



## Full Length Research Paper

# Impacts environnementaux du numérique : cas du métavers

Georges OUFFOUE <sup>1\*</sup>, Jean-Philippe AKPOUE <sup>1</sup><sup>1</sup>APL, expert en data center, Paris, France

Received July 2023 – Accepted November 2023

\*Corresponding author. [georges.ouffoue@apl-datecenter.fr](mailto:georges.ouffoue@apl-datecenter.fr).....

Author(s) agree that this article remain permanently open access under the terms of the Creative Commons Attribution License 4.0 International License.

**Résumé:**

La transition numérique qui caractérise notre époque, accélérée par la crise sanitaire covid-19, se manifeste à travers divers indicateurs éloquentes : l'accroissement considérable du trafic sur les réseaux et datacenters, l'adoption massive du cloud computing, la prolifération d'objets connectés à travers le monde, l'évolution de nos modes de vie et de nos interactions numériques... La digitalisation des activités continue de croître et ce, sans limite apparente [1]. Dans cette optique, un nouveau mode de digitalisation émerge pour favoriser une immersion en 4D, le "métavers". Grâce à l'utilisation de casques de réalité virtuelle et un avatar en 3D, l'on peut vivre une partie de votre existence au sein de cet univers virtuel ( [2], [3], [4]). Le métavers aura un impact certain sur toutes les activités humaines, y compris le domaine de la santé. Grâce à cette technologie, de nouveaux services de santé tels que la chirurgie augmentée seront développés dans le but de réduire les coûts et d'améliorer la qualité des soins.

Cependant, il est essentiel de reconnaître que malgré sa nature virtuelle, le numérique repose sur des infrastructures physiques qui, lors de leur fabrication, utilisation et fin de vie, engendrent une consommation d'énergie grise. Selon la dernière étude de GreenIT.fr, les impacts environnementaux annuels du numérique en France représentent 6,3% de la consommation d'énergie primaire, 3,3% des émissions de gaz à effet de serre (GES), 2,2% de la consommation d'eau du territoire et entraînent une excavation de près de 4 milliards de tonnes de terre [5].

L'impact environnemental du métavers, comme celui du numérique en général sera donc l'impact de l'ensemble des matériaux et technologies mises en œuvre. Dans ce papier, nous avons déterminé que les impacts environnementaux d'une application dans le métavers étaient 10 fois plus importants que dans une situation classique. Il faudra donc anticiper ces impacts et écoconcevoir le métavers sur le continent africain.

**Mots clés:** Métavers, IA, impacts environnementaux, Analyse de cycle de vie (ACV).**Cite this article:**

Georges OUFFOUE, Jean-Philippe AKPOUE (2023). Impacts environnementaux du numérique : cas du métavers. Revue RAMReS – Sci. Appl. &amp; de l'Ing., Vol. 5(1), pp. 65-72. ISSN 2630-1164.

**1. Introduction**

La transition numérique caractérise notre époque, boostée par la crise covid-19. Multiples indicateurs : trafic réseau en hausse, cloud répandu, objets connectés en explosion, transformation des modes de vie. Notre monde est déjà largement digitalisé, la croissance continue. Pour accélérer et favoriser l'immersion en 4D, émerge le métavers.

Le concept de métavers provient de la science-fiction, apparaissant pour la première fois dans le roman de 1992, "Le samouraï virtuel" de Neal Stephenson. Il décrit un univers généré par ordinateur, accessible via lunettes et écouteurs. D'autres romans avaient dépeint

des mondes virtuels similaires sous différents termes, tels que "simulateur" dans un roman des années 1960 de Daniel F. Galouye ou "cyberespace" dans les romans de William Gibson du début des années 1980. Certaines personnes considèrent qu'elles explorent déjà le métavers depuis une vingtaine d'années, sur les premières plateformes sociales et 3D comme Second Life ou les jeux en ligne massivement multijoueurs. Par ailleurs, interagir avec des collègues ou des amis via des avatars 2D sur Gathertown ou Workadventure peut également être considéré comme une expérience dans le métavers [6].

Le métavers a été vulgarisé et présenté par Marc Zuckerberg en octobre 2021, comme un monde virtuel où vous pouvez y effectuer beaucoup de choses.

Dans sa forme contractée, métavers, « meta » plus « universe », désigne un monde fictif, connecté et immersif, dans lequel à travers l'utilisation de casques de réalité virtuelle, et grâce à votre avatar en 3D, vous pouvez y vivre une partie de votre vie (travail, divertissement, socialisation...).

Dans le métavers, nous pouvons par exemple choisir de personnaliser notre avatar, de construire et décorer un espace virtuel qui permet d'accueillir des communautés (aspect social et collaboratif). Cette capacité à créer « tout et n'importe quoi », couplée à la création artificielle de rareté d'objets numériques, a, par exemple, fait gonfler une bulle spéculative autour des NFT (non-fungible token). À cela s'ajoutent les nouvelles générations de casques virtuels grand public permettant

Une immersion toujours plus réaliste (aspect immersif). L'engouement pour le métavers atteint de nouveaux sommets.

Le métavers tout comme le numérique aura un impact certain sur l'environnement. Selon la dernière étude de GreenIT.fr, les impacts environnementaux annuels du numérique en France représentent 6,3% de la consommation d'énergie primaire, 3,3% des émissions de gaz à effet de serre (GES), 2,2% de la consommation d'eau du territoire et entraînent une excavation de près de 4 milliards de tonnes de terre.

Face à ces impacts qui sont grandissants le concept de numérique responsable est cité comme moyen permettant de répondre à cette problématique.

Le numérique responsable dans définition la plus partagée est une méthode d'amélioration continue qui vise à réduire les impacts environnementaux, sociétaux et économiques du numérique. Cette approche se décline en trois principaux axes :

- L'IT For Green: utilisation du numérique pour réduire les impacts d'autres secteurs d'activité
- L'écoconception, qui consiste à introduire les principes de sobriété lors de la construction des services numériques
- Le Green IT qui consiste à mesurer et réduire les impacts environnementaux des services numériques.

Notre étude dans ce papier s'articulera autour de ce dernier axe appliqué au métavers. En effet, bien que le métavers soit encore dans ses balbutiements, dans ce papier, nous proposons d'en savoir plus sur le potentiel impact environnemental de cette innovation.

A notre connaissance très peu d'études [2], [6], [7], [8] s'intéressent à ces impacts et sur l'ensemble du cycle de vie des équipements.

Nous nous baserons sur la méthode scientifique de l'Analyse du Cycle de Vie (ACV) standardisée selon les normes ISO 14040/44 et des résultats du projet de recherche et développement NégaOoctet.

Nous présenterons les contours méthodologiques de notre analyse à la section 2 ci-dessous. Les résultats d'étude seront explicités à la section 3. Nous concluons ce papier avec une discussion et envisagerons les travaux futurs.

## 2. Matériels et méthodes

### 2.1. Méthode d'évaluation

La méthode d'évaluation utilisée est l'analyse du cycle de vie (ACV)

#### 2.1.1. Fondamentaux

L'analyse du cycle de vie (ACV) est une méthode d'évaluation environnementale au même titre que le Bilan Carbone ou les analyses d'impacts, mais elle dispose de spécificités qui rendent son approche holistique unique. En effet, utilisée depuis la fin des années 90 et normalisée dans la série des ISO 14040 :2006 et ISO 14044 : 2006, cette méthode propose d'établir le bagage écologique d'un produit ou d'un service selon une approche :

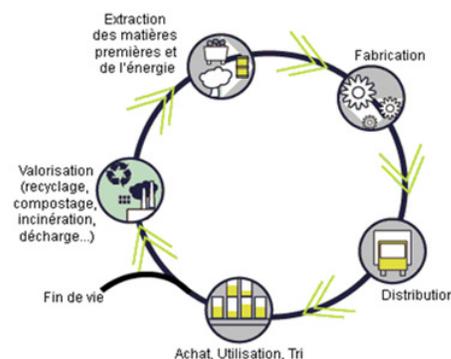


Figure 1 : étapes de l'ACV

**Multicritère** : Plusieurs indicateurs environnementaux sont à considérer de manière systématique en passant par le potentiel de réchauffement climatique, l'épuisement des ressources abiotiques, la création d'ozone photochimique, la pollution de l'eau, de l'air, des sols, l'écotoxicité humaine, la biodiversité. La liste des indicateurs n'est pas fixe mais dépend des secteurs d'activité.

**Cycle de vie** : afin d'intégrer les impacts générés lors de toutes les étapes du cycle de vie des équipements, depuis l'extraction des ressources naturelles souvent peu accessibles jusqu'à la production des déchets en passant par la consommation d'énergie en phase d'usage...

**Quantitative** : chaque indicateur est qualifié de manière chiffrée afin de pouvoir mettre sur une même échelle l'ensemble des externalités d'un produit ou d'un service et de prendre des décisions objectives.

**Fonctionnelle** : l'objet d'étude est défini par la fonction qu'il remplit afin de pouvoir comparer différentes solutions techniques.

**Attributionnelle ou conséquentielle** : L'analyse du cycle de vie permet de caractériser de manière traditionnelle les impacts environnementaux directs d'une solution via l'analyse du cycle de vie attributionnelle mais aussi les impacts environnementaux indirects ou systémiques au travers de l'analyse du cycle de vie conséquentielle. Dans le

cadre des ACVs menés pour NegaOctet, nous restons dans le champ des ACV attributionnelles.

Même si l'ACV est initialement plus appliquée sur le champ des produits, son périmètre d'actions a été élargi ces dernières années. Tout d'abord grâce à la norme ETSI 203 199 et aujourd'hui grâce aux nombreux travaux menés par les organisations professionnelles des télécommunications telles que l'ITU, par le consortium NegaOctet pour les services numériques ou encore par le Pôle Ecoconception pour les services en général.

Ces travaux permettent aujourd'hui d'alimenter la réglementation française et notamment la mise en application de l'article 13 de la loi anti-gaspillage et économie circulaire qui a pour objet de contraindre les opérateurs de réseaux de télécommunication à communiquer au grand public sur les émissions de gaz à effet de serre de la transmission de données.

Passer d'un produit à un service revient à conserver la philosophie multicritère et fonctionnelle mais à passer d'une approche circulaire (du berceau à la tombe) à une approche matricielle intégrant le cycle de vie de l'ensemble des équipements constituant les trois tiers (terminaux, réseaux, datacenter) permettant au service numérique de fonctionner.

Ainsi, un tel diagnostic environnemental permet d'éviter les transferts de pollution d'une phase à l'autre mais aussi d'un tiers à l'autre du service. Par exemple, lors du passage d'une solution en local vers une solution SaaS dans le cloud, l'analyse du cycle de vie permettra de s'assurer que les impacts évités au niveau des terminaux utilisateurs ne seront pas compensés par des impacts complémentaires sur le réseau.

### 2.1.2. Objet de l'ACV

De manière générale, réaliser l'Analyse du Cycle de Vie d'un service numérique revient à lui rendre sa matérialité et ses externalités environnementales. Il est pertinent d'appliquer cette méthode :

- Pour établir un diagnostic quantitatif des impacts environnementaux directs d'une solution numérique
- Pour identifier les leviers d'amélioration les plus significatifs en vue d'un projet d'écoconception
- Pour comparer des solutions techniques numériques et non numériques et établir des recommandations en fonction de choix techniques et de comportements
- Pour communiquer de manière objective sur des performances et des améliorations de services
- Pour piloter sa stratégie numérique responsable et intégrer l'empreinte des services numériques dans les reportings des entreprises

L'analyse du cycle de vie est un puissant outil d'aide à la décision au niveau de la stratégie étatique comme de la stratégie d'entreprise.

Par son caractère itératif, la méthode d'analyse du cycle de vie s'adapte à tous les niveaux de maturité d'équipe projet. On peut uniquement décider d'en appliquer la philosophie, faire une évaluation screening

ou chercher l'exhaustivité par l'élaboration d'une Analyse du cycle de vie conforme à l'ISO 14040.

## 2.2. Objectif de l'étude

Le but de l'analyse est de mesurer l'impact environnemental du métavers

## 2.3. Unité fonctionnelle

L'unité fonctionnelle est l'unité de mesure utilisée pour évaluer le service rendu par le service. Elle permet de comparer les impacts environnementaux de deux services, sur la base d'une unité commune. Cette unité reflète la fonction que le service apporte à l'utilisateur final. L'unité fonctionnelle retenue dépend du service étudié, de l'objectif du commanditaire et doit être définie lors de la réalisation de l'analyse du cycle de vie.

L'unité fonctionnelle peut-être perçue sous différentes visions :

- Si l'on considère tout un ensemble d'éléments ou un tiers maîtrisé par le déclarant (ex. datacenter, côté éditeur, niveau 1), on parle d'une vision concepteur / exploitant du service
- Si l'on considère un service numérique :
- Dans le cas du périmètre client (x comptes utilisateurs, représentant un utilisateur unique ou l'ensemble des comptes clients), on parle d'une vision compte client.
- Dans le cas du périmètre d'un acte métier, on parle d'une vision utilisateur du service.

Dans cette étude, notre unité fonctionnelle est

**Utiliser un casque de réalité virtuelle pendant 1h lors d'un jeu dans le métavers en France.**

## 2.4. Périmètre

Le périmètre est français. C'est important de le préciser à cause du mix électrique qui diffère d'un pays à l'autre ainsi et que les impacts environnementaux qui y sont associés

## 2.5. Frontières du système

En accord avec les référentiels en vigueur, les étapes suivantes sont exclues de l'évaluation environnementale :

- Les flux liés à la R&D ;
- Les flux liés aux transports des salariés du domicile jusqu'au lieu de travail et les déplacements professionnels ;
- Les flux liés aux services associés à un produit ou un système tels que la publicité, le démarchage et le marketing ;
- Les flux liés aux services administratifs ;
- L'éclairage, le chauffage, les sanitaires et le nettoyage des infrastructures.

### 2.5.1. Règle d'allocation

Pour chacun des équipements (IT et infrastructure technique collectés) qui permettent au service de fonctionner, les impacts environnementaux sont modélisés grâce à la base de données NégaOctet.

Les composants élémentaires tels que, les cartes mères, les processeurs, la mémoire qui constituent ces équipements ont été modélisés au préalable et sont disponibles dans la base de données NégaOctet.

Ainsi chacun de ces équipements en fonction de ses caractéristiques est reconfiguré à partir de ces composants élémentaires. En sortie de la modélisation, les impacts environnementaux de la fabrication et de la fin de vie des équipements (sous forme de facteurs d'émission) sont produits comme le montre la Figure 7 ci-dessous.

L'impact de l'utilisation de l'équipement comme nous le verrons ultérieurement est lié à la puissance de l'équipement et au mix énergétique qui a été redéfini dans la base NégaOctet.

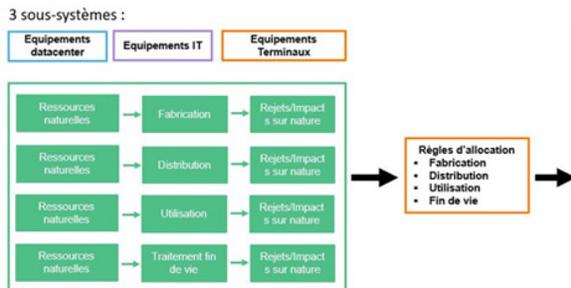


Figure 2 : Modélisation des équipements suivant les trois tiers.

Par conséquent, l'impact environnemental de l'ensemble des équipements IT est calculé comme suit (1 heure d'utilisation):

L'impact environnemental sur les différents indicateurs est égal à la somme des impacts de chacun des équipements (**éqp**) sur tout leur cycle de vie : fabrication (**fab**), distribution et utilisation (use) et fin de vie (**fdv**).

Puisque chacun de ces équipements a une durée de vie définie (**DDV(i)**), les impacts sur tout le cycle de vie sont ramenés à 1 heure de fonctionnement. Les impacts du transport et de l'installation sont intégrés à la phase de fabrication (**fab**).

Par conséquent l'impact du service numérique est égal à la somme des impacts des équipements IT, du réseau et du datacenter qui héberge le service

Les données de bases ayant servi à la réalisation de l'analyse sont présentées dans la figure 2 ainsi que dans les tableaux 1 et 2 ci-dessous :

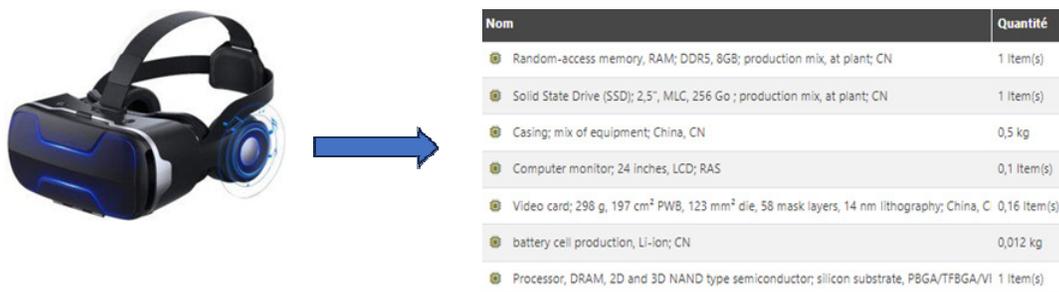


Figure 3 : Modélisation du casque

Tableau 1 Données de l'application traditionnelle

	Lots	Quantité	DDV	Utilisation en h/an	Ratio alloc	Conso (kWh)
Application traditionnelle	Smartphone	1	4	1	2,85388E-05	0,00368

Tableau 2.: Données de l'application du métavers

	Lots	Quantité	DDV	Utilisation en h/an	Ratio alloc	Conso (kWh)
Application métavers	Smartphone	1	4	1	2,85388E-05	0,003680
	Casque VR (Cambria)	1	4	1	2,85388E-05	0,014600

Tableau 3.: Axes de recherche du numérique responsable

Principaux Axes de recherche	Principales contributions	Principaux résultats	Problèmes couverts
Optimisation des consommations des logiciels (et des algo) d'IA de ML, durables)	Oprescu et al. (2022), Gutiérrez et al. (2022), Bambazek et al. (2022), Smith et al. (2015), Chen et al. (2018)	--Techniques telle que les k-anonymisation sembleraient moins énergivores --Réduction des opérations redondantes pour minimiser la consommation d'énergie	Complexité de l'analyse des interactions entre composants logiciels Prise en compte des contraintes de performance lors des optimisations.
Référentiels d'analyse environnementale	Wiedmann et al. (2014), Hilty et al. (2017), Ouffoue et al. (2021) (2022) (2023) (NégaOctet, PCR, SN DC et cloud, réseaux)	Définition de cadres méthodologiques complets pour l'évaluation de l'impact environnemental.	Adapter ces cadres aux domaines émergents (IA, ML, sécurité) Considération des interactions entre les produits
Base de données environnementale	Humbert et al. (2013), Frischknecht et al. (2016), Ouffoue et al. (2021) (NégaOctet)	--Création de base de données homogènes --Support à la prise de décision éclairée	Travailler sur plus de données d'équipements et services numériques
Optimisation du matériel et des DC	Beloglazov et Buyya (2010), Kusic et al. (2011) Orgerie et al. (2014), Wang et al. (2018)	--Optimisation du placement des VM et des serveurs --Optimisation des consommations des DC	Développement de modèles de prédiction pour une allocation de ressources plus précise.

### 3. Résultats, discussion et futurs travaux

#### 3.1. Indicateurs environnementaux considérés

Les résultats des impacts environnementaux sont exprimés suivant les indicateurs :

- **Epuisement des ressources abiotiques :**

- Exprimé en kg équivalent antimoine (en kg Sb eq).
- Evalue la quantité de ressources (minérales et métalliques prélevées à la nature, biodiversité...).



- **Changement climatique:**

- Exprimé en kg équivalent CO<sub>2</sub> (kg eq CO<sub>2</sub>).
- Quantifie l'émission de gaz à effet de serre.



- **Epuisement de la ressource en eau**

- Exprimé en m<sup>3</sup> équivalent
- Cet indicateur représente une consommation d'eau (par le service numérique) multipliée par un facteur prenant en compte le manque d'eau de la région où l'eau est consommée.



### 3.2. Evaluation des impacts environnementaux

Les résultats de l'analyse environnementale sur tout le cycle de vie (fabrication, utilisation et fin de vie) sont présentés sur toutes les figures ci-dessous.

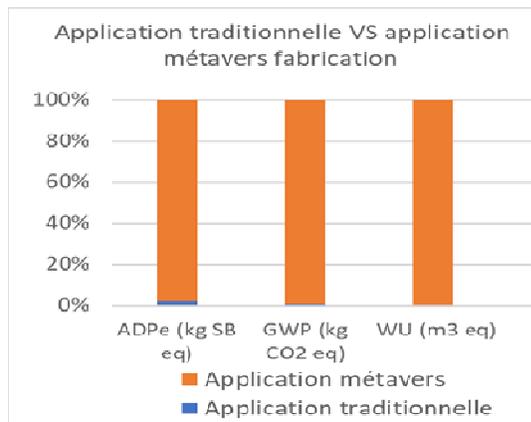


Figure 4: Comparaison des impacts en phase de fabrication pour une application traditionnelle et sa version sur le métavers

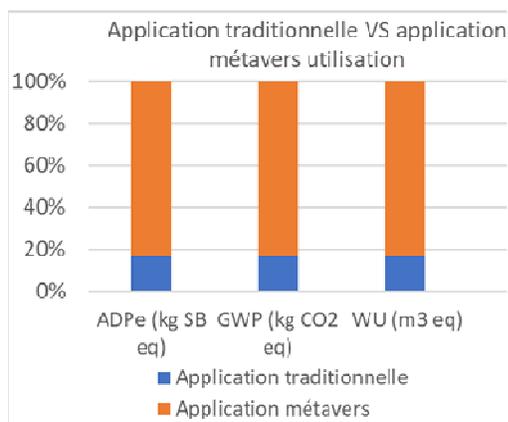


Figure 5: Comparaison des impacts en phase d'utilisation pour une application traditionnelle et sa version sur le métavers

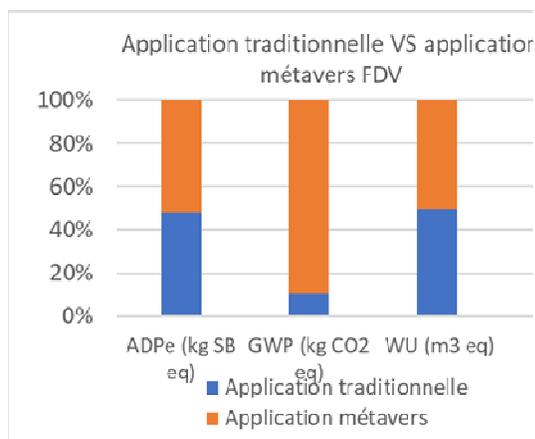


Figure 6: Comparaison des impacts en phase de fin de vie pour une application traditionnelle et sa version sur le métavers

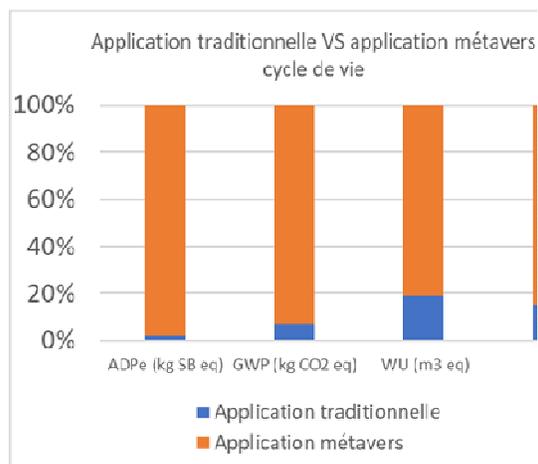


Figure 7: Comparaison des impacts sur tout le cycle de vie pour une application traditionnelle et sa version sur le métavers.

Comme l'on peut le constater, sur tout le cycle de vies, globalement l'application sur le métavers est largement plus impactante que l'application classique sur l'ensemble des indicateurs environnementaux concernés : à savoir émission de gaz à effet de serre (kg CO2 eq), épuisement des ressources abiotiques (kg SB eq) et consommation d'eau (m3).

**On peut affirmer ainsi qu'une utilisation d'une application dans le métavers entrainerait en moyenne 10 fois plus d'impact que cette même application traditionnelle.**

Ce constat est dû en grande partie à la fabrication du casque permettant une plus grande immersion dans le monde virtuel. Ces casques seront de plus en plus sophistiqués et intégreront des capacités de calcul avancées, du stockage flash et une bande passante réseau importante.

De plus, en se référant aux résultats du projet NégaOctet,

- les composants ayant le plus d'impact sur la plupart des indicateurs sont les composants constitués essentiellement de semi-conducteurs (RAM, SSD processeurs, etc).
  - Les composants miniaturisés (semi-conducteurs) génèrent plus d'impact que les composants mécaniques.
  - La fabrication des équipements est plus importante que leur utilisation.
  - Les logiciels (l'obsolescence) ont une influence sur la durée de vie des équipements.
- En effet la transformation d'une puce de silicium en composants électroniques miniaturisés requiert plusieurs étapes très énergivores et polluantes les unes les autres. Par ailleurs, le tableau ci-dessous présente l'impact de la fabrication pour un serveur de la variation du nombre de barrette RAM.

En conclusion, les configurations (par exemple quantité de mémoire RAM) des équipements informatiques (serveurs, stockage, etc.) influencent les impacts

environnementaux de la fabrication des équipements notamment sur l'indicateur d'émission de GES. Ainsi le dimensionnement au juste besoin des équipements informatiques du métavers est une piste d'écoconception non négligeable

### 3.3. Discussions et travaux futurs

Le numérique a un impact certain sur l'environnement. Au-delà de la consommation électrique et de l'empreinte carbone, le numérique impacte aussi les ressources naturelles non renouvelables, la biodiversité et l'eau.

Le métavers ne sera pas en reste car il nécessitera :

- Des anciens et nouveaux terminaux pour se connecter (ordinateurs plus puissants, casque de réalité virtuelle...),
- de réseau 5G ou 6G puissant pour se connecter,
- de nombreux datacenters (Edge datacenter) pour héberger les data générées par les interactions de ce monde, d'un maximum d'énergie en plus

Nous avons vu que l'impact environnemental du métavers est celui de l'ensemble des matériaux et technologies mises en œuvre comme le casque de réalité virtuelle dont l'impact est estimé entre 70 et 200 kg CO<sub>2</sub> eq sur l'ensemble de son cycle de vie, soit 10% du budget carbone annuel d'un humain soutenable (2 T Co<sub>2</sub>eq).

Dans notre étude nous avons trouvé qu'au minimum une application sur smartphone aurait une empreinte environnementale 10 fois plus importante dans le métavers que sans le métavers.

Ainsi en considérant tous les usages qu'entraînerait le métavers, nous pouvons affirmer que l'empreinte carbone du numérique risque de s'alourdir, annulant ainsi les progrès. Quelle que soit la solution envisagée, plus le nombre d'utilisateurs et d'applications sera élevé, et plus la sophistication des technologies sous-jacentes sera grande (qu'il s'agisse de métavers avec ou sans crypto-monnaies, avec ou sans casques), plus l'impact écologique sera significatif.

Outre les considérations environnementales, le métavers peut également engendrer des problèmes éthiques et sociaux. Le coût élevé du matériel nécessaire pour y accéder pourrait exclure une grande partie de la population mondiale (notamment en Afrique), aggravant ainsi les inégalités à une époque où la fracture numérique demeure préoccupante.

Ces nombreuses interrogations alimenteront certainement la recherche sur le numérique responsable en générale et sur le métavers en particulier. En effet Le tableau 3 ci-dessus montre quelques thématiques de recherche qui restent à être adressés.

Pour les futures ACV (Analyses du Cycle de Vie), étant donné que l'ACV est sensible aux données et à leur qualité, il peut être approprié de :

- Renforcer le reporting environnemental des équipements ;
- Suivre les caractéristiques (poids, composition matérielle, références réelles) des actifs tout au long de leur cycle de vie ;

- Encourager davantage de fournisseurs à faire preuve de transparence concernant les déclarations environnementales de leurs matériaux ou équipements. La synergie des acteurs académiques ainsi que des acteurs industriels permettra de tenir compte de tous ces aspects (environnementaux, éthiques et sociaux économique) pour assurer que le développement du métavers soit bénéfique pour nos état africains.

Pour l'heure les bonnes pratiques suivantes peuvent être appliquées :

- Virtualiser dans la mesure du possible
- Optimiser les codes informatiques
- Ecoconcevoir les services numériques

### 4. Conclusion

Le métavers offre des avantages considérables en termes de flexibilité et de nouveaux modèles économiques pour le monde du travail.

Cependant, il présente des inconvénients environnementaux tels que la nécessité de maintenir de nouveaux serveurs en permanence, des serveurs hautement performants en termes de calcul, et l'utilisation de terminaux puissants chez les utilisateurs, entraînant une augmentation du volume de données transférées.

Nous avons vu que l'impact environnemental du métavers est celui de l'ensemble des matériaux et technologies mises en œuvre comme le casque de réalité virtuelle dont l'impact est estimé entre 70 et 200 kg CO<sub>2</sub> eq sur l'ensemble de son cycle de vie, soit 10% du budget carbone annuel d'un humain soutenable (2 T Co<sub>2</sub>eq).

Dans notre étude nous avons trouvé qu'au minimum une application sur smartphone aurait une empreinte environnementale 10 fois plus importante dans le métavers que sans le métavers. Il est donc urgent d'anticiper ces impacts en mettant œuvre d'ores et déjà les bonnes pratiques de sobriété numérique et d'autre part ; adresser les sujets ouverts en ce qui concerne la recherche sur le numérique responsable en général et sur le métavers en particulier

### REFERENCES

- [1] Sénat, «Rapport d'information de la mission d'information - Note de synthèse,» Paris, 2020
- [2] P. Guitton et N. Roussel, «Le métavers, quels métavers ?,» HAL Open science, <https://inria.hal.science/hal-03599140/document>, 2022.
- [3] VonGuru, «Focus sur le métaverse – Que nous réserve l'avenir digital ?,» 26 Juin 2022. [En ligne]. Available: <https://vonguru.fr/2022/06/20/focus-sur-le-metaverse-que-nous-reserve-lavenir-digital/#:~:text=M%C3%A9taverse%20et%20digitalisation%20des%20entreprises&text=Le%20m%C3%A9taverse%20est%20pr%C3%A9sent%C3%A9%20comme,certains%20outils%20digitaux%20d%C3%A9jà>. [Accès le 2 Juillet 2023].
- [4] Jaesa, «Quelles sont les applications possibles du Métavers ?,» 10 Mai 2022. [En ligne]. Available: <https://iatranshumanisme.com/2022/05/10/quelles-sont-les-applications-possibles-du-metavers/>. [Accès le 30 Juin 2023].

[5] F. Bordage, «Empreinte environnementale du numérique mondial.» Septembre 2019. [En ligne]. Available: [https://www.greenit.fr/wp-content/uploads/2019/10/2019-10-GREENIT-etude\\_EENM-rapport-accessible.VF\\_.pdf](https://www.greenit.fr/wp-content/uploads/2019/10/2019-10-GREENIT-etude_EENM-rapport-accessible.VF_.pdf) . [Accès le 20 Juin 2023].

[6] Technology for change, «Metavers ou Meta-waste ? Au-delà de la « hype », quels impacts environnementaux, sociétaux et industriels de cette nouvelle « révolution » numérique ?.» 15 Juin 2022. [En ligne]. Available: [https://www.linkedin.com/pulse/metavers-ou-meta-waste-au-del%25C3%25A0-de-la-hype-/?trackingId=.](https://www.linkedin.com/pulse/metavers-ou-meta-waste-au-del%25C3%25A0-de-la-hype-/?trackingId=) [Accès le 2 Juin 2023].

[7] C. Stoll, U. Gallersdorfer et L. Klassen, «Climate impacts of the metaverse,» *Joule*, Vols. %1 sur %2ISSN 2542-4351, n° %1<https://doi.org/10.1016/j.joule.2022.10.013>, pp. 2668-2673, 2022.

[8] Z. Allam, A. Sharifi, S. E. Bibri, D. S. Jones et J. Krogstie, «The Metaverse as a Virtual Form of Smart Cities: Opportunities and Challenges for Environmental, Economic, and Social Sustainability in Urban Futures.,» *MDPI*, vol. <https://doi.org/10.3390/smartcities5030040>, n° %15, pp. 771-801, 2022.