



LE THINK TANK
DE LA TRANSITION
BAS-CARBONE

ÉNERGIE, CLIMAT : QUELS MONDES VIRTUELS POUR QUEL MONDE RÉEL ?

**ORIENTER NOS CHOIX TECHNOLOGIQUES
VERS LA SOBRIÉTÉ NUMÉRIQUE**

RAPPORT INTERMÉDIAIRE — DÉCEMBRE 2023



Crédit photo : Image de jcomp sur Freepik

Avant-propos

Au sein de son programme de travail consacré aux **enjeux des technologies numériques vis-à-vis de la double contrainte carbone (réduction des émissions carbonées, affranchissement à notre dépendance aux énergies fossiles)** The Shift Project a publié, au cours des dernières années, quatre 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)**
Rapport mettant à jour les trajectoires d'évolution à 2025 de l'impact énergie-carbone du numérique produite par le Shift en 2018. 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.

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 et les stratégies à mettre en œuvre pour les rendre résilientes à la double contrainte carbone.

Ce travail encore imparfait et incomplet est présenté et discuté lors d'un événement dédié du Shift Project le 14 décembre 2023, selon notre méthode itérative usuelle.

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.

Votre participation aux travaux : relectures et contributions

Le travail qui vous est présenté ici est exploratoire : il vise à initier de nouvelles discussions et pose sur de nombreux sujets davantage de questions qu'il n'en résout. Bien qu'il soit déjà le fruit d'un travail collectif, ce rapport intermédiaire est encore un document de travail imparfait, incomplet et évolutif.

Comme vous le constaterez, les résultats de nos analyses quantitatives n'ont pas encore été pleinement réalisés. Pour les phases de travail à venir, toute source de données que vous trouveriez essentielles à intégrer à nos travaux seront les bienvenues.

Vos retours seront également précieux sur l'ensemble du document et des éléments qui vous y sont présentés : méthodologie, approche générale et choix des angles choisis sont ici présentés pour être soumis aux avis des parties prenantes du sujet des technologies numériques, de leur décarbonation et de leurs enjeux de résilience.

Dans cette logique, nous vous prions d'envoyer vos remarques, critiques et propositions aux contacts indiqués en fin de rapport.

Vous n'avez bien entendu pas besoin de lire l'ensemble de ce long document pour nous aider à l'améliorer : toutes les contributions sont les bienvenues.

Nous avons besoin de vous !

Comité de rédaction

Le groupe de travail

Joris COUDREAU (Consultant et formateur, Eleutheria Consulting)

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

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 (Ingénieur de Recherche, 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

Le programme « Numérique » de The Shift Project est accompagné par ses partenaires, qui rendent possible par leur soutien et leur participation les travaux dont le présent rapport est l'un résultat :



Table des matières

AVANT-PROPOS	2
Votre participation aux travaux : relectures et contributions	4
Comité de rédaction	5
Partenaires	6
Table des matières	7
INTRODUCTION	9
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 DESTINATIONS ENERGETIQUES DES MONDES VIRTUELS	14
I. Le métavers et les mondes virtuels : contexte et définition	15
II. Première évaluation macroscopique d'une généralisation des usages des mondes virtuels	17
III. Qualification des impacts énergétiques du continuum de mondes virtuels sur le système numérique	21
A. Approche des mondes virtuels par « cas d'usage ».....	22
B. Approche des mondes virtuels par directions technologiques	25
C. Directions technologiques et impacts sur le système numérique : présentation de la Matrice	31
IV. Quantification des impacts énergétiques du continuum de mondes virtuels sur l'infrastructure réseau	34
METHODOLOGIE DE PONDERATION DES DIRECTIONS TECHNOLOGIQUES POUR LES MONDES VIRTUELS	37
I. Méthodologie et étapes	38
II. Application aux réunions et conférences en ligne	38

A. Description du « cas d'usage »	38
B. Quantification des tendances et empreintes énergétiques et climatiques	41
C. De l'apport et de la nécessité des directions technologiques suivies face à leurs coûts énergétiques et climatiques	42
III. Autres applications	43
IV. Quelles sont les modalités de mondes virtuels à encourager et celles à dissuader ?.....	43
CONCLUSION.....	46
ANNEXE 1 : « CAS D'USAGE » ET NARRATIFS	48
ANNEXE 2.....	61
REFERENCES	64

01

INTRODUCTION

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, possèdent 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. 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 puis livraison aux consommateurs et consommatrices nécessitent des ressources conséquentes, loin d'être négligeables.

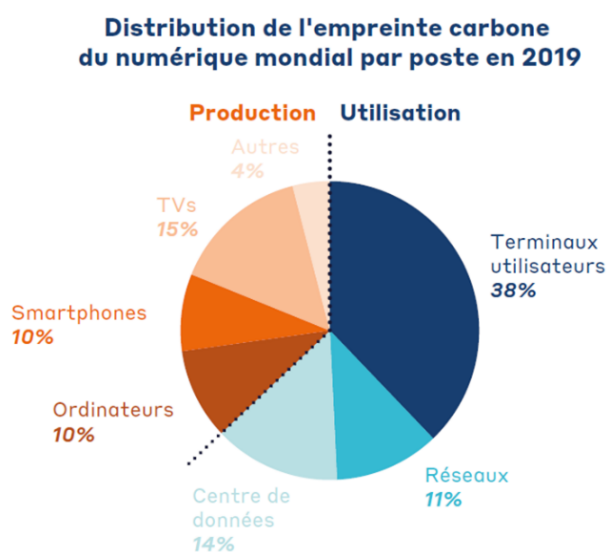


Figure 1 : Distribution de l'empreinte carbone du numérique mondial en 2019, par poste pour les phases de production (40 %) et d'utilisation (60 %)

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 (réduction des émissions carbonées de nos activités, affranchissement à notre dépendance aux énergies fossiles)** doivent être pensées. Le numérique est un catalyseur : là où il est déployé, il permet d'optimiser, accélérer, fluidifier, paralléliser... Le déployer sans stratégie mène donc à l'accélération de toutes les dynamiques, y compris des plus éloignées de nos objectifs de résilience. En faire un véritable outil de réinvention de nos activités pour les rendre compatibles avec le XXI^{ème} siècle réclame une stratégie et une compréhension systémique des impacts du numérique.

Une trajectoire insoutenable à infléchir

Le numérique est aujourd'hui déjà un secteur non-négligeable du point de vue carbone, représentant près de 4 % des émissions mondiales (The Shift Project, 2021), soit du même ordre que l'intégralité des poids lourds dans le monde (IEA, 2021). A l'échelle française, le numérique représente 2,5 % de l'empreinte carbone du pays (The Shift Project, 2023b).

Sa particularité tient dans les 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 incrémentales 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, 2023b). Ce constat continue de se vérifier et s'est illustré au cours des cinq dernières années, qui devaient pourtant 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 plus de 10 % de la consommation électrique (The Shift Project, 2021, 2023b). Dans un contexte d'électrification intense des usages (mobilité, bâtiment, industrie etc.), on comprend qu'il est 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, 2023b).

Rendre le numérique compatible avec la double contrainte carbone ne consiste donc 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 % à 2030 par rapport à 2020 au niveau mondial**. 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 objectif SBTi recalculé pour l'adapter au cas français, de - 30 % des émissions du secteur à 2030 par rapport à 2020.**

L'existence d'interactions systémiques multiples dans la construction de notre système numérique révèle que l'analyse conjointe de nos offres et usages futurs au prisme de l'énergie et

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.

du climat est un levier essentiel pour maîtriser les impacts de nos technologies. **L'inflexion des volumes de terminaux et de données étant même la condition sine qua non à l'avènement de la maîtrise de la consommation énergétique par les gains d'efficacité énergétique (The Shift Project, 2023b).**

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 climatique. Le simple cas des technologies immersives démontre déjà que **les empreintes énergétiques des trois tiers du système numérique (terminaux, centre de données, infrastructure réseaux) sont menacées de prendre de concert des directions insoutenables :**

- **Du côté des terminaux**, l'extension de l'offre de terminaux immersifs, dont l'intensité énergétique se renforce, a vocation à séduire un public toujours plus large.
- **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. Ces volumes de données deviennent même essentiels pour supporter certains modèles d'affaires. A cela s'ajoute d'autres dynamiques, comme le déport de puissance de calcul vers les centres de données pour alléger 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 co-construisent une dynamique qui, si elle s'entérine dans l'écosystème numérique sous l'impulsion de politiques publiques (ou de l'absence de politiques publiques) et en stratégies économiques, fixe un cap en définitive incompatible avec la double-contraainte carbone.

Ainsi la première partie de ce rapport est dédiée à **la description des directions technologiques et destinations énergétiques et carbone pour différentes caractéristiques des mondes virtuels**. Cette analyse est construite dans le cadre d'une approche conséquentielle, dont la méthodologie est documentée dans notre rapport "Stratégie pour des réseaux sobres et résilients" (The Shift Project, 2023a). Elle permet de renforcer la compréhension des effets d'offre et d'usage sur notre infrastructure réseau, en répondant à la question décisive : « Quel impact les mondes virtuels ont-ils sur le déploiement de notre infrastructure réseau ? ». La seconde partie décline une méthodologie de mise en arbitrage des modalités de mondes virtuels afin d'identifier les options de développement technologique cohérentes avec un système numérique sobre et résilient.

02

DIRECTIONS TECHNOLOGIQUES ET DESTINATIONS ÉNERGÉTIQUES DES MONDES VIRTUELS

Directions technologiques et destinations énergétiques des mondes virtuels

I. Le métavers et les mondes virtuels : contexte et définition

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 2022 : 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, 1995-2022).

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 imaginaires et contenu que dans leur forme.

En octobre 2021, l'engouement pour les mondes virtuels augmente après l'annonce retentissante de la structuration par l'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, dans laquelle plusieurs industries (créatives, software et hardware, infrastructures) amènent chacune leur brique technologique avec la volonté de converger. 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 Parliament, Committee on the Internal Market and Consumer Protection, 2023; L'usine digitale, 2023).

La vision de ce que proposent concrètement ces technologies reste cependant floue. Meta adopte en effet l'approche incrémentale et développe plusieurs briques technologiques en parallèle (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...), aux directions et applications possibles multiples. A cette première hétérogénéité s'ajoute la promesse d'un Métavers comme « prochain chapitre d'Internet », mettant en scène une dématérialisation complète dans les vidéos marketing Meta plutôt qu'une mise en scène d'équipements et de situations opérationnelles concrètes. A cela s'ajoute l'ensemble des acteurs s'engouffrant sur le sujet et produisant chacun leurs définitions, visions, spéculations et produits.

La vision floue, multiple et hétérogène qui en résulte rend non seulement complexe l'appréciation environnementale mais complique également la réfutabilité (au sens épistémologique²) 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 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 l'interrogation de la place des mondes virtuels dans un numérique sobre et adapté à la double contrainte carbone.

L'approche de The Shift Project propose de questionner les conditions de pertinence des solutions technologiques et numériques, prises au sein de leur contexte de déploiement et d'usage (The Shift Project, 2020). Plutôt que de caractériser de manière floue un objet « Métavers », il s'agira donc ici de proposer une approche permettant de décrire les destinations énergétiques et climatiques prises par de tels projets suivant les directions technologiques concrètes choisies.

Nous distinguons dans ces travaux le métavers (au singulier) à savoir la vision long-terme proposée par Meta, du continuum de mondes virtuels (au pluriel), déjà existants ou non et définissables par la combinaison de plusieurs caractéristiques technologiques à différents degrés. Selon leurs caractéristiques, ces mondes virtuels reposeraient sur des typologies de systèmes numériques différents, pouvant pour certains étant sobres et résilients, ou non.

Il est à noter que si le métavers et les mondes virtuels ont été imposés à l'agenda collectif (médiatique, politique, économique...), ce rapport ne les considère pas comme un passage obligé. 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.

² 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.

II. Première évaluation macroscopique d'une généralisation des usages des mondes virtuels

Le scénario « Méta-métavers » est construit de manière à représenter les effets du déploiement de services de mondes virtuels généralisés sur l'impact carbone du numérique mondial.

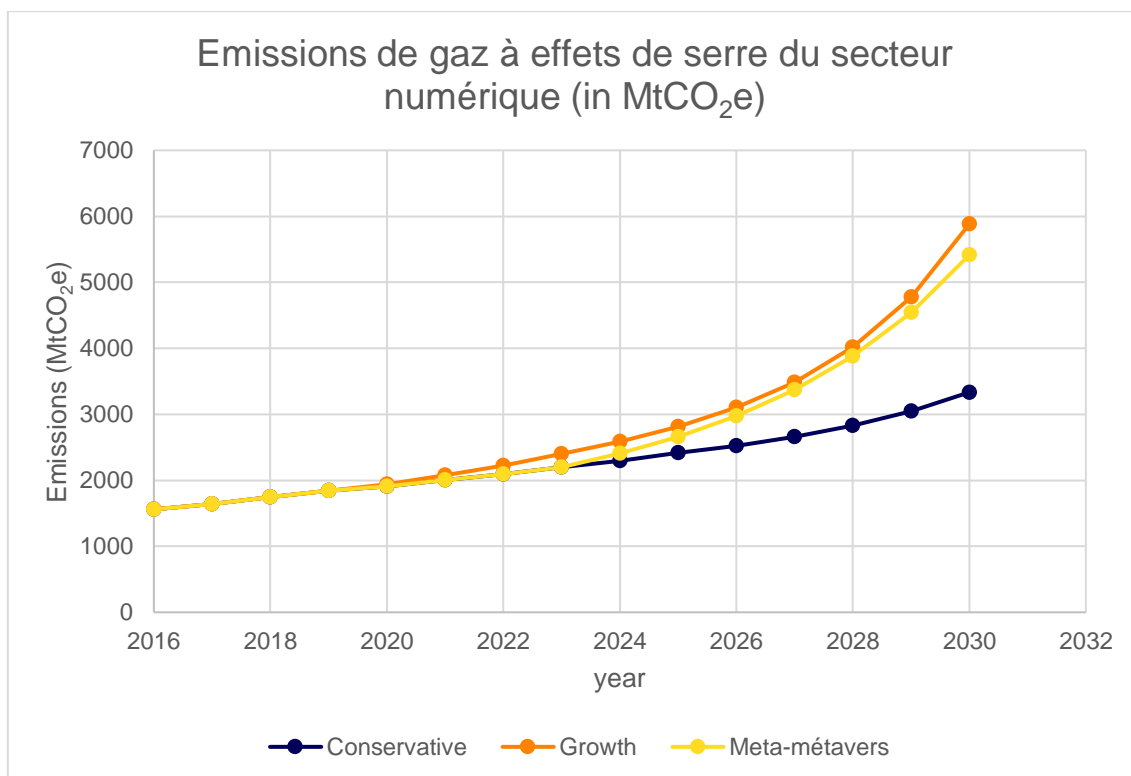


Figure 1 – Evolution 2016-2030 des émissions de gaz à effets de serre du numérique : Scénarios Conservative et Growth 2016-2025 (The Shift Project, 2021) prolongés et scénario Meta-métavers
Source : The Shift Project, dans le cadre de ce rapport

Il est construit de manière très macroscopique à ce stade, afin d'agrèger et traduire les dynamiques essentielles aujourd'hui identifiées ou projetées. Il s'appuie ainsi sur (données disponibles en

Annexe 2) :

- La prédiction de Gartner : « En 2026, 25% des personnes passeront 1h dans les 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 ;
- 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) combinés à des objectifs de puissance de calcul y étant liés (Intel, 2021).

Replacé dans le contexte des scénarios « Conservative » (scénario de référence) 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 suit en effet la dynamique du scénario « Growth » et l'empreinte carbone du numérique atteint 5,4 GtCO₂e en 2030. Cette première trajectoire reste pourtant conservative 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 ne s'ajoute pas aux usages existant mais est par hypothèse substituée à 1h de vidéo en ligne ;
- Seuls les casques de réalité virtuelle sont considérés parmi l'ensemble des équipements possiblement déployés dans le cadre de services de mondes virtuels généralisés ;

Seule une augmentation des débits descendants est considérée ; la valeur choisie de 50 Mbps n'étant pas extrême dans les plages de débit annoncées (voir ordres de grandeur au chapitre 0-

- Quantification des impacts énergétiques du continuum de mondes virtuels sur l'infrastructure réseau).
- 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 afin d'accéder à différents mondes virtuels dont la compatibilité n'est pas généralisée (de la même façon que plusieurs consoles de jeu sont nécessaires pour pouvoir jouer à plusieurs jeux vidéo).

Cette première évaluation basée sur une prédiction macroscopique de Gartner ne détaillant pas la somme des utilisations effectives des mondes virtuels en 2030. Les travaux à poursuivre à la suite de ce rapport intermédiaire viseront à :

- Vérifier que cette évaluation est couvrante d'un déploiement généralisé tel qu'escompté par Meta, puisque le nombre de personnes considéré dans la prédiction Gartner est cohérent des 2.9 milliards d'utilisateurs de Facebook actifs fin 2022 (Statista Research Department, 2023);
- Construire, dans une démarche bottom-up plutôt que top-down, la somme des usages possibles des mondes virtuels, afin d'en évaluer les dynamiques en termes énergétiques et climatiques.

III. Qualification des impacts énergétiques du continuum de mondes virtuels sur le système numérique

Parallèlement à la promesse de Meta et s'appuyant sur l'ensemble de l'écosystème numérique, se développent incrémentalement plusieurs gammes de technologies, destinées à se compléter mutuellement pour donner lieu à de **multiples modalités de mondes virtuels**. C'est précisément 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 approches 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 que nous avons quelquefois utilisée) 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).
- Elle se visualise aussi comme une approche par chaque entrée de la chaîne de valeur du Métavers proposée par Jon Radoff sur la figure ci-dessous (Radoff J., 2021b, 2021a; Renaissance Numérique, 2023).
- Enfin, l'approche par « cas d'usage » pourrait être à l'analyse de besoin ce que l'approche par orientations technologiques serait à l'analyse fonctionnelle dans le champ des sciences de l'ingénieur.

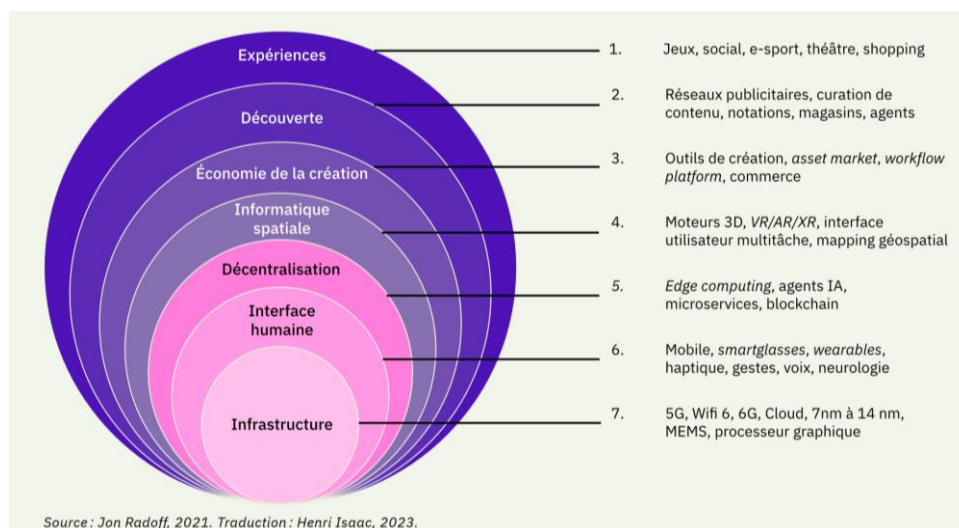


Figure 2 – Chaîne de valeur du Métavers Source : (Radoff J., 2021b; Renaissance Numérique, 2023)

A. Approche des mondes virtuels par « cas d'usage »

Les « cas d'usage » suivants sont conçus de manière à être représentatifs des principales offres, à date, de l'écosystème numérique. Leur construction est la première étape de la démarche développée dans ce rapport : **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 permettant de traduire les services proposés en nécessités techniques et infrastructurelles (terminaux, réseaux, centres de données)**. Ces spécifications permettront alors d'évaluer les impacts carbone et énergie liés à la proposition initiale (voir partie « III.C Directions technologiques et impacts sur le système numérique »).

Plusieurs champs d'application possibles sont concernés et décrits, avec des exemples d'offres déjà existantes ou en cours (exemples détaillés en Annexe) ainsi que des commentaires sur les fonctionnalités et modèles d'affaire associés :

- **Les conférences et réunions en ligne :**
 - Exemple d'application existante : salles de travail en réalité virtuelle
 - Type de terminal : casque de réalité mixte
 - Publics cible : entreprises, particuliers
 - Narratif : *La méta-conférence*
 - Ce narratif décrit l'évolution d'un service de téléconférence, des outils et fonctionnalités de productivité et des logiciels de collaboration.
- **Les 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)
 - Type de terminaux : console de jeux, casque de réalité virtuelle
 - Publics cible : joueurs, à domicile
 - Narratif : *Le « je » dans le jeu*

- Ce narratif décrit aussi l'intégration de réseaux sociaux et de producteurs de service à des jeux vidéo.
- **Les jeux vidéo et les réseaux sociaux en mobilité :**
 - Exemples de types de jeux concernés : jeux mobiles, jeux « battle-royale » (Pokemon Go, Fortnite)
 - Type de terminal : terminaux portables de réalité augmentée, de type « lunettes »
 - Publics cible : particuliers, en mobilité
 - Narratif : [à construire dans le cadre des travaux suivant ce rapport intermédiaire]
 - Ce narratif intègre notamment le *cloud computing*.
- **Les achats en ligne :**
 - Exemple de services concernés : plateforme dédiée de commerce en ligne, plateforme en ligne de grandes enseignes etc.
 - Type de terminal : casque ou lunettes de réalité virtuelle
 - Publics cible : particuliers
 - 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 adapté au marketing (marketing géolocalisé et émotionnel), l'abondance de données étant permis par des terminaux immersifs.
- **Les expériences culturelles :**
 - Exemple d'expérience : expériences immersives (« Eternelle Notre-Dame »)
 - Publics cible : particuliers
 - Narratifs : *Le métavers culturel* avec deux déclinaisons proposées : en présentiel, en distanciel.
- **Les jumeaux numériques :**
 - Exemples existants : systèmes d'information (solutions déployées dans l'industrie), jumeau numérique (applications dans l'industrie de l'énergie, de l'automobile)
 - Public cibles : entreprises industrielles et réseaux
 - Narratif : *Les jumeaux numériques*
- **La pornographie :**
 - Exemple de terminaux : équipements haptiques
 - Narratif : *Pornographie immersive*
 - Ce narratif intègre les vidéos 360°, la collecte de données pour un marketing individualisé éventuellement permis par des algorithmes intelligents.
- **L'informatique ubiquitaire :**
 - Ce narratif contiendrait un assistant virtuel et de multiples terminaux.
 - Narratif : [à construire dans le cadre des travaux suivant ce rapport intermédiaire]

- **La formation et l'apprentissage :**
 - Narratif : [à construire dans le cadre des travaux suivant ce rapport intermédiaire]
 - Une proximité est attendue avec le cas traitant les conférences et réunions en ligne.
- **La santé**
- **L'administration et les services en ligne**

Certains cas pourraient ne pas être traités : en effet, les cas choisis sont couvrants vis-à-vis des directions technologiques et donc des impacts sur le système numérique et son empreinte énergie-climat (voir analyse à la fin de la partie C - Directions technologiques et impacts sur le système numérique à ce sujet).

Certains de ces « cas d'usage » ont été transformés en narratifs afin de proposer une projection retranscrivant les tendances proposées.

Bien que l'expression *cas d'usage* semble consacrée, elle ne reflète pas nécessairement l'existence d'un usage puisque ce ne sont que des projections possibles dont il est question ici.

Excepté le narratif « *Un commerce pas si virtuel* » ci-dessous et « *la méta-conférence* » placé dans la partie II, l'ensemble des narratifs sont placés en Annexe 1.

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 étalages 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.

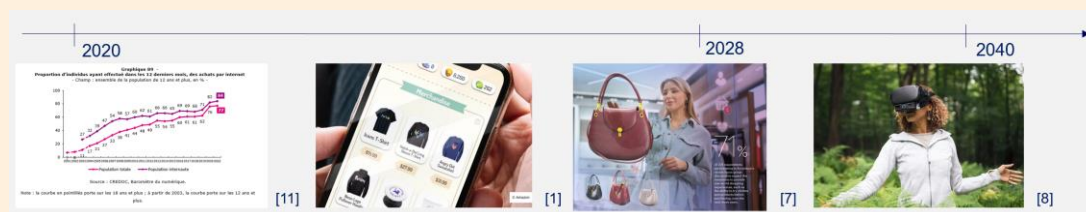
Les assistants de shopping virtuels, véritable personnification de l'UX (User Experience) et des parcours d'achat, décuplent les ventes grâce à leur potentiel de persuasion permis à la fois par des données cérébrales, corporelles et visuelles collectées en temps-réel, et à la fois un historique persistant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

B. Approche des mondes virtuels par directions technologiques

En complément de l'approche par « cas d'usage » centrée sur les utilisations possibles et suggérées que pourraient prendre les mondes virtuels, l'approche par directions technologiques va nous permettre de mettre en évidence les **caractéristiques techniques** que peuvent avoir les mondes virtuels et d'en décrire le contenu matériel requis, ceci afin de se rapprocher des

consommations énergétiques et 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'interaction entre le monde 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, actionneurs, robotique
Immersion	L'immersion est la déclinaison de la coexistence physique et numérique adaptée aux êtres humains (jusqu'à ne plus percevoir la différence entre le monde virtuel et le monde réel). Ex : Chat textuel, écran, avatar, sentiment de présence et de co-présence, casques VR, lunettes AR, capture volumétrique, projection holographique, équipements haptiques, interfaces cerveau-ordinateur
Simultanéité	Les interactions se font de plus en plus rapidement (jusqu'à être en temps-réel). Ex : La simultanéité est fonction de la latence
Localisation	Caractérise l'espace physique d'où l'on accède au monde virtuel : lieu fixe ? individuel ou partagé ? dédié ? en mobilité ? Ex : Selon les la localisation des participants, les réseaux utilisés peuvent être différents.
Persistance	Même en l'absence de l'utilisateur, le monde virtuel continue d'exister, il peut être modifié par un autre utilisateur ou un algorithme. Ex : personnages non joueurs, historiques de données traités pour des communications ciblées.
Virtualisation et remplissage	Concerne la richesse et la complexité des mondes virtuels, intégrés (AR) ou non (VR) avec le monde physique ainsi que le remplissage (en contenu, en méthode, et en modèles d'affaires) des mondes virtuels. Ex virtualisation : avatars, mondes / environnements, supportés par des créations 3D et IA Ex remplissage : créations de contenu monétisés, collecte et analyse des données, vente d'objets réels, monnaie, token, transactions, certificats, emplois, propriétés
Commercialisation	Capacité du système à commercialiser des biens, via des places de systèmes de marché centralisées ou décentralisées
Taille importante requise	La nécessité d'avoir un monde virtuel de grande taille pour que les services promis soient rendus. Ex : un évènement (concert) peut requérir de nombreux utilisateurs pour atteindre sa promesse de substituabilité à la même expérience physique dans le monde réel

Tableau 1 – Caractéristiques structurantes des mondes virtuels, définition
Source : The Shift Project, dans le cadre de ce rapport,
approche appuyée sur celle de (Weinberger M. & Gross D., 2023)

Pour s'approprier cette définition complexe mais néanmoins nécessaire pour démarrer les analyses énergétiques et climatiques, l'exemple de la plateforme de jeu Fortnite³ est emblématique :

- 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 un minimum de **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 et remplissage**, le rendu de l'univers dans son ensemble et des interactions des avatars avec lui appelle un ensemble de calculs ;
- L'expérience de jeu et la **commercialisation** passent par une collecte de données colossale en volume : de l'ordre de 5 Po par mois (Amazon Web Services, 2018) ;
- Fortnite gère sa **taille** avec des options de jeu adaptées (bac à sable en plusieurs secteurs, battle royale avec un nombre fini de joueurs) pour son nombre d'utilisateurs importants (8 millions en simultané) et organise des événements dont la vocation est de rassembler l'ensemble des utilisateurs au même endroit.

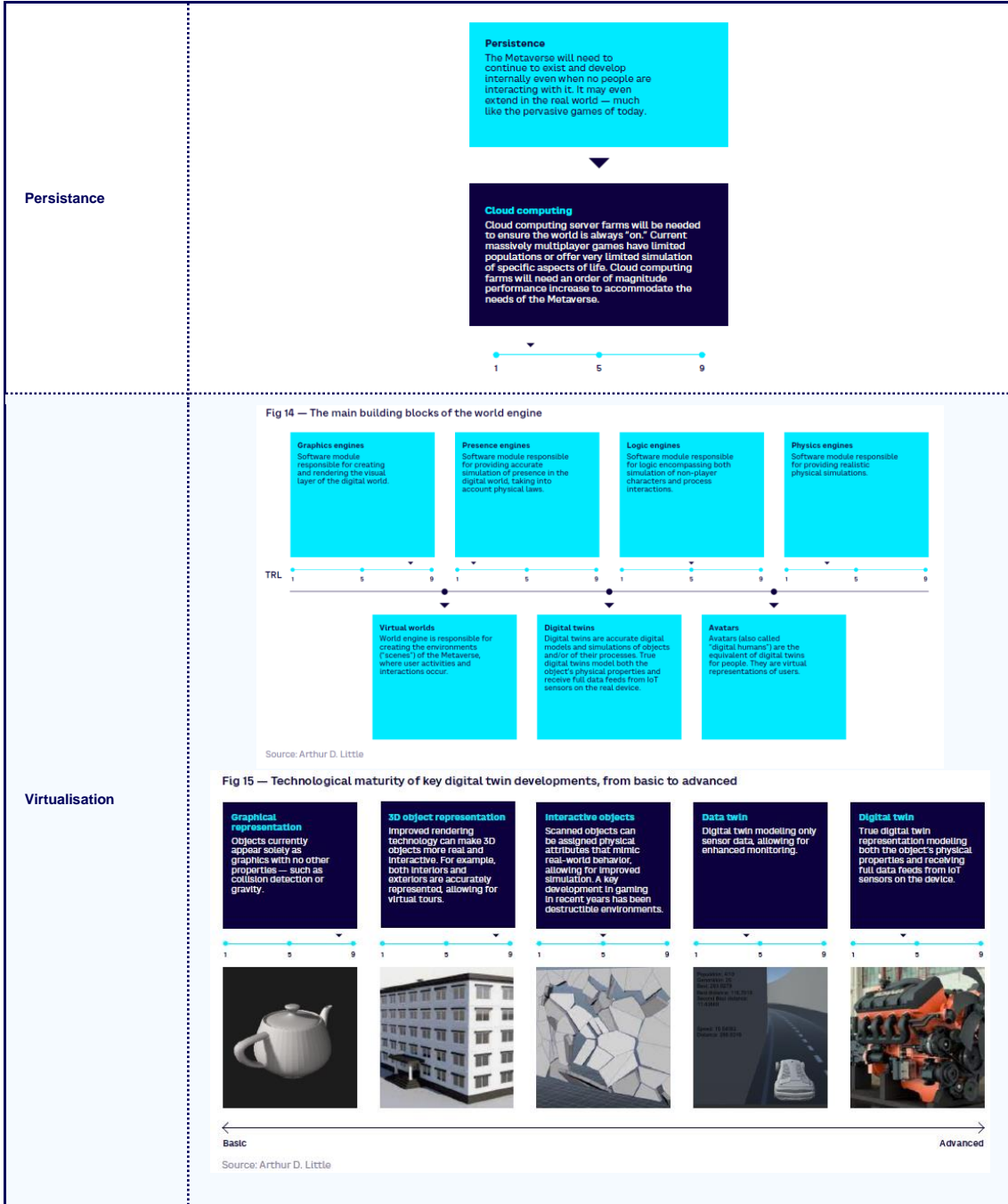
Certaines caractéristiques des métavers n'ont pas été retenues dans cette synthèse car non trivialement liées aux impacts énergétiques et climatiques. Par exemple, l'interopérabilité entre mondes virtuels n'est pas forcément synonyme d'empreinte énergie-climat plus ou moins importante : est-ce que ce sont plusieurs mondes virtuels interopérables ou un seul monopolistique qui auront l'adoption la plus franche et l'empreinte la plus élevée ? De même, la capacité de scalabilité est plutôt opérationnelle et n'est pas directement liée à l'empreinte.

Notre définition inclut donc des mondes virtuels qui diffèrent en termes de caractéristiques présentées. La force 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 « III.C Directions technologiques et impacts sur le système numérique »). Mais la nécessité d'emprunter cette direction technologique ou non est aussi un élément important ; de même que le degré auquel la direction technologique est empruntée. Ainsi les caractéristiques peuvent être :

- Qualifiées en termes d'intérêt pour le monde virtuel : indispensable au fonctionnement du monde virtuel, utile, optionnel ;
- Quantifiées, particulièrement en termes de tendances énergétiques Les échelles de maturité technologique comme celles proposées dans le rapport « The Metaverse, beyond fantasy » (Arthur D Little, 2022a) peuvent être un premier support à cette quantification.

³ 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.

<p>Caractéristiques</p>	<p align="center">Technology maturity (Arthur D Little, 2022a)</p> <p>TRL 1 : basic principles, TRL 3 : proof of concept, TRL 6 : prototype, TRL 7 : operational, TRL 9 : operational and qualified in production</p>
<p>Coexistence physique et numérique</p>	<p>Fig 12 — Types of human-machine interface and their technology maturity</p> <p>Input</p> <ul style="list-style-type: none"> Non-hands-free interfaces (Keyboard, mouse, touch screen): TRL 1-5 Computer vision (Real-time gesture/eye movement recognition): TRL 1-5 Digital textiles (Alternative for hands-free interaction using smart textiles): TRL 1-5 On-body interaction (Human body as an interactive surface): TRL 1-5 Brain computer interfaces (To allow user to send inputs to the machine by the power of thought): TRL 1-5 <p>Output</p> <ul style="list-style-type: none"> VR/AR headsets (Enable an immersive experience of the virtual world through sight and hearing): TRL 1-5 Holography (A 3D image of a subject seen in the real world without the aid of special glasses): TRL 1-5 Haptic interfaces (Allow to complement the experience with haptic feedback): TRL 1-5 Brain computer interfaces (Provide sensory outputs to all five senses): TRL 1-5 <p>Source: Arthur D. Little</p>
<p>Immersion</p>	<p>Fig 13 — The spectrum of real and virtual mixes that constitutes XR</p> <p>Real world (Perceived reality through our 5 senses): TRL 1-5</p> <p>Augmented reality (AR) (Virtual information on objects overlaid on the real world. Superimposed layers on top of reality without taking into account the context): TRL 1-5</p> <p>Mixed reality (MR) (Real and virtual worlds are merged so physical and digital objects interact. Superimpose layers on top of reality by taking into account the context): TRL 1-5</p> <p>Augmented Virtuality (AV) (Real objects or information are placed in the virtual world): TRL 1-5</p> <p>Virtual reality (VR) (Users are fully immersed in a simulated environment. The virtual world is perceived through sight and hearing and other senses): TRL 1-5</p> <p>"Brain in a vat" (The user perceives and interacts with the virtual world directly through brain-computer interfaces and the five senses): TRL 1-5</p> <p>Immersion (The Metaverse will need to allow users to become totally engrossed and involved in the experience — effectively living in another universe): TRL 1-5</p> <p>Local computing power (Significant local computing power is needed to achieve an immersive VR/AR experience. Local computing will require an order of magnitude improvement in performance to achieve Metaverse-required levels): TRL 1-5</p> <p>Source: Arthur D. Little</p>
<p>Simultanéité</p> <p>Taille</p> <p>Localisation</p>	<p>Interaction</p> <p>The Metaverse will require complete, near instantaneous, two-way flow of information between computer and user.</p> <p>Communications</p> <p>New, low-latency, near instantaneous communications methods will need to be developed to achieve interaction levels needed for truly immersive Metaverses to exist. Networks, including internet backbones, will require perhaps an order of magnitude in throughput increase to handle the new data streams.</p> <p>TRL 1 5 9</p>



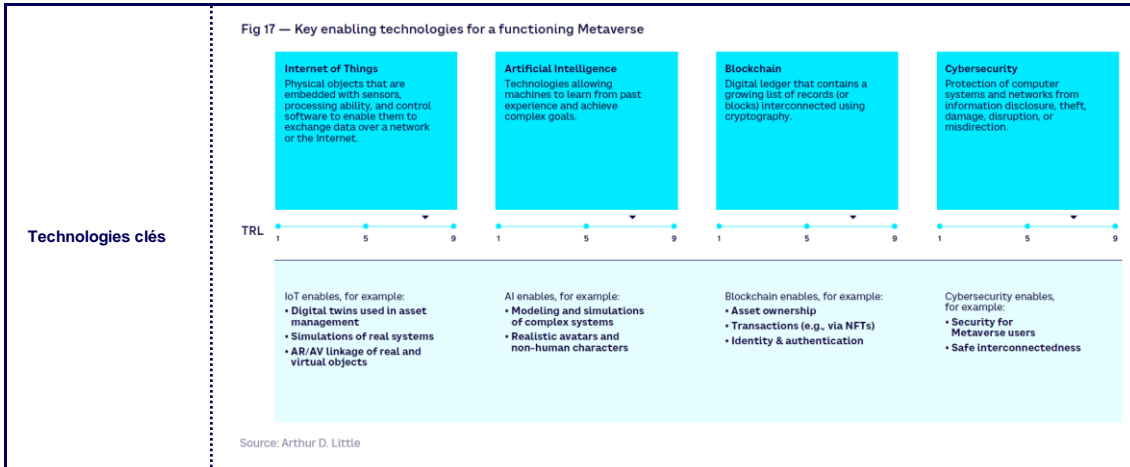


Tableau 2 – Croisement de l'approche par directions technologiques (Tableau 1) avec celle des échelles de maturité technologique

Source : The Shift Project dans le cas de ce rapport ; (Arthur D Little, 2022a)

Cette dernière catégorie des « Technologies clés » traduit **le rôle essentiel qu'ont certaines technologies dans la faisabilité de changement d'échelle les mondes virtuels : Web 3.0, blockchains, jetons non fongibles (NFT), 5G, jumeaux numériques et intelligence artificielle** sont de celles identifiées comme étant intimement liées à l'émergence de mondes virtuels de grande ampleur (Ericsson, 2022).

Cette approche nous permet d'être robuste à tout « cas d'usage », même non identifié aujourd'hui, les 6 des « cas d'usage » identifiés dans ce rapport couvrant bien toutes les directions technologiques étudiées :

Caractéristiques	Les conférences et réunions en ligne	Les jeux vidéo	Les jeux vidéo et les réseaux sociaux en mobilité	Les achats en ligne	Les expériences culturelles	Les jumeaux numériques
Coexistence physique et numérique						Indispensable
Immersion		Indispensable			Indispensable	
Simultanéité	Indispensable					
Taille				Indispensable		
Localisation			Mobilité indispensable			
Persistance						
Virtualisation					Indispensable	Indispensable
Commercialisation				Indispensable		

C. Directions technologiques et impacts sur le système numérique : présentation de la Matrice

Ces directions technologiques que prennent et que peuvent prendre les mondes virtuels viennent structurer et dimensionner matériellement et énergétiquement notre système numérique. **La matrice ci-dessous vise à expliciter les effets induits par les offres et usages des mondes virtuels sur les trois tiers du système numérique : terminaux, centres de données, réseaux.**

Par exemple, si la direction technologique de *virtualisation* qui concerne la richesse et la complexité des mondes virtuels est prise avec une intensité croissante, l'infrastructure numérique s'y adaptera et à différentes échelles de temps afin de la rendre possible. Requérir plus de calculs aura un effet instantané : en consommation d'énergie et cela quelle que soit la taille du monde virtuel ; mais aussi en achats de serveurs, voire en implantation de nouveaux centres de données si la *taille* du monde virtuel est importante ou si l'adoption de plusieurs mondes virtuels est large. De plus, requérir plus de puissance de calcul pour obtenir ces rendus plus réalistes aura par divers mécanismes un effet à plus long-terme impliquant des terminaux ou des serveurs plus puissants, peut-être par la recherche et le développement de nouveaux processeurs et de nouveaux algorithmes si la direction technologique poursuivie est largement partagée (ce qui est le cas aujourd'hui). Cette exigence de rendus réalistes couplée avec des directions technologiques d'*immersion* ou de *coexistence physique et numérique* pourrait impliquer une augmentation des volumes de données à faire transiter sur les réseaux d'où pour les réseaux des effets instantanés (augmentation de leur consommation d'énergie sur sa partie variable) mais aussi des effets de long-terme (adaptation des réseaux à cette demande en déploiement capacitaire mais aussi nouvelles générations de réseaux optimisées pour des demandes amplifiées).

Autre exemple : si les directions d'*immersion* et de *commercialisation* sont prises conjointement, le flux de données de l'expérience immersive devra transiter, ce qui engendre des débits montants et descendants élevés et donc un impact sur la consommation énergétique des réseaux, voire sur le dimensionnement des réseaux futurs. Couplé avec la *simultanéité*, cela ajoute une exigence de latence faible, qui s'ajoutera à celles sur les débits.

Ces exemples illustrent :

- L'hétérogénéité des mécanismes d'impact des directions technologiques sur l'infrastructure numérique : purement physiques ou techniques, économiques, sociétaux, issus de stratégie privées, publiques ou mixtes.
- Les impacts peuvent advenir à des échelles de temps différentes. Un serveur peut par exemple être acheté presque instantanément (hors contrainte ou tension d'approvisionnement). L'implantation d'un centre de données ou le déploiement de réseaux d'accès peut prendre un temps non négligeable, et est en fait motivé par des projections à moyen terme sur les évolutions des usages. Une fois implanté, la nécessité de le rentabiliser va de plus pousser les acteurs à favoriser l'émergence des usages prévus, influençant ainsi des dynamiques de long terme.
- Selon la combinaison et l'intensité des directions prises, les impacts peuvent être d'ordre de grandeur différents.

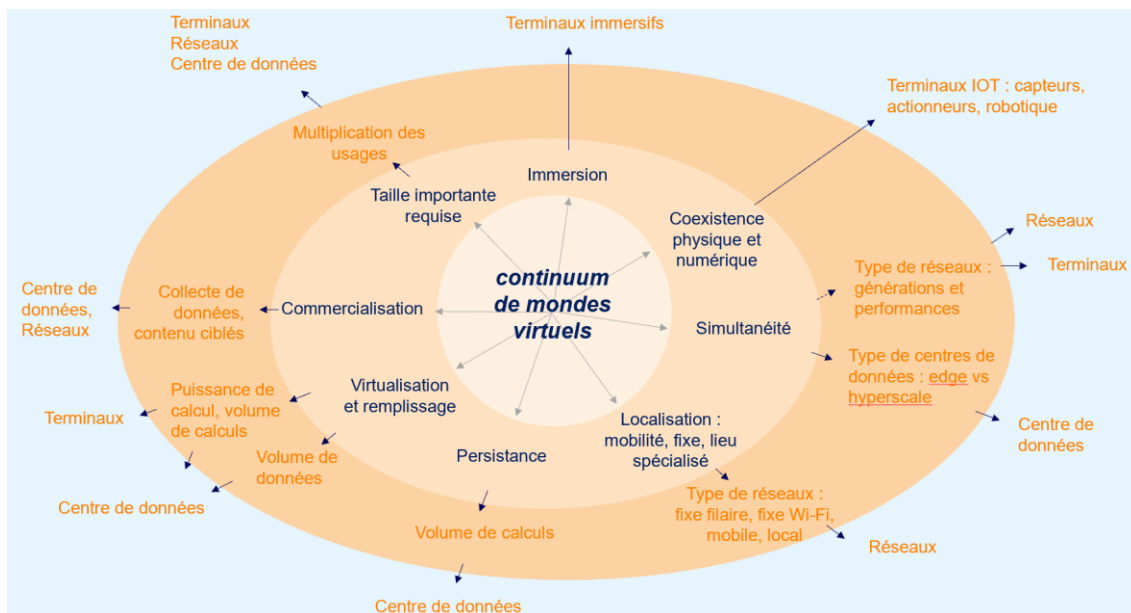


Figure 3 – Matrice de traduction des directions technologiques possibles pour les mondes virtuels en impacts physiques et matériels pour le système numérique
 Source : The Shift Project, dans le cadre de ce rapport

Cette matrice à vocation à inscrire des choix de développement technologique dans une dimension systémique, infrastructurelle et de long-terme afin de les relier aux dynamiques énergétiques résultantes :

- Quelles directions technologiques nous entraînent vers une consommation accrue de terminaux (et donc une dépendance) ?
- Quelles directions technologiques exercent une pression sur l’extension des infrastructures réseaux mobiles ?
- Quelles directions technologiques sont des rouages de l’inflation des volumes de données ?

La direction technologique *taille*, dès lors qu’elle est couplée à une autre direction technologique, joue nécessairement un rôle important d’inflation des impacts car venant multiplier l’inventaire matériel et incitant au développement d’infrastructures.

La matrice se lit en partant du centre :

- **Le premier cercle** représente le monde virtuel analysé, qui peut 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 mécanismes par lesquels **une offre ou un usage vient induire un effet sur l’un des trois tiers du système numérique**. Ces mécanismes sont hétérogènes : à la fois techniques, économiques et sociétaux.
- Enfin, on trouve les **impacts sur l’infrastructure numérique, qu’il s’agit de retranscrire ensuite en énergie et en émissions de gaz à effets de serre**.

Inscription de cette matrice dans l'ensemble des méthodologies

Cette matrice permet d'**expliciter les conséquences des choix 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. Cette matrice peut aussi être une aide à la décision dans l'évolution de ces choix numériques vers des modèles d'affaires et d'organisation soutenables.

En termes de périmètre, et au sens des trois types d'action non fongibles de la Net Zero Initiative (NZI) (Net Zero Initiative, 2022), cette matrice s'inscrit sur le pilier « A » 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.

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. Les principes 8 à 10 rappellent que les actions d'évitement d'émissions et de contribution à la séquestration durable dans les puits de carbone sont à favoriser à l'intérieur des chaînes de valeur et ne sont pas comptabilisables de manière positive dans une mesure d'empreinte carbone.

Cette matrice est à destination des acteurs et parties prenantes des mondes virtuels et du secteur numérique, privés comme publics, comme une aide à la conception d'offres et d'infrastructures moins carbonées afin d'encourager une construction compatible avec une sobriété numérique systémique, en ce qu'elle permet de réfléchir à des scénarios d'offres et d'usages et d'en observer les résultats d'empreinte collective.

Si cette matrice indique les écueils énergétiques d'offres numériques, elle ne répond pas à la question importante de la raison d'être d'une entreprise dans un monde décarboné, ni ne se substitue à un bilan carbone nécessaire au pilotage de la transformation des entreprises.

En cherchant à décrire les conséquences collectives énergétiques et climatiques d'offres numériques, cette matrice ne présente pas le même objectif qu'une analyse de cycle de vie, et pourrait être utilisée de manière complémentaire.

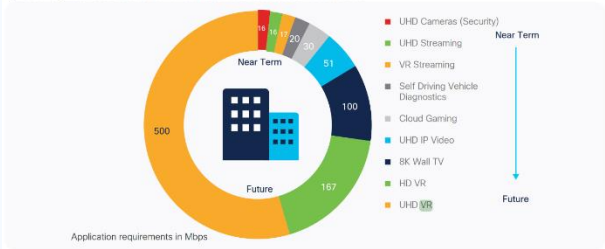
IV. Quantification des impacts énergétiques du continuum de mondes virtuels sur l'infrastructure réseau

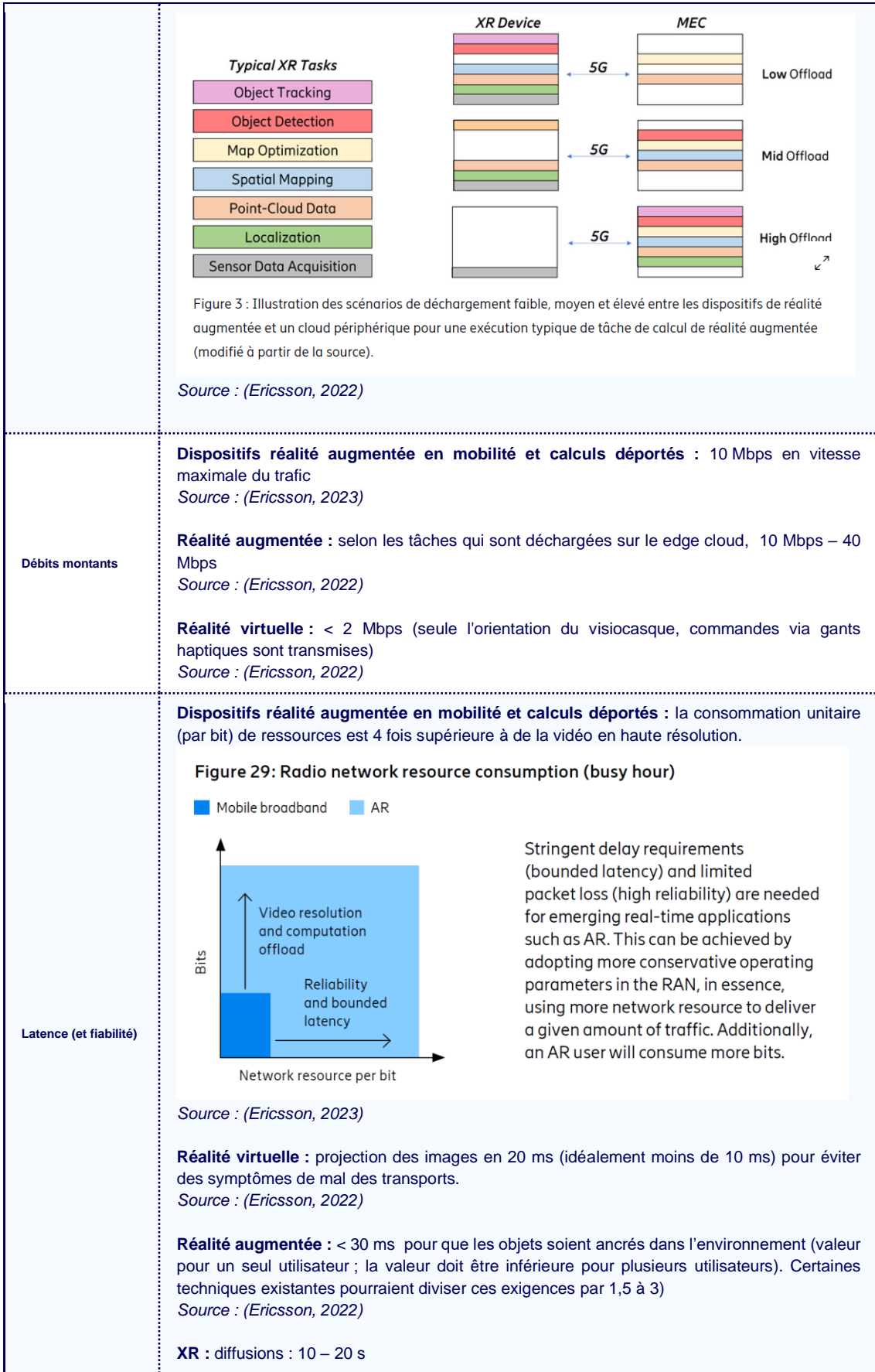
La matrice présentée ci-dessus (voir III.C) démontre que déployer et adopter l'offre des mondes virtuels ne se fait et ne se fera pas à système numérique constant, que le système numérique s'adapte, à la fois d'un point de vue capacitaire mais aussi en termes d'organisation, de fonctionnalités et d'usages.

L'objectif de cette partie est de quantifier la partie de la matrice dédiée aux réseaux d'accès mobiles afin d'apporter une réponse chiffrée à la question décisive : quel impact les mondes virtuels ont-ils sur le déploiement de notre infrastructure réseau et où cela nous embarque d'un point de vue énergétique et climatique ?

La méthode pour répondre à cette question est documentée dans notre rapport « Stratégie pour des réseaux sobres et résilients » (The Shift Project, 2023a). Si les résultats s'appliqueront au cas français, la méthodologie est en revanche construite de manière à être à terme applicable à d'autres pays et au niveau européen.

L'importance de cette question peut être appréciée par de premiers indicateurs reflétant la pression exercée par les mondes virtuels sur le déploiement des réseaux et qui seront les données d'entrées du modèle de réseaux.

Données d'entrées	Description
<p>Débits descendants</p>	<p>Dispositifs réalité augmentée en mobilité et calculs déportés : 50 Mbps en vitesse maximale du trafic <i>Source : (Ericsson, 2023)</i></p> <p>VR streaming : 17 Mbps HD VR : 167 Mbps UHD VR : 500 Mbps UHD cameras : 16 Mbps Cloud gaming : 30 Mbps <i>Source : (Cisco, 2020)</i></p>  <p>Réalité virtuelle : 30 Mbps (pour un flux codé H.264 2K) - 800 Mbps (pour un flux codé H.266 8K) <i>Source : (Ericsson, 2022; GSMA, 2019)</i></p> <p>Réalité augmentée : selon les tâches qui sont reportées sur le edge cloud (schéma ci-dessous), 20 Mbps – 80 Mbps</p>



	<p>Source : (Ericsson, 2022; GSMA, 2019)</p> <p>Vidéoconférence XR : 200 ms Source : (Ericsson, 2022; GSMA, 2019)</p> <p>Jeux en ligne ou jeux sportifs engageants : < 20 ms Source : (Ericsson, 2022; GSMA, 2019)</p>
Augmentation de la demande ou déplacement des horaires et des lieux	<p>Dispositifs réalité augmentée en mobilité et calculs déportés : usage important de 2h par jour Source : (Ericsson, 2023)</p>
Modifications de l'infrastructure proposées	<p>Dispositifs réalité augmentée en mobilité et calculs déportés :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Nouvelles bandes de fréquences autour de 3-7GHz • Direction du trafic selon les débits ou selon les latences • Densification du réseau • La génération mobile 5G ne suffira pas à remplir les spécifications appelées • Fréquences 7-15 GHz exploitées • Calculs déportés <p>Source : (Ericsson, 2023)</p> <p>Edge-cloud (délocalisation, déport ou décharge des tâches vers le cloud) essentiel pour permettre le métavers en rendant les appareils XR économiquement abordables, légers mais puissants, et connectés avec une durée de vie de batterie suffisante. Source : (Ericsson, 2022)</p>
Projection de demande et d'usages	<p>Dispositifs réalité augmentée en mobilité et calculs déportés : 20-35 millions de dispositifs en 2030 en Amérique du Nord et taux de renouvellement de 30 %. Source : (Ericsson, 2023)</p>

Tableau 3 – Spécifications des mondes virtuels pour le dimensionnement des réseaux mobiles
Source : The Shift Project, dans le cadre de ce rapport

Prenant en compte l'ensemble des performances et des projections de demande et d'usages, Ericsson propose la dynamique ci-dessous pour les réseaux mobiles (Ericsson, 2023).

Figure 30: AR and mobile broadband traffic and capacity evolution

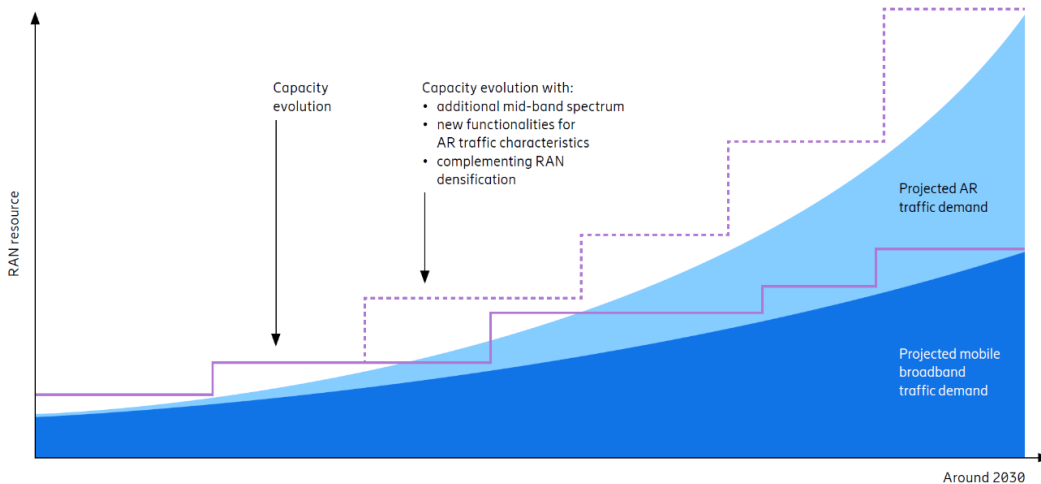


Figure 4 – Dynamique en projection de demande et capacité pour les réseaux mobiles d'Ericsson
Source : (Ericsson, 2023)

Autres références possibles à étudier : (Arthur D Little, 2022b, 2023; Crédit suisse, 2022).

03

**MÉTHODOLOGIE
DE PONDÉRATION
DES DIRECTIONS
TECHNOLOGIQUES POUR
LES MONDES VIRTUELS**

Méthodologie de pondération des directions technologiques pour les mondes virtuels

Il s'agit de décliner la matrice de qualification présentée dans le chapitre III.C (Directions technologiques et impacts sur le système numérique) sur différents « cas d'usage » de mondes virtuels possibles, identifiés dans le chapitre III.A (Approche des mondes virtuels par « cas d'usage »), afin de déterminer pour chacun d'entre eux les directions technologiques suivies et les pressions exercées sur l'empreinte climatique du système numérique. Pour chaque cas, quels tiers du système numérique est impacté : les terminaux, les centres de données, les réseaux ? A quel point ? Est-ce indispensable pour rendre le service souhaité ?

V. Méthodologie et étapes

Trois étapes permettent d'évaluer les conséquences énergie-climat des choix technologiques possibles pour un « cas d'usage » :

- **Etape n°1** : Décrire le « cas d'usage » étudié ; la matrice permet dès cette étape d'analyser les différentes directions technologiques impliquées.
- **Etape n°2** : Quantifier les tendances et l'empreinte énergétique et climatique.
- **Etape n°3** : Discuter pour le « cas d'usage » proposé l'apport et la nécessité des directions technologiques suivies face à leurs coûts énergétiques et climatiques.

VI. Application aux réunions et conférences en ligne

A. Description du « cas d'usage »

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 ainsi que sur des visions proposées et partagées au sein de l'écosystème numérique. Ce cas est intitulé « méta-conférence » par analogie avec audio-conférence et visio-conférence afin de mettre en avant le fait que la réunion ou la conférence utilisent comme vecteur de communication un « métavers ».

La méta-conférence

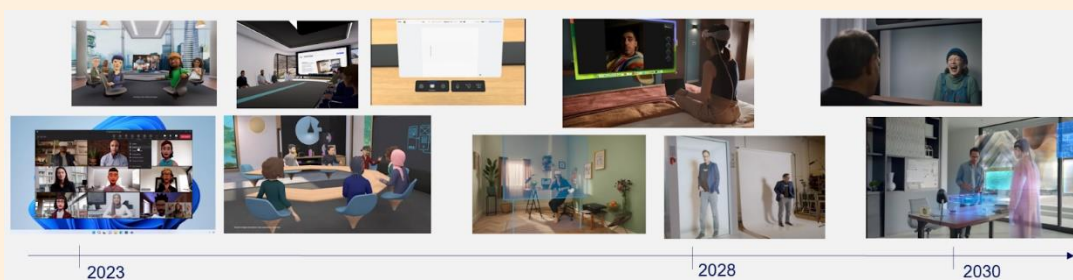
Dès 2023, les avatars se fraient un chemin discret dans les outils de visio-conférence [1]. Tout d'abord en complément de l'audio ou en substitution de la vidéo, pour un public amateur et pour un public professionnel [2,3] séduit par le sentiment de confort et d'inclusion [4].

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

Dans les outils de visio-conférence, les fonctionnalités de collaboration immersive s'enrichissent : elles sont multi-tâches 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, accès à des modèles et jumeaux numériques et salons virtuels pour la commercialisation [6].

L'adoption massive de la méta-conférence par les professionnels notamment, pourrait être déclenchée par la réalité augmentée, éventuellement mixte [7], 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/eYiU9mV7-6q?si=QMo60uABv6H-aDAL>, Horizon Workrooms - Remote Collaboration Reimagined, Meta Quest, 19 août 2021, https://youtu.be/lqj50lxRrKQ?si=y6xLioviqH0x1_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=zW0YN47RiPD0jPI>
- [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 QUicktack, 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>

Images

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

Caractéristiques	Les réunions et conférence en ligne	Appréciation
Coexistence physique et numérique	Optionnel	
Immersion	Utile	
Simultanéité	Indispensable	
Taille	Optionnel	
Localisation	Utile	
Persistance	Optionnel	
Virtualisation	Utile	
Commercialisation	Optionnel	

Tableau 4 – 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

La méta-conférence est une extension de l’audio-conférence ou de la vidéo-conférence avec des fonctionnalités supplémentaires de type « mondes virtuels » dont on peut estimer les impacts sur le système numérique en utilisant la matrice :

- **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 éventuellement en *mobilité* pourraient nécessiter 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.

B. Quantification des tendances et empreintes énergétiques et climatiques

Ajout 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"> D'ici 2030, même nombre d'utilisateurs qu'Outlook en 2015 : 400 millions (Microsoft, 2015) Durée de vie des casques : 2 ans Casque VR : OLED, batterie, calcul intégré (CEPIR, 2023) 	28	27	0.4	81	80	1
Simultanéité : réseaux	<ul style="list-style-type: none"> D'ici 2030, même nombre d'utilisateurs qu'Outlook en 2015 : 400 millions (Microsoft, 2015) 1h d'utilisation par jour (Gartner, 2022) Débits descendants : 17 Mbps (Cisco, 2020) 	16	2	15	40	5	34

Le « cas d'usage » méta-conférence de réunions et de conférences dans le métavers pourrait conduire à une empreinte énergie-climat additionnelle de 44 MtCO₂e à l'horizon 2030 (ce qui correspond à 2% de l'empreinte du secteur en 2022) :

- **L'immersion** correspondant à : 28 MtCO₂e, principalement dû à la fabrication des terminaux ;
- **La simultanéité**, couplée à la direction **d'immersion**, (sans l'immersion, les débits ne seraient pas de 17 Mbps mais potentiellement de 3 Mbps seulement au maximum) correspondant à : 16 MtCO₂e.

Remarque : Il s'agit d'un premier calcul, un ensemble d'éléments n'ayant pas été compté (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).

C. De l'apport et de la nécessité des directions technologiques suivies face à leurs coûts énergétiques et climatiques

A partir de ces coûts énergétiques et carbone, imputables pour partie à l'immersion et pour partie à la simultanéité, deux types de questions méthodologiques sont posées sur ce cas de la « méta-conférence » afin d'identifier s'il existe (il peut ne pas en exister) des conditions dans lesquels ce « cas d'usage » est un atout à généraliser, à savoir un outil et un usage bas-carbone, ayant sa place dans un monde décarboné ou à décarboner.

Se donner les moyens de concevoir un système numérique sobre et résilient :

- Identifier les alternatives :** L'évaluation pour chacune des directions technologiques de la « méta-conférence » en trois catégories indispensable / utile / optionnel (réalisée en fin de partie A - Description du « cas d'usage ») permet de se recentrer sur la valeur ajoutée principale de la réunion et de la conférence en ligne : la simultanéité plutôt que l'immersion ici. Ceci afin de pouvoir identifier des alternatives moins carbonées. Par exemple, pour le service de réunion ou de conférence en ligne, l'appel téléphonique, l'audio-conférence ou la visio-conférence peuvent être des options existantes moins carbonées. D'autres options étant peut-être à envisager et concevoir.
- Analyser les contreparties de chaque direction technologique face à la considération de leur coût énergétique et climatique :** En interrogeant pour chacune des caractéristiques technologiques l'utilité marginale apportée face au coût environnemental, cela permet un arbitrage éclairé : la convivialité et la productivité (a priori apportée par la « méta-conférence ») sont-elles soutenables, explicables, quantifiables et justifiables par rapport au coût environnemental ?

Caractéristiques	Les réunions et conférence en ligne	Coûts et trajectoires énergétiques et environnementales	Contreparties (avancées dans les offres analysées pour la rédaction du narratif en partie A - Description du « cas d'usage »)
Immersion	Utile	XX MtCO ₂ e en 2030	Convivialité, productivité
Simultanéité	Indispensable	YY MtCO ₂ e en 2030 (dont une part importante due à l'immersion, et à la mobilité)	Productivité

A noter que plusieurs métiers ou disciplines peuvent être nécessaires pour réaliser cet arbitrage.

De plus, les coûts énergétiques et environnementaux sont à envisager temporellement : ces coûts sont-ils valables sur une certaine période de temps ? Et les contreparties ? Quelles sont les implications à terme sur le système numérique ?

Le cas des contreparties ayant vocation à décarboner d'autres chaînes de valeur : les quelques pièges :

La « méta-conférence », voire plus largement les métavers en considérant le télétravail, promettent de réduire les émissions de gaz à effets de serre (jusqu'à 10-23% de 10 GtCO₂e ! (Zhao N., 2023)). Dans cette perspective, cette contrepartie est à considérer avec méthode :

- Tout d'abord, le périmètre doit être exhaustif et ne pas se limiter aux émissions évitées.

- Ensuite, le contrefactuel : pour le cas de la « méta-conférence », la question n'est pas de comparer une heure de méta-conférence avec un vol en avion pour se rendre à un rendez-vous ou à une journée de télétravail, puisque les réunions et les conférences en ligne se font déjà, là où le télétravail est possible, autorisé et encouragé. Dans ces cas, le bon contrefactuel est en fait de comparer la « méta-conférence » à la visio-conférence. Par ailleurs, le contrefactuel « mobilités carbonées », qui serait adapté si la « méta-conférence » permettait d'encourager de nouveaux télétravailleurs, se décarbone aussi : voitures électriques, mobilités actives, décarbonation de la mobilité longue-distance.
- Enfin, les différents effets sur les émissions de gaz à effets de serre, potentiellement indirects, doivent être listés et si possible évalués. « L'étude sur la caractérisation des effets rebond induits par le télétravail » (ADEME, 2020) fait par exemple état de 6 effets principaux (rebond direct), de 6 effets systémiques non modélisables et de 3 effets peu significatifs à court-terme.
- Cette étude illustre aussi la variété de situations différentes de télétravail menant à des résultats différents et met en évidence des recommandations sur les conditions de télétravail favorisant les réductions d'émissions de gaz à effets de serre (ADEME, 2020).

VII. Autres applications

Dans l'optique de conclure sur les modalités de mondes virtuels et de typologies de systèmes numériques associés à encourager ou à dissuader, quel prochain cas d'usage à étudier ?

VIII. Quelles sont les modalités de mondes virtuels à encourager et celles à dissuader ?

En résonance avec nos travaux sur les conditions de pertinence de déploiement des technologies connectées (The Shift Project, 2020) ces premiers résultats confortent que l'étude des apports nets des utilisations possibles de monde virtuels ne peut être indifférenciée selon leurs contextes d'utilisation. Les empreintes énergétiques induites sur le système numérique peuvent en effet être radicalement différentes.

Il convient donc de réaliser systématiquement, pour chaque modalité de monde virtuel possible, en incluant les hypothèses d'adoption et d'utilisation, une appréciation méthodologique et quantifiée des coûts énergétiques et environnementaux induits sur le système numérique ; cette appréciation se doit d'être exhaustive plutôt que partielle.

Si d'autres utilisations de mondes virtuels sont à étudier pour pouvoir clore ce chapitre, les premiers résultats suivants permettent d'identifier certaines combinaisons de caractéristiques de mondes virtuels aux effets fortement inflationnistes sur les impacts énergie-climat :

- Le cas de la réunion en ligne et de la conférence en ligne a mis en évidence que la combinaison de direction (**simultanéité x immersion**) appelle des besoins particuliers en terminaux et réseaux (notamment, pour ces derniers, en engendrant un besoin en débit descendants très important). Il soulève également les questions liées aux usages

de conférences en ligne et de travail à distance de manière générale : sa mise en place peut en effet substituer l'usage du système numérique à celui du système de mobilité et ainsi contribuer à la réduction d'émissions carbonées en dehors de sa chaîne de valeur, mais sous des conditions de pertinence à documenter du point de vue des usages auxquels il se substitue (effets rebonds de mobilité, logement, bâtiment, relocalisation etc.). Les conditions de pertinence en termes de mécanisme de substitution étant aussi à instruire (la conférence immersive permet-elle d'attirer de nouveaux utilisateurs vers la conférence à distance, ou bien propose-t-elle simplement un nouveau service, plus gourmands en ressource, aux utilisateurs de la conférence vidéo classique ?).

- La brève analyse du cas Fortnite relié aux travaux de la CNIL (LINC, CNIL, 2023) met en évidence que la combinaison de directions (**immersion x commercialisation**) implique des collectes et des analyses de données en volume très important, avec des empreintes environnementales associées élevées.
- L'analyse du cas du cloud computing par l'ADEME (ADEME, 2022) met en évidence que la combinaison de directions (**mobilité x simultanété**) implique une empreinte environnementale importante. On peut en déduire qu'en particulier la combinaison de directions (**immersion x simultanété x mobilité**) vient exacerber les effets identifiés dans le cas du *cloud computing*, les données échangées étant d'autant plus nombreuses.
- La **taille minimale requise** pour que les services promis par le monde virtuel soient assurés, a un effet important sur le niveau d'impact final, en particulier dès lors qu'elle est couplée à une autre direction.

Par ailleurs nous recherchons des références pour nous aider dans la construction et l'évaluation quantifiée des directions suivantes :

- Direction de **virtualisation** et de **persistance**,
- Direction de **coexistence physique et numérique** et les couplages possibles avec **persistance** et **virtualisation**.

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) à la fois agents et responsables de cette 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).

Ces premières conclusions sont formulées dans le cadre du rapport intermédiaire, produit lors du point d'étape de nos travaux sur le sujet. Cela implique plusieurs limites et prolongations possibles aux travaux :

- Ce rapport intermédiaire met en évidence des modalités de mondes virtuels qui s'avèrent incompatibles avec le cadre énergétique et climatique. La question posée est cependant bien celle des conditions de pertinence. Notre méthode permettra ainsi tout à fait d'identifier si des « cas d'usage » à documenter peuvent être déployés de manière positivement impactante d'un point de vue énergie-climat.
- Des exercices de bouclage au niveau français pourraient disqualifier certaines modalités additionnelles, en ce que les ressources nécessaires pourraient ne pas être disponibles (dimensionnements possibles des infrastructures réseaux, disponibilité électrique etc.).

- 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, pollution des sols etc.), mais également pour des motifs sociaux, économiques, cognitifs, éthiques ou encore juridiques puisque de fait le métavers, à l'image du numérique, est un objet social. Les relations sociales prévues dans les offres de mondes virtuels que nous avons étudiées pourraient ainsi être considérées selon des prismes évaluant les effets sociétaux des solutions (IHEST, 2023; Renaissance Numérique, 2023).

04

CONCLUSION

Conclusion

La pérennité de nos usages numériques essentiels ne sera garantie que par l'adaptation de nos systèmes à la double contrainte carbone. L'infléchissement de notre système numérique vers un système numérique sobre et résilient passe à la fois par la maîtrise de nos volumes de terminaux et de nos volumes de données ; l'inflexion des volumes de données étant la condition nécessaire à l'avènement de la maîtrise de la consommation énergétique par les gains d'efficacité énergétique (The Shift Project, 2021).

En regard, cette analyse des mondes virtuels décrit les conséquences des dynamiques prises en termes d'augmentation des volumes de terminaux, de données et de calculs. A ce stade des travaux, elle permet de visualiser de premières tendances indiquant qu'entériner ces dynamiques et les traduire en politiques publiques (ou en l'absence de politiques publiques) et en stratégies économiques aurait pour effet de placer le numérique sur des trajectoires insoutenables, le rendant incompatible avec l'Accord de Paris et perpétuant nos dépendances énergétiques et matérielles délétères.

Aussi, cette analyse des mondes virtuels propose la déclinaison d'une méthodologie de mise en arbitrage des options de développement, de déploiement et d'adoption technologique à l'aune des coûts environnementaux induits sur le système numérique et des apports des mondes virtuels.

Ce travail sera poursuivi entre les ateliers collaboratifs du 14 décembre 2023 et la publication du rapport final au premier trimestre 2024, ainsi qu'au travers des travaux suivants de The Shift Project sur les caractéristiques d'un système européen adapté à la double contrainte carbone, sobre et résilient.



ANNEXE 1

—

« CAS D'USAGE » ET NARRATIFS



Annexe 1 : « Cas d'usage » et narratifs

Ces narratifs visent à décrire les directions technologiques prises et les modalités d'usage des mondes virtuels envisagées par l'écosystème numérique (voir partie III.A - l'Approche des mondes virtuels par « cas d'usage »).

2 narratifs sont détaillés dans le cœur du rapport, dont un fait objet d'une première évaluation environnementale et d'une première discussion :

- Les achats en ligne : *Un commerce pas si virtuel* (voir partie III.A)
- Les réunions et conférences en ligne : *La méta-conférence* (voir partie VI.A)

5 narratifs, dont l'objectif est d'en quantifier les impacts environnementaux d'ici la publication du rapport final, sont détaillés dans cette annexe :

- Les jeux vidéo : *Le "Je" dans le jeu*
- Les expériences culturelles avec deux déclinaisons proposées : en présentiel, et distanciel. : *Le culturel c'est virtuel ?*
- Les jumeaux numériques : *Les jumeaux numériques*
- La pornographie : *Pornographie immersive*

2 narratifs sont encore à rédiger :

- Les jeux vidéo et les réseaux sociaux en mobilité : [à construire dans le cadre des travaux suivant ce rapport intermédiaire]
- L'informatique ubiquitaire : [à construire dans le cadre des travaux suivant ce rapport intermédiaire]

3 "cas d'usage" n'ont pas été traités :

- La formation et l'apprentissage
- La santé
- L'administration et les services en ligne

Le « Je » dans le jeu

En 2025 plus besoin d'aller au cinéma, les joueurs sont désormais les héros d'une intrigue minutieusement orchestrée et en permanence réajustée au gré de leurs actions courantes et passées, influençant de fait un univers en constante évolution, où le sentiment d'immersion est total.

Les autorités de régulation imposent progressivement aux éditeurs de jeux d'informer les utilisateurs sur leur temps de connexion en ligne. Ces informations sont déjà exploitées par certains annonceurs qui anticipent ainsi les besoins des joueurs de se sustenter par notification de leur application de livraison préférée. "Un petit creux ?! Gagnez du temps de jeu en vous faisant livrer votre plat préféré !!" [1].

La porosité entre annonceurs et jeux vidéo se fait de plus en plus grande au fur et à mesure que les éditeurs migrent vers un modèle « producteur de services » [2] leur permettant de monétiser toujours plus de contenus (abonnements, personnalisations des avatars, déblocage d'artefacts, ou de fonctionnalités, etc.). De la même manière, la perméabilité entre secteur culturel et jeux vidéo se renforce (événementiel, concert dans les jeux vidéo). [2bis]

2035 : la standardisation des métavers [3][4] permet aux différents mondes virtuels d'être complètement interopérables. Ils offrent la possibilité aux joueurs d'incarner, s'ils le souhaitent, le même avatar dans différents environnements thématiques [5] en fonction de leur humeur, sans discontinuité dans l'expérience sociale et ludique.

Les outils de traduction automatique en temps réel [6] permettent de passer outre la barrière de la langue et de voir émerger des communautés au-delà des frontières physiques, linguistiques, et culturelles.

Les principaux réseaux sociaux sont totalement intégrés dans les fils de discussion internes au métavers.

Grâce à l'avènement du edge computing [7] et de la 6G [8], une pléthore de ressources matérielles est désormais dédiée à traiter en temps réel des péta-octets de données en provenance des capteurs dont sont bardés les équipements de jeu. Le rythme cardiaque, le suivi des yeux, la transpiration, et même les éventuels commentaires des joueurs pendant la partie (ayant préalablement signé les conditions d'utilisation permettant de "maximiser son expérience de jeu") [9][10].

L'effet "retour de force" (force feedback) d'une combinaison haptique intégrale et de gants haptiques, dont le coût d'acquisition s'est « démocratisé », du moins pour les classes moyennes (600 euros), permet de sentir les balles prises pendant les escarmouches... en version allégée bien sûr, et de « toucher » les objets de l'environnement. La nouvelle génération de casques hybrides permet également de « sentir » les odeurs de l'environnement dans lequel les joueurs évoluent [11]. On recharge ainsi un système de « cartouches » d'huiles essentielles dont les compositions chimiques sont combinées pour produire ces « parfums d'ambiance » (allant du délicat parfum de la rose, aux effluves fétides de la décharge à ciel ouvert).

Des produits dont l'existence est purement numérique sont vendus et promus. On considère à présent normal d'habiller son avatar avec soin, d'autant qu'il est rendu hyper-réaliste grâce à la fonctionnalité "capture morphologique" proposée en ligne par la plupart des éditeurs [12].

Les éditeurs s'adaptent aux nouvelles contraintes et réglementations sanitaires leur imposant la recommandation aux utilisateurs de pauses régulières pour lutter contre la sédentarité accrue et une véritable épidémie d'obésité morbide dans la communauté des "gamers" : le

Gameplay et les équipements induisent à présent un nombre de mouvements minimum supposé compenser l'inactivité potentielle des joueurs !

2040 : La convergence d'univers et gameplay de type "action-aventure" [14], "jeu de rôle" [15], et "bacs à sable" [16], auxquels l'accès est proposé « gratuitement », est largement adoptée par une population croissante de joueurs ; l'IA générative [13] ayant permis l'adaptation à chaque joueur de l'expérience de jeu.

Toutes les classes d'âge s'y adonnent, en recherche d'alternatives à une expérience de vie physique de plus en plus délétère suite aux nombreuses conséquences des dérèglements climatiques [17].

Captation de l'activité cérébrale (électroencéphalogramme) [18], de l'état de fatigue estimé en fonction du niveau de réflexes remonté par les équipements haptiques, de ses capacités intellectuelles à résoudre des énigmes, suggérées par les données collectées lors des précédentes parties, tout est mis en œuvre pour cerner le profil du joueur et maximiser son « engagement » dans la durée [19], au profit des annonceurs, qui réutilisent l'ensemble de ces données à des fins marketing, micro-ciblé [20].



Références

[1] <https://www.cairn.info/revue-geo-economie-2012-4-page-49.htm>, <https://www.lesechos.fr/tech-medias/hightech/la-publicite-se-fait-une-place-dans-le-jeu-video-1865718>, <https://shs.hal.science/halshs-00305739/document>

[2] Epic Games où la transition du modèle « développeur de jeux vidéo » (« Gear of War »), vers celui d'éditeur de jeux vidéo en ligne utilisant le jeu comme « modèle de service » (« Fortnite »), Source : <https://aws.amazon.com/fr/solutions/case-studies/EPICGames/>

[2bis] Travis Scott sur « Fortnite », Alonzo sur « GTA »... Les concerts jouent le jeu du virtuel, Le Monde, 22 juin 2020, https://www.lemonde.fr/m-le-mag/article/2020/06/22/travis-scott-sur-fortnite-alonzo-sur-gta-les-concerts-jouent-le-jeu-du-virtuel_6043664_4500055.html

[3] Thomas A. Hemphill (2023) The 'Metaverse' and the challenge of responsible standards development, Journal of Responsible Innovation, 10:1, DOI: 10.1080/23299460.2023.2243121

- [4] W. Hyun, "Study on standardization for Interoperable Metaverse," 2023 25th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT), Pyeongchang, Korea, Republic of, 2023, pp. 319-322, doi: 10.23919/ICACT56868.2023.10079642.
- [5] K. Yang, Z. Zhang, T. Youliang and J. Ma, "A Secure Authentication Framework to Guarantee the Traceability of Avatars in Metaverse," in IEEE Transactions on Information Forensics and Security, vol. 18, pp. 3817-3832, 2023, doi: 10.1109/TIFS.2023.3288689.
- [6] Z. Lv, « Generative artificial intelligence in the metaverse era », Cognitive Robotics, vol. 3, p. 208-217, janv. 2023, doi: 10.1016/j.cogr.2023.06.001.
- [7] Y. Wang and J. Zhao, "A Survey of Mobile Edge Computing for the Metaverse: Architectures, Applications, and Challenges," 2022 IEEE 8th International Conference on Collaboration and Internet Computing (CIC), Atlanta, GA, USA, 2022, pp. 1-9, doi: 10.1109/CIC56439.2022.00011.
- [8] F. Tang, X. Chen, M. Zhao and N. Kato, "The Roadmap of Communication and Networking in 6G for the Metaverse," in IEEE Wireless Communications, vol. 30, no. 4, pp. 72-81, August 2023, doi: 10.1109/MWC.019.2100721.
- [9] J. Wang, S. Chen, Y. Liu and R. Lau, "Intelligent Metaverse Scene Content Construction," in IEEE Access, vol. 11, pp. 76222-76241, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3297873.
- [10] Leonardo Angelini, Massimo Mecella, Hai-Ning Liang, Maurizio Caon, Elena Mugellini, Omar Abou Khaled, and Danilo Bernardini. 2022. Towards an Emotionally Augmented Metaverse: a Framework for Recording and Analysing Physiological Data and User Behaviour. In 13th Augmented Human International Conference (AH2022). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, Article 3, 1–5. <https://doi.org/10.1145/3532530.3532546>
- [11] Lukaszewicz, M. S., Rossoni, M., Spadoni, E., Dozio, N., Carulli, M., Ferrise, F., and Bordegoni, M. (August 14, 2023). "An Open-Source Olfactory Display to Add the Sense of Smell to the Metaverse." ASME. J. Comput. Inf. Sci. Eng. February 2024; 24(2): 024501. <https://doi.org/10.1115/1.4062889>
- [12] Reay, E., Wanick, V. (2023). Skins in the Game: Fashion Branding and Commercial Video Games. In: Bazaki, E., Wanick, V. (eds) Reinventing Fashion Retailing. Palgrave Studies in Practice: Global Fashion Brand Management . Palgrave Macmillan, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-11185-3_5 et Joy, A., Zhu, Y., Peña, C., & Brouard, M. (2022). Digital future of luxury brands: Metaverse, digital fashion, and non-fungible tokens. Strategic Change, 31(3), 337–343. <https://doi.org/10.1002/jsc.2502>
- [13] H. X. Qin and P. Hui, "Empowering the Metaverse with Generative AI: Survey and Future Directions," 2023 IEEE 43rd International Conference on Distributed Computing Systems Workshops (ICDCSW), Hong Kong, Hong Kong, 2023, pp. 85-90, doi: 10.1109/ICDCSW60045.2023.00022.
- [14] *Grand Theft Auto V*, Rockstar Games, 17/09/2013
- [15] *Red Dead Redemption*, Rockstar Games, 26/10/2018
- [16] *The Sandbox*, Animoca, Bulkypix, 04/03/2012, *Decentraland*, Ari Meilich et Esteban Ordano, 2015, *Roblox*, Roblox Corporation, 27/02/2006
- [17] D. Pal et C. Arpikanondt, « The sweet escape to metaverse: Exploring escapism, anxiety, and virtual place attachment », Computers in Human Behavior, vol. 150, p. 107998, janv. 2024, doi: 10.1016/j.chb.2023.107998. et *Ready Player One*, Steven Spielberg, 28/03/2018
- [18] <https://www.cryptopolitan.com/fr/casque-vr-eeg-pour-mesurer-l-39-activite-cerebrale/>, <https://www.futura-sciences.com/tech/actualites/realite-augmentee-realite-virtuelle-premier-jeu-controle-cerveau-68229/>, <https://www.realite-virtuelle.com/looxidvr-ondes-cerebrales-1201/>
- [19] Activision Blizzard, utilisation de l'IA pour renforcer l' « engagement », https://www.youtube.com/watch?v=ir33m9RJxs0&t=1727s&ab_channel=AWSEvents
- [20] Dwivedi, Y. K., Hughes, L., Wang, Y., Alalwan, A. A., Ahn, S. J., Balakrishnan, J., Barta, S., Belk, R., Buhalis, D., Dutot, V., Felix, R., Filieri, R., Flavián, C., Gustafsson, A., Hinsch, C., Hollensen, S., Jain, V., Kim, J., Krishen, A. S., ... Wirtz, J. (2023). Metaverse marketing: How the metaverse will shape the future of consumer research and practice. Psychology & Marketing, 40, 750–776. <https://doi.org/10.1002/mar.21767>

Images

Affiche du jeu vidéo Grand Theft Auto V, Concert de Travis Scott dans le jeu Fortnite, Affiche du film Ready Player One

Une première évaluation de ce narratif fournit la grille suivante :

Caractéristiques	Les jeux vidéo	Appréciation
Coexistence physique et numérique	Nécessaire	
Immersion	Indispensable	
Simultanéité	Nécessaire	
Taille	Nécessaire	
Localisation	Optionnel	
Persistance	Indispensable	
Virtualisation	Indispensable	
Commercialisation	Nécessaire	

Le culturel c'est virtuel ?

Cas en présentiel :

2025 : dans les sites français les plus touristiques [1,2], les audioguides disparaissent progressivement remplacés par une application de réalité augmentée couplée à un guide animé par de l'intelligence artificielle mise à disposition des visiteurs sur une plateforme de téléchargement installée sur des smartphones ou tablettes loués le temps de la visite.

Des casques de réalité virtuelle accompagnés de manettes sont par ailleurs proposés pour une expérience "Premium" dans les cadres s'y prêtant.

On peut ainsi se voir saluer par Gustave Eiffel [3] en gravissant les marches de la tour du même nom, ou inviter à suivre le roi soleil dans sa balade matinale dans les jardins de Versailles, tout en accomplissant des quêtes, ou résolvant des énigmes sous forme d'escape games pédagogiques.

2030 : l'utilisation de la réalité augmentée s'est généralisée dans les grands musées français notamment.

Les applications en réalité augmentée proposant un guide virtuel sont disponibles dans tous les petits musées également équipés d'un WIFI performant.

Les plus grands musées proposent des expériences immersives permettant la mise en situation d'une œuvre dans son contexte de création : au Louvre, on peut ainsi se voir projeter dans l'atelier de Léonard de Vinci peignant la Joconde. Il est possible d'interagir avec la Joconde en train de poser, ainsi qu'avec l'artiste au travail, qui nous explique le contexte historique de son œuvre, les techniques employées, jusqu'à nous proposer de nous essayer en tant qu'apprenti sur une toile virtuelle disposée devant nous dans l'atelier, selon la même technique et les mêmes principes de composition.

Des gants haptiques s'ajoutant au casque de réalité virtuelle permettront de se saisir d'objets du décor, tels qu'une palette et un pinceau.

L'œuvre ainsi créée restera disponible sous forme de NFT dans la collection "visiteurs" du musée [4].

Nombre d'autres applications sont ainsi proposées selon les sites touristiques et culturels : mise en contexte visuel et linguistique dans les musées historiques, et certaines pièces jusqu'ici inaccessibles au public (œuvres ou antiquités protégées) le deviennent.

Les expériences peuvent être déplacées sur d'autres lieux [1,6].



Références

- [1] Eternelle Notre -Dame est une expérience immersive de découverte de la cathédrale, <https://www.eternelnotenotredame.com/>
- [2] Réalité virtuelle : 3 expériences à ne pas manquer cet été, Orange, 13 juin 2023 : <https://bienvivreledigital.orange.fr/societe/tendances/realite-virtuelle-3-musees-a-ne-pas-manquer-cet-ete.html>
- [3] En Floride, Salvador Dali ressuscité par l'intelligence artificielle, Le journal des arts, 19 mai 2019, <https://www.lejournaldesarts.fr/patrimoine/en-floride-salvador-dali-ressuscite-par-lintelligence-artificielle-144196>
- [4] Le Centre Pompidou passe à l'heure NFT, Centre Pompidou, 6 avril 2023 : <https://www.centrepompidou.fr/fr/magazine/article/le-centre-pompidou-passe-a-lheure-nft>
- [5] Les usages immersifs, de la réalité virtuelle au métavers, CNC, juin 2023, page 8 : <https://www.cnc.fr/documents/36995/1872922/Les+usages+immersifs%2C+de+la+r%C3%A9alit%C3%A9+virtuelle+au+m%C3%A9tavers.pdf/2c3693f2-4085-6ca6-5e37-2c0995b15d0b?t=1693558191224>
- [6] Micro-Folie, plateforme culturelle au service des territoires, Ministère de la culture, <https://www.culture.gouv.fr/Regions/Drac-Provence-Alpes-Cote-d-Azur/Politique-et-actions-culturelles/Micro-Folies>

Images

Affiche de l'expérience immersive Eternelle Notre-Dame

Application Spatial pour la vente de photographies d'art : Metavers, le nouvel Eldorado, France 24 : <https://youtu.be/Fq5EBHS22Jl?si=17KjWWRwqZiQ92O6>

Une première évaluation de ce narratif fournit la grille suivante :

Caractéristiques	Les expériences culturelles (cas présentiel)	Appréciation
Coexistence physique et numérique	Nécessaire	
Immersion	Indispensable	
Simultanéité	Nécessaire	
Taille	Nécessaire	
Localisation	Optionnel	
Persistance	Nécessaire	
Virtualisation	Indispensable	
Commercialisation	Nécessaire	

Le culturel c'est virtuel ?

Cas en distanciel :

En 2030 la visite culturelle en réalité virtuelle à distance se déploie, à la faveur d'un taux de pénétration des équipements et casques de réalité virtuelle bien meilleur dans les ménages et d'une commande publique [1].

On peut maintenant visiter un musée depuis chez soi, dans un monde virtuel, proche du jumeau numérique, peuplé d'avatars d'autres visiteurs. Il est possible de profiter des services d'un guide interactif, paramétrable en termes d'époque, de rendu, manière de s'exprimer, etc.

En termes d'expérience immersive [2], le même type d'interactions (artistes, contexte etc.) qu'en présentiel est proposé, mais avec un rendu et un accès moindre : toutes les œuvres ne sont pas numérisées et la visite virtuelle reste un produit d'appel, à venir découvrir le lieu réel. Les limitations induites par le virtuel telles l'absence d'odeur des peintures, craquement du parquet sous les pas, etc. font que l'offre de visite virtuelle ne saurait par ailleurs pas se substituer à l'offre de visite réelle.

Parallèlement, les concerts internationaux en réalité virtuelle convainquent massivement [3], favorisé par l'instauration de quota carbone pour les transports de longue distance et la reconstruction virtuelle de lieux après leur destruction ou leur disparition [4].



Références

[1] Mission exploratoire sur les métavers, A. Basdevant, C. François, R. Ronfard, octobre 2022, page 60,

<https://www.economie.gouv.fr/files/files/2022/Rapport-interministeriel-metavers.pdf>

[2] La Joconde en réalité virtuelle chez vous, Le Louvre, 23 février 2021, <https://www.louvre.fr/en-ce-moment/vie-du-musee/la-joconde-en-realite-virtuelle-chez-vous>

[3] Comment VRROOM a téléporté Jean-Michel Jarre dans la réalité virtuelle ? AFXR, 12 juillet 2020, <https://www.afxr.org/articles/58356-comment-vrroom-a-teleporte-jean-michel-jarre-dans-la-realite-virtuelle>

[4] L'archipel de Tuvalu duplique son territoire et sa culture dans le métaverse, Radio France, 9 janvier 2023, <https://www.radiofrance.fr/franceculture/podcasts/affaire-en-cours/l-archipel-de-tuvalu-duplique-son-territoire-et-sa-culture-dans-le-metaverse-9138431>

Images

Affiche concert Jean-Michel Jarre 21 juin 2020

Une première évaluation de ce narratif fournit la grille suivante :

Caractéristiques	Les expériences culturelles (cas distanciel)	Appréciation
Coexistence physique et numérique	Nécessaire	
Immersion	Indispensable	
Simultanéité	Nécessaire	

Taille	Nécessaire	
Localisation	Optionnel	
Persistance	Nécessaire	
Virtualisation	Indispensable	
Commercialisation	Nécessaire	

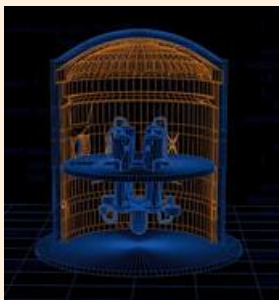
Les jumeaux numériques

Les jumeaux numériques sont des représentations synchronisées d'une entité ou d'un système existant [1][2]. En 2025, que ce soit sur des outils de production industrielle ou sur des équipements de pointe comme des sièges d'avion de chasse [3], des capteurs embarqués sur des dispositifs permettent de produire des données transmises vers un jumeau numérique. Les opérations de maintenance ou de remplacement peuvent ainsi faire l'objet d'une optimisation permettant l'économie de pièces et de main d'œuvre, tout en produisant des connaissances sur les comportements des dispositifs dans diverses situations [4]. Les industriels adaptent leurs lignes logistiques et de transport [5].

En 2030 l'entretien du réseau ferré Français, majoritairement couvert par des capteurs envoyant quotidiennement des données relatives à l'état des voies, est programmé à partir de jumeaux numériques [6]. Des services d'aide à la décision ou des données relatives à l'usage des voies sont mises à disposition des différents services du gestionnaire et des compagnies ferroviaires. Le temps de travail dédié à la surveillance des voies est réduit.

En 2035, les EPR2 sont conçus nativement avec un jumeau numérique. Les capteurs placés dans la tuyauterie permettent le suivi de l'état des centrales nucléaires en continu et avec une intervention humaine minimale. Les capteurs couvrant les chaînes d'approvisionnement [7], les infrastructures, les réseaux [8], les flux logistiques [9] et centres de données [10] sont désormais souvent accompagnés d'objets connectés agissant sur l'entité réelle. Les informations et actions ne circulent plus simplement de l'entité réelle vers les jumeaux numériques, mais également dans le sens inverse. L'entité réelle peut donc être pilotée directement via le jumeau numérique.

En 2040, les jumeaux numériques commencent à être déployés dans le domaine de la santé [11]. La multiplication de capteurs externes et la consommation de gélules communicantes permettent la production de jumeaux numériques des patients. Ces jumeaux favorisent les dépistages, facilitent les diagnostics, et permettent la mise en place de traitements personnalisés ou prédictifs. L'existence d'un jumeau numérique est un standard de la bonne gestion des systèmes physiques, et les villes ne font pas exception. Les réseaux d'énergie et de transport, les flux de biens et de personnes tous sont jumelés afin de réguler en temps réel le système urbain [14].



Références

[1] Voir la norme ISO 23247-1 de 2021 pour une définition exhaustive des jumeaux numériques.

[2] Wright L. & Davidson S. 2020. "How to tell the difference between a model and a digital twin" *Adv. Model. and Simul. in Eng. Sci.* 7, 13.

[3] James O., 2020. "Les avionneurs s'emparent du jumeau numérique" *L'Usine Nouvelle*, 24 avril 2020. <https://www.usinenouvelle.com/editorial/les-avionneurs-s-emparent-du-jumeau-numerique.N953846>

[3] Thelen A. et al., 2022. "A comprehensive review of digital twin — part 1: modeling and twinning enabling technologies". *Structural and Multidisciplinary Optimization*, n°65, 354. <https://doi.org/10.1007/s00158-022-03425-4>

[4] EY et Nokia, 2013. *The metaverse at work*, Juin 2023, p.12

[5] McKinsey & Company, 2022. *Value creation in the metaverse*, p.38

[6] <https://www.sncf-reseau.com/fr/entreprise/newsroom/sujet/innovation-jumeau-numerique>

[7] <https://media.renaultgroup.com/renault-group-lance-le-premier-metaverse-industriel/> à la collecte des données en masse, optimisation flux et stocks

[8] Pour étudier le comportement d'une centrale, EDF modélise son « jumeau numérique », EDF : https://youtu.be/O7bRilPvuCU?si=Mrq7ytxtzoceEy-V_59 : Exploitation. Voir également "GE Digital Twin, Analytic Engine for the Digital Power Plant", a White Paper by General Electric, 2016

[9] Amazon Robotics Builds Digital Twins of Warehouses with NVIDIA Omniverse and Isaac Sim, Nvidia : <https://youtu.be/-VQLqs6s9y0?si=PPRRbljmXqWYtGqS> à jumeau numérique d'entrepôts

[10] Building a data center digital twin in NVIDIA omniverse, NVIDIA : <https://youtu.be/gGg2wpzukPA?si=62o33HRI7Zf9Yv> à jumeau numérique de DC

[11] Sun T, He X, Li Z. Digital twin in healthcare: Recent updates and challenges. *Digit Health*. 2023 Jan 3;9:20552076221149651. doi: [10.1177/20552076221149651](https://doi.org/10.1177/20552076221149651)

[12] AI and 6G into the Metaverse: Fundamentals, Challenges and Future Research Trends, Zawish et al, IEEE, 2021 à spatial computing

[13] WhiteG. et al., 2021. "A digital twin smart city for citizen feedback" *Cities*, Vol.110, 103064.

[14] The Smart Cultural City to leverage the Heritage: the Digital Twin experience : <https://www.interregeurope.eu/good-practices/the-smart-cultural-city-to-leverage-the-heritage-the-digital-twin-experience>

Images

Pour étudier le comportement d'une centrale, EDF modélise son « jumeau numérique », EDF : <https://youtu.be/O7bRilPvuCU?si=Mrq7ytxtzoceEy-V>

EY et Nokia, 2013. *The metaverse at work*, Juin 2023, p.12

Why digital twins will be the backbone of industry in the future, Siemens Knowledge Hub : <https://youtu.be/ObGhB9CCHP8?si=56nP9LH8Q0mx8GMG>

Une première évaluation de ce narratif fournit la grille suivante :

Caractéristiques	Les jumeaux numériques	Appréciation
Coexistence physique et numérique	Indispensable	
Immersion	Optionnel	
Simultanéité	Nécessaire	
Taille	Optionnel	
Localisation	Optionnel	
Persistance	Nécessaire	
Virtualisation	Indispensable	
Commercialisation	Optionnel	

Pornographie immersive

2025: Augmentation des contenus vidéo 360° en ligne et équipement en casque VR

L'industrie pornographique investit de plus en plus dans la production de contenus immersifs en commençant par la distribution de vidéos 360° en ligne. Les revenus ont dépassé le milliard de dollars pour ces contenus [1], [2] soit une augmentation de 1506 % comparé à 2018. Alors que la VR représentait 5% du marché en 2018 [3], elle représente à présent 10%.

Une seconde de vidéo 360 à l'acquisition pèse environ 24 fois plus qu'une équivalente en 2D avec le format MPEG4. En 2020, la moyenne du temps de consommation des vidéos en ligne serait de 6 minutes [5]. Ainsi, en 2025, le poids des vidéos pornographiques en ligne augmente et demande une bande passante plus élevée qu'auparavant, et plus d'espace serveur. Les utilisateurs adoptent lentement les casques de réalité virtuelle en remplacement des écrans PC.

2030: Renforcement des contenus vidéo 360° et progression des contenus rendus en 3D temps réel

La pornographie immersive légale s'est démocratisée par sa capacité à provoquer une activation physiologique plus élevée que devant un écran 2D [6]–[8].

60% des flux d'internet anciennement dédiés (estimés à 4% du total [9]) sont substitués par des contenus immersifs impliquant plus de bande passante et plus d'espace sur les serveurs. Les vidéos 360° avec de réels acteurs de la fin des années 2010 [10] sont peu à peu remplacées par des avatars reproduisant les gestes des acteurs avec des rendus 3D hautement photoréalistes. Les utilisateurs adoptent de plus en plus les casques de réalité virtuelle en remplacement des écrans PC.

2040: Démocratisation de l'IoT dédié et de l'haptique, dimension sociale et IA générative

L'évolution des sex-toys connectés [11]–[13] et des équipements haptiques [14] produisent des données utilisées par la pornographie immersive [15] dont une partie est stockée pour améliorer les systèmes mais aussi suggérer de nouvelles expériences ou réaliser du marketing individualisé. Les casques de réalité virtuelle sont les terminaux principaux pour accéder à ces contenus.

Certaines applications proposent de rencontrer de vrais partenaires à travers leurs avatars [16], [17] dans des univers dédiés. Mais, de plus en plus de pornographie immersive est associée à de l'IA générative et du deepfake afin de produire à la volée des scénarios sauvegardés répondant aux divers fantasmes des utilisateurs [18].

Grâce à cette montée en gamme de la personnalisation et des stimulations possibles, la consommation moyenne de pornographie au moins une fois par mois a augmentée de 91.5% (hommes) 60.2% (femmes) en 2018 [19] à 95% (hommes) 80% (femmes) en 2040. Une population s'ennuyant de plus en plus [20] et avec un stress élevé motive également cette consommation. La bande passante et l'espace sur les serveurs dédiés ont explosé.

Références

[1] J. Booton, « Porn industry's billion-dollar new frontier », MarketWatch. Consulté le: 15 novembre 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.marketwatch.com/story/how-the-future-of-virtual-reality-depends-on-porn-2015-07-15>

[2] Market Research Engine, « Virtual-Reality Pornography Market by Regional Analysis - Global Forecast by 2022-2027 », Marketresearch. Consulté le: 15 novembre 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.marketresearchengine.com/virtual-reality-pornography-market>

- [3] D. Ng, « Porn industry gets a boost from VR, but manufacturers aren't thrilled », Los Angeles Times. Consulté le: 15 novembre 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.latimes.com/business/hollywood/la-fi-ct-virtual-reality-porn-20180105-story.html>
- [4] T.-W. Mi et M.-T. Yang, « Comparison of Tracking Techniques on 360-Degree Videos », *Appl. Sci.*, vol. 9, n° 16, Art. n° 16, janv. 2019, doi: 10.3390/app9163336.
- [5] M. Castleman, « How Much Time Does the World Spend Watching Porn? », Psychology Today. Consulté le: 15 novembre 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.psychologytoday.com/us/blog/all-about-sex/202010/how-much-time-does-the-world-spend-watching-porn>
- [6] J. W. B. Elsej, K. van Andel, R. B. Kater, I. M. Reints, et M. Spiering, « The impact of virtual reality versus 2D pornography on sexual arousal and presence », *Comput. Hum. Behav.*, vol. 97, p. 35-43, 2019, doi: 10.1016/j.chb.2019.02.031.
- [7] D. Rosenkjær, A. Pacey, R. Montgomerie, et A.-B. Skytte, « Effects of virtual reality erotica on ejaculate quality of sperm donors: a balanced and randomized controlled cross-over within-subjects trial », *Reprod. Biol. Endocrinol. RBE*, vol. 20, n° 1, p. 149, oct. 2022, doi: 10.1186/s12958-022-01021-1.
- [8] S. C. Simon et T. Greitemeyer, « The impact of immersion on the perception of pornography: A virtual reality study », *Comput. Hum. Behav.*, vol. 93, p. 141-148, avr. 2019, doi: 10.1016/j.chb.2018.12.018.
- [9] K. Buchholz, « Infographic: How Much of the Internet Consists of Porn? », Statista Daily Data. Consulté le: 12 octobre 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.statista.com/chart/16959/share-of-the-internet-that-is-porn>
- [10] S. Ashton, K. McDonald, et M. Kirkman, « What does 'pornography' mean in the digital age? Revisiting a definition for social science researchers », *Porn Stud.*, vol. 6, n° 2, p. 144-168, avr. 2019, doi: 10.1080/23268743.2018.1544096.
- [11] N. Döring et S. Pöschl, « Sex toys, sex dolls, sex robots: Our under-researched bed-fellows », *Sexologies*, vol. 27, n° 3, p. e51-e55, juill. 2018, doi: 10.1016/j.sexol.2018.05.009.
- [12] « Size of the global sex toy market 2016-2030 », Statista. Consulté le: 12 octobre 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.statista.com/statistics/587109/size-of-the-global-sex-toy-market/>
- [13] Z. Stardust, K. Albury, et J. Kennedy, « Sex tech entrepreneurs: Governing intimate data in start-up culture », *New Media Soc.*, p. 14614448231164408, avr. 2023, doi: 10.1177/14614448231164408.
- [14] M. Mello, M. Fusaro, G. Tieri, et S. M. Aglioti, « Wearing same- and opposite-sex virtual bodies and seeing them caressed in intimate areas », *Q. J. Exp. Psychol.*, vol. 75, n° 3, p. 461-474, mars 2022, doi: 10.1177/17470218211031557.
- [15] L. Evans, « Virtual Reality Pornography: a Review of Health-Related Opportunities and Challenges », *Curr. Sex. Health Rep.*, vol. 15, n° 1, p. 26-35, mars 2023, doi: 10.1007/s11930-022-00352-9.
- [16] A. D. Cheok et E. Y. Zhang, « Sex and a History of Sex Technologies », in *Human-Robot Intimate Relationships*, A. D. Cheok et E. Y. Zhang, Éd., in Human-Computer Interaction Series. , Cham: Springer International Publishing, 2019, p. 23-32. doi: 10.1007/978-3-319-94730-3_2.
- [17] A. Aleksandrovich et L. M. Gomes, « Shared multisensory sexual arousal in virtual reality (VR) environments », *Paladyn J. Behav. Robot.*, vol. 11, n° 1, p. 379-389, janv. 2020, doi: 10.1515/pjbr-2020-0018.
- [18] P. Pataranutaporn *et al.*, « AI-generated characters for supporting personalized learning and well-being », *Nat. Mach. Intell.*, vol. 3, n° 12, Art. n° 12, déc. 2021, doi: 10.1038/s42256-021-00417-9.
- [19] I. Solano, N. R. Eaton, et K. D. O'Leary, « Pornography Consumption, Modality and Function in a Large Internet Sample », *J. Sex Res.*, vol. 57, n° 1, p. 92-103, janv. 2020, doi: 10.1080/00224499.2018.1532488.
- [20] A. B. Moynihan, E. R. Igou, et W. A. P. van Tilburg, « Pornography consumption as existential escape from boredom », *Personal. Individ. Differ.*, vol. 198, p. 111802, nov. 2022, doi: 10.1016/j.paid.2022.111802.

Image

Immersive pron image caption : "Pink Supernova" © Death_Burger / Josan Gonzalez

Une première évaluation de ce narratif fournit la grille suivante :

Caractéristiques	La pornographie	Appréciation
Coexistence physique et numérique	Nécessaire	

Immersion	Indispensable	
Simultanéité	Nécessaire	
Taille	Nécessaire	
Localisation	Optionnel	
Persistance	Indispensable	
Virtualisation	Indispensable	
Commercialisation	Nécessaire	

ANNEXE 2

Annexe 2

Lien vers le fichier : Materials : [ici](#)

Hypothèses du scénario Meta-métavers tel que décrit dans la section II - Première évaluation macroscopique d'une généralisation des usages des mondes virtuels.

Consumer devices	Meta-métavers	
VR headsets	CAGR 2023-2030	Summary
Devices Production (in millions of units)	61%	By 2026, 25% of people will spend at least 1h per day in the metaverse (Gartner, 2022). Hypothesis to postpone to 2030
Production GHG Intensity (in kgCO ₂ e/unit)	7%	VR headset, OLED, battery, integrated computing (CEPIR, 2023)
Production Energy Intensity (in kWh/unit)	8%	Same hypothesis as production GHG intensity (slightly higher)
Connected Devices (in millions of units)	36%	Same number than produced devices in 2030
Connected Devices Unitary Elec. Cons. (in kwh/year)	3,6%	VR headset, OLED, battery, integrated computing (CEPIR, 2023)

Networks and data centers	Meta-métavers	
	CAGR 2023-2030	Summary
Traffic fixed wired (EB)	29%	- By 2026, 25% of people will spend at least 1h per day in the metaverse (Gartner, 2022). Hypothesis to postpone to 2030
Traffic fixed Wi-Fi (EB)	35%	- Hypothesis: Users substitute 1h of VOD by 1h of metaverse
Traffic fixed mobile (EB)	45%	- Peak traffic speed downlink : 50 Mbps (Ericsson, 2023)
Traffic Hyperscale (EB)	60%	- Hypothesis: data allocation to fixe wired, Wi-Fi, mobile: 1/3, 1/3, 1/3
Traffic Others (EB)	50%	- Hypothesis: all additional data are stored on data centers - Vision of computation power and computational efficiency increase (Intel, 2021) : hypothesis to x10 data center electrical consumption

Ont été utilisés pour construction : (ITU, 2022).

Ont été utilisés pour comparaison : (Andrae A., 2017; Cisco, 2020, p. 2; ITU, s. d.; United Nations, s. d.).

Un scénario méta-conférence est conçu à partir du scénario Conservative et à partir de la méta-conférence tel que décrit dans la section VIII - Application .

Consumer devices	Meta-conference	
VR headsets	CAGR 2023-2030	Summary
Devices Production (in millions of units)	44%	By 2030, same number of meta-conference users than outlook in 2015 (Microsoft, 2015) and life duration hypothesis : 2 years
Production GHG Intensity (in kgCO ₂ e/unit)	7%	VR headset, OLED, battery, integrated computing (CEPIR, 2023)
Production Energy Intensity (in kWh/unit)	8%	Same hypothesis as production GHG intensity (slightly higher)
Connected Devices (in millions of units)	16%	By 2030, same number of meta-conference users than outlook in 2015 (Microsoft, 2015)
Connected Devices Unitary Elec. Cons. (in kWh/year)	3,6%	VR headset, OLED, battery, integrated computing (CEPIR, 2023)

Networks and data centers	Meta-conference	
	CAGR 2023-2030	Summary
Traffic fixed wired (EB)	15%	By 2030, same number of meta-conference users than outlook in 2015 (Microsoft, 2015) and will spend at least 1h per day in the metaverse (Gartner, 2022)
Traffic fixed wifi (EB)	31% up to 2025 28% for 2025-2030	
Traffic fixed mobile (EB)	37% up to 2025 31% for 2025-2030	Meta-conference with 17 Mbps download rate (Cisco, 2020) Traffic is added on top of Conservative scenario (The Shift Project, 2021)
Traffic Hyperscale (EB)	30%	No impact on data center considered; no modification of computation power is taken into account.
Traffic Others (EB)	13%	

Ont été utilisés pour comparaison : (Andrae A., 2017; Ericsson, 2023; Greenspector, 2021)

RÉFÉRENCES

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. (2022). *Évaluation de l'impact environnemental de la digitalisation des services culturels*. <https://bibliothèque.ademe.fr/dechets-economie-circulaire/5942-evaluation-de-l-impact-environnemental-de-la-digitalisation-des-services-culturels.html>
- ADEME, & Arcep. (2023). *Évaluation 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. (2018). *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>
- Andrae A. (2017). *Life Cycle Assessment of a Virtual Reality Device*. <https://www.mdpi.com/2078-1547/8/2/15>
- Arthur D Little. (2022a). *The metaverse beyond fantasy. Synthetic world, real economy*.
<https://www.adlittle.com/en/insights/report/metaverse-beyond-fantasy>
- Arthur D Little. (2022b). *The metaverse: What's in it for telcos? Telcos need to move now to capture value*. <https://www.adlittle.com/en/insights/viewpoints/metaverse-what%E2%80%99s-it-telcos>
- 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. (2023). *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>
- Crédit suisse. (2022). *Metaverse : A guide to the Next-Gen internet*. <https://www.credit-suisse.com/media/assets/corporate/docs/about-us/media/media-release/2022/03/metaverse-14032022.pdf>
- Direction Générale des Entreprises. (2022). *Les technologies immersives*.
<https://www.entreprises.gouv.fr/fr/numerique/politique-numerique/technologies-immersives>
- Ericsson. (2022). *Qu'est-ce que le métaverse et pourquoi a-t-il besoin de la 5G pour s'imposer ? La relation entre le métaverse et la 5G expliquée*.
<https://www.ericsson.com/fr/blog/2022/4/the-metaverse-5g-relationship>
- 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>

European Parliament, Committee on the Internal Market and Consumer Protection. (2023). *Virtual worlds – opportunities, risks and policy implications for the single market, Compromise amendments.*

https://www.europarl.europa.eu/meetdocs/2014_2019/plmrep/COMMITTEES/IMCO/DV/2023/11-28/9-CAsVirtualWorlds_EN.pdf

Facebook. (2021). *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). *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>,

<https://hubinstitute.com/2019/data-tendances-hypecycle-gartner-technologies-emergentes-ia-ecosysteme-capteurs-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/>

Greenspector. (2021). *How does Greenspector assess the environmental footprint of digital service use?* <https://greenspector.com/en/environmental-footprint-methodology/>

GSMA. (2019). *Cloud AR/VR Whitepaper*. <https://www.gsma.com/futurenetworks/wiki/cloud-ar-vr-whitepaper/>

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-mediathèque/le-metavers-une-enquete-sur-les-univers-virtuels-en-gestation/>
- Intel. (2021). *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>
- ITU. (s. d.). *Aspirational targets for 2030*. Consulté 7 décembre 2023, à l'adresse
<https://www.itu.int/itu-d/meetings/statistics/wp-content/uploads/sites/8/2022/04/UniversalMeaningfulDigitalConnectivityTargets2030.pdf>
- ITU. (2022). *Measuring digital development, Facts and figures*.
https://www.itu.int/hub/publication/d-ind-ict_mdd-2022/
- 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-I/en>
- LINC, CNIL. (2023). *Données, empreinte et libertés. Une exploration des intersections entre protection des données, des libertés, de l'environnement*. <https://linc.cnil.fr/la-cn-il-publie-son-nouveau-cahier-innovation-et-prospective-donnees-empreinte-et-libertes>
- 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, juin 16). *Emmanuel Macron annonce 200 millions d'euros pour les technologies immersives et le métavers*. <https://www.usine-digitale.fr/article/emmanuel-macron-annonce-200-millions-d-euros-pour-les-technologies-immersives-et-le-metavers.N2143877>

- 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>
- 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>
- 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
- Radoff J. (2021a). *La chaîne de valeur du Métavers*.
- Radoff J. (2021b). *The Metaverse Value-Chain*. <https://medium.com/building-the-metaverse/the-metaverse-value-chain-afcf9e09e3a7>
- Renaissance Numérique. (2023). *Gouverner le Métavers et l'internet de demain*.
https://www.renaissancenumerique.org/wp-content/uploads/2023/11/renaisancenumerique_rapport_metavers_web.pdf
- 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>
- 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). *Nombre d'utilisateurs actifs de Facebook par trimestre dans le monde 2008-2022*. <https://fr.statista.com/statistiques/565258/facebook-nombre-d-utilisateurs-actifs-mensuels-dans-le-monde/>

- 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. (2023a). *Cahier des charges pour des réseaux numériques sobres et résilients—Rapport intermédiaire*.
- The Shift Project. (2023b). *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/>
- United Nations. (s. d.). *Population*. Consulté 7 décembre 2023, à l'adresse <https://www.un.org/en/global-issues/population>
- Weinberger M. & Gross D. (2023). *A metaverse maturity model*. https://www.researchgate.net/publication/366920442_A_Metaverse_Maturity_Model_A_Metaverse_Maturity_Model
- 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>

The 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, notre mission est d'éclairer et influencer le débat sur la transition énergétique en Europe. Nos membres sont de grandes entreprises qui veulent faire de la transition énergétique leur priorité.

www.theshiftproject.org

Contacts :

Hugues Ferreboeuf
Chef de projet Numérique

Maxime Efoui-Hess
Coordinateur du programme
Numérique
maxime.efoui@theshiftproject.org

Marlène De Bank
Ingénieure de recherche
marlene.debank@theshiftproject.org

Ilana Toledano
Responsable Communication

