/article/2023/05/17/realite-virtuelle-un-masque-genere-des-odeurs-synthetiques_6173771_1650684.html
- [10] Decision of the governing board of the Smart Networks and Services Joint Undertaking No 12/2021, Adopting the Joint Undertaking's Strategic Research and Innovation Agenda, p29, consulté le 24/11/2023, https://smart-networks.europa.eu/wp-content/uploads/2022/10/122021_sns_gb_decision_sria_including_annexdocx_89dnouztkolqi0m6dij7feh9da_8207_9_compressed-1.pdf
- [11] Le baromètre du numérique, ARCEP, 30 janvier 2023, <https://www.arcep.fr/cartes-et-donnees/nos-publications-chiffrees/barometre-du-numerique/le-barometre-du-numerique.html>

Images

[11], [1], [7], [8]

Approche des mondes virtuels par directions technologiques

En complément de l'approche par « cas d'usage » des mondes virtuels, l'approche par directions technologiques va nous permettre de **mettre en évidence les caractéristiques techniques que peuvent avoir les mondes virtuels ceci afin d'en décrire les configurations matérielles requises** pour pouvoir quantifier la consommation énergétique et l'empreinte carbone. Cette approche est largement inspirée de : « A Metaverse Maturity Model » (Weinberger M. & Gross D., 2023).

Nous en déclinons **une définition adaptée aux analyses énergétiques et climatiques** que nous menons : **est considéré comme un monde virtuel, toute application ou service, présentant tout ou partie des caractéristiques suivantes, à des degrés différents** (Tableau 1) :

Caractéristiques	Définition (et exemples)
Coexistence physique et numérique	Capacité d'interactions entre le système virtuel et le monde réel au travers d'interfaces : un changement dans un monde influence l'autre (jusqu'à l'interaction permanente). Ex : Capteurs, internet des objets (IoT), automatique, jumeaux numériques, actionneurs, robotique

Immersion	<p>Capacité du système à altérer la perception de la réalité et à plonger l'utilisateur dans un environnement artificiel où il se ressent tout autant immergé que dans la réalité matérielle (jusqu'à ne plus percevoir la différence entre l'environnement artificiel et le monde réel).</p> <p>Ex : Chat textuel, écran, avatar, sentiment de présence et de co-présence, casques de réalité virtuelle, capture volumétrique, projection holographique, équipements haptiques, interfaces cerveau-ordinateur</p>
Simultanéité	<p>Capacité à gérer des interactions de plus en plus rapides, jusqu'à être perçues comme temps réel. La simultanéité est fonction de la latence.</p> <p>Ex : Vidéoconférence, jeux vidéo</p>
Localisation	<p>Contrainte liée au lieu physique d'accès au système : accès possible dans des endroits spécifiques ou quel que soit l'endroit (en mobilité, à domicile...). Selon la localisation des participants, les réseaux utilisés peuvent être différents.</p> <p>Ex : Expériences de réalité virtuelle dans des salles dédiées (cinéma...), jeux vidéo en mobilité</p>
Persistence	<p>Capacité du système à exister et évoluer en permanence (sous l'action des concepteurs et autres utilisateurs), même quand l'utilisateur est déconnecté. La persistance offre à l'utilisateur la possibilité de modifications définitives de l'environnement.</p> <p>Ex : Univers sociaux (Second Life)</p>
Virtualisation et remplissage	<p>Capacité du système à créer des représentations virtuelles du monde réel et à produire une richesse de contenus numériques qui peut être facilitée ou améliorée par l'IA.</p> <p>Ex : Création de contenus (avatars, personnages non joueurs, mondes et environnements), supportés par des créations 3D et IA, générés éventuellement par l'action des utilisateurs</p>
Commercialisation	<p>Capacité du système à commercialiser des biens, via des places de marché centralisées ou décentralisées.</p> <p>Ex : Collecte et analyse des données, publicités ciblées, ventes d'objets ou d'accessoires virtuels, monnaie, jeton, transactions, certificats, propriétés</p>
Taille	<p>Contrainte d'avoir un système de grande taille pour que les services promis soient rendus.</p> <p>Ex : Un évènement (concert) peut requérir de nombreux utilisateurs pour atteindre sa promesse de substituabilité à la même expérience physique dans le monde réel</p>

Tableau 1 – Caractéristiques structurantes des mondes virtuels

Source : The Shift Project, dans le cadre de ce rapport, approche appuyée sur celle de (Weinberger M. & Gross D., 2023)

Notre définition inclut donc des mondes virtuels qui diffèrent en termes de caractéristiques présentées¹⁸. L'apport de cette approche centrée sur les voies technologiques va être de nous permettre de relier ces caractéristiques à un contenu matériel (terminaux comme infrastructures) (voir partie Impacts induits sur le système numérique : présentation de la Matrice).

¹⁸ A noter que notre caractérisation des mondes virtuels se fait à l'aide des caractéristiques précédentes et de l'opérateur logique « ou ». Notre caractérisation des mondes virtuels couvre donc un large spectre de services numériques. Chez (Weinberger M. & Gross D., 2023), la sélection se fait à l'aide d'un « et » lorsque les caractéristiques sont présentées « au degré de maturité 1 ». Mais le « degré de maturité 1 » étant relativement généralisée, c'est ce qui nous a conduit à choisir le « ou ». Voir les degrés en question en « Annexe – Directions technologiques et maturité technologique des mondes virtuels ».

A noter que certaines caractéristiques de l'approche proposée par (Weinberger M. & Gross D., 2023) n'ont pas été retenues dans cette synthèse car non strictement liées aux impacts énergétiques et climatiques¹⁹. Pour les mêmes raisons, des caractéristiques présentes dans d'autres définitions n'ont pas été considérées comme des critères à part entière : comme l'aspect web et chaînes de blocs²⁰. Enfin, ces caractéristiques ne résument pas l'ensemble des leviers qui permettraient de réduire les effets induits (directs) sur le système numérique²¹.

Le degré auquel la direction technologique est empruntée est un élément important. Dans l'annexe « Annexe – Directions technologiques et maturité technologique des mondes virtuels », sont présentées plusieurs quantifications existantes : échelle de capacité d'un monde virtuel (Weinberger M. & Gross D., 2023), niveaux de maturité technologique (TRL) (Arthur D Little, 2022) et cadre d'analyse propices aux analyses carbone paramétriques dans le cadre de l'IoT (Pirson T., Bol D., 2021).

La nécessité d'emprunter une direction technologique ou non pour un « cas d'usage » est aussi une donnée essentielle : la caractéristique est-elle indispensable au fonctionnement du monde virtuel ? Utile ? Optionnelle ?

Pour s'approprier cette définition complexe mais néanmoins nécessaire et ainsi démarrer les analyses énergétiques et climatiques, l'exemple de la plateforme de jeu Fortnite²² est emblématique (même s'il ne s'agit que d'un exemple parmi d'autres mondes virtuels qui ne présenteront pas les mêmes caractéristiques) :

- Les vecteurs de la **coexistence physique et numérique** et de **l'immersion** sont relativement ordinaires (un smartphone, une console, un ordinateur, un écran) ;
- Le jeu requiert des opérations rapides et donc de la **simultanéité** ;
- L'option de jeu smartphone propose un nouveau type de **localisation** en se prêtant à un usage en **mobilité** (non sans impact pour les réseaux d'accès mobile avec les flux vidéo à transmettre) ;
- Selon les options de jeu, l'environnement n'est pas **persistant** mais l'avatar (le profil du joueur) est **persistant** au sens où les statistiques collectées vont être utilisées pour améliorer l'expérience du jeu ;
- En termes de **virtualisation**, le rendu de l'univers dans son ensemble et des interactions des avatars avec lui appelle un ensemble de calculs ;

¹⁹ Par exemple, l'interopérabilité entre mondes virtuels n'est pas forcément synonyme d'empreinte énergie-climat plus ou moins importante : est-ce que ce sont plusieurs mondes virtuels interopérables ou un seul monopolistique qui auraient l'adoption la plus franche et l'empreinte la plus élevée ? Autre exemple, la capacité de scalabilité quand bien même essentielle au développement d'un monde virtuel, n'est pas caractéristique de ce monde virtuel.

²⁰ Pour certains mondes virtuels (ex : Decentraland, The Sandbox), les notions de décentralisation et de Web 3.0 sont inséparables des mondes virtuels et sont donc considérées comme des critères séparés dans certaines analyses (Basdevant A., François C., Ronfard R., 2022). Ici, ces éléments font partie de la caractéristique commercialisation et peuvent avoir un impact environnemental (consommation énergétique de la preuve de travail par exemple).

²¹ Par exemple, l'usage de mondes virtuels particulièrement au pic de consommation ont un impact sur la consommation énergétique mais sont plus éloignés de la conception et des directions technologiques des mondes virtuels.

²² Fortnite : jeu en ligne dont le mode de jeu le plus populaire, de type dit « battle royale », rassemble les joueurs dans un univers ouvert aux frontières définies, au sein duquel les joueurs doivent survivre les uns aux autres, la victoire allant au dernier survivant.

- L'expérience de jeu et la **commercialisation** passent par une collecte de données de l'ordre de 5 Po par mois afin d'améliorer l'expérience joueur (Amazon Web Services, 2018) ;
- Fortnite ménage sa **taille** avec des options de jeu adaptées (bac à sable en plusieurs secteurs, battle royale avec un nombre fini de joueurs) particulièrement pour son nombre d'utilisateurs important (8 millions en simultanément). Fortnite organise aussi des événements dont la vocation est de rassembler l'ensemble des utilisateurs (125 millions). Par ailleurs, son adoption est conséquente (plus de 200 millions d'utilisateurs et 350 millions d'inscrits) et le rend d'autant plus populaire (Amazon Web Services, 2018).

Cette approche nous permet aussi d'être robuste à tout « cas d'usage », même non identifié aujourd'hui : les 6 « cas d'usage » en vogue dans l'écosystème numérique et décrits dans ce rapport (dans la partie Approche des mondes virtuels par « cas d'usage » et en « Annexe – « Cas d'usage » et narratifs ») couvrant bien toutes les directions technologiques étudiées :

Caractéristiques	Les conférences et réunions en ligne	Les jeux vidéo (et les univers sociaux)	Les achats en ligne	Les expériences culturelles	Les jumeaux numériques	La pornographie
Coexistence physique et numérique					x	
Immersion	x	x		x		x
Simultanéité	x	x				x
Localisation		x (mobilité)		x (lieu dédié)		
Persistance		x	x		x	
Virtualisation et remplissage	x	x		x	x	x
Commercialisation		x	x			x
Taille		x	x			

Tableau 2 - La sélection de « cas d'usage » réalisée dans le cadre de ce rapport permet d'étudier l'ensemble des caractéristiques des mondes virtuels

La Matrice « usages – systèmes numériques » : un outil pour traduire la proposition de services en impacts physiques

Les directions technologiques que prennent et que peuvent prendre les mondes virtuels viennent structurer et dimensionner matériellement et énergétiquement le système numérique mondial. **C'est l'objectif de la matrice ci-dessous d'inscrire les choix de développement technologique dans une dimension systémique, infrastructurelle et de long-terme afin de les relier aux dynamiques énergétiques résultantes** pour répondre aux questions suivantes :

- Quelles directions technologiques nous entraînent vers une consommation accrue de terminaux (et donc une dépendance matérielle au détriment de la résilience) ?
- Quelles directions technologiques exercent une pression sur l'extension des infrastructures réseaux ?

- Quelles directions technologiques sont des rouages de l'inflation des volumes de données et de l'intensité en ressources informatiques (calculs etc.) ?

La matrice se lit en partant du centre :

- **Le premier cercle** représente les mondes virtuels analysés, qui peuvent suivre tout ou partie des directions technologiques possibles décrites et à des degrés divers.
- **Le second cercle** décrit les **directions technologiques possibles** pour les mondes virtuels, tels que considérés à ce jour par la majeure partie de l'écosystème numérique.
- **Le troisième cercle** décrit les effets des directions technologiques **sur l'un des trois tiers du système numérique**.
- Enfin, on trouve les **impacts induits sur l'infrastructure numérique, qu'il s'agit de retranscrire ensuite en énergie et en émissions de gaz à effets de serre**.

MATRICE – USAGES DES MONDES VIRTUELS & effets induits directs sur le système numérique

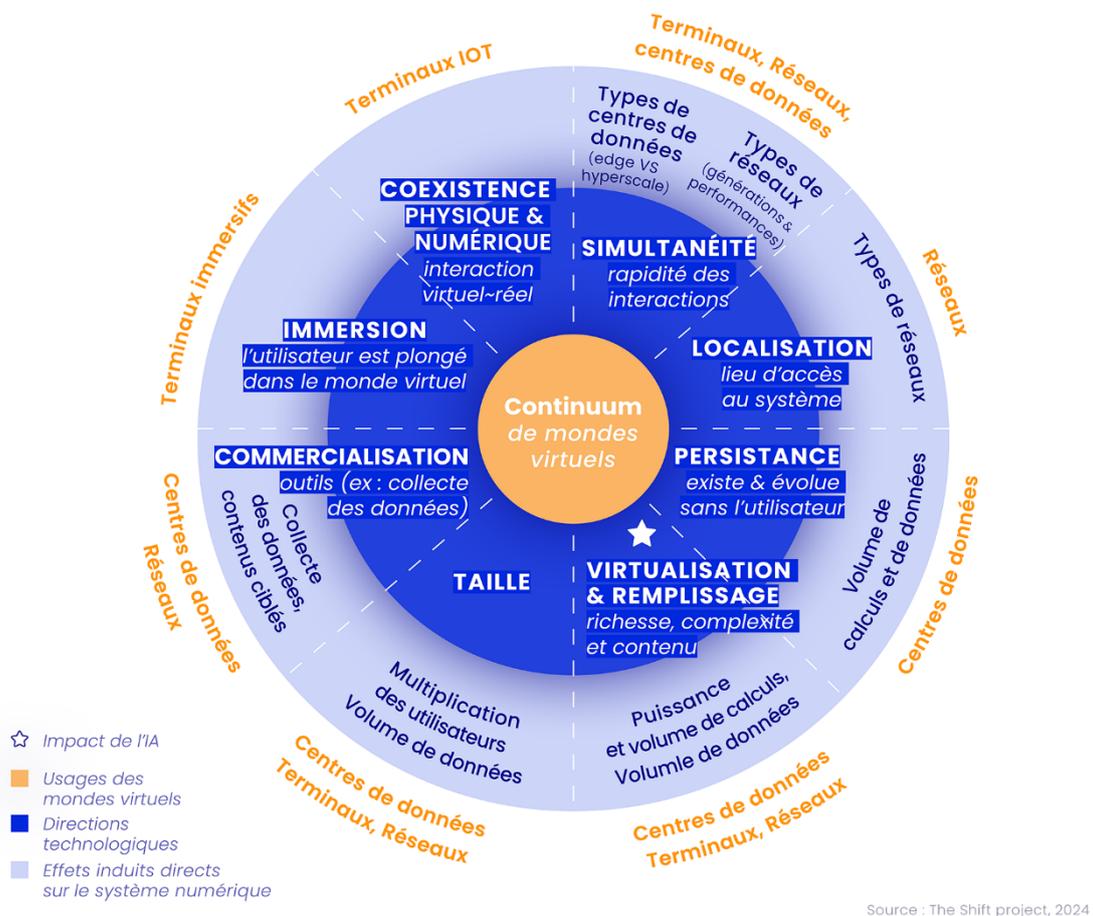


Figure 3 - Matrice « usages des mondes virtuels et effets induits directs sur le système numérique »
 Source : The Shift Project, dans le cadre de ce rapport

Les effets induits par les mondes virtuels sur le système numérique sont les suivants :

- L'axe **immersion** influe sur le volume de terminaux immersifs mais aussi leur empreinte carbone et consommation unitaire ;
- L'axe **virtualisation et remplissage** pourra conduire à l'installation de nouveaux serveurs ou l'implantation de nouveaux centres de données pour permettre des contenus plus riches, de même que l'axe **persistance** assurera la continuité de service du monde virtuel même sans la consommation électrique du terminal de l'utilisateur ;
- La combinaison des deux axes **virtualisation & remplissage** et **immersion** agit sur l'empreinte carbone embarquée et la consommation électrique des terminaux immersifs qui deviennent alors de plus en plus puissants pour permettre des rendus plus réalistes (avec alors des impacts sur les centres de données et les réseaux peut-être plus modérés) ou bien en conduisant à l'installation de serveurs plus puissants et plus nombreux (avec des impacts réseaux plus importants, mais des terminaux plus légers) ;
- Combiné avec l'IA et l'axe **commercialisation** (avec la génération de contenus personnalisés par exemple), l'axe **virtualisation et remplissage** pourra amplifier le phénomène précédent ;
- La combinaison de l'axe **commercialisation** avec l'axe **immersion** pourrait se traduire en la collecte de nouveaux types de données (marketing géolocalisé, émotionnel, optimisation d'expérience de jeu), ce qui se traduirait par des débits montants plus importants et donc des effets sur les réseaux : instantanés avec l'augmentation de la consommation d'énergie des réseaux sur sa partie variable, mais aussi de plus long-terme en conduisant à du déploiement capacitaire voire de nouvelles générations dédiées à répondre à cette spécification.
- De même pour **simultanéité** et **immersion** via l'exigence de latences pour des flux plus importants (cas de la visio-conférence immersive, cas du *cloud computing*) ;
- L'axe **simultanéité** peut mener spécifiquement à l'augmentation du *edge computing*, afin de rapprocher les capacités de calculs, stockage et traitement de la donnée le plus possible de l'utilisateur ;
- L'axe **coexistence physique et numérique** agit sur le volume de modules IoT (intrication plus importante des mondes virtuels avec le monde réel) mais aussi l'empreinte carbone embarquée et la consommation électrique des modules qui deviennent alors de plus en plus puissants ;
- L'axe **taille** mais aussi l'adoption généralisée viennent décupler ces phénomènes en les faisant changer d'échelle et donc d'ordre de grandeur pour leur empreinte carbone et leur consommation électrique.

Cette matrice est un outil permettant aux parties prenantes des mondes virtuels de comprendre quels sont les choix déterminants pour les impacts induits d'un service ou d'une application :

- Les effets induits sur le système numérique sont fonction de l'intensité avec laquelle les directions technologiques sont prises ;
- Les effets sont fonction de la combinaison de directions technologiques observées ;
- Les effets peuvent advenir à des échelles de temps différentes (achat d'un serveur / implantation d'un centre de données) et peuvent être le résultat de dynamiques différentes (déploiement réseau capacitaire / organisé par des régulateurs) ;

- Les effets sont fonction des stratégies prises par les acteurs (puissance de calcul à la hausse sur les terminaux / sur les centres de données).

Comment l'intelligence artificielle vient décupler les impacts sur le système numérique ?

L'IA peut être utilisée sur l'axe **virtualisation** pour faciliter le peuplement qui va rendre l'univers plus attractif et immersif. Plusieurs cas d'usage sont concernés :

- Pour le cas d'usage **des jeux vidéo** par exemple, il existe trois principales phases d'utilisation de l'IA, supportées par un panel de technologies d'impacts variables :
 - A la conception et au développement, pour créer des outils de production, générer et tester du contenu (personnages, gameplay et graphismes), ou encore des modèles d'optimisation de l'expérience de jeu (gameplay) utilisant l'apprentissage par renforcement et le *deep learning* pour alimenter des récits, des environnements (réseaux antagonistes génératifs (GAN)), ou contrôler des Personnages Non Joueurs (PNJ) (*pathfinding*, arbres de décision, chasse, instinct de survie, navigation dynamique, etc.)
 - A l'exécution : pour améliorer le gameplay en temps réel (Monte Carlo Tree Search (MCTS)), protéger les joueurs contre les comportements toxiques, améliorer l'accessibilité et personnaliser le processus de découverte (Amazon Web Services, 2019) ;
 - En post-exécution : le Machine Learning (ML) peut être utilisé pour l'analytique et la décision, en générant des prédictions de comportement de joueurs dans le but d'optimiser sa « Life Time Value » (LTV), en regard des probabilités de désabonnement ou d'achat (Amazon Web Services, 2018) ;
 - En combinant l'axe **virtualisation** avec d'autres axes du modèle, l'IA peut aussi permettre de renforcer l'intérêt du monde virtuel : avec l'axe **commercialisation** en générant plus de contenus ciblés par exemple.
 - Concernant les **conférences et réunions en ligne**, l'IA peut faciliter la génération de texte et permet de synthétiser une discussion et de la retranscrire à l'écrit. Elle permet également de transformer en temps réel des éléments de la réalité pour modifier la perception des participants, comme le visage ou la voix (DeepFaceLive, s. d.). Certaines fonctionnalités semblent vouées à se généraliser, comme par exemple, la possibilité de donner l'illusion que le regard reste focalisé sur la caméra (et donc perçu comme faisant face aux interlocuteurs) lorsque l'on participe à une conférence en ligne tout en marchant dans la rue ou en lisant un document (Radio-Canada, 2023) (deep learning pour reconnaissance d'image et/ou vocale, GAN, ou autoencodeurs variationnels (VAE) pour générer de l'image ou de la vidéo).
- Que ce soit pour les **jeux vidéo ou les conférences et réunions en ligne**, l'IA permet d'outre passer les barrières du langage en permettant la traduction instantanée en différentes langues sans interprète (Wordly, s. d.) (Traitement du langage naturel (NLP), et grands modèles de langage (LLM)).

Inscription de cette matrice dans l'ensemble des méthodologies

Initialement, cette matrice est une représentation permettant d'**expliciter les conséquences des choix d'usages et de systèmes numériques pris collectivement par les acteurs économiques et publics** (politiques publiques, financement, stratégies économiques et industrielles, etc.) **sur les émissions de gaz à effets de serre et les consommations énergétiques du secteur numérique.**

Le **périmètre** de cette matrice des effets induits sur le système numérique est :

- Plus large que le périmètre d'écoconception d'un monde virtuel (effets induits sur le système numérique) puisque des dynamiques de moyen-terme et de long-terme sont prises en compte afin de cerner les effets de moyen-terme et de long-terme sur le système numérique ;
- Plus restreint qu'une approche tenant compte des effets indirects (de second ordre ou d'ordre supérieur), comme notre représentation systémique en figure 2 de la note « Planifier la décarbonation du système numérique en France : Cahier des charges » (The Shift Project, 2023), ou que le standard ITU L.1480 (ITU, 2022) dont l'objectif est d'évaluer comment les émissions du secteur numérique peuvent impacter les émissions des autres secteurs.
- Similaire au pilier « A » (au sens des trois types d'action non fongibles de la Net Zero Initiative (NZI) (Net Zero Initiative, 2022)) qui vise à réduire les émissions directes et indirectes aux niveaux requis par les scénarios de décarbonation compatibles avec l'Accord de Paris ; là où le pilier « B » vise à contribuer à réduire les émissions “chez les autres”, via la commercialisation de produits et services décarbonants ou le financement de projets d'évitement de GES en-dehors de sa chaîne de valeur et le pilier « C » à préserver et développer les puits de carbone, dans ou en dehors de sa chaîne de valeur.

Ainsi **cette matrice participe à l'étude des effets directs et à l'empreinte propre du numérique**, c'est-à-dire au périmètre considéré dans l'objectif SBTi de – 45 % de réduction de gaz à effets de serre entre 2020 et 2030²³, et particulièrement **à l'interaction entre la conception des offres futures et le système numérique**. De plus, les principes 4 à 7 de la NZI rappellent que les réductions des émissions directes et indirectes sont prioritaires et qu'il est urgent que les entreprises obtiennent des résultats concrets et rapides sur la réduction de leurs émissions propres.

En revanche :

- **Cette matrice ne se prête pas à l'étude des émissions de gaz à effets de serre nettes**. Ces études demandent à être réalisées sur des cas d'usage précis (comme abordé en fin de chapitre : « Méthodologie de pondération des directions technologiques pour les mondes virtuels : étude du cas la métaconférence ») et pour des contextes d'utilisation précis ;

²³La recommandation de l'ITU indique -45% entre 2020 et 2030 (SBTi et al., 2020) sur l'empreinte propre du numérique : avec une trajectoire SBTi établie sur la base de la recommandation L-1470 publiée par l'UIT (ITU-T, 2020). Cette recommandation n'ignore pas l'existence d'impacts indirects du numérique sur les émissions d'autres secteurs, positifs (émissions évitées) ou négatifs (émissions induites). Elle les évoque explicitement mais n'en déduit pas pour autant qu'il faille tenir compte d'une sorte d'effet de compensation qui conduirait à un objectif moins ambitieux de réduction des émissions propres du numérique (The Shift Project, 2023).

- Si cette matrice indique les écueils énergétiques d'offres numériques, **cette matrice ne répond pas à la question importante de la raison d'être d'une entreprise dans un monde décarboné**, question pourtant essentielle dans la construction d'un monde Zéro Emissions Nettes ;

Cette matrice ne se substitue pas à un bilan carbone nécessaire au pilotage de la transformation des entreprises.

Par ailleurs, **en décrivant les conséquences collectives et infrastructurelles énergétiques et climatiques d'offres numériques, cette matrice est un type²⁴ de support judicieux pour discuter collectivement, entre acteurs et parties prenantes, de spécifications d'offres futures.**

En utilisation conjointe avec de l'écoconception généralisée, elle peut permettre de challenger les spécifications faisant partie de l'unité fonctionnelle afin de permettre des réductions de consommations électriques et d'émissions de gaz à effets de serre plus importantes. Remettant alors en jeu des spécifications de haut niveau, elle doit être accompagnée d'une stratégie projet ou d'entreprise adaptée et d'une véritable transformation des modèles d'affaires. Cette utilisation comme complément d'aide à la décision dans la conception d'offres et d'infrastructures moins carbonées permettra alors d'encourager la construction d'offres compatibles avec une sobriété numérique structurelle.

Quantification de l'impact énergie-climat d'un déploiement indifférencié et d'une adoption généralisée des mondes virtuels : scénario Méta-métavers

Le scénario **Méta-métavers** est construit afin d'agréger et traduire les **dynamiques essentielles d'un déploiement indifférencié et d'une adoption généralisée des mondes virtuels sur l'impact carbone du numérique mondial**. Ce scénario s'appuie sur :

- La prédiction macroscopique²⁵ de Gartner : « En 2026, 25 % des personnes passeront 1h dans le métavers » (Gartner, 2022). Cet ordre de grandeur a été intégré comme base de pénétration des usages dans notre trajectoire, en le décalant cependant à 2030 plutôt qu'à 2026 ;

²⁴ Suggestion qui ne demande qu'à être améliorée.

²⁵ La prédiction macroscopique de Gartner ne détaille pas la somme des utilisations effectives des mondes virtuels en 2030, ainsi le résultat n'est pas projeté par type d'utilisation. Ce déploiement et cette adoption peuvent tout autant être le fruit d'un seul grand acteur et d'un type d'utilisation unique que de multiples applications et d'utilisations variées.

- L’empreinte carbone à la fabrication et la consommation électrique à l’utilisation d’un casque de réalité virtuelle (CEPIR, 2023) ;
- Les débits associés à de la réalité virtuelle (Ericsson, 2023) ;
- Des objectifs de puissance de calcul y étant liés (Intel, 2021) ;
- L’augmentation de l’empreinte carbone embarquée des terminaux IoT (Pirson T., Bol D., 2021), et une augmentation du nombre de terminaux IoT et caméras de vidéosurveillance afin de modéliser l’intrication entre mondes physiques et numériques proposée par les mondes virtuels.

L’ensemble des données d’entrées est disponible en annexe (« Annexe – Quantification de l’impact énergie-climat d’un déploiement indifférencié et d’une adoption généralisée des mondes virtuels ») et la modélisation s’appuie sur notre modèle Lean_ICT.

Cette première trajectoire reste pourtant conservatrice sur plusieurs points :

- L’hypothèse de Gartner étant déplacée en 2030 au lieu de 2026, la pénétration des équipements et usages est moindre que dans la formulation initiale ;
- L’heure de métavers prévue par Gartner ne s’ajoute pas aux usages existants mais se substitue par hypothèse dans notre modèle à 1h de vidéo en ligne déjà consommée aujourd’hui ;
- Seuls les casques de réalité virtuelle sont considérés parmi l’ensemble des équipements possiblement déployés dans le cadre de services de mondes virtuels généralisés. Auraient pu être considérés un surplus d’ordinateurs et des consoles en utilisation conjointe avec les casques, des lunettes de réalité augmentée, des équipements haptiques, des contrôleurs, du matériel de conception et de projection holographique etc.
- Seule une augmentation des débits descendants est considérée, avec un choix de valeur moyenne de 50 Mbps n’étant pas extrême dans les plages de débit annoncées (Cisco, 2020; Ericsson, 2023) et alors qu’une augmentation des débits montants est prévue jusqu’à 10 Mbps (Ericsson, 2023) (voir ordres de grandeur en « Annexe – Quantification des pressions exercées par les mondes virtuels sur les infrastructures réseaux (mobiles) ») ;
- Le taux d’équipement en casques de réalité virtuelle est considéré comme étant d’un casque par personne utilisatrice. Un utilisateur pourrait pourtant détenir plusieurs casques aux fonctionnalités différentes (fonctionnalités professionnelles ou divertissement, réalité virtuelle ou augmentée par exemple) ou afin d’accéder à différents

mondes virtuels dont la compatibilité ne serait pas généralisée (de la même façon que plusieurs consoles de jeux sont nécessaires pour pouvoir jouer à plusieurs jeux vidéo).

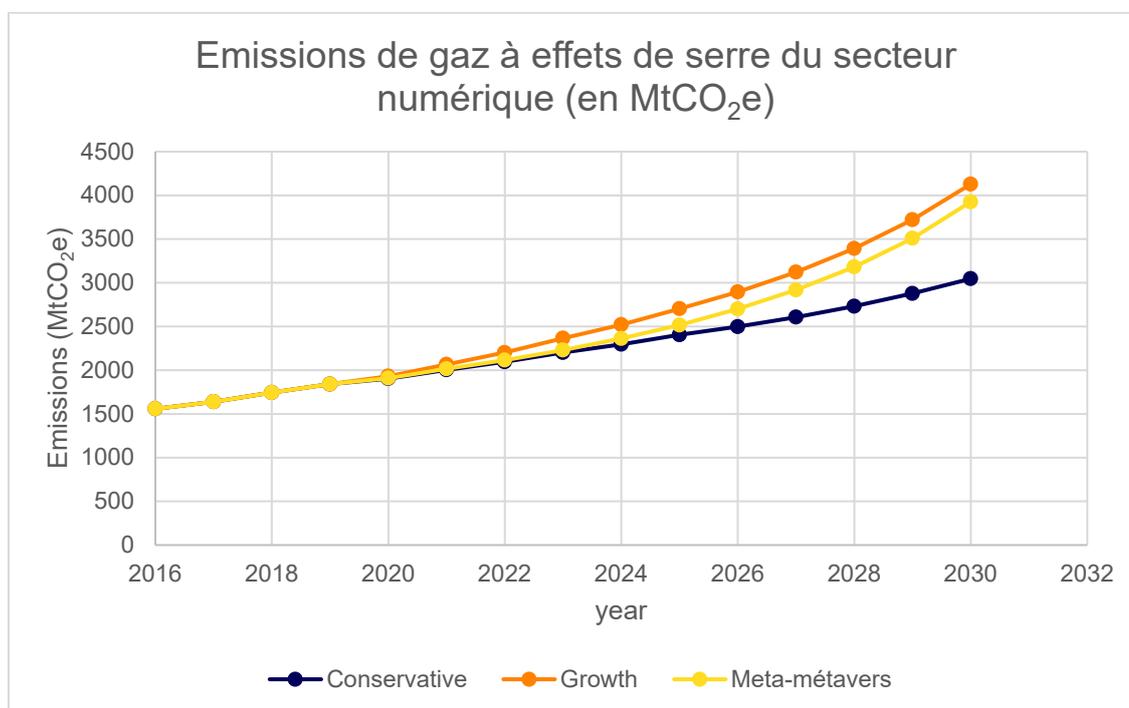


Figure 4 - Evolution 2016-2030 des émissions de gaz à effets de serre du numérique : Scénarios Conservative et Growth 2016-2025 (The Shift Project, 2021) prolongés à 2030 et scénario Meta-métavers
 Source : The Shift Project, dans le cadre de ce rapport

Replacé dans le contexte des scénarios **Conservative** (scénario de référence construit en prolongeant les tendances observées) et **Growth** (scénario maximaliste d'alors) établis en 2021 par The Shift Project (The Shift Project, 2021), le scénario **Meta-métavers** traduit une accélération notable de l'évolution des impacts du système numérique. **Dans cette projection, l'empreinte carbone du numérique mondial se détache du scénario « Conservative » pour se rapprocher de la dynamique du scénario « Growth » et l'empreinte carbone du numérique et atteint 3,9 GtCO₂e en 2030 soit 7 %²⁶ des émissions mondiales.**

Un déploiement indifférencié et une adoption généralisée des mondes virtuels ont pour effet de placer le numérique sur une trajectoire insoutenable et incompatible avec l'Accord de Paris tout en perpétuant et accentuant nos dépendances et vulnérabilités aux approvisionnements énergétiques fossiles et en matières (Figure 3) :

- La sollicitation accrue des réseaux place leur consommation électrique sur la même trajectoire que le scénario « Growth » ;
- La production de terminaux engendre une empreinte carbone embarquée équivalente au scénario « Growth » (bien qu'une consommation en phase d'usage qui reste inférieure,

²⁶ Par comparaison à 54 GtCO₂eq en 2030 en limitant le réchauffement à 3°C (>50%), Table SPM.2 (Intergovernmental Panel On Climate Change (Ippc), 2023). Si on compare à 44 GtCO₂eq en 2030 (en limitant le réchauffement à 2°C (>67%), Table SPM.2 (Intergovernmental Panel On Climate Change (Ippc), 2023)), on obtient 9%. Le scénario Méta-métavers semble cependant incompatible avec une trajectoire 2°C (>67%) à l'échelle mondiale.

de par le développement de multiples terminaux de taille et consommation directe réduite, comme l'IoT) ;

- L'appel en ressources informatiques et serveurs d'un nouvel ordre entraîne la consommation électrique des centres de données au-delà de la trajectoire dessinée par le scénario « Growth ».

Pour comparaison, à date seules deux études scientifiques (Liu, F. et al., 2023; Zhao N., 2023) quantifient les émissions carbonées « du métavers » mais sur des périmètres tout à fait différents.²⁷

Le périmètre considéré dans l'étude ADEME-Arcep est comparable en termes de frontières du système, bien qu'il diffère géographiquement (périmètre mondial dans le cadre de ce rapport, périmètre France dans le cas de l'ADEME-Arcep) :

- **A horizon 2030, le scénario *Méta-métavers* se situe déjà au-delà du scénario tendanciel de l'ADEME-Arcep (ADEME & Arcep, 2023) :**
 - Les nombres de terminaux immersifs (casques de réalité virtuelle) ou permettant l'intrication des mondes virtuels avec le monde réel (terminaux IoT) augmentent plus rapidement ;
 - L'augmentation du trafic sur les réseaux et centres de données engendrée par ces nouveaux terminaux est supérieure (voir comparaison en « Annexe – Quantification de l'impact énergie-climat d'un déploiement indifférencié et d'une adoption généralisée des mondes virtuels ») (ADEME & Arcep, 2023) ;
- **A horizon 2050, le scénario *Méta-métavers* ne pourrait être compatible qu'avec le scénario *Pari réparateur* de l'ADEME (ADEME & Arcep, 2023) :**
 - Le nombre de terminaux évolue comme le scénario tendanciel avec une explosion des objets connectés ;
 - Le déploiement des réseaux et des centres de données est soutenu.
 - Les principes généraux du *Méta-métavers* sont analogues à la déclinaison du scénario *Pari réparateur* au numérique : « tous les services sont dématérialisés », « les habitations sont toutes smart », « les interactions entre personnes sont virtualisées aussi bien dans les relations privées que professionnelles », « les loisirs passent par des flux de données très importants (vidéos, jeux vidéo) » (ADEME & Arcep, 2023).

²⁷ Liu, F. et al projettent 115,3 MtCO₂e pour la seule consommation électrique et Zhao & You projettent 4,03 GtCO₂e avec leur scénario « Multi Metaverse applications (near term) » là aussi pour la seule consommation électrique. Tous les scénarios intègrent des études prospectives de départ (sur l'évolution des consommations et usages du métavers) mais des études différentes. Zhao & You circonscrivent leur calcul aux Etats-Unis avec les chiffres de l'U.S. Energy Information Administration. Liu, F. et al se basent sur de précédents travaux scientifiques modélisant les dynamiques prospectives de mix énergétiques alimentant en électricité les technologies de l'information et de la communication.

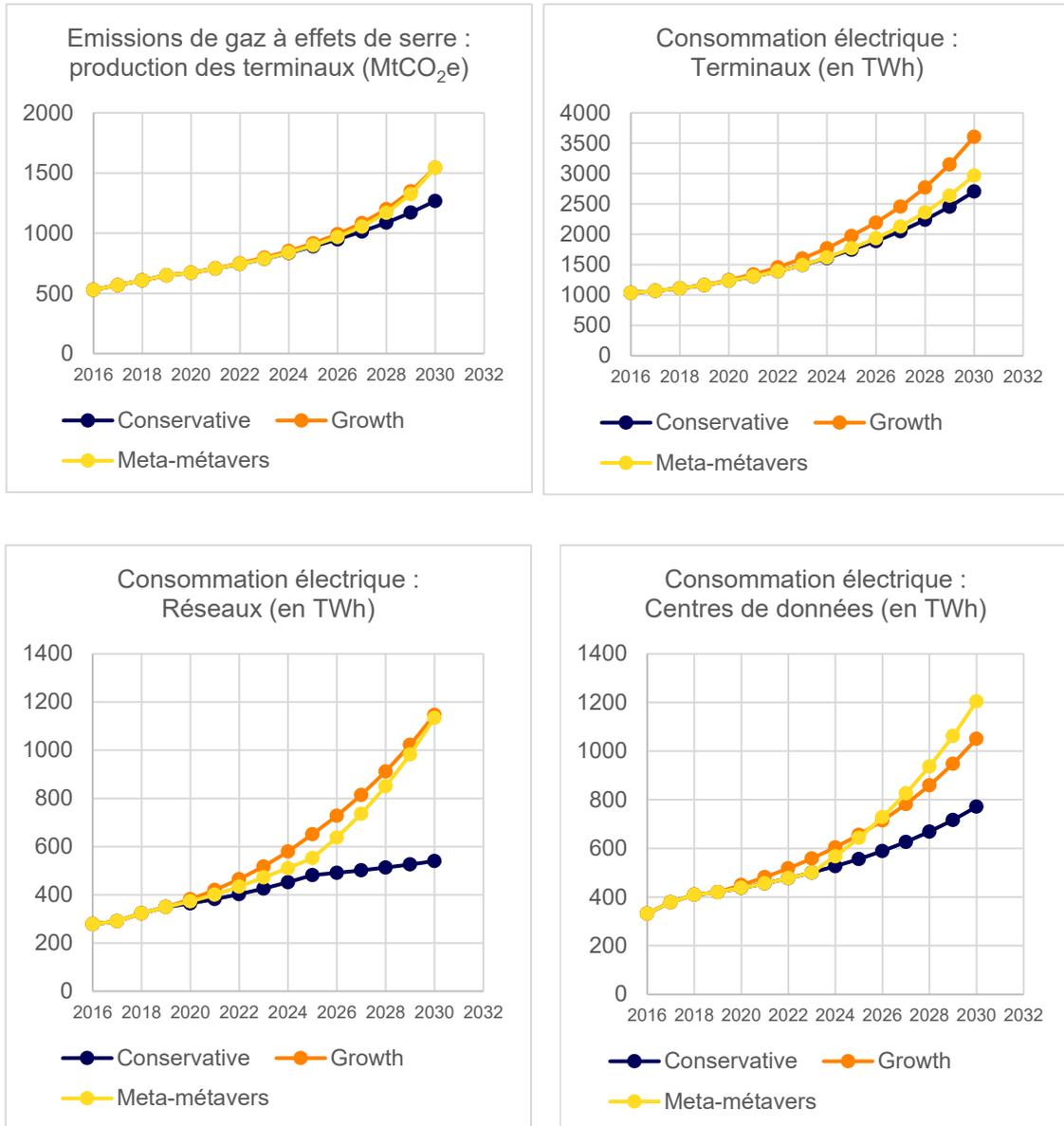


Figure 5 - Evolution 2016-2030 des émissions de gaz à effets de serre de la production de terminaux et des consommations électriques pour chacun des 3 tiers : Scénarios Conservative et Growth 2016-2025 (The Shift Project, 2021) prolongés et scénario Meta-métavers.
 Source : The Shift Project, dans le cadre de ce rapport

Quantification de l'impact énergie-climat d'un déploiement capacitaire et d'une adoption généralisée des mondes virtuels : impact sur l'infrastructure réseaux mobiles française

La description qualitative des effets induits par les mondes virtuels sur le système numérique (au chapitre « La Matrice « usages – systèmes numériques » : un outil pour traduire la proposition de services en impacts physiques ») permet de comprendre que **déployer et adopter l'offre des mondes virtuels ne se fait et ne se ferait pas à système numérique constant**, et que cela appellerait au contraire une adaptation significative :

- **D'un point de vue capacitaire ;**
- **En termes d'organisation et de fonctionnalités (répartition des fréquences, déploiement des fréquences hautes, tranches de réseaux, etc.).**

Ces éléments sont documentés en « Annexe – Quantification des pressions exercées par les mondes virtuels sur l'infrastructure réseaux (mobiles) ».

En complément de la quantification réalisée avec notre modèle « Lean ICT » (et détaillée dans le chapitre précédent « Quantification de l'impact énergie-climat d'un déploiement indifférencié et d'une adoption généralisée des mondes virtuels : scénario Méta-métavers »), l'objectif de ce chapitre est de **quantifier la partie de la matrice dédiée aux réseaux d'accès mobiles afin d'apporter un éclairage quantitatif à la question : « quel impact les mondes virtuels ont-ils sur le déploiement de l'infrastructure réseau mobile en France et où cela nous entraîne-t-il d'un point de vue énergétique et climatique ? »**. Cette modélisation s'appuie sur la méthode et l'outil construits et documentés dans le cadre du rapport « Energie, climat : Des réseaux sobres pour des usages connectés résilients » (The Shift Project, 2024b).

L'analyse qui suit a pour objectif de calculer l'empreinte énergie-climat associée à une évolution capacitaire seulement des réseaux mobiles²⁸ en réponse à une adoption généralisée des mondes virtuels. En revanche et à ce stade, **cette analyse ne prend pas en compte l'empreinte énergie-climat associée à l'évolution des réseaux en termes d'organisation ni de fonctionnalités.** Notamment, en chaque lieu, **les fréquences déployées ne sont pas nécessairement compatibles avec un usage des mondes virtuels²⁹** alors que par exemple pour permettre un usage des mondes virtuels, des bandes de fréquences hautes devraient être déployées en chaque lieu.

²⁸ En termes de périmètre, l'analyse ci-dessous considère seulement les réseaux d'accès mobile 4G et 5G. La méthodologie déployée dans le rapport est générique (modélisation d'un opérateur générique notamment). Les analyses quantifiées sont à l'échelle française (métropolitaine). L'ensemble de la modélisation est à retrouver dans (The Shift Project, 2024b).

²⁹ En effet, dans les scénarios produits par notre modélisation, la demande en couverture est satisfaite avec les bandes dites de basses fréquences, c'est-à-dire agrégeant les bandes 700, 800 et 900 MHz actuellement utilisées par les opérateurs français ; fréquences qui peuvent être insatisfaisantes pour accéder aux usages promis des mondes virtuels.

Pour estimer les effets d'une adoption généralisée des mondes virtuels et du déploiement capacitaire associé, quatre scénarios faisant varier la demande sur les réseaux mobiles ont été élaborés (les noms des scénarios sont ceux de notre rapport : (The Shift Project, 2024b)) :

- Le scénario « Usages : croissance maîtrisée » prévoit une consommation de données qui prolonge la tendance linéaire historiquement observée dans les données Arcep de 2017 à 2023 (Arcep, 2023) ;
- Le scénario « Cahier des charges » prévoit une consommation de données qui correspond à l'augmentation prévisionnelle d'ADL (Arthur D Little, 2023) prolongé avec une tendance linéaire à 2035 ;
- Le scénario « Usages : exponentiel » prévoit une consommation de données qui correspond à l'augmentation prévisionnelle d'ADL (Arthur D Little, 2023), prolongé avec une tendance exponentielle (au même rythme de + 26 %/an) à 2035 ;
- Le scénario « Méta-métavers (Gartner, Ericsson) » suit l'évolution de trafic sur les réseaux mobiles décrite dans le scénario Méta-métavers précédemment.

Les évolutions de trafic modélisées sont disponibles en « Annexe – Quantification de l'impact énergie-climat d'une adoption généralisée des mondes virtuels : impact sur l'infrastructure réseaux mobiles française ».

L'intégration, dans le modèle, de la demande correspondant à l'adoption généralisée des mondes virtuels montre que ce scénario « Méta-métavers (Gartner, Ericsson) » nous engage à une augmentation annuelle des émissions plus que doublant l'empreinte carbone de 2024. Seuls les scénarios « Usages : croissance maîtrisée » et « Cahier des charges » permettent la maîtrise des émissions de gaz à effets de serre des réseaux mobiles, et aucun de ces scénarios ne permet de les réduire.

A l'insoutenabilité carbone, s'ajoutent les défis posés en termes de consommation électrique : si le scénario « Usages : exponentiel » requiert déjà 3.4 TWh de plus en 2035 qu'en 2024, soit un doublement, le scénario « Méta-métavers (Gartner, Ericsson) » appelle lui 5.8 TWh de plus qu'en 2024, ce qui correspond presque à un triplement de la consommation électrique du réseau mobile.

Ces analyses sont conservatives puisque ne prenant pas en compte les spécificités liées aux mondes virtuels (latences, fréquences adaptées) qui appelleraient pourtant un déploiement matériel additionnel jouant très probablement au premier ordre.

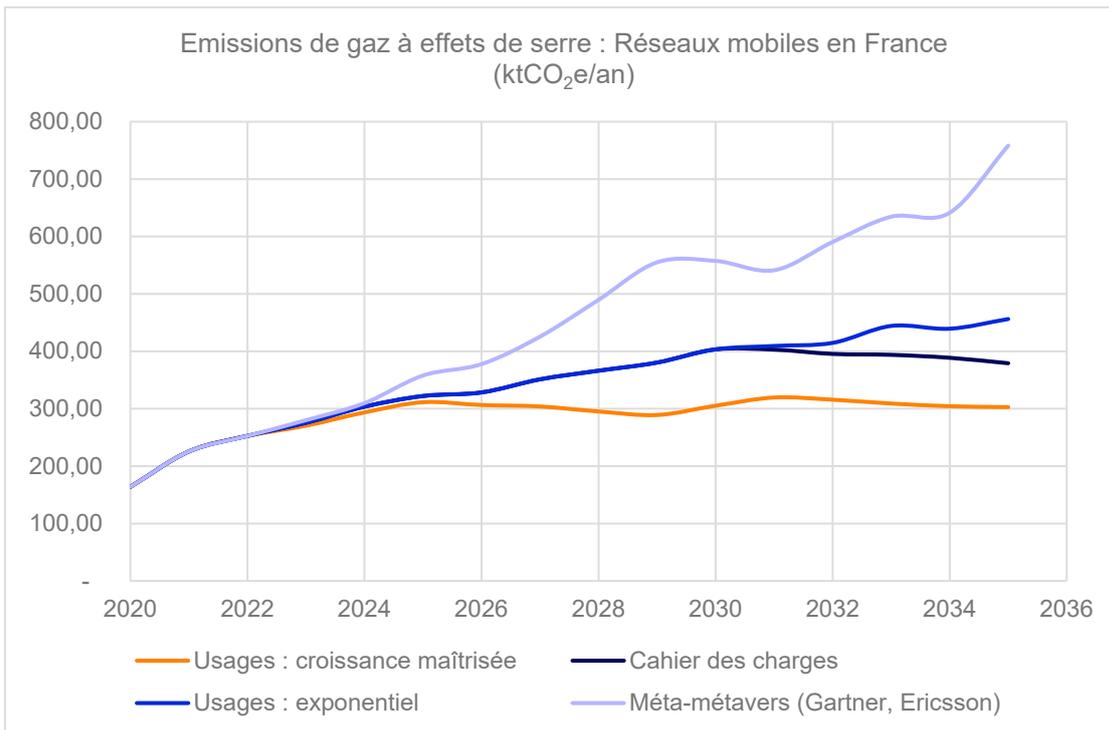


Figure 6 - Evolution 2020-2035 des émissions de gaz à effets de serre des réseaux mobiles pour 4 scénarios de trafics contrastés
Périmètre³⁰ et méthode de calcul détaillés dans (The Shift Project, 2024b)
Source : The Shift Project dans le cadre de ce rapport et (The Shift Project, 2024b)

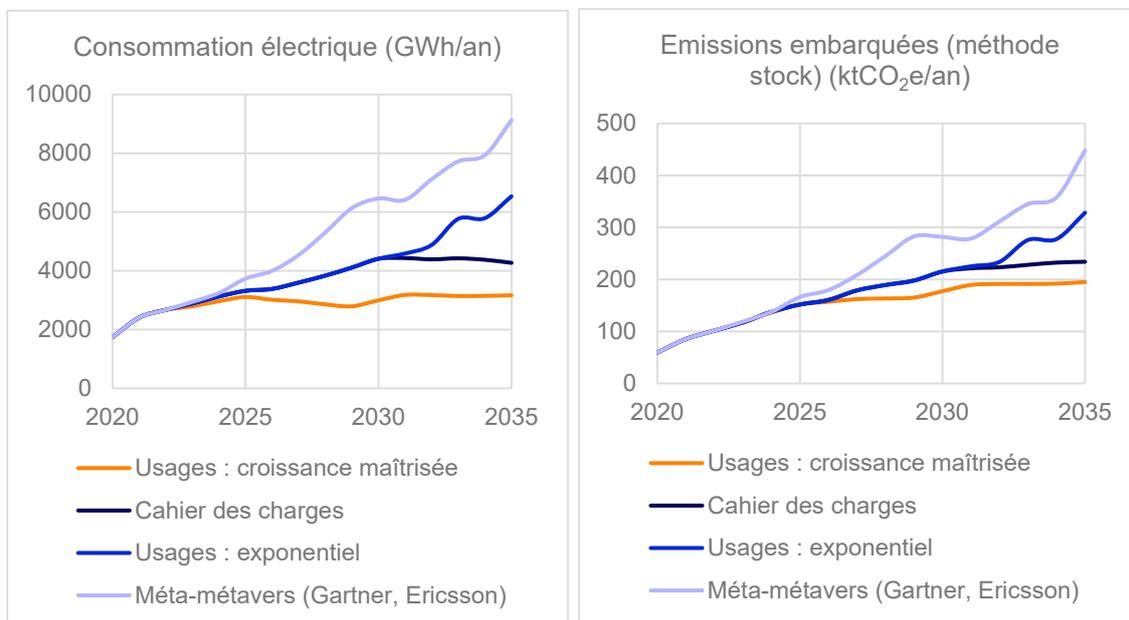


Figure 7 - Evolution 2020-2035 de la consommation d'électricité et des émissions embarquées (méthode stock) de gaz à effets de serre des réseaux mobiles pour 4 scénarios aux trafics contrastés
Périmètre et méthode de calcul détaillés dans (The Shift Project, 2024e)
Source : The Shift Project dans le cadre de ce rapport et (The Shift Project, 2024e)

³⁰ Périmètre étude réseaux mobiles : réseaux d'accès mobile, 4G et 5G, modélisation d'un opérateur générique (x4), quantification à l'échelle française métropolitaine. L'ensemble de la modélisation est à retrouver dans (The Shift Project, 2024b).

Méthodologie de pondération des directions technologiques pour les mondes virtuels : étude du cas de la métaconférence

La méthodologie de différenciation des mondes virtuels mise en place dans la partie « Qualification de l'impact énergie-climat du continuum de mondes virtuels sur le système numérique » sera un support à cette analyse de la **métaconférence**. Il s'agit ici de déterminer si le déploiement du « cas d'usage » de la **métaconférence** est soutenable en termes d'impacts énergétique et climatique et sous quelles conditions il serait à encourager ou dissuader de ce point de vue. Pour cela, une méthodologie en cinq étapes est proposée :

- **Etape n°1** : Décrire le « cas d'usage » étudié. Cela peut être réalisé à l'aide d'une projection si elle existe : le narratif de la **métaconférence** a ici été construit comme un support permettant une synthèse des tendances prospectives observées dans les services promis ou évoqués par les grands acteurs du numérique aujourd'hui³¹.
- **Etape n°2** : Caractériser ce « cas d'usage » parmi les modalités de mondes virtuels³².
- **Etape n°3** : Appliquer la matrice pour qualifier les effets induits sur le système numérique³³.
- **Etape n°4** : Quantifier les tendances et l'empreinte énergétique et climatique du « cas d'usage » étudié.
- **Etape n°5** : Comment agir en conséquence ?

Etape n°1 : Décrire le « cas d'usage » étudié³⁴

Le « cas d'usage » des réunions et conférences en ligne est décrit à l'aide d'un narratif d'une douzaine de lignes dont la construction est basée sur l'étude d'offres de produits et de services des grands acteurs des services numérique ainsi que sur des visions proposées et partagées au sein de l'écosystème numérique. L'intitulé **métaconférence** choisi pour ce « cas d'étude », par analogie avec audioconférence et visioconférence, permet de caractériser l'usage étudié : l'utilisation d'un « métavers » comme vecteur de communication par une réunion ou une conférence. **Il ne s'agit pas d'un service unique mais plutôt d'un cas synthétique permettant de considérer la tendance qui viserait à rendre immersifs les services de réunions et de conférence en ligne.**

³¹ Voir partie « Approche des mondes virtuels par « cas d'usage » » pour la description des cas d'usage et construction des narratifs.

³² Voir partie « Approche des mondes virtuels par directions technologiques ».

³³ Voir partie « Impacts induits sur le système numérique : présentation de la Matrice « usages – systèmes numériques » ».

³⁴ Voir partie « Approche des mondes virtuels par « cas d'usage » » pour la description des cas d'usage et construction des narratifs.

La métaconférence

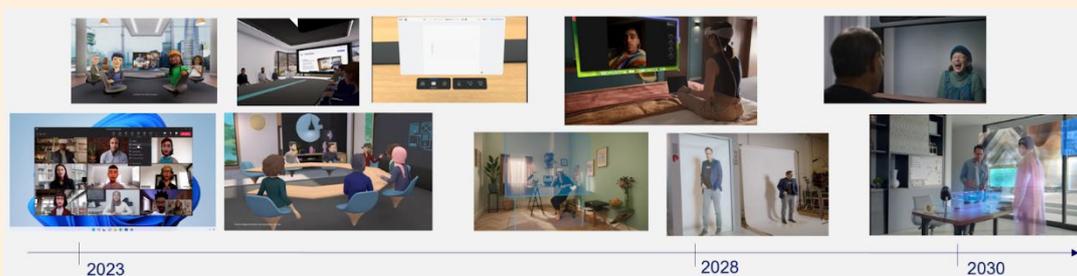
Dès 2023, les avatars se fraient un chemin discret dans les outils de visio-conférence [1]. Tout d'abord en complément de l'audio ou en substitution de la vidéo, pour un public amateur et pour un public professionnel [2,3] séduit par le sentiment de confort et d'inclusion [4].

En parallèle, le secteur du divertissement généralise la réalité virtuelle et les avatars ; les appels familiaux et amicaux généralisent eux la visioconférence.

Dans les outils de visioconférence, les fonctionnalités de collaboration immersive s'enrichissent : elles sont multitâches et plus productives : traduction multilingue simultanée [5], prise de note et synthèse automatique et outils collaboratifs [1].

En entreprise [3], les expériences immersives partagées se multiplient aussi : formations pour des compétences spécifiques, recrutement, on-boarding, bureaux virtuels, accès à des modèles et jumeaux numériques et salons virtuels pour la commercialisation [6].

L'adoption massive de la métaconférence par les professionnels notamment, pourrait être déclenchée par la réalité augmentée, éventuellement mixte [7, 11], et les hologrammes [8,9] autorisant un surplus de réalisme immersif [10].



Références

- [1] This is Meta Horizon Workrooms, Meta for Work, 7 juin 2023, <https://youtu.be/eYjU9mV7-6q?si=QMo60uABv6H-aDAL>, Horizon Workrooms - Remote Collaboration Reimagined, Meta Quest, 19 août 2021, https://youtu.be/lqj50lxRrKQ?si=y6xLiioviqH0x1_fj
- [2] Microsoft Mesh | Microsoft Teams, Microsoft Teams, 23 mai 2023, <https://youtu.be/fSKBHOWOcSM?si=AuRe6QYmwQrsaUt>
- [3] How the evolution of VR and AR will impact the network, Nokia, consulté le 24/11/2023, <https://www.nokia.com/metaverse/impact-of-metaverse-on-the-network/>
- [4] Bureaux virtuels, consulté le 24/11/2023, <https://teemew.com/en/>
- [5] Service de traduction multilingue simultanée, consulté le 24/11/2023 : <https://www.heygen.com/>
- [6] Metaverse : evolution then revolution, consulté le 24/11/2023 : <https://www.accenture.com/content/dam/accenture/final/accenture-com/document/Accenture-Metaverse-Evolution-Before-Revolution.pdf>
- [7] Introducing Apple Vision Pro, Apple, 5 juin 2023, <https://youtu.be/TX9qSaGXFyg?si=zW0YN47RiPD0jiPI>
- [8] Project Starline : Feel like you're there, together, Google, 18 mai 2021, <https://www.youtube.com/watch?v=Q13CishCKXY>
- [9] Are holograms the next zoom?, Bloomberg QUicktake, 3 mai 2022, <https://www.youtube.com/watch?v=rspXptNysqU>
- [10] The Metaverse and How We'll Build It Together – Connect 2021 , 28 octobre 2021, <https://youtu.be/Uvufun6xer8?si=x4NvBMfoBDXjreBl>
- [11] Représentations et usages du Métavers, Renaissance numérique et L'Observatoire Société & Consommation, octobre 2023, https://www.renaissancenumerique.org/wp-content/uploads/2023/10/renaissance-numerique-representations_usages_metavers.pdf

Images : De gauche à droite : [2], [1], [1] [4], [1], [1], [7], [9], [8], [10]

Etape n°2 : Caractériser ce « cas d'usage » parmi les modalités de mondes virtuels³⁵.

Cette étape de caractérisation de la **métaconférence** vise à identifier parmi les caractéristiques de mondes virtuels lesquelles sont indispensables au fonctionnement du monde virtuel pour rendre le service promis, lesquelles sont utiles, et lesquelles tout à fait optionnelles³⁶ :

Caractéristiques	Les réunions et conférence en ligne	La métaconférence	Appréciation
Coexistence physique et numérique	Optionnel	Optionnel	(aucune influence entre le monde virtuel et le monde réel)
Immersion	Utile	Indispensable	La spécificité de la métaconférence tient à l'immersion, promesse de confort, d'inclusion et de productivité accrue.
Simultanéité	Indispensable	Indispensable	Il s'agit de la valeur d'usage : communiquer rapidement. Elle peut être gain de productivité.
Localisation	Utile	Utile	Si les dispositifs immersifs le permettent, l'usage peut se faire en mobilité.
Persistance	Optionnel	Optionnel	(pas de capacité du système à exister quand l'utilisateur est déconnecté – sauf cas particulier de prise de note automatique dans une réunion de laquelle l'utilisateur est déconnecté – et excepté les paramètres de l'environnement virtuel enregistrés d'une réunion sur l'autre)
Virtualisation et remplissage	Utile	Indispensable	La virtualisation permet l'immersion.
Commercialisation	Optionnel	Optionnel	(pas de commercialisation particulière : système d'abonnements)
Taille	Optionnel	Optionnel	(excepté pour de grandes conférences)

Tableau 3 - Evaluation du caractère essentiel des directions technologiques pour le « cas d'usage » de la conférence en ligne

Source : The Shift Project, dans le cadre de ce rapport

Etape n°3 : Appliquer la matrice « usages – systèmes numériques » pour qualifier les effets induits sur le système numérique³⁷.

La matrice « usages – systèmes numériques » permet d'identifier les effets induits sur le système numérique par la **métaconférence** :

- **Terminaux** : de l'**immersion**, éventuellement dans un environnement **virtuel**, est rendue possible grâce à un terminal additionnel (casques ou lunettes), dont la connexion à internet est rendue possible grâce à une connexion via un smartphone ou un ordinateur ;
- **Réseaux** : de la **simultanéité** est rendue possible avec des réseaux à faibles latences et possiblement haut-débit selon les exigences d'**immersion**. Des usages en **mobilité** nécessitent ces mêmes exigences pour des réseaux mobiles ;
- **Centres de données** : selon l'utilisation sur terminaux avec leur propre puissance de calcul ou non, éventuellement liée à l'utilisation en **mobilité** ou non, et selon la mise en place de la **virtualisation**, les centres de données pourraient être plus ou moins sollicités.

³⁵ Voir partie « Approche des mondes virtuels par directions technologiques ».

³⁶ Cet exercice de qualification à l'aide de critères « indispensable / utile / optionnel » devant être réalisé au cours d'un processus d'innovation (c'est-à-dire quand les services possibles ne sont pas 100% définis), il est plus difficile à réaliser que lorsque le service existe déjà et est parfaitement défini.

³⁷ Voir partie « Impacts induits sur le système numérique : présentation de la Matrice « usages – systèmes numériques » ».

Etape n°4 : Quantifier les tendances et l’empreinte énergétique et climatique du « cas d’usage » étudié.

Ajout pour la méta-conférence		2030					
		Emissions GES (MtCO ₂ e)			Energie finale (TWh)		
		Total	Fabrication	Utilisation	Total	Fabrication	Utilisation
Immersion : terminaux	<ul style="list-style-type: none"> Hypothèse : d'ici 2030, 400 millions d'utilisateurs (même nombre d'utilisateurs qu'Outlook en 2015 (Microsoft, 2015)) 1h d'utilisation par jour en 2030 (Gartner, 2022) Casque VR : OLED, batterie, calcul intégré (CEPIR, 2023) Durée de vie des casques : 2 ans (hypothèse à partir (Statista Research Department, 2023; Wikipédia, 2024b)) 	26	26	0,4	94	93	1
Simultanéité : réseaux	<ul style="list-style-type: none"> Débit descendant : 50 Mbps (Ericsson, 2023) Hypothèse : d'ici 2030, 400 millions d'utilisateurs (même nombre d'utilisateurs qu'Outlook en 2015 (Microsoft, 2015)) 1h d'utilisation par jour en 2030 se substituant à la visioconférence (Gartner, 2022) 	28	3	26	68	9	59

Tableau 4 - La métaconférence : quelle tendance en termes de coût énergie et coût carbone ?
Source : The Shift Project dans le cadre de ce rapport

L’ensemble des données est à retrouver dans le fichier Materials (The Shift Project, 2024a).

Cette estimation se base sur l’hypothèse que 400 millions d’utilisateurs (soit le nombre d’utilisateurs d’Outlook en 2015³⁸) pourraient être séduits d’ici 2030 pour utiliser 1h par jour la **métaconférence** plutôt que la visioconférence. Cette hypothèse est prise dans cet exercice afin d’effectuer une quantification dans le cadre de ce « cas d’étude », mais demanderait à être mise à jour à l’arrivée de scénarios de pénétration des technologies concernées.

Ce calcul reste sans doute conservateur, un ensemble d’éléments n’ayant pas été pris en compte : le téléchargement d’un client lourd, les fonctionnalités collaboratives ou productives automatisées ou intelligentes, la complexité de l’environnement virtuel et la puissance de calcul requise, et l’empreinte carbone embarquée et la consommation électrique d’un casque à la puissance de calcul élevée.

Cette évaluation n’est pas généralisable, mais bien spécifique au « cas d’étude » ici construit : ces résultats ne signifient pas que toutes les solutions de **métaconférence** auraient cette empreinte carbone et cette consommation électrique. La quantification permet simplement ici de

³⁸ Nombre du même ordre de grandeur que les utilisateurs de visioconférence en 2023 (sous hypothèse que chaque utilisateur l’utilise 1 heure par jour) puisque Zoom devrait comptabiliser 3,3 milliards de minutes (Search logistics, 2023) et détenir 40% du marché (webinarcare, 2023).

caractériser les postes et déterminants clés parmi ce qui semble prévu par les acteurs du secteur en termes de services et applications de ce type.

Avec ce scénario, l'encouragement et l'adoption de la **métaconférence** impliquerait 26 MtCO₂e/an pour les casques (principalement engendrés par la fabrication des terminaux appelée par **l'immersion**) et 28 MtCO₂e/an pour les réseaux (principalement dues aux débits accrus appelés par la combinaison **immersion x simultanéité**) au niveau mondial. Dit autrement, cela impliquerait, **pour bénéficier de ces fonctionnalités d'immersion, d'engendrer des émissions de gaz à effets de serre équivalentes à 6,4 fois les efforts de réduction d'émissions atteints par la France chaque année**³⁹.

Dans le cas d'une adoption importante du service et considérant ses effets directs et induits sur le système numérique, l'ajout de l'immersion dans les fonctionnalités de visioconférence nous éloignerait ainsi des trajectoires compatibles de l'Accord de Paris.

Etape n°5 : Comment agir en conséquence ?

Les étapes précédentes démontrent que **substituer la métaconférence à la visioconférence dans le milieu professionnel augmente la consommation d'énergie et les émissions directes et induites** (de premier ordre) sur le système numérique. C'est pourtant bien sur ce périmètre que la recommandation de l'ITU indique l'objectif de - 45 % de réductions d'émissions de gaz à effets de serre entre 2020 et 2030 (SBTi et al., 2020)⁴⁰.

Ce « cas d'usage » entre dans la catégorie de ceux pour lesquels se pose ensuite la question des **émissions indirectes** : **est-il possible de bénéficier de la métaconférence pour obtenir un bilan favorable en termes d'émissions de gaz à effets de serre ?**

- D'un point de vue énergie-climat, il faut **identifier s'il existe des conditions de pertinence pour une substitution d'usages de métaconférence à des usages de mobilité carbonée par exemple**, dans lesquelles le **gain en réduction des émissions indirectes (et la consommation d'énergie associée) serait supérieur à l'augmentation d'impact engendrée au premier ordre sur le système numérique par le service.**
- **Le contexte dans lequel nous recommandons de mener cette analyse est celui d'une entreprise, le gain ne pouvant venir que de la capacité éventuelle de la métaconférence à faire basculer en réunions à distance supplémentaires des réunions ou interactions physiques qui subsistent malgré la possibilité de visioconférence.**
- Les paramètres qui peuvent entrer en ligne de compte dans le dimensionnement du gain vont être :
 - **L'appétence marginale** des collaborateurs et des partenaires externes pour la **métaconférence** par rapport à la visioconférence ;
 - Mais aussi la **politique de ressources humaines** de l'entreprise qui peut au contraire vouloir maintenir un minimum de présence physique dans les locaux.

³⁹ Sur la période 2019-2021, la baisse annuelle moyenne observée est de 8,1 MtCO₂e observée pour les émissions brutes (excluant les puits de carbone du secteur de l'utilisation des terres, du changement d'affectation des terres et de la foresterie (UTCATF)) (Haut Conseil pour le Climat, 2023). (11,0 MtCO₂e en 2022, 6,7 MtCO₂e observée sur la période 2011-2021).

⁴⁰ La trajectoire SBTi est établie sur la base de la recommandation L-1470 publiée par l'UIT (ITU-T, 2020). Cette recommandation n'ignore pas l'existence d'impacts indirects du numérique sur les émissions d'autres secteurs, positifs ou négatifs. Elle les évoque explicitement mais n'en déduit pas pour autant qu'il faille tenir compte d'une sorte d'effet de compensation qui conduirait à un objectif moins ambitieux de réduction des émissions propres du numérique (The Shift Project, 2023).

- **Le cadre de l'entreprise présente l'avantage** de tenir compte des spécificités de l'entreprise qui peuvent jouer dans le bilan mais aussi **l'avantage de mesurer et piloter ces émissions de gaz à effets de serre à moyen et long-terme** pour vérifier que le bilan reste favorable malgré de possibles nouveaux effets.

Plusieurs éléments invitent à la prudence dans la mise en place de *métaconférence* dans un objectif de décarbonation :

- **L'identification et les ordres de grandeur des effets rebond** : « L'étude sur la caractérisation des effets rebond induits par le télétravail » (ADEME, 2020) évaluait que pour une réduction de mobilité permise par le télétravail, 31 % du gain peut être annulé par des effets rebond⁴¹. Les études menées sur le sujet ont de plus historiquement largement surévalué les émissions évitées (Roussilhe G., 2023). La mise en place d'une première méthodologie standard en décembre 2022 fournit la base d'un support à l'identification des effets indirects (ITU, 2022).
- **Le gain net dépend de conditions économiques et sociales, géographiques et temporelles ainsi que de l'adoption** : pour le télétravail, par exemple, le gain net dépend des types de bureau et d'organisation (flex office organisé ou non par exemple), des profils et de la façon dont les employés adoptent le télétravail mais aussi de l'évolution des organisations, de l'acceptabilité de la virtualisation des relations professionnelles, de possibles effets rebond latents (politique de ressources humaines contraignant à un minimum de présence physique) et de la capacité à maintenir les effets.
- **La pertinence des outils de communication à distance comme levier de décarbonation ne pourra passer aussi que par des programmes d'accompagnement au changement, à l'échelle de l'entreprise, voire de ses partenaires** ; ce que nous avons montré sur l'étude des technologies connectées dans notre rapport « Déployer la sobriété numérique » où nous avons mis en évidence que ces technologies pouvaient devenir des solutions pertinentes seulement si elles faisaient partie d'un programme plus large d'accompagnement de changements des comportements et des paradigmes (The Shift Project, 2020).

En l'absence de bilan net favorable, maîtriser l'empreinte carbone des services de réunions et de conférences en ligne passe donc par se recentrer sur la valeur ajoutée principale : la *simultanéité* plutôt que l'*immersion* dans ce cas d'étude, en accompagnement de la mise en place généralisée de l'écoconception de ces services. A cet égard et au vu des paramètres pris en compte dans ce « cas d'étude », la visioconférence semble plus pertinente que la métaconférence d'un point de vue énergie-carbone, et l'audioconférence plus pertinente que la visioconférence⁴².

⁴¹ -24.9% par les effets rebond Chaînes Modales (CM) et Nouvelles Mobilités Quotidiennes (NMQ), -7.6% par l'effet rebond Logement (LOG).

⁴² Le jeu de données relatif au projet NegaOctet 1.4 documenté dans la base Impact au sein de la base Empreinte de l'ADEME (<https://base-empreinte.ademe.fr/>) et accessible via le calculateur en ligne AgirPourLaTransition (<https://agirpourlatransition.ademe.fr/particuliers/collectivites/particuliers/bureau/numerique/calculuez-lempreinte-carbone-usages-numeriques>) contient l'évaluation de l'empreinte environnementale pour 8 services de : audioconférence/visioconférence d'une heure pour 2/20 utilisateurs avec une connexion fixe/mobile.

Conclusions et recommandations

La pérennité de nos usages numériques essentiels ne sera garantie que par l'adaptation de nos systèmes à la double contrainte carbone, c'est-à-dire par l'infléchissement de la trajectoire de notre système numérique vers un paradigme sobre et résilient, passant à la fois par la maîtrise de nos volumes d'équipements et de celle de nos volumes de données.

Les évaluations énergie-carbone du scénario « Méta-métavers » indiquent qu'**entériner le déploiement indifférencié ou l'adoption généralisée des mondes virtuels et les traduire en politiques publiques (ou en l'absence de politiques publiques) et en stratégies économiques aurait pour effet de consolider les dynamiques qui placent aujourd'hui le numérique sur des trajectoires insoutenables**, accroissant son incompatibilité avec l'Accord de Paris et perpétuant nos dépendances énergétiques et matérielles.

Les **méthodologies de mise en arbitrage des options de développement, de déploiement et d'adoption technologique, d'une part à l'aune des coûts environnementaux induits sur le système numérique, et d'autre part à l'aune de l'évaluation des apports énergétiques et climatiques nets des mondes virtuels analysés par « cas d'usage » tenant compte des contextes d'utilisation**, doivent être déployées de la manière la plus exhaustive et systématique possible par les parties prenantes de l'écosystème des mondes virtuels.

Quelles sont les modalités de mondes virtuels discriminantes du point de vue énergie-climat ?

Puisqu'entériner le déploiement indifférencié des mondes virtuels aboutit à une impasse climatique, alors il doit être différencié.

Pour cela, **l'étude des apports énergétiques et climatiques nets des utilisations possibles de mondes virtuels est requise. Elle dépend à la fois des orientations technologiques choisies lors de leur conception, et des contextes de pertinence de leur déploiement.**

Il convient donc, pour chaque modalité de monde virtuel, de **réaliser systématiquement et de façon exhaustive (en incluant les hypothèses d'adoption et d'utilisation) une appréciation méthodologique et quantifiée des coûts énergétiques et environnementaux.**

Conclusion de l'analyse par directions technologiques

En termes d'effets induits (directs⁴³) sur le système numérique, il est déjà possible d'identifier certaines caractéristiques ou combinaisons de caractéristiques de mondes virtuels fortement inflationnistes :

- L'axe **immersion** combiné avec tout autre axe impliquant des débits échangés importants est à éviter car impliquant des échanges de données accrus conduisant à l'augmentation de l'empreinte énergétique et environnementale des réseaux. En particulier :
 - Les combinaisons (**immersion x simultanéité**), (**immersion x simultanéité x mobilité**) appellent des extensions capacitaires, consommatrices d'énergie, ou de nouvelles spécifications pour les réseaux fixes et mobiles (cas de la visio-conférence immersive, cas du *cloud computing*) pouvant conduire à de nouveaux déploiements.
 - La combinaison (**immersion x commercialisation**) implique une collecte de données appelant de nouvelles spécifications en débits montants pour les réseaux et en stockage sur les centres de données (marketing géolocalisé, émotionnel, optimisation expérience de jeu).
- De manière générale, l'axe **taille** a un effet important sur le niveau d'impact final, spécialement dès lors qu'il est **couplé à une autre direction comme** :
 - **L'immersion** : principalement lié au volume de terminaux, sa combinaison avec l'axe **taille** ou l'adoption généralisée est délétère, l'impact environnemental étant exacerbé par l'obsolescence rapide et le renouvellement dû à la compatibilité limitée de certains terminaux avec les nouveaux services ;
 - **La coexistence physique et numérique** (cas de l'intrication progressive monde réel et monde virtuel démultipliant les petits terminaux IoT).
- L'axe **persistance** demande à être mis en regard de la valeur ajoutée pour les utilisateurs puisqu'il peut s'agir de consommer de l'énergie en l'absence de l'utilisateur.
- De même l'axe **commercialisation** qui sous-tend économiquement le monde virtuel peut être mis en regard de la valeur ajoutée nette pour les utilisateurs.
- L'axe **virtualisation** décuple les volumes de données calculés et stockés. La combinaison avec l'IA amplifie ce phénomène, par exemple si elle est suscitée par l'axe **commercialisation** (contenus personnalisés), la poursuite de la puissance de calcul pouvant se traduire jusqu'à des empreintes embarquées plus importantes dans les terminaux immersifs ou IoT ainsi que dans les serveurs.

⁴³ A la différence de la représentation systémique du numérique présentée dans la note « Planifier la décarbonation du système numérique en France : Cahier des charges » (The Shift Project, 2023) (Figure 2), l'analyse présentée dans le présent rapport s'arrête aux effets induits directs sur le système numérique et ne cherche pas à décrire les effets indirects (de second ordre ou d'ordre supérieur).

Conclusion de l'analyse par « cas d'usages »

L'analyse par « cas d'usage » est complémentaire de l'analyse par directions technologiques. Elle permet de soulever les imbrications entre les dimensions techniques et sociologiques :

- La conférence immersive, étudiée via notre narratif *la métaconférence*, permet-elle d'attirer de nouveaux utilisateurs vers la conférence à distance, ou bien propose-t-elle simplement un nouveau service, plus gourmand en ressources, aux utilisateurs de la conférence vidéo classique ?

La conférence immersive fait partie de ces cas évalués par certains (Zhao N., 2023) comme « IT for green » c'est-à-dire dont la mise en place permettrait de substituer l'usage du système numérique à celui du système de mobilité et ainsi contribuer à la réduction d'émissions carbonées en dehors de la chaîne de valeur du numérique.

Rien de moins évident puisqu'en plus de l'évaluation du coût environnemental direct de la *métaconférence* (empreinte des terminaux nécessaires, consommations directes et indirectes liées à la sollicitation des ressources réseaux et serveurs nécessaires etc.), il faut aussi évaluer (mesurer sur des cas pilotes, et contrôler ensuite) quel est le gain réellement atteignable en termes d'émissions de gaz à effets de serre évitées. La réalité de ce gain dépend de facteurs n'étant ni numériques ni techniques, ayant trait au fonctionnement des organisations et à la sociologie du travail (le report **effectif et supplémentaire** de déplacements vers la conférence à distance par rapport à la conférence vidéo classique dépend de la compatibilité avec les modes de travail, avec les habitudes de mobilité et leurs marges de transformation etc.). Le lieu où il convient de mener cette analyse est donc celui de l'organisation et de l'entreprise (au sens large). Ceci afin de documenter les conditions suffisantes pour que la substitution puisse effectivement avoir lieu.

Qu'il y ait des conditions de pertinence ou non (possibilité de réduction effective des déplacements), la décomposition des émissions de gaz à effets de serre par caractéristique et fonctionnalité permet d'identifier les axes technologiques les plus inflationnistes sur l'empreinte carbone. Dans le cas de la conférence immersive, c'est le cas de la caractéristique « immersion ». Si celle-ci ne permet pas une réduction plus importante des kilomètres parcourus au sein d'une organisation que ce qu'engendre la conférence vidéo classique, alors il sera pertinent pour l'organisation, d'un point de vue énergie-carbone, de s'en affranchir.

- Exporter l'approche par cas d'usage développée dans ce rapport à d'autres applications permettra par exemple de documenter les conditions de pertinence du métavers industriel comme le déploiement de jumeaux numériques. Sa pertinence s'évalue elle aussi au regard du contexte opérationnel : les potentiels de gains nets en émissions de gaz à effets de serre sont à démontrer, les conditions à réunir pour que ce gain perdure dans le temps sont à caractériser et assurer (maintien de certaines caractéristiques des chaînes de valeur ou au contraire marges de transformation de ces chaînes, capacité de maintien des solutions dans le temps, compétences en interne ou non pour faire évoluer la solution et la maintenir compatible avec les évolutions de l'entreprise etc.), et la pérennité de la solution est fonction de la place des projets de l'entreprise dans une économie française en transformation active et soutenue vers la décarbonation.

Une prolongation multidisciplinaire et multi-sectorielle permettrait de compléter l’instruction d’étude d’impact au-delà des aspects énergétiques et climatiques et conclure (ou non) à l’encouragement de modalités de monde virtuel dans une société française et européenne en transition énergétique et climatique :

- Des **contraintes de bouclage** au niveau français ou européen pourraient disqualifier certaines modalités additionnelles de mondes virtuels, en ce que les ressources nécessaires pourraient ne pas être disponibles (**dimensionnements possibles des infrastructures réseaux, disponibilité électrique, disponibilité des sols, ressources minérales, ressources en eau etc.**), ni accessibles de manière sécurisée (dans certaines zones instables notamment), voire créer des **conflits d’usages**.
- Le prisme énergie-climat retenu ici pourrait être complété par des **éléments de pertinence sociétale adaptés à une société française en transition énergétique et environnementale** : non seulement du point de vue des impacts environnementaux non pris en compte dans notre méthode (**biodiversité, ressources abiotiques, pollution des sols etc.**), mais également pour des motifs **sociaux, économiques, sanitaires, cognitifs, éthiques ou encore juridiques**, puisque **les mondes virtuels, à l’image du numérique, sont des objets sociaux dans lesquels se définissent des relations sociales, des représentations, des pratiques et des usages** (IHEST, 2023; Renaissance Numérique, 2023). Notre étude des offres de métavers et de mondes virtuels aura permis d’entrevoir certains éléments de visions de futurs technologiques possibles, proposées par leurs concepteurs et leur écosystème. Mais un choix technologique est un choix sociétal, et ne pas porter la question du futur technologique au sein d’un débat de société éclairé mènerait non seulement à des mécanismes auto-réalisateurs dont la pertinence n’aura pas été démontrée, mais également à des polarisation fortes (The Shift Project, 2021).

Recommandations méthodologiques

Mesure et transparence

- **Conditionner le déploiement de nouveaux services à des études d’impact préalables, standardisées et transparentes.**

Le déploiement de mondes virtuels généralisé n’étant pas compatible avec les trajectoires imposées par les contraintes physiques, il est essentiel de systématiser ces études pour les applications sectorielles, de manière adaptée à chaque cas.

Ces études d’impact doivent être exhaustives et systématiques : toutes les phases du cycle de vie doivent être prises en compte, et tous les nouveaux services sont concernés, non uniquement ceux préalablement identifiés comme « IT for green ». Elles doivent également être standardisées et transparentes, pour les rendre comparables, auditables et réintégréables dans une vision panoramique des enjeux du secteur numérique et de ses parties prenantes.

Les conditions de pertinence ou de substitution identifiées doivent pouvoir être mises en place, tout comme les mécanismes éventuels d’endiguement d’effets rebond : cadres réglementaire et opérationnel cohérents, adhésion ou mécanismes incitatifs existants... Démontrer que ces critères sont en mesure d’être respectés au moment du déploiement

et suivis dans le temps long est une condition incontournable pour que l'instruction puisse conclure à la pertinence du déploiement.

- **Conditionner les investissements** vers de nouveaux services (ceux vers les industries créatives et culturelles sont particulièrement concernés dans le cadre des applications étudiées dans ce rapport) ou vers la construction d'infrastructures (5G+ et 6G) à **des études d'impact préalables en s'assurant que les trajectoires dans lesquelles ces services et infrastructures s'inscrivent soient compatibles avec nos budgets carbonés, stratégies nationale et européenne de décarbonation, et contraintes énergétiques et matières.**
- **Quantifier les impacts environnementaux des services au cours des processus d'innovation selon les choix technologiques** qui peuvent être réalisés (avec une **méthodologie standardisée et comparable**) et **les rendre visibles aux parties prenantes pour éclairer leurs choix** (transparence de l'information aux consommateurs et aux entreprises, orientations des investissements, labels, priorisation de R&D et de conception des nouveaux services...).

Optimisation

- **Encourager l'écoconception généralisée afin de concevoir des services bas carbone.**
- **Appliquer le déploiement d'outils comme la matrice « usages – systèmes numériques » afin d'identifier au niveau du périmètre du système numérique la meilleure réponse technique aux besoins initiaux identifiés** en relâchant les contraintes sur certaines caractéristiques (voir section « Impacts directs induits sur le système numérique : présentation de la Matrice « usages – systèmes numériques » »).

En particulier, il résulte de cette étude qu'une décision de déploiement de réseaux mobiles voué à augmenter les débits descendants, montants et réduire les latences pour permettre conjointement *immersion* et *simultanéité* ne pourra être rendu à coût énergétique et climatique maîtrisé.

- **Transformer les modèles d'affaires** afin de permettre de délivrer les mêmes services à coût environnemental réduit en travaillant sur l'ensemble de la chaîne de valeur.

Réorganisation collective vers la sobriété

- **Faire émerger des technologies numériques dont la vocation est d'accompagner la mise en place d'une économie décarbonée.**

Ce qui implique d'éviter le **suivisme dans le processus d'engouement** (« *hype* technologique ») qui a mis à l'agenda collectif les métavers et mondes virtuels, **en venant rapidement pondérer les décisions de directions technologiques par leur instruction environnementale.**

- Afin d'être sélectif sur nos usages numériques et suspendre les projets aux coûts environnementaux et aux consommations de ressources trop élevées, **l'encouragement de l'écoconception généralisée doit s'accompagner du déploiement de méthodologies et outils comme la matrice « usages – systèmes numériques », afin d'identifier et de s'affranchir des spécifications (et combinaisons de**

spécifications) de services incompatibles avec une empreinte du système numérique maîtrisée (voir section « Conclusion de l'analyse par directions technologiques »).

Formation et compétences

- **Former aux impacts systémiques et environnementaux les parties prenantes du processus d'innovation** (investisseurs privés et publics, entrepreneurs, responsables de produits, concepteurs, conseillers, intermédiaires de déploiement, concepteurs de contenus et d'applications...), **d'autant plus quand les parties prenantes sont sectorielles** (acteurs culturels par exemple).
- **Former aux impacts systémiques et environnementaux les parties prenantes de la transformation des modèles d'affaires** (couches métiers, couches stratégiques, consortiums d'acteurs etc.).
- Former les entreprises et organisations à des méthodes bilantielles prenant en compte les émissions de gaz à effets de serre par axes technologiques, caractéristiques, et avec une vision systémique tout en restant directement exploitable par les acteurs, telles que décrites au paragraphe « Méthodologie de pondération des directions technologiques pour les mondes virtuels ».

Orienter nos choix technologiques vers la sobriété numérique

Les évolutions technologiques, à la fois construites par des lames de fond (comme le développement des technologies immersives) mais aussi par des effets d'annonce qui viennent structurer et amplifier ces dynamiques (comme l'annonce de Meta en 2021), peuvent devenir des mots d'ordre dans les politiques publiques.

L'incompatibilité du déploiement indifférencié des mondes virtuels avec la double-contraainte carbone démontre la nécessité de l'orientation de nos choix technologiques par leur caractérisation concrète et physique.

Les modes d'organisation et d'interaction régissant l'écosystème numérique et ses parties prenantes dans la conception des offres et services rendent l'ensemble de ces acteurs (investisseurs, entrepreneurs, conseillers, concepteurs, intermédiaires de déploiement, politiques publiques) à la fois agents et responsables de l'appréciation énergétique et environnementale, prélude à leur participation stratégique dans l'encouragement de systèmes numériques sobres et bénéfiques et dans la dissuasion de systèmes numériques délétères (incompatibles avec la double-contraainte carbone ou sans apports sociétaux identifiés).

Orienter nos choix technologiques vers la sobriété numérique n'est pas seulement la réponse aux contraintes physiques, mais l'occasion d'une nouvelle direction autour de laquelle structurer et coordonner un véritable écosystème numérique européen du XXI^{ème} siècle.

Références

- ADEME. (2020). *Caractérisation des effets rebond induits par le télétravail*.
<https://bibliothèque.ademe.fr/mobilite-et-transport/3776-caracterisation-des-effets-rebond-induits-par-le-teletravail.html>
- ADEME, & Arcep. (2023). *Evaluation de l'impact environnemental du numérique en France et analyse prospective—Analyse prospective à 2030 et 2050 (3/3)*.
https://www.arcep.fr/uploads/tx_gspublication/etude-prospective-2030-2050_mars2023.pdf
- Amazon Web Services (Réalisateur). (2018, novembre 28). *AWS re:Invent 2018: Chris Dyl, Director of Platform at Epic Games, Speaks at Monday Night Live (4'33'')*.
<https://youtu.be/MCLrA401vHw?si=HfYDrm1OgNBqYBpi>
- Amazon Web Services. (2019). *Comment Activision utilise le machine learning AWS pour personnaliser l'engagement des joueurs dans Call of Duty*.
<https://aws.amazon.com/fr/solutions/case-studies/activision-call-of-duty/>
- Arcep. (2023). *Marché des communications électroniques en France—Les chiffres au 2ème trimestre 2023*. https://www.arcep.fr/fileadmin/cru-1677573101/reprise/observatoire/2-2023/obs-marches-T2-2023_oct2023.pdf
- Arthur D Little. (2022). *The metaverse beyond fantasy. Synthetic world, real economy*.
<https://www.adlittle.com/en/insights/report/metaverse-beyond-fantasy>
- Arthur D Little. (2023). *The evolution of data growth in Europe. Evaluating the trends fueling data consumption in European markets*. <https://www.adlittle.com/en/insights/report/evolution-data-growth-europe>
- Basdevant A., François C., Ronfard R. (2022). *Mission exploratoire sur les métavers*.
<https://www.economie.gouv.fr/files/files/2022/Rapport-interministeriel-metavers.pdf>

- Bol, D., Pirson, T., & Dekimpe, R. (2020). *Moore's Law and ICT Innovation in the Anthropocene* (Electronic Circuits and Systems group, ICTEAM Institute, Université catholique de Louvain.).
- CEPIR (Réalisateur). (2023, juin). *Cas d'Etude Pour un Immersif Responsable, webinaire de restitution intermédiaire*. <https://www.cepir.info/webinaire-juin-2023>
- Cisco. (2020). *Cisco Annual Internet Report 2018-2023*. <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/executive-perspectives/annual-internet-report/white-paper-c11-741490.html>
- DeepFaceLive. (s. d.). *DeepFaceLive: Real-time face swap for PC streaming or video calls*. Consulté 27 février 2024, à l'adresse <https://github.com/iperov/DeepFaceLive>
- Direction Générale des Entreprises. (2022). *Les technologies immersives*. <https://www.entreprises.gouv.fr/fr/numerique/politique-numerique/technologies-immersives>
- Ericsson. (2023). *AR uptake enabled by mobile networks, Ericsson Mobility Report*. <https://www.ericsson.com/en/reports-and-papers/mobility-report/reports/june-2023>
- European Commission. (2020). *Energy-efficient Cloud Computing Technologies and Policies for an Eco-friendly Cloud Market—Final study report*. <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/library/energy-efficient-cloud-computing-technologies-and-policies-eco-friendly-cloud-market>
- European Commission. (2023). *An EU initiative on Web 4.0 and virtual worlds: A head start in the next technological transition*. <https://digital-strategy.ec.europa.eu/fr/library/eu-initiative-virtual-worlds-head-start-next-technological-transition>
- Facebook. (2021, octobre 25). *Facebook Reports Third Quarter 2021 Results*. <https://investor.fb.com/investor-news/press-release-details/2021/Facebook-Reports-Third-Quarter-2021-Results/default.aspx>
- Gartner. (1995, 2022). *Hype Cycle for Emerging Tech*. <https://www.gartner.fr/fr/articles/quelles-sont-les-nouveautes-du-hype-cycle-2022-de-gartner-consacre-aux-technologies-emergentes>, <https://www.gartner.com/smarterwithgartner/5-trends-drive-the-gartner-hype-cycle-for-emerging-technologies-2020>, [Energie, climat : Quels mondes virtuels pour quel monde réel ?
The Shift Project – Mars 2024](https://hubinstitute.com/2019/data-</p>
</div>
<div data-bbox=)

tendances-hypecycle-gartner-technologies-emergentes-ia-ecosysteme-capturs-
analytics, <https://www.gartner.com/en/newsroom/press-releases/2018-08-20-gartner-identifies-five-emerging-technology-trends-that-will-blur-the-lines-between-human-and-machine> , <https://www.gartner.com/smarterwithgartner/top-trends-in-the-gartner-hype-cycle-for-emerging-technologies-2017>, <https://www.gartner.com/en/newsroom/press-releases/2016-08-16-gartners-2016-hype-cycle-for-emerging-technologies-identifies-three-key-trends-that-organizations-must-track-to-gain-competitive-advantage> , <https://www.gartner.com/en/newsroom/press-releases/2015-08-18-gartners-2015-hype-cycle-for-emerging-technologies-identifies-the-computing-innovations-that-organizations-should-monitor>, https://www.researchgate.net/figure/Gartner-2014-hype-cycle-of-emerging-technologies-Source-Gartner-Inc_fig1_307466504, <https://www.zdnet.com/article/gartners-2013-emerging-technologies-hype-cycle-focuses-on-humans-and-machines/> , <https://www.forbes.com/sites/gartnergroup/2012/09/18/key-trends-to-watch-in-gartner-2012-emerging-technologies-hype-cycle-2/> , <https://www.paperblog.fr/4753950/gartner-hype-cycle-des-technologies-emergentes-2011/>, https://www.researchgate.net/figure/Hype-Cycle-of-Emerging-Technologies-2010-Gartner-2010_fig5_268200261, https://www.researchgate.net/figure/Hype-cycle-for-emerging-technologies-2009-by-Gartner-2009_fig1_242012197, <https://www.zdnet.fr/blogs/media-tech/gartner-publie-son-hype-cycle-des-technologies-2008-quo-vadis-39601871.htm>, <https://www.pinterest.fr/pin/253186810279135292/>, <https://structure101.com/2006/08/22/gartner-2006-technology-hype-cycle/>, <https://danielneamu.ro/2005/09/13/hype-cycle-for-emerging-technologies-2005/>, https://www.researchgate.net/figure/The-Gartner-Hype-Cycle-cited-in-Henten-Skouby-2004-Retrieved-February-2-2005-from_fig1_232656419/download, <https://www.pinterest.fr/pin/253186810279135286/>, <https://www.pinterest.fr/andrepiazza512/>

Gartner. (2022). *Qu'est-ce qu'un metaverse ? Devez-vous investir dans ce domaine ?* (<https://www.gartner.fr/fr/articles/qu-est-ce-qu-un-metavers>)

- GreenIT.fr. (2019). *Empreinte environnementale du numérique mondial*. GreenIT.fr.
<https://www.greenit.fr/empreinte-environnementale-du-numerique-mondial/>
- Haut Conseil pour le Climat. (2023). *Acter l'urgence, engager les moyens*.
https://www.hautconseilclimat.fr/wp-content/uploads/2023/06/HCC_RA_2023-Resume-executif.pdf
- HCC. (2020). *Maîtriser l'impact carbone de la 5G* [Haut conseil pour le climat].
<https://www.hautconseilclimat.fr/publications/maitriser-limpact-carbone-de-la-5g/>
- IEA. (2019). *Data centres and energy – from global headlines to local headaches?*
<https://www.iea.org/commentaries/data-centres-and-energy-from-global-headlines-to-local-headaches>
- IEA. (2021). *Global CO2 emissions from transport by subsector, 2000-2030*.
<https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-co2-emissions-from-transport-by-subsector-2000-2030>
- IEA. (2022). *Data Centres and Data Transmission Networks—Tracking report*. International Energy Agency. <https://www.iea.org/reports/data-centres-and-data-transmission-networks>
- IHEST. (2023). *Le métavers : Une enquête sur les univers virtuels en gestation*.
<https://www.ihest.fr/ihest-mediatheque/le-metavers-une-enquete-sur-les-univers-virtuels-en-gestation/>
- Intel. (2021, décembre 14). *Powering the metaverse. Intel is working on the plumbing for a persistent and immersive internet*.
<https://www.intel.com/content/www/us/en/newsroom/opinion/powering-metaverse.html>
- Intergovernmental Panel On Climate Change (Ippc) (Éd.). (2023). Summary for Policymakers. In *Climate Change 2022—Mitigation of Climate Change* (1^{re} éd., p. 3-48). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157926.001>
- ITU. (2022). *Enabling the Net Zero transition : Assessing how the use of information and communication technology solutions impact greenhouse gas emissions of other sectors*.
<https://www.itu.int/rec/T-REC-L.1480-202212-I>

- ITU-T. (2020). *Greenhouse gas emissions trajectories for the information and communication technology sector compatible with the UNFCCC Paris Agreement* [L.1470. Series L: environment and icts, climate change, e-waste, energy efficiency; construction, installation and protection of cables and other elements of outside plant]. <https://www.itu.int/rec/T-REC-L.1470-202001-l/en>
- Liu, F., Pei, Q, Chen, S., Yuan, Y., Wang, L., & Muhlhauser, M. (2023). *When the Metaverse Meets Carbon Neutrality: Ongoing Efforts and Directions*. <https://doi.org/10.48550/ARXIV.2301.10235>
- L'usine digitale. (2021, octobre 26). *Facebook aura dépensé plus de 10 milliards de dollars dans l'AR/VR en 2021*. <https://www.usine-digitale.fr/article/facebook-aura-depense-plus-de-10-milliards-de-dollars-dans-l-ar-vr-en-2021.N1153372>
- L'usine digitale. (2023, août 1). *Apple, Pixar, Adobe et Nvidia lancent une alliance dans les contenus 3D*. <https://www.usine-digitale.fr/article/apple-pixar-adobe-et-d-autres-societes-lancent-une-alliance-dans-l-animation-3d.N2158207>
- L'usine digitale. (2024, février 9). *Disney investit 1,5 milliard de dollars dans Epic Games pour créer un grand univers virtuel à la Fortnite*. <https://www.usine-digitale.fr/article/disney-investit-1-5-milliard-de-dollars-dans-epic-games-pour-creer-un-grand-univers-virtuel-a-la-fortnite.N2208056>
- Masanet et al. (2020). *Recalibrating global data center energy-use estimates* [Science, 367(6481), 984–986. doi:10.1126/science.aba3758]. <https://www.science.org/doi/10.1126/science.aba3758>
- Meta. (2021a). *Introducing Meta: A social technology company*. <https://about.fb.com/news/2021/10/facebook-company-is-now-meta/>
- Meta (Réalisateur). (2021b, octobre 28). *The Metaverse and How We'll Build It Together—Connect 2021*. consulté sur <https://www.youtube.com>. <https://www.youtube.com/watch?v=Uvufun6xer8>
- Meta. (2024). *Meta website*. <https://www.meta.com/fr/en/>

- Microsoft. (2015, avril 29). *Add-ins for Outlook.com—Build an experience that reaches 400 million users*. <https://www.microsoft.com/en-us/microsoft-365/blog/2015/04/29/add-ins-for-outlook-com-build-an-experience-that-reaches-400-million-users>
- Musso P., Coiffier S., & Lucas J-F. (2014). *Innover avec et par les imaginaires*. Editions Manucius.
- Net Zero Initiative. (2022). *Les 10 principes NZI pour une action climat ambitieuse*. https://assets-global.website-files.com/612ca83f8578a75a8cf1cf3d/62bb1410bfda467f91acb275_NZI_10_principes_VF.pdf
- Pirson T., Bol D. (2021). *Assessing the embodied carbon footprint of IoT edge devices with a bottom-up life-cycle approach*. <https://arxiv.org/abs/2105.02082>
- Radio-Canada. (2023, janvier 13). *Ne détournez plus le regard lors d'appels vidéo grâce à l'hypertrucage de Nvidia*. <https://ici.radio-canada.ca/nouvelle/1948240/regard-hypertrucage-camera-video-appel-nvidia-broadcast>
- Renaissance Numérique. (2023). *Gouverner le Metavers et l'internet de demain*. https://www.renaissancenumerique.org/wp-content/uploads/2023/11/renaisancenumerique_rapport_metavers_web.pdf
- Renaissance Numérique, & L'Observatoire Société & Consommation. (2023). *Représentations et usages du Métavers*. https://www.renaissancenumerique.org/wp-content/uploads/2023/10/renaissance-numerique-representations_usages_metavers.pdf
- Roussilhe G. (2023). *Les émissions évitées de la numérisation*. <https://gauthierroussilhe.com/articles/les-emissions-evitees-de-la-numerisation>
- SBTi, ITU, GeSI, & GSMA. (2020). *Guidance for ICT companies setting science based targets—Mobile networks operators, fixed networks operators and data centres operators*. <https://sciencebasedtargets.org/sectors/ict>
- Search logistics. (2023). *Zoom User Statistics*. <https://www.searchlogistics.com/learn/statistics/zoom-user-statistics/>
- Sénat. (2020). *Pour une transition numérique écologique. Rapport d'information n°555 (2019-2020)*. https://www.senat.fr/rap/r19-555/r19-555_mono.html

Statista Research Department. (2023, août 31). *Statista*. (2023, août 31). U.S. : *Smartphones replacement cycle 2013-2027*. <https://www.statista.com/statistics/619788/average-smartphone-life/>

The Shift Project. (2020). *Déployer la sobriété numérique*. The Shift Project. <https://theshiftproject.org/article/deployer-la-sobriete-numerique-rapport-shift/>

The Shift Project. (2021). *Impact environnemental du numérique : Tendances à 5 ans et gouvernance de la 5G*. The Shift Project. <https://theshiftproject.org/article/impact-environnemental-du-numerique-5g-nouvelle-etude-du-shift/>

The Shift Project. (2023). *Planifier la décarbonation du système numérique en France : Cahier des charges*. <https://theshiftproject.org/article/planifier-la-decarbonation-du-systeme-numerique-en-france-cahier-des-charges/>

The Shift Project. (2024a). *[Energie, Climat : Quels mondes virtuels pour quel monde réel ? - Materials] Case study : Metaconference*.

The Shift Project. (2024b). *Energie-climat : Des réseaux sobres pour des usages connectés résilients*.

webinarcare. (2023). *Video Conferencing Statistics*. <https://webinarcare.com/best-video-conferencing-software/video-conferencing-statistics/>

Weinberger M. & Gross D. (2023). *A metaverse maturity model*. https://www.researchgate.net/publication/366920442_A_Metaverse_Maturity_Model_A_Metaverse_Maturity_Model

Wikipédia. (2024a). *Réalité virtuelle*. https://fr.wikipedia.org/wiki/R%C3%A9alit%C3%A9_virtuelle

Wikipédia. (2024b, février 20). *List of virtual reality headsets*. https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=List_of_virtual_reality_headsets&oldid=1208303712

Wordly. (s. d.). *About Wordly Real-Time Translation*. Consulté 27 février 2024, à l'adresse <https://www.wordly.ai/real-time-translation#:~:text=The%20Wordly%20platform%20captures%20the,time%20into%20dozens%20of%20languages>.

Zhao N. (2023). *The growing metaverse sector can reduce greenhouse gas emissions by 10 Gt CO₂e in the united states by 2050.*

<https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2023/ee/d3ee00081h>

Zhao, N., & You, F. (2023). The growing metaverse sector can reduce greenhouse gas emissions by 10 Gt CO₂e in the united states by 2050. *Energy & Environmental Science*, 16(6), 2382-2397. <https://doi.org/10.1039/D3EE00081H>

THE SHIFT PROJECT

The Shift Project est un think tank qui œuvre en faveur d'une économie libérée de la contrainte carbone.

Nous sommes une association loi 1901 d'intérêt général, guidée par l'exigence de la rigueur scientifique. Notre mission consiste à éclairer et influencer le débat sur la transition énergétique.

www.theshiftproject.com

Contacts

Hugues Ferreboeuf

Chef de projet Numérique
hugues.ferreboeuf@theshiftproject.org

Maxime Efoui-Hess

Coordinateur du programme Numérique
maxime.efoui@theshiftproject.org

Marlène de Bank

Ingénieure recherche – Technologies numériques
marlene.debank@theshiftproject.org

Graphisme

Illustration de couverture : Virgile Bellaiche

Mise en page : Karine Pellan