



GOUVERNEMENT

*Liberté
Égalité
Fraternité*

Mission exploratoire sur les métavers

Adrien Basdevant

Camille François

Rémi Ronfard

Octobre 2022

*« Il faut toujours connaître les limites du possible.
Pas pour s'arrêter, mais pour entreprendre l'impossible
dans les meilleures conditions. »*

Romain Gary, *Charge d'âme*, 1977

Contexte :

Par une lettre de mission en date du 14 février 2022, le Ministre de l'Économie, des Finances et de la Relance, la Ministre de la Culture ainsi que le Secrétaire d'État chargé de la Transition numérique et des Communications électroniques ont souhaité la mise en place d'une mission exploratoire sur le développement des métavers. Le présent document constitue le fruit de cette mission, aboutie en **juillet 2022**, et qui a été portée par **Camille François**, chercheuse à Columbia University, **Adrien Basdevant**, avocat au Barreau de Paris, et **Rémi Ronfard**, chercheur à Inria.

Sommaire

Sommaire	5
Synthèse des pistes de réflexion.....	7
I. De quoi le Métavers est-il le nom?	8
II. Les grands axes d'une stratégie métaversique : organiser l'infrastructure, soutenir l'innovation, miser sur les usages culturels, orchestrer la régulation et prendre en compte les enjeux sociétaux et environnementaux.	11
Les conditions d'un horizon commun : organiser l'infrastructure du Métavers	11
Soutenir l'innovation.....	12
Miser sur les usages culturels	13
Orchestrer la régulation	14
Éducation & Recherche	15
Acceptabilité sociale et enjeux environnementaux.....	16
Synthèse des propositions	17
Partie I — Métavers, définitions et origines	19
I. Préhistoire du Métavers.....	20
Littérature et cinéma	20
Web	21
Jeux vidéo	23
Mondes virtuels.....	25
Réalité virtuelle (RV).....	27
Réalité augmentée (RA).....	30
Chaînes de blocs et cryptomonnaies.....	31
II. De quoi le métavers est-il le nom?	34
Définitions des métavers.....	34
Taxonomie des métavers	36
Finalités des métavers, illustrations et limites.....	38
Partie II — Panorama des enjeux liés aux développements des métavers.....	45
I. Une opportunité culturelle pour la France	46
Les métavers, de nouveaux médias immersifs et créatifs	46

Promouvoir la filière française et européenne des industries culturelles et créatives.....	48
La formation et la recherche au soutien des enjeux de souverainetés	53
II. Analyser la chaîne de valeur des métavers.....	57
Dans quelles briques technologiques investir?	57
Cartographie des métavers et des acteurs.....	60
Actifs numériques et économie des créateurs	68
III. Des freins structurels technologiques à dépasser	73
Des infrastructures technologiques à perfectionner	73
Développer les outils de création 3D.....	75
La quête de l’interopérabilité.....	77
IV. Repenser notre rapport au numérique.....	81
Acceptabilité sociale, enjeux environnementaux : pourquoi le métavers soulève de véritables questions de société	81
En finir avec la captation de nos attentions.....	85
Des sujets de santé publique.....	86
V. Anticiper des cadres de régulation adaptés.....	90
Par-delà le RGPD, le DSA et le DMA	90
Les identités numériques au sein des métavers.....	93
Vers la privatisation des outils d’enquête et des procédures de justice	97
Annexe 1 — Lettre de mission	101
Annexe 2 — Panorama de certains métavers en 2022	104
Annexe 3 — Limites des métavers	107
Références et remerciements.....	110
Entretiens.....	110
Contributions reçues	112
Références bibliographiques	113
Remerciements.....	115

Synthèse des pistes de réflexion

Cette mission exploratoire a eu comme objectif, en un temps court, de présenter les enjeux des «métavers» pour la France. Elle pose, nous l'espérons, quelques jalons qui permettront de clarifier le débat, de saisir les opportunités émergentes, de mieux appréhender les risques du sujet et de rassembler l'écosystème français autour d'un horizon commun. Les grandes lignes en sont résumées dans ce sommaire en deux parties, où la première s'attache à clarifier les termes et principaux acteurs, et la seconde à esquisser les axes d'une stratégie «métaversique» pour la France. C'est à la fois avec humour et sérieux que nous utilisons librement l'adjectif métaversique, pour souligner les possibilités plurielles et les horizons multiples des technologies sociales immersives, et inviter imagination et créativité sur ces sujets.

Dix pistes de réflexion (P1, P2, P3, P4, etc.) apparaissent dans ce sommaire : elles suggèrent des clés d'entrée pour que la puissance publique puisse rapidement se saisir des chantiers essentiels à la constitution d'une stratégie française des métavers. D'autres pistes et recommandations sont articulées tout au long du rapport. Se dessinent également en filigrane les aspirations, frustrations, recommandations et interrogations d'un grand nombre de nos auditionné(e)s, dont la candeur et la générosité ont guidé nos explorations au cours de cette mission.

I. De quoi le Métavers est-il le nom ?

Ou comment résister à l'étroite vision de la Silicon Valley, raconter les futurs possibles des technologies de l'immersion, et rassembler l'écosystème français autour d'un horizon commun.

- **Polysémie du Métavers.** Nos auditions ont d'abord fait ressortir une grande confusion des acteurs du secteur face au terme Métavers, qui est défini différemment par chacun («c'est l'immersion», «c'est l'Internet», «non! c'est le web», «c'est un assemblage de technologies»). Il est perçu avec une certaine méfiance depuis la campagne marketing de Facebook/Meta en 2021. Il nous a paru utile, au sein de la mission, de fournir quelques éléments sur la «préhistoire» du Métavers, en mettant en évidence ses éléments constitutifs afin de comprendre ce moment de convergence et d'accélération technologique.
- **Résister à des visions réductrices (im)portées par des campagnes de marketing.** À mesure que se dessine une stratégie française des technologies sociales de l'immersion, il est essentiel d'interroger avec suspicion les visions contraignantes et restrictives portées par d'autres, que ce soit par les acteurs privés tels que Meta/Facebook ou par des puissances publiques étrangères, comme la Chine et la Corée du Sud, tant ces visions pourraient façonner notre imaginaire et impacter nos quotidiens. Cette réduction technologique est contenue et illustrée dans l'exercice classique des représentations des «technological stacks» du Métavers, un passage obligé des billets de blogs des capital-risqueurs américains étudiant le Métavers. Dans ces descriptions, les «couches technologiques» sous-jacentes au Métavers sont présentées sans questionnement préalable de l'objet qui les contient : ainsi, des pans essentiels de briques technologiques qui constituent le futur des technologies immersives manquent à ces schémas, qui traduisent une vision normative, contraignante et réductrice du Métavers et de ses évolutions possibles.

- **L'arbre Meta, la forêt Silicon Valley.** Au-delà des projets de Meta, qui font couler beaucoup d'encre, les grands acteurs de la Silicon Valley et les industriels du numérique ont aujourd'hui des stratégies et des visions divergentes du futur des technologies immersives. Une grande partie de ces acteurs sont par exemple concentrés sur des applications qui touchent des publics professionnels. Il est essentiel d'analyser les desseins de Nvidia, de Microsoft, de Siemens, et la course au développement de jumeaux numériques industriels dont Dassault Systèmes est à la fois le champion et le pionnier : c'est aussi par là que se profilent les chemins métaversiques les plus prometteurs pour la France. D'autres, comme Snapchat, Niantic ou Apple dans une certaine mesure, font le pari de la réalité augmentée plutôt que de la réalité virtuelle, parfois même en portant un discours très critique sur l'aspect « dystopique » des visions du Métavers trop fortement ancrées sur des technologies de réalité virtuelle en proie à isoler les utilisateurs les uns des autres, et du monde qui les entoure. Côté Silicon Valley, on observe donc également une bataille de perspectives au sujet de ce que peut représenter le « Métavers » : ouvert ou fermé, grand public ou industriel, en réalité virtuelle ou augmentée, grand public ou spécialisé, etc.
- **Ne jetons pas le bébé Métaversique avec l'eau du bain de Facebook!** Depuis plusieurs années, et bien avant que Facebook s'en préoccupe, le terme de Métavers est utilisé pour décrire l'horizon commun des technologies sociales de l'immersion. Ces technologies progressent à vitesse éclair : microélectronique (nano-OLED, capteurs de mouvement, spatialisation sonore), processeurs graphiques embarqués, rendus temps réel en haute résolution vidéo comme audio, etc. Les futurs réseaux sociaux, connectés et immersifs, émergent devant nos yeux, à travers nos écrans d'ordinateurs, de smartphones, et des premiers visiocasques et lunettes de réalité augmentée et virtuelle. Ils dessinent des horizons pluriels, qui appellent une vraie stratégie de la part des acteurs gouvernementaux afin d'en saisir les opportunités et les risques. Comme avant elle l'intelligence artificielle ou le cyber, cette « Stratégie Métaversique » devra contenir à la fois l'ensemble des grands enjeux du numérique et appeler à une compréhension granulaire des enjeux propres à l'immersion sociale.
- **Vers une définition souple, qui suggère la pluralité des horizons des technologies de l'immersion.** Afin de guider cette stratégie, notre mission propose une définition de travail. Elle s'attelle d'abord à distinguer le concept abstrait du *Métavers* « avec un grand M » (comme on a pu parler de l'Internet « à majuscule ») qui décrit un concept de l'immersion, des *métavers* à minuscules. Le terme métavers avec une minuscule est utilisé quant à lui pour décrire les instanciations ou implémentations des principes du Métavers. Autrement dit, le concept de Métavers contient en lui une multitude de possibilités, de services, d'espaces, plus ou moins ouverts, que l'on nommera ci-après « métavers » avec un « m » minuscule. Notre définition de travail s'attelle ensuite à séparer les éléments *essentiels* et *constitutifs* des métavers des *modalités possibles d'expression* de ces métavers. Ainsi, les caractéristiques essentielles des métavers sont : l'existence de mondes virtuels, en 3D, en temps réel, immersifs, persistants et partagés. Les modalités à date se concentrent sur la possibilité d'y accéder avec ou sans visiocasques, d'y utiliser ou non des avatars, d'y échanger avec ou sans technologies de registres distribués. Ces modalités continueront à évoluer avec les

usages et les technologies : séparer les caractéristiques essentielles des métavers de leurs modalités possibles d'expression permet de mieux organiser stratégies, paris et formations pour saisir les opportunités métaversiques. Ainsi pour nous, métavers et blockchains (tout comme métavers et Web3) ne sont en rien consubstantiels, mais certains métavers pourraient reposer sur des technologies de registres distribués. Différents types de métavers se dessinent déjà, avec différents degrés d'acceptabilité sociale (en effet, à l'heure actuelle, les métavers sont davantage poussés par l'industrie dans une logique de l'offre, beaucoup plus que par le public dans une logique de la demande).

- **La France, bien positionnée dans les technologies immersives.** Ce travail de (re)définition permet également de raconter la volonté de leadership de la France dans les secteurs des technologies immersives : c'est à la fois un leadership technologique et intellectuel, qui propose une vision différente du futur. On voit ici des parallèles avec l'histoire du Minitel, qui contiennent en eux-mêmes une mise en garde sur comment effectuer ce travail narratif : en effet, dans l'imaginaire collectif (et entrepreneurial) français, le Minitel est davantage perçu comme un échec de politique industrielle que comme une innovation majeure apportant une contre-perspective essentielle à une logique américaine qui deviendra par la suite celle de la Silicon Valley (c'est pourtant ainsi que la recherche américaine couvre le Minitel, comme un succès et une innovation publique!).
- **Où est l'écosystème français du Métavers?** La France possède de nombreux atouts à faire valoir dans cet horizon commun des technologies de l'immersion, tel qu'en témoignent les succès de grandes structures comme Ubisoft, Dassault Systèmes ou encore Ledger, ainsi que les multiples achats de startups innovantes par des groupes américains (Pixyz par Unity, Clay AIR par Qualcomm, Sketchfab par Epic, NextMind par Snapchat,...). La filière française de la création immersive a également donné naissance à des studios de fabrication reconnus mondialement (Atlas V, Small, Backlight Studio, Stage11, Innerspace, Emissive, etc.). D'autres projets innovants — indispensables pour naviguer et réaliser des transactions dans les métavers — sont en cours de développement afin d'offrir des solutions de gestion d'identités, de stockage décentralisé, ou de sécurisation des actifs numériques. Il en ressort ainsi que pionniers et pépites des métavers français se répartissent entre deux écosystèmes. Ces deux écosystèmes (qui sont aussi deux générations, et deux groupes d'acteurs différents) sont clairs et distincts. D'un côté, le premier écosystème réalité virtuelle / réalité augmentée / réalité mixte (ou réalité étendue); et de l'autre l'écosystème Blockchain / Web3 / NFT. Il existe des talents français dans ces deux écosystèmes. Une stratégie française des métavers doit nécessairement couvrir ces deux écosystèmes à la fois, même si en réalité peu les réunissent à date. Les défricheurs français du courant VR/AR/XR sont réservés face à ce nouveau mot à la mode qui semble présenter à la fois un risque («*on va tout confondre*») et être porteur d'une promesse (de nouveaux financements, une attention renouvelée pour le secteur). Ils expriment leur inquiétude quant au manque de stratégie française pour soutenir ce secteur pionnier et se sentent courtisés à l'étranger, mais peu compris et considérés en France. Cet ensemble est dynamique, mais disparate : il nous semble souhaitable de rassembler ces deux écosystèmes et de créer les conditions d'un dialogue entre tous les acteurs

français des métavers, en concertation avec les organismes publics de recherche, pour faciliter l'émergence et la mise en œuvre d'une stratégie française des métavers.

- **Mobiliser rapidement cet écosystème autour de projets concrets à l'horizon imminent.** Cet écosystème des acteurs français du Métavers doit être réuni et mobilisé autour de projets ambitieux. À cet égard, notre première piste de réflexion (P1) suggère de se **saisir de l'opportunité des Jeux olympiques pour rassembler ces acteurs autour de projets concrets** au sein d'un consortium public/privé placé sous le pilotage d'Inria et pour proposer des actions de grande visibilité autour d'expériences immersives pouvant être partagées avant, pendant et après les Jeux olympiques et paralympiques (entraînement/compétitions, transport/tourisme, coulisses/échanges avec les athlètes).

II. Les grands axes d'une stratégie métaversique : organiser l'infrastructure, soutenir l'innovation, miser sur les usages culturels, orchestrer la régulation et prendre en compte les enjeux sociétaux et environnementaux.

Ou comment organiser une politique publique des métavers qui reflète nos valeurs, soutient nos atouts économiques et culturels et adapte nos outils de régulation aux risques émergents.

Les conditions d'un horizon commun : organiser l'infrastructure du Métavers

- **Vers des métavers libres et interopérables.** L'avenir des technologies de l'immersion n'est pas encore décidé et beaucoup se jouera (comme cela a pu être le cas pour Internet et pour le web) sur les standards technologiques qui s'imposeront dans les années à venir. Il semble souhaitable (P2) **de réinvestir les instances de négociation des standards techniques**, et que la France et les principaux acteurs français (du secteur numérique de l'immersion, mais aussi de la recherche sur ces sujets) **participent activement aux discussions sur l'interopérabilité** des technologies de l'immersion. Il est urgent de reprendre place dans les instances de standardisation (groupe de travail «Immersive web» du W3C, consortium Metaverse Standards Forum) afin de participer en amont à l'élaboration des normes, plutôt que d'en subir les conséquences en aval. Cela nécessite une implication de l'ensemble de l'écosystème et de la puissance publique afin de converger sur des positions nationales claires à défendre, et de mettre en place des expérimentations pour conforter ces positions. Les institutions de standardisation des couches techniques du web (IETF, W3C, Web3D, Khronos...) sont ouvertes, accessibles aux personnes physiques comme morales. La présence de cadres de haut niveau représentant le secteur public français, comme c'est désormais le cas pour d'autres instances de négociation de standards numériques, peut permettre la co-création de l'infrastructure du Métavers. La France défend un internet ouvert, libre et sûr, commun de l'humanité : ces positions doivent se traduire également dans les

instances diplomatiques et techniques de négociation sur le futur des technologies de l'immersion.

- **Organiser les services communs dans le Métavers.** Au-delà de la participation à l'élaboration de standards ouverts, il semble souhaitable que (P3) **la puissance publique s'attelle à faire émerger les services communs et essentiels permettant l'avènement d'une pluralité de métavers interopérables.** Cette vision du rôle de la puissance publique dans le Métavers priorise la constitution de briques technologiques ouvertes, de confiance et gratuites (services interopérables et sécurisés, données ouvertes) plutôt que la provision de services *dans* le Métavers à proprement parler. Pour le dire autrement : il semble judicieux d'encourager les efforts d'institutions comme l'Institut national de l'information géographique et forestière (IGN) qui produit et met à disposition des jeux de données géographiques ouverts et prometteurs pour de futures applications immersives, ou de travailler sur le futur d'un service d'identification interopérable de confiance (par exemple fondé sur des identités sécurisées décentralisées), plutôt que de développer des applications permettant aux usagers d'effectuer leurs démarches administratives dans des mondes immersifs. Cette dernière approche, qui apparaît clairement dans la stratégie sud-coréenne du Métavers par exemple, nous semble faire fausse route en France étant donné l'absence de besoin et de demande, et les barrières déjà rencontrées dans la numérisation des services publics. Une approche plus prometteuse consisterait à collaborer à travers une stratégie publique organisée avec les différentes entités publiques qui détiennent des technologies et des services qui seront autant de briques essentielles et de moteurs d'innovation des métavers publics français.

Soutenir l'innovation

- **Développer une analyse rigoureuse des chaînes de valeur des métavers.** Plutôt que de se concentrer à faire émerger le «Google européen du métavers», il semble stratégique de protéger, soutenir et encourager les acteurs en pointe sur des briques technologiques peut-être plus modestes, mais essentielles à la constitution des métavers de demain. Afin de trancher les grands débats d'investissements stratégiques (ex. Où investir les budgets publics de soutien industriel? Faut-il ou non encourager un moteur 3D concurrent à Unreal et Unity? Est-il clé qu'il existe une offre française de visiocasques et de leur système d'exploitation?), il est essentiel (P4) de **développer une analyse rigoureuse des différentes chaînes de valeur des métavers** afin de guider au mieux d'une part les domaines d'investissement stratégiques, d'autre part les risques de perte de souveraineté ou de fuite de valeur. Une stratégie économique du Métavers viendra ici consolider et protéger les filières industrielles de la réalité virtuelle, de la modélisation 3D, de l'animation 3D et du jeu vidéo, à éviter autant que possible la fuite des cerveaux, accompagner les startups dans leur développement, protéger les fleurons, écouter et engager les leaders.
- Des éléments stratégiques de cette chaîne de valeur sont déjà embarqués dans des technologies du quotidien, sans que l'on s'en rende nécessairement compte. Ainsi, des millions de citoyens européens ont déjà dans leur poche des scanners sophistiqués LiDAR («Light Detection and Ranging»), car ceux-ci sont maintenant

intégrés par défaut aux iPhone Pro. Ils permettent la capture instantanée de modèles 3D en haute définition, et par conséquent l'avènement potentiellement rapide d'une première génération d'univers augmentés et participatifs.

Miser sur les usages culturels

- **Il est urgent de dépasser la dichotomie entre technologies et usages**, qui est souvent ressortie lors des entretiens de la mission. La dichotomie entre «usages» et «technologies» est rapidement contre-productive : le secteur de la culture n'est pas seulement créateur de contenu et peut en réalité être un vrai laboratoire. Les auditions de la mission avec les acteurs du secteur culturel font ressortir une grande innovation, freinée par la peur que la valeur de ces projets culturels immersifs soit capturée par les acteurs étrangers (notamment américains), «comme le cinéma français avec Netflix».
- **Que nous dit la Joconde Métaversique?** Malgré cette angoisse très présente, les acteurs du secteur culturel ne sont pas équipés d'outils permettant une compréhension claire des différents systèmes de distribution des contenus immersifs et de leurs modalités. Afin de démontrer à la fois les enjeux, la complexité et les possibilités des différentes modalités d'expression des œuvres culturelles dans le métavers, la mission propose un exercice ouvert, celui de la *Joconde Métaversique*. Cet exercice est une invitation à penser l'ensemble des déclinaisons possibles de la Joconde dans les formats divers des technologies de l'immersion : une Joconde en réalité virtuelle, que l'on pourrait explorer avec un casque Lynx en se promenant dans les différentes couches de peinture originelles du tableau; une Joconde en réalité augmentée, qui permettrait aux jeunes visiteurs du Louvre présents sur site de taguer l'œuvre et de voir dans une galerie immersive les créations d'autres artistes et amateurs ayant été invités à taguer la Joconde; une Joconde en tokens, permettant une levée de fonds et la constitution d'un DAO des *Amis de la Joconde*, etc. Bref, les déclinaisons sont quasiment infinies, et la mission recense quelques projets déjà réalisés et quelques pistes pour l'imagination. Au-delà de l'aspect ludique de l'exercice, ces déclinaisons de la Joconde Métaversique permettent de mieux expliciter la variété des formats et des canaux de distribution de ces projets, et la prédominance de certains contrôleurs d'accès (*gatekeepers*) qui sont souvent absents des débats sur la capture de valeur dans le secteur culturel pour les œuvres immersives (par exemple Apple, pour toutes les déclinaisons qui nécessitent une application smartphone). Pour être complet, il faudrait décliner l'exercice sur des œuvres spatiales et temporelles, ce qui dépasse malheureusement le cadre nécessairement limité de notre mission exploratoire.
- **Réconcilier la souveraineté technologique et la souveraineté culturelle.** Là où les acteurs économiques parlent volontiers de souveraineté technologique, les acteurs culturels se préoccupent de souveraineté culturelle dans les métavers. Ces deux récits sont à réconcilier, notamment (P5) par la **mise en place de commandes publiques pour joindre ces deux volets et soutenir des attelages hybrides entre structures françaises technologiques et institutions culturelles**. S'il a existé quelques projets remarquables qui incarnent ces attelages hybrides, ils restent aujourd'hui l'exception plutôt que la

norme. À travers l'Europe, on observe en effet une certaine dispersion des efforts entre les domaines technologiques des métavers et ceux des applications (notamment culturelles) ce qui a pour effet que les grands projets immersifs culturels et de mise en valeur du patrimoine sont souvent basés sur des solutions techniques américaines et réalisés en partenariat avec des entreprises US (Microsoft pour « All Kinds of Limbo » au National Theatre, Epic Games, Magic Leap et Intel pour « Dream » à la Royal Shakespeare Company; Google Arts & Culture pour « Dans l'intimité de Kandinsky » au Centre Pompidou). Les métavers constituent une opportunité culturelle pour la France. La commande publique dans ces domaines pourrait servir de levier pour favoriser le développement de solutions technologiques souveraines et innovantes, créatrices d'emplois et de nouveaux marchés pour les entreprises françaises.

Orchestrer la régulation

- **Adapter l'application des cadres existants au sujet métaversique.** Les différents cadres de régulation visant le numérique en général et les réseaux sociaux en particulier posent des jalons essentiels permettant d'organiser la responsabilisation des plateformes, la protection des données personnelles ainsi que la gestion des risques sociotechniques. Une grande partie des risques que ces textes (comme le DSA, le DMA, ou l'AI Act) visent à réguler, de la modération des contenus aux biais algorithmiques, se traduiront de manière nouvelle dans les métavers. Il est urgent de (P6) **lancer dès maintenant le travail d'adaptation, notamment du RGPD, du DSA et du DMA, aux enjeux métaversiques.**
- **Web3, renforcer l'expertise.** D'un point de vue réglementaire, les retours de l'écosystème français du Web3 soulignent l'inadéquation et le manque d'expertise des messages affichés au niveau européen (projet de règlement européen MiCA, refonte du règlement TFR, obligations sur les identités numériques ou wallet). Nombreux envisagent d'entreprendre hors UE (Suisse, USA, etc.). Les experts existent en France sur ces questions, à la fois dans la recherche et dans les institutions publiques : il faut impérativement s'appuyer sur eux pour aider à guider la régulation naissante (sinon la place sera prise rapidement par les lobbys industriels).
- Il est indispensable de disposer d'outils et de méthodes d'analyse français pour comprendre et suivre ce qui se passe dans les métavers. Pour cela, il paraît clé (P7) d'investir dans les outils et les techniques d'analyse qui permettront aussi bien la **détection des infractions pour remonter aux auteurs qu'à percevoir l'impôt.** Sans cela, un réel risque de souveraineté se profile, ce qui est déjà le cas dans le domaine de l'analyse des réseaux de criminalité dans les cryptomonnaies où beaucoup d'institutions publiques dépendent d'outils et d'entreprises américaines. L'opportunité de créer un « Chainalysis français » (pour prendre l'exemple d'une compagnie incubée par In-Q-Tel, fonds d'investissement du renseignement américain) pour limiter nos dépendances technologiques et économiques doit être considérée au plus tôt.

Éducation & Recherche

- **Investir dans une recherche ciblée.** Les risques évoqués à propos des métavers sont souvent des calques des enjeux communs à de nombreux écosystèmes numériques et en particulier aux réseaux sociaux (harcèlement, désinformation, radicalisation, etc.). Beaucoup des publications actuelles et des projets de « métavers éthique » s'arrêtent sur ce calque, apportant peu de précisions et de réponses concrètes à ces enjeux sociétaux émergents. Ceux qui pensent que les enjeux des réseaux sociaux vont se manifester dans les métavers ont raison, mais il y a urgence à investir dans des réflexions plus spécifiques et précises, sans quoi le retard pris sur la régulation des réseaux sociaux adviendra également pour les métavers.
- De la même manière qu'il existe une tendance à promouvoir les promesses de ces transformations, il existe une tendance de fond visant à critiquer ces évolutions sans s'en donner réellement les moyens. Les enjeux sociétaux et éthiques sont fondamentalement différents en fonction des types de métavers considérés. Dans le cas de la réalité virtuelle, apparaît par exemple une inquiétude liée à l'utilisation de casques pouvant entraîner des expériences de déréalisation ou de dépersonnalisation. Pour les métavers en relation avec des registres distribués se posent des questions relatives à la propriété des actifs immatériels, les conditions de leur protection et sécurisation notamment informatique, ainsi que des enjeux de recouvrement de l'impôt sur les transactions en cryptomonnaies. La réalité augmentée de son côté vient amener des « couches digitales invisibles » sur le monde partagé, ouvrant de nouvelles possibilités d'abus à la fois industriels (comme la publicité invasive) et sociétaux. Il existe bien sûr des préoccupations communes, comme l'enjeu de la transition écologique, de la sécurité informatique ou encore de l'acceptation sociale voire du désir même de l'avènement de ces nouveaux usages.
- En bref, il s'agit pour mieux comprendre et aborder ces impacts éthiques et sociétaux de (P8) **réaliser un investissement dans des initiatives de recherche interdisciplinaire** (informatique, neurosciences et sciences sociales) de grande ampleur et à long terme, utilisant les dispositifs existants (France 2030, PIA 4, PEPR, ANR) pour développer simultanément des métavers expérimentaux guidés par des besoins sociétaux (culture, santé, éducation) et les moyens d'en évaluer les risques sociotechniques par des études empiriques.
- **La France bénéficie d'ores et déjà de filières d'excellence dans les technologies de l'immersion**, à la fois dans ses filières techniques (French Tech) comme dans ses filières créatives (French Touch), mais il lui manque l'équivalent d'un institut innovant interdisciplinaire (sur le modèle, par exemple, du MIT Media Lab) pour rapprocher ces deux filières de la recherche publique et les inscrire dans la durée. La mission propose (P9) **la création d'un institut de recherche et coordination, sur le modèle de l'Ircam**, qui serait à la fois un laboratoire de recherche en informatique dédié aux arts immersifs, un lieu de coordination entre chercheurs et artistes pour la création d'œuvres immersives innovantes dans les métavers et un comptoir d'expertise pour toutes les institutions culturelles concernées.

- **Les formations permettant de créer des contenus de qualité** (modélisation 3D, infographie, animation, postproduction, effets, développement des interactions en réalité mixte, bon niveau des écoles d'ingénieur, écoles de jeu vidéo et universités pour la programmation dans le domaine du jeu) sont des éléments importants à prendre en compte dans les forces de la France, souvent considérée comme acteur majeur des expressions numériques culturelles, dans le marché de la création. Ces formations devraient être encouragées dans un mode applicatif et concret afin de favoriser le dialogue et les synergies entre scientifiques et créateurs. Il est en effet urgent d'intégrer des étudiants de tous niveaux sur ces questions. Les écoles telles que Rubika (animation 3D, jeu vidéo) sont reconnues internationalement. Ces filières devraient être renforcées et complétées.

Acceptabilité sociale et enjeux environnementaux

- **Enfin, il semble fondamental (P10) d'explorer des solutions écoresponsables et de développer un système de mesure de l'impact environnemental des infrastructures du Métavers.** Les technologies associées au Métavers sont pointées du doigt pour leur caractère très énergivore, à rebours des objectifs actuels de réduction de l'empreinte carbone. L'effort d'investissement dans l'innovation ne s'oppose pas à des objectifs de durabilité mais doit au contraire permettre de développer des solutions au service de la sobriété numérique.
- Les évolutions technologiques récentes et leurs usages ont été marqués par des modèles d'affaires fondés sur la captation des attentions et la constitution d'acteurs oligopolistiques, tout comme de nouvelles formes de précarisation ou une inégale répartition de la valeur. Ces technologies viennent avec des besoins croissants de captation de données (par exemple, les scans de la totalité de l'environnement des utilisateurs, par lunettes et téléphones en réalité augmentée, par casques dans la réalité virtuelle). Cela pose à court terme des enjeux de vie privée importants, et potentiellement nouveaux pour ce qui est des captations de données cognitives : certains pays, comme le Chili, ont pris sur ces sujets une mesure d'avance en consacrant des « neuro-droits », une approche plébiscitée par certains chercheurs comme étant fondamentale à l'encadrement d'une innovation responsable des métavers.
- Entreprendre dans les meilleures conditions pour la France dans le Métavers signifie donc entreprendre dans les meilleures conditions environnementales et sociétales : dans le respect à la fois des exigences climatiques, de santé publique, et d'acceptabilité sociale, ainsi que pour la protection des citoyens.

Synthèse des propositions

Proposition 1

Se saisir de l'opportunité des Jeux olympiques pour rassembler les acteurs français des métavers autour de projets concrets, au sein d'un consortium public/privé placé sous le pilotage d'Inria et pour proposer des actions de grande visibilité autour d'expériences immersives pouvant être partagées avant, pendant et après les Jeux olympiques et paralympiques (entraînement/compétitions, transport/tourisme, coulisses/échanges avec les athlètes) (p. 51)

Proposition 2

Réinvestir les instances de négociation des standards techniques, pour faire en sorte que la France et les principaux acteurs français (du secteur numérique de l'immersion, mais aussi de la recherche sur ces sujets) **participent activement aux discussions sur l'interopérabilité** des technologies de l'immersion. (p. 79)

Proposition 3

Amener la puissance publique à faire émerger les services communs et essentiels permettant l'avènement d'une pluralité de métavers interopérables. (p. 95)

Proposition 4

Développer une analyse rigoureuse des différentes chaînes de valeur des métavers afin de guider au mieux d'une part les domaines d'investissement stratégiques, d'autre part les risques de perte de souveraineté ou de fuite de valeur. (p. 57)

Proposition 5

Mettre en place des **commandes publiques répondant aux objectifs de souveraineté culturelle et de souveraineté technologique afin de soutenir des attelages hybrides entre structures françaises technologiques et institutions culturelles.** (p. 60)

Proposition 6

Lancer dès maintenant le travail d'adaptation, notamment du RGPD, du DSA et du DMA, aux enjeux des métavers. (p. 91)

Proposition 7

Investir dans les outils et les techniques d'analyse des métavers, et des transactions qui s'y déroulent afin de permettre aussi bien la **détection des infractions pour remonter aux auteurs que de percevoir l'impôt.** (p. 99)

Proposition 8

Réaliser des investissements dans des initiatives de recherche interdisciplinaire (informatique, neurosciences et sciences sociales) de grande ampleur et à long terme, utilisant les dispositifs existants (France 2030, PIA 4, PEPR, ANR) pour développer simultanément des métavers expérimentaux guidés par des besoins sociétaux (culture, santé, éducation) et les moyens d'en évaluer les risques sociotechniques par des études empiriques. (p. 53)

Proposition 9

Créer un institut de recherche et de coordination, sur le modèle de l'Ircam, qui serait à la fois un laboratoire de recherche en informatique dédié aux arts immersifs, un lieu de coordination entre chercheurs et artistes pour la création d'œuvres immersives innovantes dans les métavers et un comptoir d'expertise pour toutes les institutions culturelles concernées. (p. 53)

Proposition 10

Explorer des solutions écoresponsables et développer un système de mesure de l'impact environnemental des infrastructures des métavers. (p. 83)

Partie I — Métavers, définitions et origines

D'où provient le terme «métavers»? De quels fils technologiques préexistants émane-t-il? Devrait-on d'ailleurs l'évoquer au singulier ou au pluriel? Face à la confusion régnant autour de sa description, il semble important de revenir à ses origines multiples (I). Cette rapide perspective historique permettra ainsi de faire ressortir ses éléments caractéristiques, pour les distinguer de ses modalités, en tirer une définition, avant d'illustrer quelques applications et opportunités (II).

I. Préhistoire du Métavers

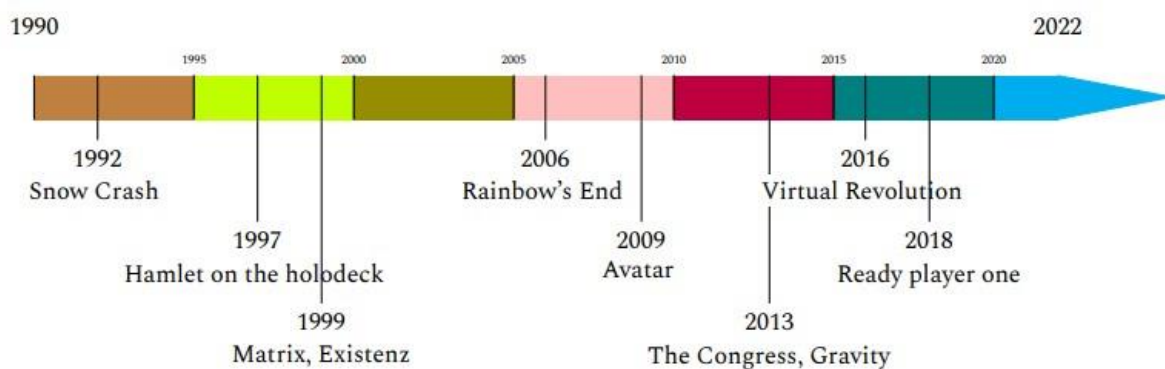
Si le terme «métavers» devient communément utilisé depuis 2021, les premiers environnements virtuels collaboratifs (ou CVE pour *Collaborative Virtual Environments*) datent d'il y a plus de trente ans, puis ont notamment été popularisés par la littérature, les jeux vidéo et le cinéma. Il est ainsi intéressant de revenir sur l'ensemble des fils technologiques distincts — qui ont chacun leur histoire propre — pour comprendre l'émergence de cette tendance technologique actuelle. Cette mise en perspective historique permettrait en outre de résister à l'appel des discours marketing qui prétendent que tout se réalisera à terme par l'intermédiaire des métavers. Un discours similaire avait déjà pu émerger dans les années 1990 à propos de la réalité virtuelle, puis plus récemment dans certaines présentations empreintes de «solutionnisme technologique». Les progrès technologiques d'aujourd'hui amènent à penser l'émergence future du Métavers. Diverses technologies comme la réalité virtuelle, la réalité augmentée, les accessoires immersifs, les technologies de chaînes de blocs et le développement de standards et d'infrastructures de télécommunication plus performantes permettent de dresser petit à petit les contours de ce à quoi il pourrait ressembler. Revenir sur ces différents fils technologiques permet de montrer que le Métavers ne se réduit à aucune de ces dimensions, et tente de les faire converger vers un horizon commun.

Littérature et cinéma

Métavers, une origine de science-fiction. Le terme métavers apparaît en 1992 dans le roman *Snow Crash (Le Samouraï virtuel)* de Neal Stephenson qui décrit un monde sans loi (une «anomie») où les échanges se font à l'aide de monnaies électroniques cryptées qui échappent à l'impôt et où les entreprises privées, les mafias et les sectes remplacent progressivement les États. Dans cet ouvrage, l'auteur invente un monde numérique dans lequel il est possible de s'immerger à l'aide d'un avatar, une représentation numérique de soi-même. Le métavers imaginé par Stephenson est construit autour d'un boulevard central où les développeurs peuvent construire des immeubles, des parcs, placer des panneaux indicateurs et «*inventer des tas de choses qui n'existent pas dans la réalité*». Le métavers de Stephenson est surtout un immense espace publicitaire : «*mettez une affiche ou un immeuble sur le boulevard et les cent millions d'habitants de la terre les plus riches, les plus branchés et les plus influents les verront chaque jour de leur vie*». En dépit (ou à cause) de cette dimension dystopique, le terme de métavers a connu plusieurs vagues d'intérêts et quelques éclipses jusqu'à sa redécouverte au cours de ces derniers mois. Pour le chercheur Wagner James Au, cette définition originelle de Stephenson reste

utile pour décrire les horizons technologiques d'aujourd'hui. Wagner James Au résume ainsi la définition de *Snow Crash* : «Le Métavers est un monde virtuel immersif vaste et simultanément accessible par des millions d'utilisateurs, à travers la réalité virtuelle et d'autres dispositifs, avec des avatars hautement personnalisables et de puissants outils de création d'expérience. Il est intégré avec l'économie du monde réel, et compatible avec les technologies qui lui sont externes».

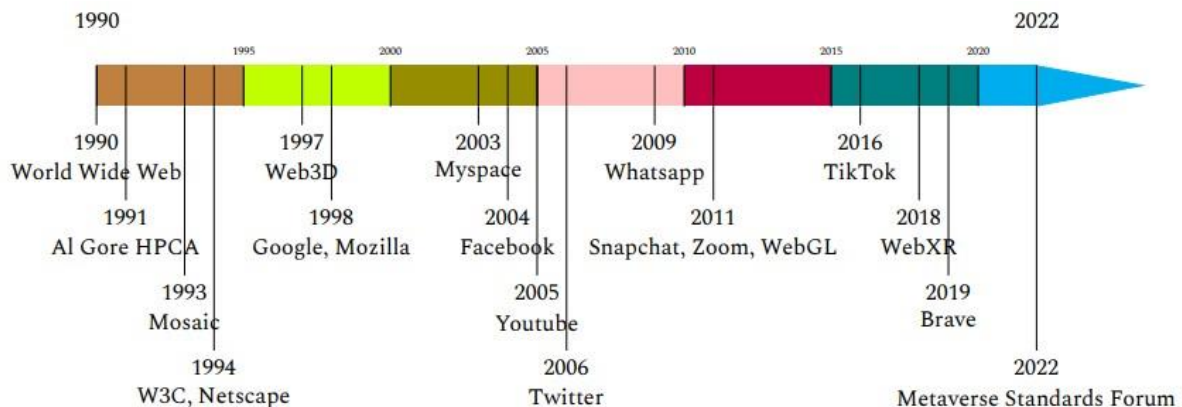
Interrogé en 2021 sur la postérité de son œuvre, Stephenson remarque que la frontière entre monde virtuel et monde réel s'est progressivement effacée depuis trente ans. Deux films illustrent en 2013 cette fusion entre le monde réel et le monde virtuel sous des angles diamétralement opposés. Dans «Le congrès», Ari Folman décrit un monde futuriste où les industries de la chimie et du cinéma ont fusionné, et les films se consomment sous forme de pilules qui provoquent des hallucinations collectives et une déréalisation du monde social. Dans «Gravity», Alfonso Cuarón mêle prises de vues réelles et images de synthèse pour faire partager avec empathie l'expérience d'une mission dans l'espace. Quand la fusion des éléments virtuels et réels est mise au service d'un récit captivant et intimiste, alors la frontière entre les deux mondes peut s'effacer de manière élégante.



Web

Les investissements initiaux massifs dans le web. Snow Crash est publié deux ans après la création du web, et un an après la loi «High Performance Computing Act» du sénateur Al Gore. Il est bon de rappeler que le gouvernement des États-Unis a investi 600 millions de dollars dans les infrastructures du web et financé le développement du premier navigateur web de l'histoire, Mosaic, par l'Université d'Illinois à Urbana Champaign. Les premiers standards dédiés à la réalité virtuelle (VRML) et aux espaces 3D (Web3D) arrivent très tôt (1994 et 1997) mais rencontrent peu de succès. Une bataille féroce oppose Myspace et Facebook dans les années 2000 et consacre la victoire de Facebook. La vidéo fait son apparition à la même époque et représente aujourd'hui 80 % du trafic mondial sur internet. Une deuxième génération de standards 3D (WebGL, WebXR) s'impose dans les années 2010 pour rendre possible la vision d'un «web immersif». La taille du web peut se mesurer à la quantité des données stockées dans ses serveurs (1 zettabyte, soit mille milliards de gigaoctets en 2012) et au trafic qu'il occasionne sur internet (1 zettabyte par an en 2018). Le web compte seulement pour 2 % de la consommation électrique dans le monde, mais la croissance annuelle de 50 % des

données stockées dans le monde n'est pas soutenable et fait craindre une catastrophe de l'information à plus ou moins long terme.



Les différentes générations du web. Les évolutions du web depuis sa création peuvent être analysées selon plusieurs perspectives. Du point des contenus, on peut remarquer que la première génération du web était principalement constituée de textes et hypertextes, à une seule dimension; que la génération suivante est dominée (en volume) par l'image et la vidéo, à deux dimensions; et que la prochaine génération du web contiendra une part importante de mondes virtuels immersifs, en trois dimensions. C'est une tendance qui est prévue de longue date et semble se confirmer au cours du temps. Selon cette perspective, le Métavers ne serait rien d'autre qu'un web 3D qui s'ajouterait aux web 1D et au web 2D sans les remplacer.

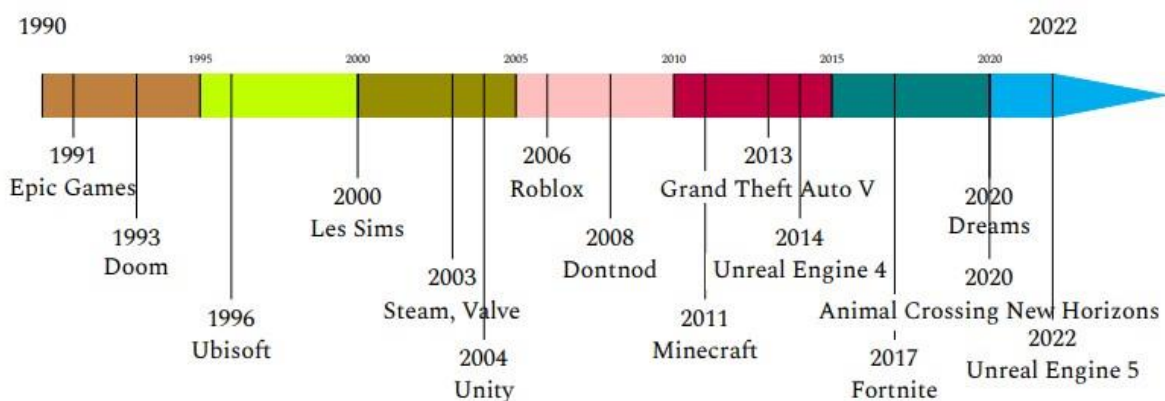
Du point de vue de son organisation, le web a connu une première génération volontairement décentralisée, qui permettait aux internautes d'écrire leurs propres pages web en HTML, et de naviguer librement d'une page à une autre. Il est plus difficile d'analyser avec précision les générations suivantes. Le langage HTML lui-même a beaucoup changé et HTML5 a consacré l'utilisation du langage JavaScript. Les pages web sont ainsi devenues des programmes destinés à être exécutés, plutôt que des pages destinées à être lues. C'est ce qui a permis le développement de nouveaux modèles économiques, dont le commerce en ligne et le modèle publicitaire, dont se sont emparées quelques plateformes centralisées. Pour autant, ce nouveau web est resté en partie décentralisé dans sa gouvernance et son fonctionnement, même si une partie des prérogatives du W3C s'est déplacée vers d'autres consortiums (WHATWG, KHRONOS). À cet égard, on peut noter que les efforts de standardisation des métavers font l'objet d'un nouveau consortium (Metaverse Standards Forum, cf. partie II), qui regroupe tous les précédents.

L'évolution la plus significative du web est peut-être à chercher du côté des matériels utilisés — ordinateurs fixes ou portables pour la première génération, smartphones pour la seconde génération — et des applications natives sur smartphones, qui ont transformé notre expérience de la navigation du web. La prochaine évolution du web passera-t-elle par des applications natives sur lunettes de réalité augmentée disposant de leur propre OS? Ou par la généralisation des standards du web immersif et la mise en œuvre de nouveaux navigateurs (*browsers*) permettant la navigation dans des pages web en 3D? Ou par de nouvelles organisations autonomes décentralisées (DAO)

prenant en charge les espaces sociaux des internautes? Dans le long terme, ces trois options sont possibles et méritent d'être prises au sérieux. On voit que les évolutions passées et futures du web sont multiples et complexes, et qu'il serait particulièrement hasardeux de décrire le Métavers comme le seul et unique avenir du web. En revanche, on peut admettre que le passage à la troisième dimension (s'il se produit) est de nature à transformer le web de façon significative, y compris dans sa régulation et son économie, dans des directions qui ne sont pas encore déterminées mais que l'on peut anticiper. C'est la perspective que nous avons adoptée.

Jeux vidéo

Les espaces virtuels et les jeux en ligne multijoueurs. À la fin des années 90, le développement simultané des technologies d'images de synthèse tridimensionnelles en temps réel (notamment dans le domaine du jeu) et celui d'Internet (interconnexions des ordinateurs) ouvrent la possibilité de faire interagir et dialoguer des utilisateurs dans des espaces virtuels. Cette possibilité de jouer ensemble à distance dans des jeux vidéo va être fortement exploitée par l'industrie du jeu sous le nom de MMORPG (*massively multiplayer online role playing game*), en français JDRMM pour jeu de rôle en ligne massivement multijoueur. Citons les jeux EverQuest (1999), Eve Online (2003) et World of Warcraft (2005). Dans les MMORPG des communautés de joueurs peuvent coopérer ou s'opposer pour remplir les objectifs du scénario du jeu proposé par l'éditeur. Toutefois, les éditeurs vont rapidement s'apercevoir que l'intérêt des joueurs pour ces nouvelles formes d'interaction dépasse la résolution du scénario et qu'ils investissent beaucoup de temps sur ces plateformes dans d'autres tâches sociales et créatives. En étant en co-présents et co-acteurs dans le jeu, les joueurs développent une identité propre et deviennent les acteurs d'une réalité sociale. Leurs apparences, le récit, leurs exploits, leurs rôles dans la communauté vont devenir des enjeux parfois plus importants que la résolution du jeu lui-même. Des activités créatives parallèles se développent, telles que celle de se faire le plus beau des avatars, de publier ses exploits et ceux de leur groupe (récit vidéo, machinima) ou de créer des espaces d'échange et de partage (club house) et des rituels, identifiant sa communauté (role play). Les éditeurs de jeux vont trouver dans nouvelles pratiques des opportunités commerciales et vont stimuler ces activités, en créant des monnaies et une économie interne au jeu, permettant aux joueurs d'acheter des objets pour leurs avatars et de louer des espaces pour leur communauté.



Les jeux vidéo en ligne sont aujourd’hui le principal moteur des métavers et les seules applications qui touchent réellement le grand public tout en enregistrant une forte croissance. Parmi les développeurs de jeu vidéo, Epic Games joue un rôle central en diffusant son moteur de jeu Unreal Engine à tous les développeurs, à des conditions très avantageuses, et en donnant l’exemple de Fortnite, qui est devenu aux États-Unis et en Europe un phénomène de société, avec un modèle économique original et puissant, qui ne passe pas par la publicité mais par des achats de biens immatériels dans le jeu. Son créateur et CEO, Tim Sweeney, a fait très tôt le choix des jeux en ligne, et propose depuis 2019 de généraliser son modèle pour le développement d’un métavers à l’échelle mondiale, sans surveillance ni publicité, qui s’oppose radicalement à la vision de Meta (Facebook).

Streaming ou non, deux approches différentes des jeux vidéo. Dans le développement des jeux en ligne, on peut noter deux approches très différentes. La première, celle des jeux en ligne, est actuellement majoritaire et consiste à effectuer les calculs de la simulation 3D temps réel, localement, à l’aide des cartes graphiques des consoles de jeu ou ordinateurs de bureau des utilisateurs finaux. Dans ce cas, ce sont les positions spatiales et les actions des joueurs qui sont échangées avec les serveurs du jeu. La seconde, celle des jeux en streaming, consiste à effectuer les calculs de la simulation 3D temps réel sur des serveurs répartis sur le cloud, dotés de cartes graphiques spécialement optimisées pour chaque jeu. Dans ce cas, ce sont les vidéos calculées pour les deux yeux de chaque joueur qui sont échangées avec les serveurs du jeu. Dans les développements futurs des métavers, ces deux approches seront en concurrence et il conviendra d’en analyser les avantages et les inconvénients, notamment sur le plan de leur bilan énergétique.

Dans les jeux en streaming, les joueurs doivent disposer d’une liaison de données avec le débit suffisant pour offrir une qualité d’image animée satisfaisante, mais surtout avec une latence la plus faible possible pour permettre des interactions en quasi-temps réel. La latence maximum estimée pour une bonne expérience dans les métavers est de 12 ms. Cette latence résulte des temps mis par les paquets de données à transiter dans les réseaux, mais aussi des temps de calcul nécessaires pour prendre en compte l’interaction de l’utilisateur dans la scène incluant les autres utilisateurs, en calculer l’impact en temps réel et restituer la scène modifiée. Il faut agir donc à la fois sur le canal de transmission et sur l’architecture des centres de calcul. Si l’utilisation dans de bonnes conditions du réseau en fibre optique doit permettre une latence suffisante, il n’en est pas encore de même avec les réseaux mobiles : le réseau 5G, en cours de déploiement, doit offrir une latence compatible de 10 ms. La capacité de calcul est un autre élément clé. Suivant les applications et en particulier le nombre d’intervenants simultanés, elle peut être distribuée de façon différente, entre le terminal (casque par exemple), la station de travail locale, le cloud... Pour de nombreux cas, elle est encore insuffisante. À titre d’exemple, le jeu Fortnite est utilisé par plusieurs millions de personnes mais chaque scène de jeu ne peut pas comporter plus de 100 joueurs simultanés. L’architecture des centres de données, la gestion de caches, clés du cloud computing, doivent être de plus en plus décentralisées, au plus près des utilisateurs, pouvant nécessiter de forts investissements.

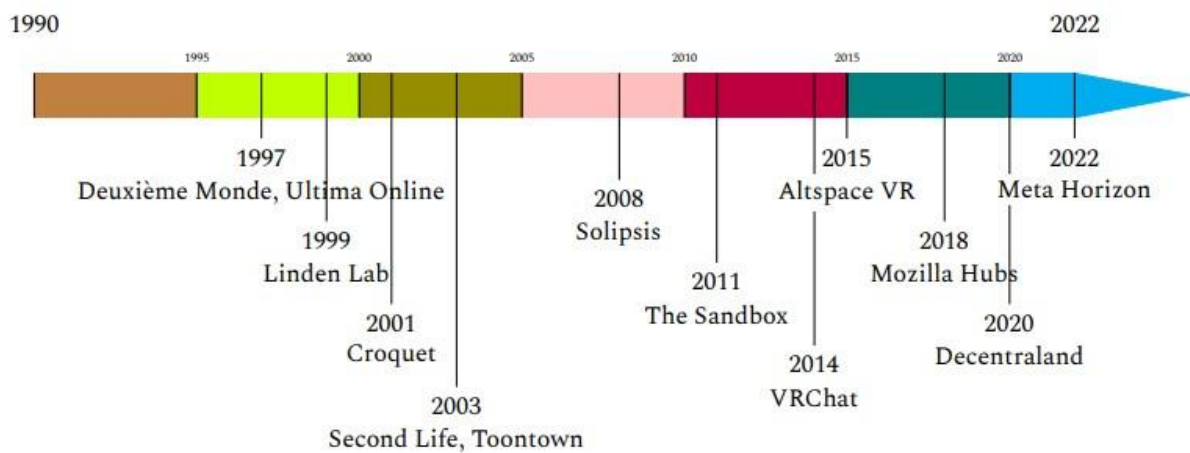
Les protométavers, croisement des jeux vidéo 3D et des réseaux sociaux. Le concept des métavers apparaît en premier lieu comme l'aboutissement d'une évolution spontanée portée par la pratique du jeu vidéo en ligne. En jouant à Second Life puis à Fortnite, les joueurs se sont mis à s'approprier l'univers proposé et à interagir socialement comme ils le feraient sur une place publique pour se retrouver et échanger. Le concept de Métavers incarne donc cette fusion des jeux vidéo 3D temps réel et des réseaux sociaux, reproduisant dans un monde virtuel persistant des comportements de la vie réelle, jusqu'à la possibilité d'acheter et vendre des actifs numériques ouvrant la voie à de nouvelles pratiques commerciales. Pour certains, le jeu vidéo se présente d'ailleurs comme un art majeur du XXI^e siècle. En ce sens, le jeu vidéo en temps réel associé à la réalité mixte est inédit. Il n'était en effet jusqu'à présent pas possible d'entrer dans une scène de film culte, d'un Hitchcock ou d'un Godard, là où les mondes virtuels nous permettent d'entrer dans les œuvres (ou inversement les œuvres peuvent sortir de leur cadre, comme la Danseuse de Degas venant vous saluer grâce à la réalité augmentée, une expérience immersive mise en place en 2022 au Musée d'Orsay à travers l'application *La Petite Danseuse au Musée d'Orsay*). Cette immersion ouvre le champ à de nouvelles expériences et émotions.

Mondes virtuels

Les premiers protométavers. Habitat (1986) est historiquement le premier environnement virtuel multi-utilisateur qui peut se prévaloir du terme de protométavers. C'était un jeu de simulation sociale sans scénario développé par Lucasfilm, qui ne fait pas référence au métavers de Stephenson, mais aux cyberespaces de Vinge et Gibson. Les concepteurs du jeu remarquèrent très vite la dimension sociale et politique de leur simulation, et la difficulté de la faire vivre dans la durée. Dix ans plus tard, Le Deuxième Monde est un monde virtuel créé par Canal+ Multimedia en 1997 qui permet aux joueurs d'évoluer, par le biais de leur avatar, dans une reconstitution de Paris en 3D; formant ainsi une communauté virtuelle dont les membres se surnommaient « les Bimondiens ». Cette expérience tourne court en 2001, faute d'avoir trouvé un modèle économique.

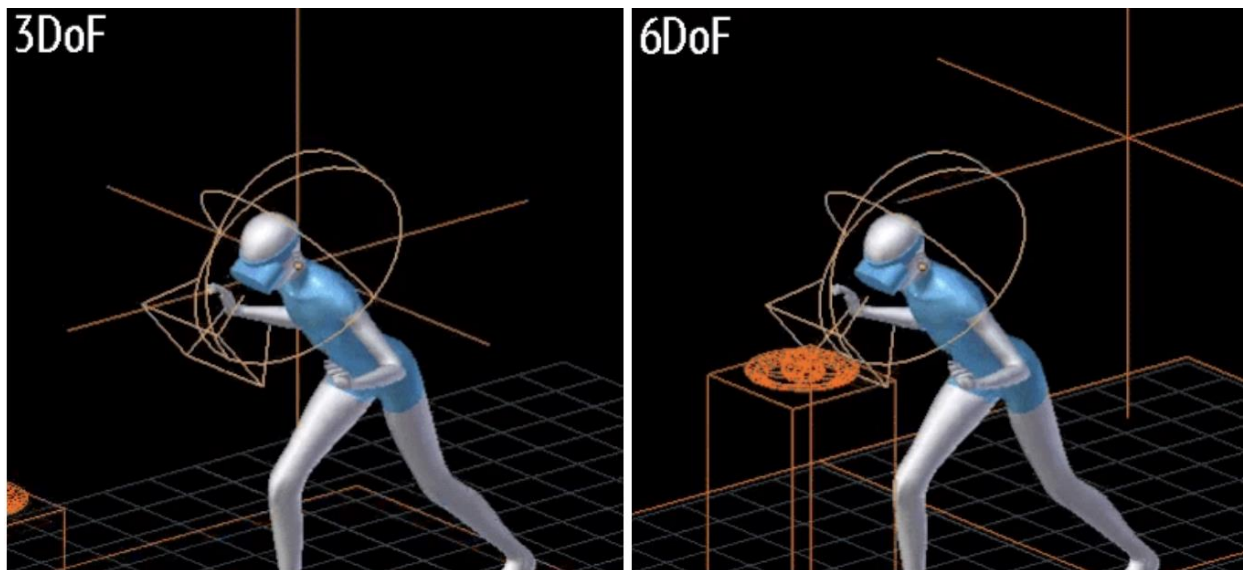
Il faut attendre 2003 pour voir apparaître la première expérience significative de métavers. Un éditeur de jeux, Linden Lab va miser sur cette dimension sociale en proposant un MMORPG sans scénario, Second Life. Dans ce monde virtuel, l'accent est mis sur les outils de socialisation et de création, le monde est dit persistant, car les résultats des actions effectués par les utilisateurs sont conservés et viennent enrichir l'expérience commune. Les utilisateurs peuvent se créer des avatars et louer des espaces pour interagir socialement. Les principales activités des utilisateurs vont être la socialisation (écouter de la musique ensemble dans des discothèques, faire des rencontres, partager des moments érotiques) et le shopping (se faire un avatar séduisant, posséder un espace personnel), et la production d'objets (créer des objets à vendre aux autres joueurs). L'accès au jeu est gratuit, le modèle économique de l'éditeur s'appuie sur un taux de change entre les monnaies nationales et la monnaie interne à la plateforme. Ce monde virtuel obtient un très grand succès vers 2009 puisqu'on démontre à cette date plus de 21 millions de comptes existants et 88000 utilisateurs connectés simultanément en moyenne. Des usages multiples se développent et on assiste à l'émergence de communautés ayant des objectifs politiques, éducatifs et culturels. Ces

communautés sont restées actives jusqu'à aujourd'hui, avec environ un million de visiteurs réguliers et une économie qui permet à Linden Lab d'être profitable depuis presque vingt ans.



Mondes et galaxies. Le terme de métavers est repris par les informaticiens dans les années 2000 pour désigner une infrastructure supportant un grand nombre de mondes virtuels 3D interconnectés, auxquels on accéderait à l'aide des mêmes interfaces (*browsers*), et qui s'ajouteraient aux sites web 2D classiques, sans les remplacer. Dans cette définition, un monde virtuel 3D désigne une simulation d'un espace dans lequel les utilisateurs peuvent interagir entre eux et sont incarnés par des projections virtuelles d'eux-mêmes. Cette nouvelle définition s'oppose à la version centralisée de Stephenson et propose une version explicitement «décentralisée» du métavers qui regrouperait de nombreux mondes virtuels («metaworlds») organisés en galaxies («metagalaxies») entre lesquels on pourrait se transporter librement. Les Français Joaquin Keller et Gwendal Simon proposent une architecture originale de pair-à-pair nommée «Solipsis» pour mettre en œuvre ces «métavers décentralisés» à grande échelle. Cette approche suscite de grands espoirs et donne lieu à un projet français de métavers open source mené par Orange Labs.

Dans les années 2010, l'intérêt pour les métavers faiblit, tandis que de nouveaux casques de réalité virtuelle apparaissent, qui permettent une immersion sensorimotrice à six degrés de liberté, également appelée «room-scale vr», pour une fraction du coût des salles de réalité virtuelle des générations précédentes. Il devient possible d'avoir des expériences de réalité virtuelle chez soi, ou dans certaines salles de cinéma et «VR rooms» commerciales. Avec ces casques, l'immersion dans les mondes virtuels devient proprioceptive — elle suit les mouvements de notre propre corps. Nous n'avons plus besoin de nous projeter dans un avatar, sauf pour nous voir nous-mêmes et être vus par les autres. Il faut attendre quelques années avant que cette nouvelle dimension soit intégrée dans la troisième incarnation du terme de métavers, qui commence avec Tim Sweeney d'Epic Games en 2019 et se poursuit avec Mark Zuckerberg en 2021 avec le retentissement que l'on connaît actuellement.



Gauche : Avec 3 degrés de liberté, la boucle sensorimotrice est rompue lorsque nous nous déplaçons. Droite : Avec 6 degrés de liberté, la boucle sensorimotrice est préservée dans tous nos déplacements et nous entrons en immersion proprioceptive. Images : Arun Prasath

Réalité virtuelle (RV)

Brève histoire de la réalité virtuelle. En 1965, Ivan Sutherland a rédigé un essai fondamental sur les réalités augmentées et virtuelles qui a servi de base à tout ce qui allait suivre. Il écrit : « *Nous vivons dans un monde physique dont nous avons appris à connaître les propriétés par une longue familiarité. Nous ressentons une implication avec ce monde physique qui nous donne la capacité de bien prédire ses propriétés. Par exemple, nous pouvons prédire l'endroit où les objets vont tomber, l'aspect des formes connues sous d'autres angles, et la force nécessaire pour pousser des objets contre la friction. L'affichage ultime serait, bien sûr, une salle dans laquelle l'ordinateur peut contrôler l'existence de la matière. Une chaise présentée dans une telle pièce serait suffisamment bonne pour que l'on puisse s'y asseoir. Des menottes affichées dans une telle pièce seraient confinées, et une balle affichée dans une telle pièce serait fatale. Avec une programmation appropriée, une telle exposition pourrait littéralement être le pays des merveilles dans lequel Alice est entrée.* » En 1968, Sutherland invente un dispositif appelé *l'Épée de Damoclès*. L'affichage monté sur la tête était relié à un dispositif suspendu au plafond pour transmettre des graphiques générés par ordinateur à des lunettes stéréoscopiques spéciales. Le système pouvait suivre les mouvements de la tête et des yeux de l'utilisateur et appliquer un logiciel spécialisé pour ajuster les images de manière optimale. Bien que le système n'offrît pas un haut niveau d'intégration entre les différents composants, il a servi de point de preuve pour les futurs visiocasques.

Le terme « réalité virtuelle » apparaît dans le langage courant dans les années 1980, sous la plume de Jaron Lanier. Sa jeune entreprise, VPL Research, a produit des composants de réalité virtuelle qui, ensemble, représentaient le premier produit disponible dans le commerce. Il s'agissait de gants, de systèmes audio, d'écrans montés sur la tête et d'un rendu 3D en temps réel. Lanier a également créé un langage de

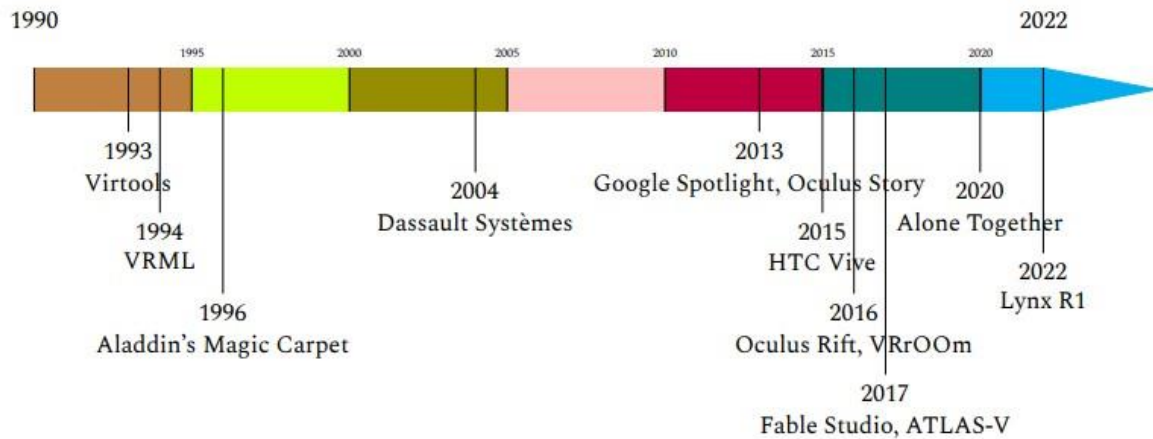
programmation visuelle utilisé pour contrôler les différents composants et les combiner en une expérience de réalité virtuelle plus complète. À peu près à la même époque, l'artiste informaticien Myron Krueger a commencé à expérimenter des systèmes qui combinent la projection vidéo et audio dans un espace personnel, et Douglas Engelbart a développé des dispositifs d'entrée et des interfaces plus avancées qui ont servi de point de départ à de nombreux systèmes actuels de réalité augmentée et de réalité virtuelle.

L'apparition des CAVE. En 1992, Carolina Cruz-Neira, Daniel J. Sandin et Thomas A. DeFanti ont fait la démonstration du CAVE (*Cave Automatic Virtual Environment*). Ceci a offert une expérience de réalité virtuelle beaucoup plus réaliste, notamment un holodeck permettant aux individus de voir leur propre corps dans la pièce. Le système comprenait des écrans de rétroprojection, un système de projection vers le bas et un système de projection vers le haut pour créer l'illusion de la réalité dans l'espace physique. Une personne se tenant dans le CAVE et portant des lunettes 3D pouvait voir des objets flottants et se déplacer dans la pièce.

CAVE visait à résoudre un problème fondamental : les premiers HMD (*Head Mounted Display*) étaient encombrants et présentaient d'importantes limitations pratiques, notamment en ce qui concerne leur utilisation pour des applications scientifiques et techniques. La première génération de cette technologie intégrait des capteurs électromagnétiques pour suivre les mouvements et les déplacements. Les versions ultérieures ont exploité la technologie infrarouge. Le logiciel de capture de mouvement tire des données de capteurs intégrés dans les lunettes et dans la pièce pour suivre les mouvements. La vidéo s'ajuste et s'adapte en permanence au mouvement. Le système de projection CAVE veille à ce que les lunettes soient constamment synchronisées afin que la personne voie les bonnes images dans chaque œil. La salle est également équipée d'un son 3D émanant de dizaines de haut-parleurs. Le résultat est un espace virtuel immersif qui permet à l'utilisateur de manipuler et de gérer des objets en 3D, plus proche des systèmes portables et mobiles d'aujourd'hui. En fait, le concept CAVE a connu un succès rapide.

En 1994, le National Center for Supercomputing Applications (NCSA) a développé un système CAVE de deuxième génération afin que les chercheurs puissent explorer l'utilisation de la réalité virtuelle dans divers domaines, notamment l'architecture, l'éducation, l'ingénierie, les jeux, les mathématiques et la visualisation d'informations. Grâce à CAVE, un concepteur automobile peut étudier l'intérieur d'un prototype de véhicule et savoir comment et où positionner les commandes. Un ingénieur peut voir l'intérieur d'un immeuble de grande hauteur avant sa construction, et un scientifique peut regarder à l'intérieur de molécules ou de systèmes biologiques. Aujourd'hui, de nombreuses universités et entreprises privées — des sociétés de conception et d'ingénierie aux entreprises pharmaceutiques — utilisent des systèmes CAVE. Ces espaces sont équipés de systèmes de projection haute définition qui utilisent des graphiques de pointe pour créer des effets réalistes. Ils intègrent également un son surround 5.1, des capteurs de suivi dans les murs et une interaction haptique pour fournir un retour d'information instantané. Comme CAVE suit les mouvements de la tête, des yeux et du corps, l'utilisateur peut agiter une baguette pour contrôler les objets virtuels et les déplacer à volonté. Cela signifie également qu'un chirurgien apprenant une

nouvelle procédure sait instantanément s'il pratique une incision incorrecte. Au fil des ans, CAVE s'est transformé en une plateforme complète comprenant différents cubes et configurations pour répondre à différents besoins et objectifs. Un dérivé commercial du projet, Visbox Inc. propose 12 configurations de base, ainsi que la possibilité de personnaliser complètement la conception de l'espace.



Les aventures de Virtools. Virtools est un moteur 3D temps réel dédié à la réalité virtuelle développé en France par Bertrand de La Chapelle et Bertrand Duplat à partir de 1993, et revendu à Dassault Systèmes en 2004. Comme plateforme générique de programmation, Virtools a joué un rôle important dans le développement de la réalité virtuelle en France de 1999 à 2004 avant d'être progressivement remplacé dans ce rôle par Unity3D et Unreal Engine, tandis que Virtools reste au catalogue de Dassault Systèmes sous l'appellation 3DVia. Dans la même période, Disney crée ses premières attractions en réalité virtuelle avec son propre moteur de jeu, Panda3D, développé en partenariat avec Carnegie Mellon.

Casques de réalité virtuelle modernes. Une nouvelle génération de casques de réalité virtuelle est apparue dans les années 2012-2016 à l'initiative des constructeurs Oculus, HTC et Valve. Elle permet aux immersants de se déplacer librement dans l'espace d'une pièce («room-scale VR»). Oculus est une startup américaine fondée par Palmer Luckey qui a développé avec John Carmack le casque de réalité virtuelle Oculus Rift en 2012 et a été achetée par Facebook en 2014 pour 2 milliards de dollars. Ce casque fonctionne en mode «inside-out» à l'aide de deux caméras et d'une centrale inertielle intégrées dans le casque et qui estiment ensemble sa position et son orientation. HTC est un fabricant de téléphones mobiles taiwanais qui s'est associé avec l'éditeur de jeu américain Valve en 2016 pour produire et commercialiser la plateforme de réalité virtuelle HTC VIVE. Cette plateforme fonctionne sur un mode «outside-in» dans lequel des faisceaux laser et LED sont envoyés de plusieurs sources extérieures («lighthouses») et reçues par des capteurs placés sur le casque, qui lui permettent de calculer en temps réel sa position et son orientation dans la pièce. Ces deux casques ont été commercialisés à des prix inférieurs à 1000 dollars (contre 100000 dollars pour un CAVE), ce qui a permis de démocratiser considérablement la réalité virtuelle : on estime que 20 millions de casques de réalité virtuelle ont été vendus entre 2016 et 2020 dans le monde. Depuis, les mêmes

constructeurs proposent une gamme de casques moins puissants et moins chers (400 dollars), mais plus autonomes et plus légers. En 2022, la société Lynx commercialise un nouveau visiocasque français, qui peut être utilisé aussi bien pour la réalité virtuelle que pour la réalité augmentée.

La réalité virtuelle, le développement d'une nouvelle forme d'interaction spatiale.

Durant les années 2010 avec l'arrivée sur le marché de casques de qualité à coût attractif, une grande partie de la recherche sur l'interaction spatiale s'est concentrée sur les expériences de réalité virtuelle. Contrairement aux mondes virtuels fortement orientés sur l'interaction sociale, les expériences de réalité virtuelle stimulent l'interaction sensible en nous permettant de percevoir et d'interagir dans notre espace proche. La réalité virtuelle permet une forte implication corporelle de l'utilisateur. C'est le geste physique de l'immersant qui pilote directement ses actes virtuels. Il est possible de contrôler son point de vue, de se déplacer, de prendre des objets, mais ces actions restent limitées à la taille de l'espace physique où il agit. Avec la réalité virtuelle se dessine la possibilité de faire vivre des expériences immersives, en spatialisant certains éléments. Le son devient ainsi un nouvel espace (grâce au design sonore et à l'audio 3D), mais également une nouvelle interface (avec la synthèse vocale, les nouveaux instruments, et l'interaction geste et son), et enfin une source de données (voir les applications d'indexation et de recommandation musicale). Concernant les récepteurs sensoriels, certains peuvent être stimulés par des phénomènes physiques (mécanique, optique ou thermique), modélisables numériquement, tandis que d'autres (odorat et goût) sont stimulés par des phénomènes chimiques, donc non modélisables numériquement. N'en déplaise aux amateurs de science-fiction, les métavers resteront donc sans odeur et sans goût, sauf à agir chimiquement sur les immersants, ce que refusons d'envisager dans le cadre de notre mission.

Réalité augmentée (RA)

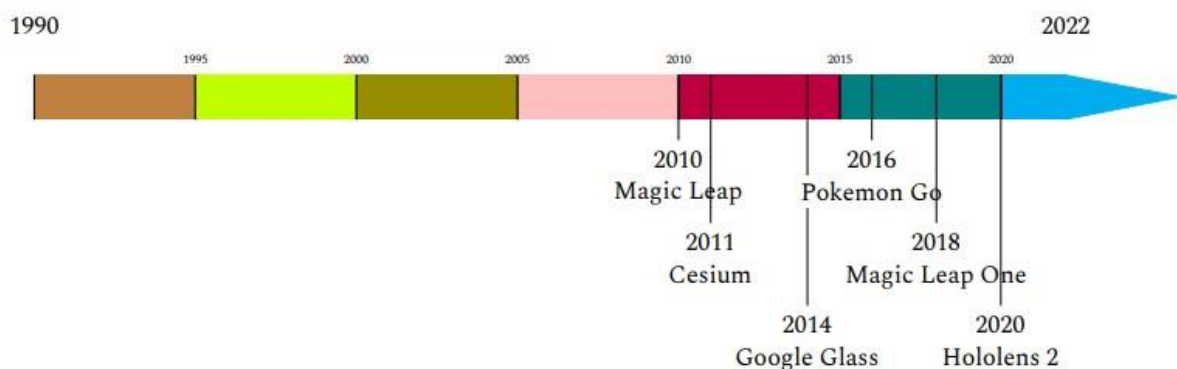
Brève histoire de la réalité augmentée. En 1981, Steve Mann, alors lycéen, a placé un microprocesseur dans un sac à dos et y a ajouté du matériel photographique, notamment un appareil photo monté sur la tête. Cela a permis de créer un ordinateur portable qui non seulement capturait des images de l'environnement physique, mais superposait également des images générées par ordinateur sur la scène. Un dispositif appelé *EyeTap* permettait à l'utilisateur d'avoir un œil sur l'environnement physique et un autre sur la scène virtuelle. Mann est ensuite devenu un membre clé du *Wearable Computing Group* au MIT Media Lab.

Au cours de la décennie suivante, les technologies entourant la réalité étendue ont considérablement progressé. Les chercheurs ont continué à développer une technologie numérique plus avancée qui a conduit à des systèmes et sous-systèmes de réalité augmentée et de réalité virtuelle plus sophistiqués. Les casques ont commencé à rétrécir et à se transformer en lunettes, et les concepteurs et ingénieurs ont commencé à intégrer toute une série de composants dans les systèmes de RA et de RV. Il s'agissait notamment de boutons, de pavés tactiles, de reconnaissance vocale, de reconnaissance gestuelle et d'autres commandes, y compris le suivi oculaire et les interfaces cerveau-ordinateur. En

1990, Tom Caudell, chercheur chez Boeing, a inventé le terme «réalité augmentée» pour décrire un affichage spécialisé qui mêle graphiques virtuels et réalité physique.

À la fin de la décennie, la réalité augmentée a fait ses débuts à la télévision. En 1998, la retransmission d'un match de la National Football League par Sportvision comportait un marqueur jaune virtuel, appelé «1st and Ten». Deux ans plus tard, en 2000, Hirokazu Kato, un chercheur du Nara Institute of Science and Technology au Japon, a présenté *ARToolkit*, qui utilise le suivi vidéo pour superposer des images de synthèse en 3D sur une caméra vidéo. Ce système open source est encore utilisé aujourd'hui, notamment sur les navigateurs web. Au cours de la décennie suivante, la RA a également commencé à faire son apparition dans les véhicules. Les voitures de sport et les véhicules de luxe haut de gamme sont équipés de systèmes qui projettent la vitesse du véhicule sur le pare-brise. Cela permettait au conducteur d'éviter de ne plus regarder la route. Aujourd'hui, la RA est présente dans de nombreux produits, des jouets aux appareils photo en passant par les smartphones et les machines industrielles.

En revanche, les efforts de nombreux constructeurs (Google, Magic Leap, Microsoft, Apple, Meta) pour développer des lunettes de réalité augmentée à destination du grand public sont restés vains, en dépit d'investissements considérables depuis 10 ans. Pour ces grands acteurs, les lunettes sont un enjeu économique de tout premier plan dans la mesure où elles pourraient progressivement remplacer les ordinateurs et les smartphones comme points d'entrée dans les métavers.



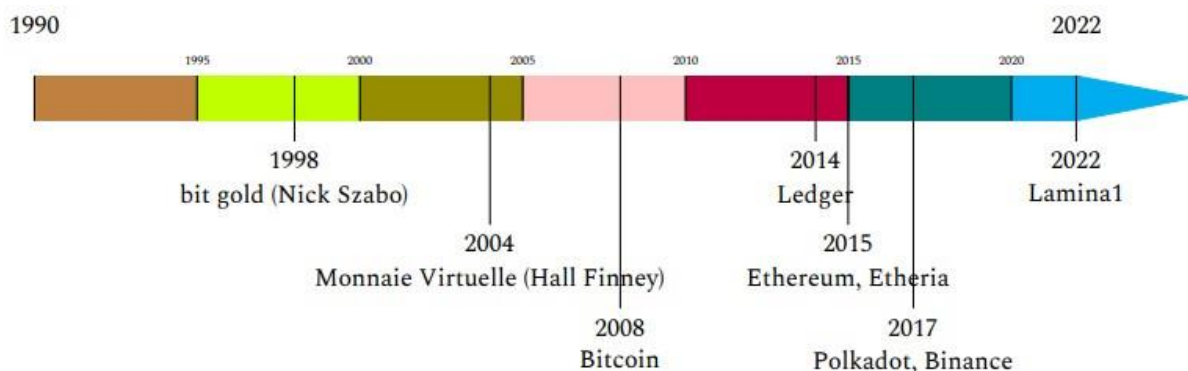
Différence entre réalité virtuelle et réalité augmentée. Pour la réalité virtuelle, l'environnement artificiel est totalement virtuel et la proprioception pose plus de problèmes que dans le cas du domaine de la réalité augmentée où l'environnement artificiel est l'association du monde réel auquel on a rajouté des entités virtuelles. Dans ce dernier cas, l'utilisateur n'est que dans l'environnement réel et sa proprioception naturelle n'est pas perturbée.

Chaînes de blocs et cryptomonnaies

Une des ambitions du métavers est, pour certains, d'être la suite, présumée plus ouverte, de l'Internet et des réseaux sociaux en utilisant les possibilités offertes potentiellement par le Web3. Restant dans l'idéologie libérale des débuts de l'Internet, le Métavers veut aller vers des architectures décentralisées, non seulement des réseaux, mais aussi des services, en particulier ceux réglementés au niveau national ou international, de contrats, transactions, paiements, droits de propriété, données personnelles.

Même si cette architecture décentralisée des services n'est pas indispensable en théorie pour créer les métavers, elle permet de les déployer rapidement à l'échelle mondiale sans attendre des accords multilatéraux toujours longs à obtenir. Elle est censée permettre une plus grande créativité et innovation dans le développement de services nouveaux. Elle peut être un moyen d'échapper à la constitution de monopoles ou d'oligopoles. La technologie blockchain, dont une application-phare a été la création de monnaie virtuelle comme le bitcoin, apparaît actuellement comme une technologie à retenir.

L'idée d'un système d'information distribué et homogénéisé entre les différents membres d'un réseau se substituant à une autorité centralisée, date de l'antiquité. L'authentification des éléments d'un registre résulte de la concordance des informations détenues chez une majorité des membres du réseau. C'est le principe de la *blockchain*, base de données décentralisée et sécurisée qui permet d'établir un registre infalsifiable des transactions réalisées. Techniquement, il s'agit d'un registre partagé et distribué par les nœuds d'un réseau pair à pair, et contenant un ensemble de transactions, validé par des nœuds selon un consensus déterminé, organisé sous forme de « blocs » liés entre eux par une « chaîne » séquentielle utilisant des moyens cryptographiques



La disposition d'un réseau informatique comme Internet a permis la réalisation de plusieurs essais de monnaies privées et décentralisées, mais avec peu de succès. En 2008, un auteur sous le pseudonyme de Satoshi Nakamoto publie un livre blanc présentant le bitcoin, monnaie basée sur *la blockchain*. Chaque transaction est chiffrée et stockée dans un bloc, qui peut contenir plusieurs transactions distinctes. Un bloc, pour être intégré dans le registre, comporte un marquage numérique issu du bloc précédent qui atteste de sa validité. Cette opération de marquage est assurée par des utilisateurs volontaires, que l'on appelle des « mineurs ». Le mineur qui, en compétition avec les autres, effectue le marquage doit résoudre un problème de cryptographie, qui nécessite une forte puissance de calcul et donc une énergie électrique importante. Il existe aujourd'hui de nombreuses autres chaînes de blocs reposant sur des méthodes de consensus autre que la preuve de travail (*Proof of Work*) comme la preuve de participation (*Proof of Stake*) ou encore preuve d'autorité (*Proof of Authority*) pour ne citer qu'eux. Chaque configuration est toutefois confrontée au trilemme connu entre sécurité/scalabilité/décentralisation. Certains projets travaillant sur les couches : *Layer 1* (par exemple Acinq sur Lightning Network) ou *Layer 2* (cf. les différentes initiatives de ZKrollup comme celles menées par Starkware) travaillent précisément sur ces enjeux.

L'application des blockchains aux métavers. Métavers et blockchain ne sont pas nécessairement consubstantiels, mais certains métavers pourraient reposer sur des technologies de registres distribués. Dans les métavers, notamment vus comme des mondes virtuels ou des lieux d'échanges d'actifs, les biens numériques deviennent une des bases importantes de l'économie de ces univers. Les technologies blockchain peuvent présenter des solutions intéressantes pour connecter ces espaces au monde réel tout en sécurisant le stockage de ces biens numériques et les données des utilisateurs. À noter qu'idéalement, les utilisateurs pourraient vouloir utiliser leurs données et biens numériques d'un métavers à un autre. Cette interopérabilité se joue à plusieurs niveaux. Elle comprend l'interopérabilité pour la connectivité (mise en réseau, communications), l'interopérabilité pour la persistance (identité, propriété, comptabilité, historique), l'interopérabilité pour la présentation (modèles graphiques, propriétés physiques), l'interopérabilité pour la signification (métadonnées, sémantique, ontologies), l'interopérabilité pour le comportement (règles, économie, conséquences, pouvoir). Par rapport aux blockchains, elle peut se faire grâce à des protocoles *cross-chain* qui permettent l'interopérabilité des blockchains et facilitent la transmission et l'utilisation des données entre différents réseaux blockchain.

Ces différents fils technologiques — dont une brève perspective historique a été rappelée — tendent actuellement à se recouper, en partie du moins. Ils constituent autant de faisceaux d'origine du sujet qui nous occupe dans le cadre de cette mission exploratoire : les métavers.

En effet, si le Métavers interopérable (avec un M majuscule) n'existe pas (ou pas encore), divers projets et plateformes s'en rapprochent. Tout d'abord dans le domaine des jeux vidéo, plusieurs mondes virtuels au sein desquels se sont développées des expériences interactives mêlant acteurs du monde réel et virtuel et où a émergé une réelle économie virtuelle active ont déjà vu le jour. Cependant, le Métavers a pour ambition de ne pas se limiter au domaine du jeu vidéo et pourrait toucher des secteurs multiples comme la culture, l'éducation, le travail, le tourisme...

II. De quoi le métavers est-il le nom ?

Pour les différents interlocuteurs rencontrés pendant cette mission, le métavers c'est «internet», le «web», «une projection de fantasme», «la révolution industrielle de demain», «un concept désignant une porosité entre vie réelle et vie virtuelle, où nous pouvons vivre, dans une dynamique communautaire, des expériences immersives et en temps réel», «des plateformes réunissant des technologies du jeu et des outils du web dans un nouveau paradigme», «un jeu vidéo associé à une blockchain», «un état de rêve», «une future version d'Internet où des espaces virtuels, persistants et partagés sont accessibles par interaction 3D», etc. Il en ressort que le Métavers est une notion abstraite, dont chaque participant tente de donner sa vision. Notre mission en fait état pour proposer une définition et revient sur les caractéristiques et finalités des métavers, tout en illustrant des applications.

Définitions des métavers

Un ou des métavers. Pourquoi utiliser un concept s'il n'est pas encore défini, pourrait-on se demander à juste titre ? Pour montrer une direction commune ? Le Métavers, avec un «M» majuscule c'est l'idée d'aboutir à un espace virtuel, persistant, avec des données de synthèse tridimensionnelle, qui serait interopérable. Nul ne sait encore s'il adviendra, et si les évolutions technologiques actuelles permettront d'atteindre ce stade. Dans ce contexte, la majuscule de Métavers est souvent utilisée pour décrire le concept, comme l'Internet. De fait, il n'existe qu'un Métavers (concept), comme il n'existe qu'un seul «Internet». Le terme métavers avec une minuscule est utilisé quant à lui pour décrire les instanciations ou implémentations des principes du Métavers. Autrement dit, il pourrait exister dans cet «univers» une multitude de services et d'espaces, plus ou moins ouverts, que l'on nommera ci-après «métavers» avec un «m» minuscule.

Un terme ambivalent, voire galvaudé. Aujourd'hui, lorsque l'on évoque le Métavers, il est en fait souvent fait référence à un concept marketing englobant plusieurs technologies immersives comme la réalité augmentée et la réalité virtuelle. Le changement récent de nom du groupe Facebook pour Meta a remobilisé les discours et réflexions autour de ce concept. Si ce changement de nom témoigne de l'ambition du groupe de se positionner en tant que leader dans le domaine, beaucoup d'autres entreprises profitent du flou entourant le concept pour s'afficher comme des acteurs du Métavers et ainsi attirer plus de capitaux et de couverture médiatique. Ainsi, des projets aussi différents que des plateformes de réalité virtuelle, des jeux vidéo multijoueurs, des plateformes de diffusion de concerts en réalité augmentée ou des marketplaces fondées sur des blockchains, ont tous recours au terme de «métavers» pour se définir.

Les métavers et le web3 sont deux concepts distincts. Au cours du Metaverse Roadmap Summit en 2006, les experts de l'époque définissaient le métavers comme «la rencontre entre le jeu vidéo et le web 2.0». Le concept du Web3 a été imaginé en 2014 par un des fondateurs de la chaîne de blocs Ethereum, Gavin Wood, autour d'une proposition originale et radicale, visant à généraliser l'usage des chaînes de blocs sur le web, dans l'espoir de briser la toute-puissance des plateformes centralisées au profit des

utilisateurs finaux. De notre point de vue, cette perspective est assez orthogonale à la question des mondes virtuels immersifs, qui n'étaient d'ailleurs pas mentionnés par Gavin Wood en 2014, même si certains mondes virtuels « décentralisés » se sont depuis réclamés du Web3. Il nous paraît donc hasardeux de lier les deux termes dans leurs définitions. Nous préférons voir les chaînes de blocs comme une modalité possible du métavers, et non un élément constitutif de sa définition.

Tentative de définition. Comme indiqué précédemment, plusieurs acteurs ont des définitions différentes, qui servent leurs intérêts. On peut cependant tenter de caractériser quelques éléments qui nous paraissent constitutifs d'un métavers en général. **Un métavers est un service en ligne donnant accès à des simulations d'espaces 3D temps réel, partagées et persistantes, dans lesquelles on peut vivre ensemble des expériences immersives.** On peut y accéder avec ou sans visiocasque, et/ou commercer avec ou sans technologies de registres distribués. Nous commentons les principaux termes :

- **Simulation d'espace 3D temps réel.** La 3D dont il est question dans les mondes virtuels du métavers concerne les trois dimensions de l'espace (hauteur, largeur et profondeur). Il ne s'agit donc pas seulement du relief comme dans le cinéma 3D stéréoscopique, mais bien de la simulation de l'espace dans ses trois dimensions.
- **Immersion.** Comme on l'a déjà souligné, plusieurs modes d'immersion sont possibles, qui ont en commun de nous placer à l'intérieur de l'espace de la simulation 3D temps réel. Dans un visiocasque, les images et les sons sont calculés de façon à exactement compenser nos mouvements et nous donner l'illusion d'un espace stable dans lequel nous nous déplaçons. Dans le cas de la réalité augmentée, cet espace se superpose avec la réalité qui nous entoure. Dans le cas de la réalité virtuelle, cet espace se substitue à la réalité qui nous entoure. Dans les deux cas, l'immersion est obtenue lorsque l'espace réel et l'espace simulé coïncident parfaitement. On peut vivre également des expériences de réalité augmentée sans casque, à l'aide de smartphones et tablettes où les deux espaces sont projetés en temps réel pour former des images hybrides. L'écran du smartphone ou de la tablette joue alors le rôle d'une caméra à travers laquelle on voit la simulation. Ces différentes modalités ont un point commun, c'est que nous nous déplaçons dans la simulation avec notre propre corps (immersion proprioceptive). Il est également possible de vivre des expériences immersives en nous projetant mentalement dans un avatar qui nous représente sur un écran (immersion extéroceptive). C'est le cas dans la plupart des jeux vidéo et des mondes en ligne de type Second Life.
- **Partage et persistance.** La simulation est partagée par tous les utilisateurs connectés et se poursuit en leur absence. Chacun est libre de la rejoindre et de la quitter, dans la limite des capacités de l'infrastructure qui la supporte.

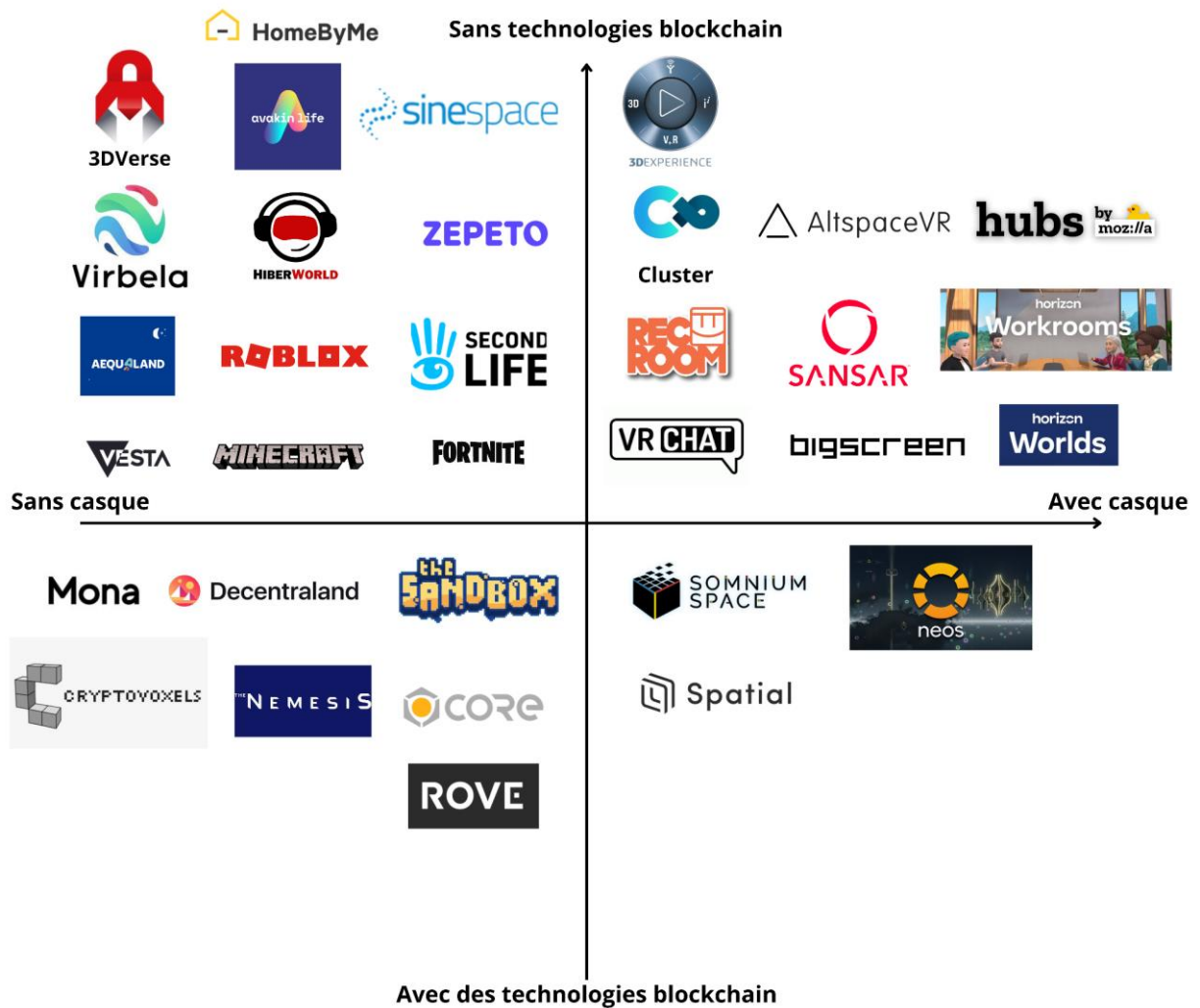
Taxonomie des métavers

Les différents types de métavers. Si les métavers partagent quelques propriétés communes, ils diffèrent sur tous les autres points. Plusieurs typologies de métavers semblent se dessiner. Un premier critère de différenciation pourrait être opéré entre les métavers hyperréalistes, par opposition aux métavers « voxelisés ». Un voxel est une unité d'information graphique qui définit un point dans un espace tridimensionnel. Contraction de « volume » et « pixel », le voxel est à la 3D ce que le pixel est à la 2D. Autrement dit, le pixel qui correspond à l'élément d'image définit un point dans l'espace bidimensionnel avec ses coordonnées x et y, là où pour le voxel une troisième coordonnée z est ajoutée.

Dans le cas des métavers hyperréalistes, l'enjeu est de reproduire de manière virtuelle la plus réaliste et précise possible des environnements, alors que la seconde approche se veut au contraire davantage « gamifiée », avec une approche de type presque sous forme de brique LEGO. Une seconde distinction s'effectue entre les métavers « plats » (plats) où l'immersion (extéroceptive) se fait en se projetant sur un écran et les métavers « spatialisés » où l'immersion (proprioceptive) se fait à l'aide d'un visiocasque à trois ou six degrés de liberté. On peut également distinguer les métavers en fonction des interactions qu'ils permettent. Dans le cas le plus simple, les interactions sont limitées aux déplacements et les immersants sont alors placés dans la situation de simples spectateurs. La plupart des métavers permettent également aux immersants de communiquer entre eux, soit par écrit soit par la voix et le geste. Certains métavers permettent également de manipuler et transformer les objets de la simulation.

Notre définition de travail nous permet donc de distinguer les caractéristiques essentielles des métavers (voir ci-dessus) de leurs modalités. Par exemple, les métavers sont accessibles via différents dispositifs allant d'un simple écran de téléphone ou d'ordinateur, aux casques de réalité virtuelle et augmentée ou de dispositifs complexes spécifiques (CAVE, VR-room, dispositifs immersifs expérimentaux). Une autre illustration de ce qui constitue une modalité et non une caractéristique est l'avatar. Les avatars peuvent également être considérés comme une modalité des métavers, et non comme caractéristique essentielle. Ainsi, certains métavers notamment en réalité augmentée ou via expériences théâtrales immersives en réalité virtuelle se passent d'avatars (il existe comme nous le verrons en partie II une série de questionnements sociotechniques liés aux avatars dans les métavers, par exemple sur la diversité des représentations et les harcèlements sexuels via interactions par avatars).

Étant donné l'évolution rapide des technologies de l'immersion et la volatilité de certains concepts autour des métavers, il est utile de séparer ces modalités des éléments essentiels de la définition. Par exemple, en 2022, deux modalités dominent les débats sur le futur des métavers : les visiocasques, et les chaînes de bloc. Les exemples qui en découlent peuvent alors être analysés dans un schéma de ce type :



- **Les métavers sans casques ni chaînes de blocs** représentent la majorité des cas, et la quasi-intégralité des jeux en ligne. Ils sont basés sur une immersion purement extéroceptive, notamment par projection avatoriale (mais pas uniquement, dans le cas de la réalité augmentée), et utilisent des moyens d'identification et de paiement traditionnels. L'archétype de ces métavers est Second Life, qui est un monde virtuel fermé avec une économie fermée utilisant sa propre monnaie (le Linden dollar). Les technologies nécessaires au déploiement de ces métavers sont bien maîtrisées depuis 15 ans et ont continué à progresser, ce qui permet d'imaginer une nouvelle génération avec des univers visuellement plus complexes et réalistes.
- **Les métavers avec casque mais sans chaîne de blocs** transforment l'expérience des univers virtuels par une immersion proprioceptive qui favorise des expériences plus émotionnelles et plus intenses. On y trouve des métavers plus récents comme VRChat, Rec Room et Sansar. Ces métavers d'un type nouveau ont une croissance qui est directement indexée sur celle des visiocasques, dont il s'est vendu environ 10 millions d'unités dans le monde entre 2015 et 2020. (Actuellement, ces casques sont dans leur très grande majorité destinés à la réalité virtuelle, car les casques ou lunettes de réalité augmentée sont encore coûteux et peinent à convaincre. Mais ces tendances technologiques peuvent évoluer, notamment au regard des investissements annoncés ces derniers mois par les géants de la Silicon Valley). Ces

métavers voient par exemple se développer des «scènes virtuelles» de concerts et spectacles d'un type nouveau où les artistes sont représentés par leurs avatars et s'adressent à des publics de plusieurs dizaines de milliers de personnes.

- **Les métavers sans casques mais avec chaînes de blocs** comme Decentraland et The Sandbox ont des caractéristiques assez différentes des précédents. On y trouve des mondes virtuels de type «bac à sable» parfois voxelisés, et qui favorisent la création par les utilisateurs et les échanges commerciaux entre eux. On entre dans ces mondes virtuels avec un portefeuille (wallet) pour y faire des achats et des ventes en cryptomonnaies. La croissance de ces nouveaux mondes est cette fois-ci indexée sur la popularité des technologies de blockchain et celle des jetons non fongibles (NFT) qui connaît actuellement un fort intérêt. De ce fait, certains artistes numériques fondent de grands espoirs sur ces métavers qui pourraient jouer le rôle de galeries d'un nouveau marché de l'art numérique et mondialisé.
- **Les métavers avec casques et chaînes de blocs** sont les moins nombreux aujourd'hui. Leur acceptabilité sociale est actuellement très faible puisqu'ils combinent deux caractéristiques qui font peur au grand public — l'isolement dans un casque et le recours aux cryptomonnaies. Leur nombre limité à ce jour pourrait constituer un indicateur du faible couplage qui existe entre le web immersif et le Web3. Mais les choses pourraient changer et il est d'autant plus intéressant de se pencher sur ces métavers aux premiers rangs desquels on trouve à l'heure de ce rapport Neos, Spatial et Somnium Space.

Finalités des métavers, illustrations et limites

Les finalités des métavers. Selon le chercheur Philippe Fuchs, la finalité des métavers est de permettre à un nombre illimité d'internautes de partager simultanément, via leur avatar identifiable, des expériences de réalité virtuelle, dans le but d'activités sociales, ludiques, économiques, professionnelles, artistiques ou culturelles. Le champ d'applications des métavers est donc très large, ce qui permet à un commentateur très écouté comme Matthew Ball d'annoncer que le métavers va révolutionner notre société dans son ensemble. Mais une technologie ne s'impose que si elle apporte un gain significatif et durable. Dans le cas des métavers, on peut légitimement se demander quel est le gain significatif et durable des espaces 3D temps réel, des visiocasques et des chaînes de blocs pour chaque activité humaine concernée. Autrement dit, on peut tenter d'évaluer la pertinence des métavers de différents types pour chaque activité. Dans le domaine du jeu vidéo par exemple, les espaces 3D temps réel apportent un gain incontestable, mais les visiocasques et les cryptomonnaies ne sont pas pour l'instant plébiscités par tous les joueurs. Pour les visioconférences, la vidéo transmet plutôt mieux la voix et les visages que la simulation 3D temps réel, le visiocasque n'apporte pas d'avantage évident et les chaînes de bloc non plus. Dans le domaine du tourisme, la simulation 3D temps réel peut faciliter la préparation d'un voyage, mais pas le remplacer. Pour le télétravail, les espaces 3D temps réel sont utiles pour travailler ensemble sur les mêmes données, mais peut-être pas pour se réunir. Dans le domaine des arts, l'immersion 3D est particulièrement utile pour les arts de l'espace (danse, théâtre, sculpture,

architecture). Sera-t-elle aussi pertinente pour les arts de l'image (peinture, photographie, cinéma)? Dans chaque domaine considéré, il paraît donc utile de procéder à une analyse en termes de coûts et de bénéfices avant de céder aux sirènes des métavers. Pour le chercheur Avi Bar-Zeev, la finalité des métavers est avant tout de nous raconter de meilleures histoires. Curieusement, c'est donc la dimension fictionnelle qui prime pour l'inventeur des casques de réalité augmentée de Microsoft et Apple, devant les dimensions sociales ou professionnelles.

Dans le domaine des arts, le Métavers apparaît comme l'ultime étape de la « conquête de l'ubiquité » imaginée par Paul Valéry lorsqu'il prédit que la science pourra « transporter ou reconstituer en tout lieu le système de sensations que dispense en un lieu quelconque un objet ou un événement quelconque. [...] Comme l'eau, comme le gaz, comme le courant électrique viennent de loin dans nos demeures répondre à nos besoins moyennant un effort quasi nul, ainsi serons-nous alimentés d'images visuelles ou auditives, naissant et s'évanouissant au moindre geste, presque à un signe. » Valéry souhaite ces innovations, car « il est de maussades journées; il est des personnes fort seules, et il n'en manque point que l'âge ou l'infirmité enferment avec elles-mêmes qu'elles ne connaissent que trop ». Après les arts de l'image et du son, le Métavers promet d'étendre cette conquête de l'ubiquité aux arts de l'espace. Après la radio et la télévision, qui diffusent les images et les sons, les nouvelles technologies de réalité virtuelle et de réalité augmentée permettent désormais de diffuser le théâtre, la danse, l'architecture, la sculpture et l'opéra, dans leur dimension spatiale et immersive. C'est une révolution qui s'annoncerait pour toute une partie de la création artistique française et il paraît important de créer les conditions d'un véritable dialogue entre scientifiques et artistes afin de poursuivre ensemble cette conquête de l'ubiquité, commencée avec la radio et la télévision française, et qui se poursuit aujourd'hui dans les métavers.

Certains acteurs culturels s'inquiètent de cette révolution. Ainsi, Jean Bellorini, directeur du TNP, déclare : « Nous faire croire que l'on peut avoir accès à l'art par le biais du numérique est un mensonge. Car l'appréhension solitaire d'un spectacle le transforme automatiquement en produit. » Dans une direction opposée, le metteur en scène Jean-François Peyret esquisse les contours d'un « théâtre numérique populaire » permettant de faire voyager les spectacles à travers le monde dans leurs incarnations numériques, pour le bénéfice mutuel des artistes et des publics. Franck Bauchard tente une synthèse après la crise du COVID-19 : « Une fois la crise passée, l'urgence sera de retrouver un théâtre en ordre de marche; mais nous sortirons peut-être de cette crise avec des questions nouvelles : comment les théâtres peuvent-ils répondre aux pratiques culturelles en ligne? Comment toucher ces nouveaux publics et rendre accessible le théâtre autrement? Avec quels formats? Comment favoriser une circulation des pratiques entre les plateformes numériques et le "in situ"? Comment inventer de nouvelles formes de présence et de circulation entre la scène et la salle? Comment créer une scène élargie, métaphore d'une conscience élargie d'un monde, où le réel et le numérique s'imbriquent? Ces questions restent en suspens, au-delà de la crise sanitaire, pour le théâtre de demain. »

Créer une scène élargie où le réel et le numérique s'imbriquent, sans transformer les spectacles en produits, c'est toute la difficulté du métavers culturel. Des développements technologiques spécifiques devront probablement être menés afin de donner aux artistes

les moyens de diffuser leurs spectacles sur un métavers qui leur appartient en propre — libre, ouvert, pérenne et respectueux de leurs environnements et de leurs droits.

Illustrations positives des métavers. Des spectacles immersifs participatifs aux jumeaux numériques de l'industrie, en passant par la facilitation des opérations de maintenance et de sécurité des centrales nucléaires, les exemples sont nombreux. Voici quelques illustrations non exhaustives (n'évoquant par exemple ni les applications militaires ni celles pour l'industrie du X, qui étaient toutes deux d'importants vecteurs d'innovation lors du développement d'Internet), afin de se représenter plus concrètement des domaines dans lesquels pourraient évoluer les métavers :

- **Un spectacle immersif et participatif.** Explorant de longue date les opportunités créatives offertes par les technologies numériques, la chorégraphe Blanca Li vient de présenter au public sa nouvelle création qui se situe au point de rencontre entre la danse et le jeu vidéo, au moyen d'un dispositif immersif qui fait communiquer le monde virtuel et le monde réel. Les spectateurs, réunis dans un même espace physique, sont équipés de casques de réalité virtuelle et se trouvent projetés dans un univers féérique qui reconstitue, en images de synthèse, les lieux typiquement parisiens où se tient une fête inoubliable. Accompagnés de « vrais » danseurs dont les gestes sont reproduits en temps réel dans l'univers virtuel, les spectateurs interagissent, se déplacent physiquement et participent à ce bal par l'intermédiaire de leurs avatars. Cette œuvre novatrice, produite en partenariat avec la maison Chanel, présente une triple dimension immersive, sociale et en direct qui caractérise les expériences culturelles dans les métavers.
- **La découverte du patrimoine.** Le projet EXPRIME a été imaginé par les chercheurs du laboratoire de réalité virtuelle de Mines Paris PSL, sans avoir finalement pu voir le jour. Tout son intérêt portait dans sa volonté de permettre des créations artistiques interactives dans les domaines muséographiques et patrimoniaux. En amont de la visite d'un musée ou d'un site patrimonial, proposer à tout public, futur visiteur du musée ou du site, une création artistique interactive, c'est-à-dire, une « EXPÉRIence IMMersive en Espace culturel » grâce aux techniques de réalité virtuelle. EXPRIME propose une expérience multisensorielle à but culturel et artistique pour un petit groupe de personnes qui peuvent s'immerger ensemble dans une des créations artistiques interactives développées lors du projet, proposant de connaître l'histoire et les caractéristiques artistiques des principales œuvres d'un musée ou d'un monument historique. Il ne s'agit pas de remplacer la visite réelle du musée mais d'inciter les personnes à y aller et à préparer efficacement la future visite. Partant du constat que les plus grands lieux d'accueil de publics de milieux sociaux, culturels et générationnels variés, seraient les médiathèques ont orienté sur les activités culturelles et sans but commercial, le projet EXPRIME exhortait à l'équipement progressif de ces lieux avec du matériel de réalité virtuelle; avant dans un second temps de s'adresser à des touristes. Dans ce contexte, les « visiteurs », équipés de visiocasques (ou tablette numérique pour les enfants de moins de 13 ans), se retrouvent immergés dans un environnement à 360 degrés et découvrent une sélection d'œuvres d'art en 3D numérisées. Ils sont accompagnés par un médiateur pour rendre l'expérience plus riche culturellement et

socialement. Cette immersion à 360° se réalise dans quelques salles ou galeries virtuelles, reconstituées en 3D à partir du musée réel (ou du monument historique).

- **Éducation.** La réalité virtuelle permet d'immerger les apprenants dans des environnements spécifiques utiles à l'apprentissage (univers évoquant le bien-être, le calme, la sérénité favorable à la concentration et à la diminution du stress), des environnements en lien direct avec le contenu de l'enseignement (ex. : reproduction d'une période historique pour permettre aux usagers d'avoir une meilleure perception d'une époque; être dans une réunion de crise diplomatique pour saisir les enjeux et les transactions relationnelles qui peuvent s'y jouer); des environnements permettant des mises en situation professionnelles comme cela est déjà utilisé en médecine pour certains aspects (ex. : pour les psychologues en formation, faire des jeux de rôle patient psychologue avec des avatars peut permettre de comprendre les enjeux relationnels et les fonctionnements liés à certaines psychopathologies sans craindre de se mettre en scène). On peut en revanche s'interroger sur l'utilité de déployer ces environnements dans des mondes virtuels pérennes et partagés par des millions (ou milliards) d'internautes.
- **Enfance.** On peut aussi envisager les usages des métavers par les enfants. Selon certains chercheurs, la projection avatoriale et l'immersion narrative trouvent leur origine commune dans notre plaisir à «jouer des rôles» dans des jeux de «make believe» ou de «mimicry» qui consistent à «devenir soi-même un personnage illusoire et se conduire en conséquence», c'est-à-dire jouer un rôle. On peut citer les imitations enfantines, les poupées et panoplies ou encore les arts du spectacle. Pour les enfants, les métavers peuvent être des «bacs à sable» ou des «théâtres de marionnettes» séduisants et amusants, avec l'avantage de l'ubiquité et de la persistance, qui permettent d'abandonner et reprendre le même jeu à volonté et à distance. Les psychologues de l'enfant soulignent l'importance de ce type de jeu dans l'élaboration de la «théorie de l'esprit» et de l'empathie, et il convient donc de les aborder avec le plus grand soin. LEGO et Epic Games ont récemment annoncé leur partenariat afin de créer un «métavers pour enfants», ce qui évidemment soulève des questions de sûreté et de protection importantes pour ces nouveaux environnements.
- **Santé.** La réalité virtuelle peut offrir des opportunités dans le champ de la santé, à travers la formation des professionnels de santé. En effet, à l'instar de ce qui existe déjà dans les thérapies en ligne, on peut envisager par exemple des thérapies d'exposition (prise en charge cognitivo-comportementale des phobies par exemple) facilitée par l'immersion dans un environnement (ex. traitement de la peur du vide, de l'avion). On pourra ainsi faire des expériences qu'on ne pourrait pas avoir dans le monde physique. Cela pourra également améliorer les visuoconsultations. À côté de la prise en charge thérapeutique, l'utilisation de plusieurs avatars pourra aussi permettre aux personnes d'explorer plusieurs facettes de la personnalité, sans avoir la crainte d'être jugées. Cela peut être particulièrement intéressant au moment de l'adolescence. Les implications pour la recherche pourront également être importantes. On peut par exemple penser aux travaux menés sur l'orientation spatiale des personnes ayant une déficience intellectuelle afin de favoriser leur accès à l'autonomie. Ces travaux sont actuellement menés dans des environnements virtuels

spécifiquement conçus. Les métavers promettent une démocratisation de ces environnements, permettant aux personnes avec un handicap d'avoir des expériences qu'elles ne pourraient pas avoir dans le monde physique, notamment du fait de l'abstraction des contraintes physiques dans les métavers, d'une liberté de se définir et de se présenter au-delà des préjugés et des discriminations dont elles peuvent faire l'objet au quotidien, et de l'expérience immersive permise par ces environnements.

- **Architecture.** Les environnements numériques sont déjà utilisés dans la conception architecturale. Dans la conception architecturale, le virtuel est au service et rejoint le réel. On parle de conception phygitale. La place de l'architecture dans les métavers sera de concevoir des lieux où les personnes se sentiront bien, à l'instar de sa mission dans le monde physique. Cette conception architecturale dans les métavers aura la possibilité de s'affranchir des contraintes du monde physique, en premier lieu la gravité. La conception dans les métavers pourra ainsi servir de laboratoire de la créativité architecturale en permettant de créer des lieux que l'on pourra vivre dans les métavers avant de s'inspirer de cette expérience pour concevoir des lieux aux services des usagers et avec lesquels les personnes pourront se sentir en adéquation.
- **De nouvelles façons d'interagir socialement.** Les usages numériques modifient les interactions sociales que nous connaissons en face à face (on retrouve souvent le terme de IRL pour *In Real Life*, expression empruntée à l'univers du jeu vidéo). Les particularités interactionnelles sont notamment liées à la possibilité de différer ces réponses, d'être anonyme, de se montrer sous un autre jour, de toujours trouver quelqu'un avec qui interagir, sans limites géographiques. Les métavers pourraient ainsi, comme lieu de socialisation, contribuer aux échanges sociaux, permettre d'entrer en relation avec de nouvelles personnes ou de maintenir des liens avec les amis et les proches dans les situations d'éloignement ou les situations de restriction des interactions physiques. Les avatars des métavers permettraient une expérience relationnelle plus riche notamment grâce à la perception des émotions non verbales à travers les expressions faciales des émotions et le langage corporel de notre interlocuteur. On peut parler d'une conception phygitale des interactions. Les interactions entre avatars pourraient donner lieu à des interactions en visio en demandant à l'autre d'activer sa caméra comme cela peut se faire par exemple dans Gather Town. Cela pourrait, dans certains cas, vaincre le sentiment d'isolement social que certaines personnes peuvent ressentir, d'autant plus si, comme cela se produit déjà avec l'univers des jeux vidéo, des rencontres IRL peuvent découler des rencontres en ligne. Pour réduire les risques liés à des interactions indésirables entre avatars (ex. agressions physiques, sexuelles) et en réponse à de nombreux incidents publics sur ces questions, le métavers Horizon a créé des « périmètres » autour des avatars, ou *personal boundary*, qui imposent une distance minimum entre deux avatars, un avatar ne pouvant pénétrer ce périmètre sans le consentement de l'autre avatar.
- **Vécu expérientiel, vie quotidienne et travail.** Au travail, les technologies immersives sont couramment utilisées pour les « revues de design » de produits, ou les jumeaux numériques remplacent les maquettes physiques et prototypes dans de nombreuses industries. Les métavers permettent d'envisager une démocratisation de ces

pratiques et leur utilisation à distance, à condition de résoudre la délicate question de la protection des données 3D échangées au cours de ces revues. Les métavers permettent également d'imaginer de nouvelles organisations de nos espaces de travail. À la métaphore du « desktop » pourrait se substituer de nouvelles métaphores utilisant mieux l'espace qui nous entoure, à la façon du bureau d'un écrivain ou de l'atelier d'un artiste. Nous pourrions même disposer de plusieurs espaces de travail dédiés à nos différentes tâches, certaines étant privées et d'autres partagées avec nos collaborateurs. La promesse de ces nouveaux espaces de travail est de faciliter la concentration par l'immersion, par opposition au « desktop » qui favorise le partage des tâches et la dispersion. Le journaliste Cal Newport explore cette piste et décrit les difficultés qui restent à résoudre, en particulier pour interagir avec des écrans, claviers et livres virtuels, qui sont infiniment plus difficiles à manier que leurs équivalents physiques. Cela reste une perspective positive et ouverte qui nécessitera des innovations dans le domaine des interactions spatiales et multimodales (geste et parole). C'est un domaine de recherche actif en interaction humain-machine et en informatique graphique. Les métavers pourront aussi nous permettre de vivre des expériences uniques, de faire de nouvelles expériences que nous pourrions, pour certaines, transposer ou prolonger dans le monde physique (ex. : pratique d'un sport). Ces expériences pourront être vécues avec une certaine intensité.

- **Industrie.** L'exploration de l'utilisation des métavers en B2B (entreprises / industrie) représente également un important vecteur de développement. Les technologies immersives peuvent effectivement être utilisées afin d'améliorer la collaboration entre équipes, et visualiser des données dans le cadre industriel, pour les entreprises à des fins de simulation, formation, collaboration, ainsi qu'en vue de la réduction des risques, des coûts de transport, d'assurance, ou encore de gains de temps. Le présent rapport ne pourra détailler l'ensemble de ces possibilités, mais exhorte à ce que des études approfondissent ces opportunités de déploiement. En effet, les techniques de visualisation en 3D pourraient permettre de renforcer la collaboration entre équipes et de modéliser rapidement des objets complexes, comme des moteurs ou des processus de fabrication. À titre d'illustration, dans l'usine Saint-Gobain à Saint-Gilles, dans le Gard, des ouvriers commencent à s'équiper de lunettes de réalité augmentée HoloLens. Principalement utilisées au stade de la formation, elles leur permettent de se familiariser rapidement avec leur environnement de travail et de gagner en efficacité dans leur apprentissage. Elles peuvent également permettre de réaliser des sessions d'assistance avec des collègues de travail localisés à distance. De la même manière, dans les centres de réparation des batteries électriques de Renault, les formations des nouveaux techniciens peuvent être assurées à distance, grâce à des casques de réalité augmentée, réduisant ainsi les coûts liés aux déplacements (à la fois énergétiques et financiers). Enfin, si les technologies immersives facilitent l'apprentissage grâce à leurs fonctions interactives, elles permettent également de renforcer la coopération entre équipes. Dans les centres de R&D d'Engie, l'entreprise Synergiz a déployé un ensemble d'équipements, de services et de solutions logicielles de réalité mixte à destination des travailleurs. Ces outils permettent aux équipes d'Engie de collaborer sur des cas concrets en visualisant des données en temps réel dans leurs laboratoires.

Une adoption massive est-elle possible ? L'ensemble des interlocuteurs rencontrés au cours de cette mission ne partage pas des points de vue convergents sur la question de l'adoption massive des métavers. En effet, plusieurs font ressortir les contraintes relatives à l'expérience immersive, notamment dans les déclinaisons qui nécessitent non seulement de porter un casque, mais aussi des poignées et éventuellement d'autres capteurs pour que d'éventuels avatars restituent nos mouvements, nos attitudes voire nos émotions. Ce qui pourrait avoir pour conséquence de dissuader un usage aussi intense et ubiquitaire que celui d'un smartphone. Il sera cependant certainement possible d'interagir dans les métavers avec des équipements plus légers, quitte à avoir une expérience dégradée. On peut imaginer que certains métavers tireront parti des capacités de la réalité augmentée pour agrémenter le monde physique d'objets virtuels et d'avatars, éliminant ainsi l'isolement du monde physique que procure la réalité virtuelle. Les interfaces peuvent bloquer l'usage naturel de ces métavers. Plusieurs études montrent la frustration des utilisateurs à ne pas pouvoir se déplacer, toucher plus librement les objets et environnements virtuels. Des travaux de recherche mixant recherche publique et R&D industrielle sont encore à mener dans ce domaine. Aussi, la « cyber-sickness » est un phénomène bien identifié lors de l'usage de systèmes immersifs de type réalité virtuelle. Il reste encore beaucoup à faire pour minimiser cette gêne qui touche beaucoup de citoyens, à différents niveaux de sensibilité. Un travail en amont est à mener pour mieux comprendre et minimiser ces désagréments. Il est aussi important de réguler l'usage de ces métavers afin de limiter le temps d'exposition par exemple, ou déterminer les conditions technologiques/usages maximales à ne pas dépasser pour limiter ces effets délétères. Un autre problème est la perte temporaire de repères lorsqu'on passe d'un environnement virtuel à la réalité, ce qui peut amener à une mauvaise estimation des distances, avec des conséquences dangereuses dans le domaine de la conduite ou des pratiques risquées. Il est important d'éduquer aux bonnes pratiques pour éviter de créer des situations accidentogènes (définir un temps minimal avant la reprise de la voiture par exemple). Avec la démocratisation des systèmes de RV notamment, et l'augmentation inévitable du temps d'exposition à ces technologies, il est important de mener une recherche amont pour mieux comprendre ces aspects délétères et définir de bonnes pratiques. Enfin, la jouabilité devra être prise en compte. Plusieurs études s'accordent à montrer que la motivation, l'appétence, pour ces environnements immersifs diminue grandement avec le temps. Cette motivation peut être maintenue en ajoutant régulièrement de nouveaux contenus. C'est un phénomène bien connu du monde des jeux vidéo, desquels il serait possible de s'inspirer.

Partie II — Panorama des enjeux liés aux développements des métavers

Les métavers s'annoncent à la fois comme un marché porteur d'opportunités dont l'écosystème français pourrait se saisir, et un grand défi anthropo-technico-économique. Les métavers constituent une opportunité culturelle pour la France et probablement une source de créations d'emplois en tant que telle **(I)**. Afin de s'en saisir, il convient de bien étudier la chaîne de valeur des métavers pour déterminer les enjeux économiques et les choix d'investissements prioritaires **(II)**. Pour prolonger l'extension de notre environnement initiée par le smartphone, la route vers le Métavers sera itérative, plusieurs freins technologiques structurels devront être dépassés **(III)**. En outre, les métavers nous interrogent sur notre rapport au numérique et interpellent sur la société dont nous voulons demain **(IV)**. Ces questions sont fondamentales pour être en mesure de déterminer quelles régulations seront adaptées aux transformations en cours **(V)**.

I. Une opportunité culturelle pour la France

Les métavers s'inscrivent dans une politique de démocratisation de la culture et laissent entrevoir des perspectives économiques majeures pour l'ensemble des filières qui y sont attachées. Encourager cette innovation sur le territoire favoriserait l'exportation de la culture francophone, dans la francophonie et au-delà. Comme le web, les métavers prendront une importance progressive dans toutes les activités économiques sociales et culturelles. En plus d'accompagner les entreprises déjà impliquées dans les premiers marchés émergents (jeux, socialisation), il semble important d'étudier le développement des pratiques immersives. Seules la recherche, la formation et les expérimentations permettront d'en ouvrir l'usage à de nouveaux secteurs, notamment les industries créatives et culturelles, l'éducation et la recherche.

Les métavers, de nouveaux médias immersifs et créatifs

Les métavers, de nouveaux médias immersifs. Après l'ère du texte, puis le règne des images, et désormais celui des vidéos, viendrait l'heure d'un médium plus immersif. Pour Louis B. Rosenberg, CEO & Chief Scientist d'Anonymous AI, le Métavers marque «*la transition sociétale entre les médias "plats" vus à la troisième personne et les médias immersifs vécus à la première personne*». Cette transformation se caractérise par le passage «*du statut d'observateur de l'extérieur à un participant de l'intérieur*». Au croisement entre des espaces de jeux vidéo immersifs et des espaces de socialisation en réalité mixte, les métavers s'apparentent à des réseaux sociaux augmentés. Pour le réalisateur François Garnier «*les pratiques artistiques dans les métavers présentent de l'émergence d'un nouveau média spatial dont l'impact esthétique et sociologique sera certainement plus fort sur nos sociétés que l'apparition de l'image animée, l'audiovisuel au début du 20e siècle*». Ce dernier détaille que dans le cas des plateformes telles que Facebook ou TikTok l'usage est fragmenté, l'utilisateur se connecte fréquemment pendant de courtes périodes de l'ordre de la minute, afin de consulter les informations publiées. Les formes de dépendance qui en découlent viennent de la fragmentation de leur vécu régulièrement haché par le besoin de s'informer. Pour de nombreux métavers, l'utilisateur vient chercher une relation sociale qui se construit à travers des actions et la réalisation de tâches dans la durée. Le temps de connexion se mesure souvent en heures

et demande une concentration qui ne permet pas de réaliser d'autres tâches en parallèle. Les métavers apparaissent ainsi comme l'expression de l'émergence d'un nouveau médium basé sur la perception spatiale, permettant d'interagir via des espaces numériques.

Prochain chapitre de l'histoire de la création numérique. D'un point de vue créatif, les métavers ouvrent un nouveau chapitre de l'histoire de la création numérique qui, depuis la fin des années 2000, explore de nouveaux formats audiovisuels en adéquation avec l'évolution des technologies et des usages. D'abord qualifiés de « webdocumentaire » (par ex. Gaza-Sderot) ou de « fiction transmédia » (Wei or Die, Tantale), ces films interactifs revendiquaient déjà une approche hybride, croisant la culture cinématographique, les usages du web et les mécaniques de jeu vidéo. Ce champ d'exploration, porté notamment par la stratégie d'innovation des diffuseurs, a permis de faire émerger une nouvelle génération de producteurs et de créateurs. Cette dimension artistique et culturelle du Métavers va se poursuivre et s'intensifier pour toucher d'autres formes artistiques traditionnelles comme la danse, le théâtre et la comédie musicale. Il paraît en effet probable que les technologies de capture de mouvement et vidéo volumétrique permettront à terme de prendre part à des représentations virtuelles immersives. Le développement du Métavers va également susciter de nouvelles formes artistiques plus interactives, par hybridation avec le jeu vidéo, entre théâtre immersif et drame interactif.

Réinventer l'expérience du spectateur. Alors que le marché de la réalité virtuelle, qui s'envisageait d'abord sous la forme de la vente à l'acte de contenus sur des plateformes spécialisées comme l'Oculus Store, ne progresse que lentement et que l'accès au public reste difficile, la diffusion s'est concentrée récemment vers des œuvres qui présentent une dimension collective (conçues pour plusieurs utilisateurs simultanés) et un ancrage physique, sous la forme d'installations, d'expositions immersives ou de spectacles vivants augmentés (« *Location Based Experience* »). Ces nouveaux formats permettent de créer davantage de ponts avec le patrimoine et les arts vivants, en particulier la danse, le théâtre et la musique, et de réinventer l'expérience du spectateur ou du visiteur d'un lieu culturel. Dans le champ patrimonial, l'expérience Éternelle Notre-Dame, développée par le studio Emissive en partenariat avec Orange, se présente comme un parcours déambulatoire au cours duquel le visiteur, équipé d'un casque de réalité virtuelle, revit les différentes étapes de la construction de Notre-Dame de Paris (conçue avec des historiens et conservateurs du patrimoine). La déambulation physique renforce l'illusion et la présence d'autres visiteurs en fait une expérience partagée, plébiscitée par le public. Dans la lignée de ces expériences, les expositions immersives monumentales, comme La Joconde proposée par le Grand Palais Immersif, ou encore la programmation de l'Atelier des Lumières, confirment l'appétence du public pour ces dispositifs spectaculaires qui inventent une nouvelle grammaire visuelle. Ubisoft, premier éditeur européen de jeu vidéo et un des atouts majeurs de la filière française, l'a bien compris en développant des jeux massivement multijoueurs, qui s'imposent comme des espaces de socialisation et de cocréation (Ghost Recon, Just Dance ou The Crew). En parallèle, l'éditeur construit des partenariats stratégiques avec des acteurs de l'éducation ou du patrimoine, donnant lieu à des réalisations immersives comme Lady Sapiens (présentée au Museum d'Histoire

Naturelle, l'expérience propose à l'utilisateur d'incarner une femme de la Préhistoire dans l'univers graphique du jeu Far Cry Primal) ou l'escape game en VR Notre-Dame Brûle, adapté du film de Jean-Jacques Annaud, et tirant parti du travail de reconstitution historique qu'Ubisoft avait fait dans le cadre de la célèbre licence Assassin's Creed. Dans le jeu vidéo ou la réalité virtuelle, des œuvres ambitieuses récentes et notamment soutenues par le Centre national du cinéma et de l'image animée (CNC) préfigurent déjà ce que pourra être la création dans les métavers.

La filière française de la création immersive. En quelques années, la filière française de la création immersive est parvenue à faire naître des œuvres majeures, d'une maturité artistique étonnante, multiprimées dans les festivals internationaux de référence comme Sundance, Tribeca et Venise (Notes on Blindness, Gloomy Eyes, A Fisherman's Tale, 7 Lives). Le secteur compte de nombreux talents créatifs de notoriété internationale (Maurice Benayoun, Emmanuel « Maa » Berriet, Marc Caro, Mathias Chelebourg, Joséphine Derobe, Camille Duvelleroy, Judith Guez, Jan Kounen, Yann Minh, Alexis Moroz, Pitof, Michel Reilhac, Céline Tricart, Pierre Zandrowicz) et a donné naissance à des studios de fabrication reconnus mondialement comme Atlas V, Small, Backlight Studio, Stage11, Innerspace ou Emissive. Les écoles d'art (Beaux-Arts, Arts Décoratifs), de design (ENSCI-Les Ateliers), d'animation (Gobelins, Rubika, ESMA, MOPA), de cinéma (Louis Lumière, FEMIS) et de jeu vidéo (CNAM-ENJMIN) qui forment ces talents ont également une excellente réputation internationale.

Promouvoir la filière française et européenne des industries culturelles et créatives

La protection de l'indépendance de la filière française et européenne. La filière française et européenne est exposée à un risque élevé de captation de la valeur produite et de prédation des acteurs extra-européens, en particulier dans le contexte actuel de consolidation industrielle qui vise à sécuriser l'accès aux contenus. Le rachat récent d'Activision Blizzard par Microsoft pour le montant record de 69 milliards de dollars signale cette nécessité de consolider des positions concurrentielles pour s'engager avec les meilleures armes dans la bataille des contenus et des talents. En ce sens, il est important pour la France d'intégrer les enjeux propres aux métavers dans sa politique de protection des actifs culturels stratégiques. La souveraineté culturelle européenne est un objectif stratégique que partagent l'ensemble des États membres. Dans ce contexte, le CNC exhorte par exemple à un soutien fort aux entreprises, qui pourrait aller au-delà des limites imposées par le régime d'encadrement des aides d'État, et à étendre les principes de protection des œuvres européennes indépendantes (issues de la directive SMA) à l'ensemble des plateformes numériques proposant des contenus culturels. Selon le CNC, en suivant ce raisonnement, les métavers extra-européens pourraient se voir imposer des obligations d'investissement dans la création française et européenne, garantissant la présence forte de l'imaginaire européen dans ces nouveaux environnements numériques, sur le modèle de ce qui a été mis en place dans l'audiovisuel.

Un enjeu de souveraineté culturelle et de liberté de création. Les métavers constituent à la fois une opportunité culturelle, et un défi culturel pour la valorisation du patrimoine français, des contenus culturels français et en langue française. Le multilinguisme se pose avec insistance, car toutes les langues et cultures risquent d'être inégalement représentées. Le Métavers « ouvert et libre » défendu par certains grands groupes américains risque de devenir un moyen de diffusion supplémentaire pour la culture américaine hollywoodienne déjà dominante dans une grande partie du monde. Mais il permettra également aux artistes français qui s'en emparent de toucher un large public, comme le montrent déjà les concerts récents de Jean-Michel Jarre. C'est vrai également pour les éditeurs français de jeux vidéo, qui y trouveront de nouveaux moyens de diffusion et de nouvelles sources de revenus. Le Métavers peut donc être une opportunité exceptionnelle pour les artistes et créateurs européens de toucher de nouveaux publics, et il convient de leur assurer un accès libre et pérenne à ces nouveaux médias. Pour cela, plusieurs interlocuteurs français comme VRrOOM encouragent à la création de « métavers culturels » européens, capables de rivaliser avec les plateformes américaines de type VRChat ou AltspaceVR. Selon eux, il s'agit d'un enjeu suffisamment important pour justifier d'investissements publics et privés, pouvant inclure des développements technologiques dédiés, par exemple dans les domaines du cloud et des moteurs de jeu. Cette proposition mérite d'être étudiée, pour en analyser la réelle faisabilité. Elle fait effectivement ressortir d'importants questionnements de fond, parmi lesquels : celui de se lancer ou non dans la course aux développements de moteurs concurrents à Unity et Unreal Engine ; voire de la mise à disposition en open source de moteurs de jeux existants, par le concours d'acteurs importants du secteur de jeu vidéo. Mais également celui de prioriser le développement ou non d'un cloud souverain, comme le promeuvent certains acteurs dont Scaleway, 3D Outscale ou OVH. Selon certains interlocuteurs comme Luc Julia, Directeur scientifique de Renault « *si le cloud n'est pas souverain, alors le métavers ne peut être souverain* ». En tout état de cause, ce débat devra être mené avec pragmatisme. En effet, le développement d'un « métavers européen » semble en l'état peu réaliste en pratique du fait de la multitude de partenaires qu'un tel projet devrait avoir sur l'ensemble des couches technologiques concernées, et qui à l'heure de l'écriture de cette mission, ne peuvent être « souverainement » réalisées.

Soutenir la diversification des activités des studios de production numérique. Plusieurs studios de production numérique (spécialisés dans l'animation, les effets visuels, ou la réalité virtuelle) sont actuellement soutenus par le CNC pour déployer de nouvelles infrastructures techniques qui soient adaptées aux enjeux de demain. Ainsi, pour les studios d'animation, la conversion de leur chaîne de fabrication au temps réel présente des avantages immenses : le temps réel permet un rendu instantané et supprime le temps de calcul long et énergivore de l'image « précalculée ». Dans le contexte de l'explosion de la demande de contenus en animation, portée par le développement des plateformes de streaming, le gain de productivité est très important, les temps de production raccourcis et les coûts mieux maîtrisés. En outre, le temps réel permet de réduire significativement l'empreinte carbone des productions. Enfin, il ouvre la voie à une diversification de l'activité des studios qui disposent d'une chaîne de fabrication unique, adaptée aussi bien au film linéaire qu'au jeu vidéo. D'autres technologies également issues du jeu vidéo sont

utilisées pour offrir des solutions de production de contenu déjà adaptées aux besoins des métavers. C'est le cas des « studios LED » qui permettent l'intégration directe des effets visuels numériques sur le plateau, pendant le tournage; des studios multicaméra de capture volumétrique; et des studios de capture de mouvement (mocap) de haute précision (corps, visages et mains). Le créneau des studios de production d'art immersif est une opportunité dont la France peut s'emparer, d'autant plus que Google et Facebook ont abandonné le terrain en fermant leurs propres studios Oculus Story Studio (2014-2017) et Google Spotlight Stories (2016-2020). Les entreprises du groupe « French Immersive Studios » ont pris une place de premier plan sur ce créneau qui leur ouvre de belles perspectives de croissance.

Soutenir la production et la diffusion d'œuvres ambitieuses. Un rapprochement au sein d'un même écosystème des acteurs de la « French Tech » et de la « French Touch » (respectivement mouvement français des startups, et mouvement pour accompagner l'expansion économique des industries culturelles et créatives) pourrait faire naître les conditions de partenariat et de production de contenus de haute qualité. Par ailleurs, une des promesses des métavers consiste à démocratiser la réalité étendue en la rendant accessible en ligne. Sans préjuger de la forme qu'il faudrait lui donner, il nous paraît important de disposer d'une chaîne de diffusion ouverte et pérenne, permettant de maximiser l'accessibilité et la durabilité des œuvres créées. Dans une démarche de service public, il pourrait utilement être intégré dans le réseau des médiathèques sur le territoire français, dans le réseau de l'Institut français à l'étranger, et faire l'objet d'un consortium public/privé. Cette démarche de métavers culturel pourrait servir de « hub » aux différents projets menés sectoriellement et de vitrine aux œuvres créées à l'occasion des différents festivals et manifestations ponctuelles. En utilisant les standards existants du « web immersif » (WebXR, WebGL, WebGPU, WebAssembly), il donnerait accès aux œuvres sur tous les matériels, avec ou sans casque, et pourrait servir de cas d'usage pour contribuer aux standards futurs qui concernent les formats de données et leur protection contre la copie, le vol et la contrefaçon, ainsi que les modes d'accès, de partage, de monétisation et de protection des droits d'auteurs.

Rassembler l'écosystème français. Nous faisons le constat que l'écosystème français est complexe, et formé de très nombreuses structures et associations dont les missions se recouvrent et se confondent, ce qui contribue à une certaine confusion. Citons les associations d'informatique graphique (AFIG), de réalité mixte (AFXR), du jeu vidéo (AFJV), d'intelligence artificielle (AFIA), le réseau des arts hybrides et cultures numériques (HAC-NUM), le Conseil national de la réalité mixte (CNXR), le réseau des producteur/productrices d'expériences numériques (PXN), l'association France Immersive Learning, le groupement French Immersive Studios, la transversale des réseaux art et sciences (TRAS), etc. Pour mieux coordonner cet écosystème complexe, il pourrait être utile de créer des consortiums public-privé sur des thématiques verticales, répondant à une commande publique ciblée et répondant à des besoins de service public. Des initiatives verticales et ciblées de ce type pourraient être plus souples et structurantes que le soutien horizontal des différentes filières et de leurs « silos »

technologiques. Les thématiques pourraient être choisies par exemple dans le sport, ou le patrimoine :

- **Lancer une initiative consortium dans la perspective des JO 2024.** Pour donner un coup d'accélérateur, les JO 2024 pourraient faire l'objet d'une expérimentation en vraie grandeur en exploitant des technologies bien maîtrisées par les acteurs français (scan 3D, photogrammétrie, animation de foule, capture de mouvements, vidéo volumétrique, tracking temps réel). Un consortium public-privé pourrait être mis en place sous le pilotage d'Inria, afin de proposer des actions de grande visibilité sur trois axes : 1) entraînement/compétitions, 2) transport/tourisme, 3) coulisses/échanges avec les athlètes, pouvant être décliné avant, pendant et après les jeux olympiques et paralympiques. Cette expérimentation en vraie grandeur permettrait de travailler sur un grand nombre de données, que ce soit en termes de production ou de transfert. Ces données sont protéiformes : géographiques, géométriques, physiologiques, images/vidéos, personnelles. Concernant les lieux, l'IGN peut donner accès aux données géographiques, et Dassault Systèmes fait de très bonnes modélisations multiéchelles de villes. Concernant les personnes, plusieurs équipes Inria sont déjà actives dans le cadre du Défi Inria « Avatar ». Dans le domaine du sport, de multiples capteurs sont utilisés de façon de plus en plus généralisée pour capter des gestes ou des signaux physiologiques produisant des masses de données gigantesques : mouvements, état physiologique (regard, rythme cardiaque, respiration, réponse électrodermale, etc.), état affectif (émotions), état cognitif (attention visuelle, fatigue, charge cognitive, etc.), actions, préférences. Cela soulève de nombreuses questions, non seulement liées à la taille et l'hétérogénéité des données, mais aussi à la sécurité et à l'éthique. Cette thématique du sport permettrait donc d'aborder un grand nombre de problématiques importantes pour les développements futurs des métavers.
- **Valoriser le patrimoine français.** Dans le domaine du patrimoine, les métavers pourraient par exemple servir de « machine à remonter le temps » pour permettre aux internautes de revivre des époques différentes dans un même espace 3D virtuel partagé. On pourrait ainsi passer du règne de Louis XIV à la Révolution française dans un Versailles virtuel accessible à tous. La mise en œuvre de tels métavers nécessite de résoudre des problèmes intéressants et difficiles, comme la reconstitution à rebours des changements architecturaux et urbains au cours du temps, et la restauration virtuelle des costumes, des coutumes et des modes. Deux sociétés françaises, Ubisoft et Iconem, ont également travaillé sur la reconstitution de monuments historiques dévastés par la guerre, en partenariat avec l'Unesco et l'Institut du Monde arabe. Ce projet, intitulé « Cités Millénaires : Voyages Virtuels de Palmyre à Mossoul » est une illustration convaincante d'un partenariat entre deux entreprises françaises et deux institutions culturelles, utilisant la réalité virtuelle afin de préserver mémoire et patrimoine. En ce qui concerne la réalité augmentée, le travail important de numérisation et de mise à disposition des données géographiques françaises réalisé par l'IGN peut ouvrir la porte à de nombreuses applications pour valoriser et faire vivre le patrimoine français.

La montée en puissance des acteurs publics pour protéger en amont leur patrimoine informationnel. Quelle que soit leur rapidité à se projeter dans ces transformations, les institutions, organisations, et acteurs publics devront en tout état de cause prendre des mesures préventives pour protéger leurs patrimoines informationnels. Parmi les mesures préconisées, notons notamment les suivantes qui devront être complétées et partagées auprès des acteurs concernés :

- Effectuer de nouveaux dépôts de marques en étendant les libellés existants afin de protéger les biens numériques dans les métavers, mais aussi réfléchir à la pertinence de déposer des marques tridimensionnelles.
- Mettre en place des outils permettant de détecter les actes illicites sur les plateformes et de solliciter via des plaintes la suppression des offres de contrefaçons ou autres violations de marques.
- Acquérir les noms de domaine pertinents disponibles sur la blockchain (par exemple, avec les nouvelles extensions « .crypto » et « .eth »), sachant que ces noms ne peuvent faire l'objet d'une procédure de récupération comme celle de l'ICANN pour les noms de domaine.
- Insérer l'usage spécifique d'une œuvre dans les métavers dans les contrats/clauses de cession de droits, conformément à l'article L. 131-3 du CPI qui impose la cession exprès des droits d'auteur par écrit et leur délimitation dans l'étendue, la destination et la durée. Ainsi, la tokenisation d'une œuvre, qui permet d'inscrire sur un jeton un actif via un smart contract inscrit sur la blockchain, apparaît comme une nouvelle destination de celle-ci.
- Examiner et modifier si besoin les licences existantes afin qu'elles soient assez flexibles pour « fonctionner » dans les métavers, ou développer de nouveaux modèles de licence de contenus adaptés aux droits précédemment concédés ou acquis en s'assurant, en cas de création d'une expérience virtuelle sur une plateforme, que la licence obtenue d'un titulaire de droit d'auteur couvre l'étendue des droits, des garanties et indemnités, la durée, le territoire, l'exclusivité, les sous-licences, les taux de redevance, etc. Parmi les ajustements à recommander pour assurer une meilleure sécurité contractuelle, la notion de « monde virtuel » devra être considérée, au-delà du « monde entier ». De même, et le sujet est sensible, il conviendra de clarifier la validité et la propriété de contenus générés par un avatar.
- Éduquer sur les enjeux de gouvernance (organisation et sécurité) et les impacts juridiques des métavers sera nécessaire au sein des organisations mais aussi auprès des futurs acteurs de cet écosystème. Les écoles et notamment celles qui sont « dédiées » — telles les premières initiatives menées par le Metaverse College ou la NFT Factory — devraient proposer des sessions de formation sur ces sujets.

La formation et la recherche au soutien des enjeux de souverainetés

Rapprocher la recherche publique et la création artistique. Il existe en France plusieurs lieux culturels comme la Gaîté lyrique à Paris, le Cube à Issy-les-Moulineaux, le Centre des Arts à Enghien-les-Bains, le Fresnoy à Tourcoing, qui sont actifs et reconnus dans les arts immersifs, mais aucun n'est associé à la recherche publique. À l'inverse, les centres de recherche publique en technologies immersives et réalité virtuelle (Immersia à Rennes, CRVM à Marseille, CERV à Brest, Institut Image de Chalon-sur-Saône) sont peu accessibles aux artistes et institutions culturelles. Pour rapprocher la recherche publique et la création artistique dans ce domaine, il pourrait être utile de créer en France un « institut de recherche et coordination » dédiée aux arts et technologies immersives, et qui serait à la fois un laboratoire de recherche en informatique dédié aux arts immersifs, et un lieu de coordination entre les chercheurs et les artistes. On peut s'inspirer pour cela du modèle de l'Ircam, qui est à la fois un laboratoire de recherche en informatique dédié au développement de la musique électronique, et un lieu de coordination entre les chercheurs et les artistes (musiciens et compositeurs). On peut s'inspirer également d'autres exemples à l'étranger, dont les plus connus sont le Media Lab au MIT, le Future Reality Lab à NYU, l'Entertainment Technology Center à l'Université Carnegie-Mellon, l'Institute for Creative Technology à l'Université de Californie du Sud, l'Expertise Centre for Creative Technology à l'Université d'Utrecht. Au fil des années, ces instituts ont joué un rôle majeur dans le développement des technologies immersives, en rapprochant les artistes et les scientifiques autour de projets communs. Nous pouvons également encourager les liens entre artistes créateurs et laboratoires de recherche au travers de résidences dans les centres de recherche. Ce serait un accélérateur pour l'évolution des connaissances, des modes de création, des productions et diffusion de contenus sur les métavers.

Les formations Art Sciences trop rares, voire inexistantes en France. Ces formations devraient être encouragées dans un mode applicatif et concret afin de favoriser le dialogue et les synergies entre scientifiques et créateurs. Le niveau des formations, souvent élevé, devrait se décliner sur les grandes échelles européennes, dont le niveau de la licence souvent ignorée sur ce point. Il est en effet urgent d'intégrer des étudiants de tous niveaux sur ces questions. Les écoles telles que Rubika (animation 3D, jeu vidéo) sont reconnues internationalement. Deux filières forment aux animations 3D et à l'image de synthèse, d'une part, à la programmation des scripts d'interaction, au game design, et éléments de structuration du jeu vidéo d'autre part. Ces filières devraient être renforcées et complétées. Les formations permettant de créer des contenus de qualité (modélisation 3D, infographie, animation, postproduction, effets, développement des interactions en réalité virtuelle, bon niveau des écoles d'ingénieur, écoles de jeu vidéo et universités pour la programmation dans le domaine du jeu) sont des éléments importants à prendre en compte dans les forces de la France, souvent considérée comme acteur majeur des expressions numériques culturelles, dans le marché de la création.

La formation initiale et continue doit anticiper les besoins du secteur. L'annonce d'investissements massifs dans le métavers s'accompagne de création d'emplois à court terme, faisant appel à des qualifications où les tensions en matière de recrutement sont

déjà très fortes (*data scientist* ou ingénieur en intelligence artificielle par exemple). La France dispose d'écoles d'ingénieur et de création numérique dont l'excellence est reconnue mondialement. Les programmes pédagogiques doivent pouvoir s'adapter à ces nouveaux besoins, et assurer une meilleure intégration entre les enjeux techniques et créatifs.

Renforcer l'enseignement de la programmation, que ce soit dans l'enseignement général, aussi bien pour les formations scientifiques que les formations artistiques et dans l'enseignement supérieur. À cet égard, il n'est pas suffisant de former nos élèves et étudiants à utiliser les logiciels existants, il faut également leur apprendre à les programmer. Dans le contexte des métavers, la programmation de jeux vidéo peut servir de point d'entrée. Plusieurs sites (threejs.org, aframe.io, www.shadertoy.com, www.babylonjs.com,) et moteurs de jeu (www.alice.org, www.panda3d.org) accessibles aux plus jeunes, permettent de s'initier à la programmation 3D temps réel et de construire des mondes virtuels en ligne. Dans l'enseignement supérieur, il serait judicieux d'aller plus loin encore et de généraliser les enseignements permettant d'aborder non seulement la programmation des jeux vidéo, mais la programmation des moteurs de jeux eux-mêmes.

Continuer à encourager la formation au plus haut niveau de *Software Engineers* et de *Computer Scientists* dans les écoles publiques et privées françaises. C'est la garantie pour notre pays de disposer des génies potentiels qui pourront créer les entreprises de demain. Les moteurs de jeux actuels sont des logiciels de grande complexité, et leur maîtrise nécessitent des connaissances pointues en génie logiciel, programmation temps réel, parallélisme, géométrie algorithmique, interface humain-machine et IA. Ces sujets doivent être plus largement enseignés dans les universités et grandes écoles françaises.

Les masters scientifiques et formations d'ingénieurs en informatique permettent des spécialisations sur le traitement d'image, la vision par ordinateur, et parfois la synthèse d'image, rarement la réalité virtuelle ou augmentée. Il apparaît donc un manque dans les centres :

- accès et formation aux stations graphique 3D, et aux logiciels moteurs 3D,
- accès et formation aux interfaces de réalité virtuelle et réalité augmentée,
- encadrement technique afin d'interfacer les contenus 3D et les capteurs, systèmes d'affichage
- former les enseignants pour augmenter le nombre d'étudiants formés à ces questions.

Renforcer la recherche publique en réalité virtuelle et augmentée. Comme le souligne le professeur Philippe Fuchs, la réalité virtuelle est une science qui dépasse les limites traditionnelles de l'informatique, et doit nécessairement intégrer d'autres disciplines, dont l'optique, l'acoustique, la mécanique, la psychologie et les sciences cognitives et comportementales. Intégrer ces disciplines est difficile, car il faut atteindre une taille critique, qui permet à chaque discipline de disposer des ressources nécessaires à son exercice, tout en contribuant à des expérimentations communes. Le campus de Rennes

est exemplaire à cet égard. Les informaticiens de l'université, du CNRS et d'Inria se sont alliés avec les biomécaniciens, les médecins et les neuroscientifiques pour mener des recherches de premier plan autour des applications de la réalité virtuelle dans les domaines du sport et de la médecine. D'autres campus de réalité virtuelle pourraient être construits sur le même modèle autour de thématiques différentes, comme le jeu vidéo, le spectacle vivant, le patrimoine, la formation, etc. Chaque thématique suscitera des directions de recherche spécifiques, et contribuera à faire avancer l'état de l'art notamment dans les domaines de la simulation et des interactions avec les mondes virtuels.

Doubler le nombre de doctorants en réalité mixte. Il paraît important de former plus de doctorants dans le domaine de la réalité virtuelle et augmentée au sens large, notamment en lien avec l'IA. On peut imaginer pour cela des dispositifs de chaires industrielles, qui disposeraient de budgets pluriannuels permettant d'attribuer des allocations doctorales réservées à ces sujets. Plusieurs chaires de ce type ont été créées avec succès par Ubisoft au Québec dans le domaine de l'IA et de ses applications au jeu vidéo (génération procédurale de terrains, animation de personnages en temps réel, personnages non joueurs).

Programmes et Équipements Prioritaires de Recherche. À notre connaissance, il n'existe pas de PEPR dédié aux métavers. Plusieurs projets de PEPR sont en gestation sur (1) le cloud et (2) les environnements numériques collaboratifs et (3) les industries créatives et culturelles. Ils doivent être encouragés et soutenus. Il pourrait également être judicieux d'étudier l'opportunité d'engager à terme un PEPR entièrement dédié à la constitution d'un métavers de la recherche et de l'enseignement supérieur, qui permettrait le déploiement expérimental d'une infrastructure de partage entre les universités et le développement d'outils intuitifs pour la création de mondes virtuels dans et pour ce métavers par les chercheurs de toutes disciplines.

Réconcilier recherche et innovation. Les différents enjeux technologiques du Métavers nécessitent une étroite concertation entre la recherche publique, d'une part, et les entreprises et institutions culturelles, d'autre part. Cette concertation peut être organisée à l'échelle locale, autour de campus régionaux centrés sur des thématiques spécialisées, comme nous l'avons mentionné plus haut. Il semblerait utile de prévoir également un « métacampus » à l'échelle nationale, capable d'aborder également ces enjeux dans leur portée générale et stratégique. À l'image de ce qui a été fait récemment sur la cybersécurité, on pourrait ainsi imaginer de structurer l'action publique sur le métavers autour de plusieurs instruments :

- Un « métacampus » à Paris où seraient représentés les chercheurs de toutes les disciplines concernées, y compris en sciences sociale et esthétique; et également toutes les industries concernées, y compris celles de la création et de la culture. Il regrouperait toutes les forces en présence — culture, industrie, recherche — dans tous les domaines, et servirait à fédérer les nombreuses associations. Il pourrait inclure un volet recherche et création avec un institut de type Ircam, ouvert au public, mais

sans « personnalité morale » *a priori*, et qui pourrait prendre la forme d'un consortium fédérant les acteurs existants des arts et des sciences de l'immersion et du web.

- Des répliques régionales dans plusieurs universités. Nous avons déjà mentionné le campus de Rennes, qui dispose d'un rayonnement important sur les applications sportives et médicales de la réalité virtuelle. D'autres campus universitaires pourraient renforcer leurs activités autour des technologies immersives avec à chaque fois une thématique spécifique et des formations de haut niveau.
- Un PEPR qui organise la recherche sur le métavers, avec des volets applicatifs dédiés aux arts de l'espace (danse, théâtre, opéra, architecture), aux sciences de la nature (physique, biologie, écologie), et aux humanités (histoire, géographie). Ce PEPR doit regrouper toutes les recherches technologiques nécessaires sur les réseaux, les interactions 3D, les logiciels de création, les formats, la programmation temps réel, ainsi que toutes les recherches en sciences cognitives, en économie et en droit, qui doivent nécessairement les accompagner.
- Un programme de transfert de la recherche publique en direction des startups et des entreprises d'une part, et de l'ensemble du secteur culturel d'autre part. Il ne s'agit pas seulement des transferts de technologie mais surtout des transferts de pratiques et de connaissances en direction de tous les secteurs économiques concernés.

II. Analyser la chaîne de valeur des métavers

Si Google, en tant qu'architecte de l'information, est parvenu à devenir la clé d'entrée du web de première génération vers les connaissances écrites, et YouTube/Netflix/Facebook vers les flux photo/vidéo du web social, nous entrons désormais dans une ère où les acteurs vont tenter de prendre une place de choix pour capter les audiences du web immersif. Au cœur de cette bataille pour cette nouvelle génération de l'économie de l'attention où le contenu guidera les audiences, la modernisation des outils et infrastructures vers la 3D et le temps réel deviendra le véritable enjeu stratégique des acteurs industriels. Aujourd'hui, n'importe qui peut créer une vidéo et la poster sur TikTok, dans quelques années cela pourrait s'avérer être le cas pour les contenus 3D et les mondes virtuels. Comment consolider et protéger les filières françaises industrielles de la modélisation 3D, de l'animation 3D et du jeu vidéo, ou encore de la réalité virtuelle ? Comment investir dans les startups, protéger les fleurons, préserver les leaders, passer des commandes publiques, et éviter la fuite des cerveaux ? Tels sont les enjeux pour notre pays. Afin de prioriser les investissements de demain, il est nécessaire de réaliser au plus vite une étude de la chaîne de valeur des métavers. Cette mission exploratoire en pose les premiers jalons qui devront être largement approfondis par la suite.

Dans quelles briques technologiques investir ?

Développer une analyse poussée de la chaîne de valeur du Métavers. Afin de guider au mieux d'une part les domaines d'investissement stratégiques, et d'autre part les risques de perte de souveraineté ou de fuite de valeur, en vue du développement d'une stratégie nationale des métavers, une cartographie exhaustive des différentes briques technologiques de ces métavers ainsi que des différents acteurs positionnés dans cet écosystème semble indispensable. Ce travail de fond devra être mené pour flécher les besoins de financement et de soutien les plus stratégiques. Plutôt que de se concentrer à faire émerger le « Google européen du métavers », il semble stratégique de protéger, soutenir et encourager les acteurs en pointe sur des briques technologiques peut-être plus modestes mais essentielles à la constitution des métavers de demain. Une stratégie économique du Métavers viendra ici consolider et protéger les filières industrielles de la réalité virtuelle, de la modélisation 3D, de l'animation 3D et du jeu vidéo, éviter autant que possible la fuite des cerveaux, investir dans les startups, protéger les fleurons, écouter et engager les leaders. Sur tous ces sujets, la commande publique peut être un levier essentiel, comme nous l'avons souligné plus haut.

Les limites des représentations actuelles des briques technologiques des métavers. La plupart des études actuelles sur les métavers reprennent souvent le même schéma des « stacks » ou « layers » du Métavers. Cette représentation des couches et briques technologiques constitutives est loin d'être neutre, et présente un réel risque normatif. En ne séparant pas ce qui relève d'éléments essentiels de ce qui constitue une modalité, ces schémas prescriptifs sont en réalité peu représentatifs des différents horizons possibles des métavers. Il est souhaitable de résister au copier-coller des billets de blogs des capital-risqueurs américains : ces schémas sont pourtant populaires et reproduits dans de nombreuses études indépendantes. À titre d'exemple, la représentation de Jon

Radoff de la chaîne de valeur présente une vision à la fois étroite des possibilités du Métavers, tout en restant à un niveau de généralité qui ne permet pas une compréhension des arbitrages propres aux technologies immersives. Les sept « couches » décrites par l'entrepreneur américain restent générales et applicables à un vaste ensemble de projets numériques (« infrastructure », « interface », « découverte », « expérience ») : elles ne reflètent ni la spécificité ni la pluralité des briques technologiques de l'immersion. Bref, si la représentation des briques technologiques du Métavers est un projet clé dans l'établissement d'une stratégie visant à protéger et promouvoir une approche souveraine, il est urgent d'investir dans une recherche rigoureuse et académique et de résister aux schémas simplistes (pourtant très populaires).

Soutenir les acteurs proposant des briques essentielles. De nombreuses entreprises françaises ont su démontrer qu'elles avaient une véritable proposition de valeur. Ainsi, plusieurs « briques de base » ont fait l'objet de rachat par d'importants groupes américains ces dernières années. C'est le cas du logiciel d'optimisation de données 3D Pixyz ou encore de la solution de streaming de contenus 3D Furioos par Unity ; du spécialiste du suivi des mouvements des mains et de la reconnaissance gestuelle Clay AIR par Qualcomm ; de la plateforme de partage et vente de modèles 3D Sketchfab par Epic ; Allgorithmic, un champion de montages 3D concurrent d'Unreal, par Adobe ; et plus récemment de NextMind, une startup française spécialisée dans les interfaces entre le cerveau et les ordinateurs, par Snapchat. Ces entreprises ont souvent dû faire preuve d'une résilience particulière pour en arriver là, avec peu d'accompagnement ou un manque d'aide de l'écosystème. Il est important d'apprendre de ces exemples passés pour soutenir davantage les acteurs de demain. L'enjeu réside à la fois dans l'identification de ces acteurs ainsi que dans la capacité à leur proposer un soutien adéquat. En ce sens, de nombreux interlocuteurs rencontrés au cours de la mission évoquent les difficultés pour entreprendre de manière fluide dans ces domaines. Un premier exemple concerne la nécessité de simplifier les aspects administratifs dans la création d'une entreprise et dans les candidatures aux appels d'offres, afin de se concentrer davantage sur leurs développements technologiques. Des suggestions de créations d'incubateurs développés par l'État pour simplifier ces processus et soutenir ces startups lors de leurs premiers mois ont été relevées. Plusieurs entretiens ont fait ressortir la grande difficulté de lever des fonds en Europe pour « *créer des métavers européens, car les fonds ne sont pas prêts à prendre ces risques, contrairement aux US* ». Ces entretiens soulignent la nécessité de soutenir en priorité les acteurs sur leurs propositions de valeur (les briques technologiques qu'ils développent) plutôt que sur leur communication. Les témoignages font également ressortir la nécessité d'augmenter la commande publique plutôt que de proposer davantage de subventions (« *il faudrait plus de marchés publics en France et en Europe. Il faudrait plus de commandes et ne pas vivre uniquement sur les subventions. Dans les studios de création, la plupart vivent des subventions. Il faudrait avoir de véritables commandes* » ou encore « *Si les financements de France 2030 ne sont pas utilisés pour les métavers, on n'avancera pas.* »). Les entrepreneurs, en particulier les plus chevronnés ayant déjà revendu leurs startups à des grands groupes américains du secteur, souhaitent une plus grande flexibilité dans les systèmes d'aide (« *Le système d'aides : il y en a plein, je connais le crédit d'impôt recherche, c'est bien mais c'est trop lourd pour les entreprises. On se fait auditer dans tous les sens, de manière disproportionnée et inefficace au vu de nos ressources humaines* »).

internes, ça nous fait perdre du temps. »). Au détriment du développement technologique et du travail de fond, ils font ressortir le manque de clarté et de structures d'accompagnement pour simplifier les processus administratifs (« je suis ingénieur mais j'ai passé du temps à faire des trucs administratifs. On n'a aucun échéancier clair des taxes et impôts à payer. »). À titre d'illustration, le crédit d'impôt recherche a pu être montré du doigt (« j'ai eu dans ce parcours-là un manque d'experts et d'interlocuteurs pour comprendre le fond de ce qu'on faisait. On est tombés dans la bureaucratie pure. Les auditeurs ne comprenaient rien donc ils demandaient encore plus de papiers pour justifier. »). Il y a enfin une différence de culture et de perception assez marquée entre les continents (« en Europe on est vu comme du gadget, alors que lorsqu'on discute avec des groupes américains ou asiatiques, ils nous voient comme des héros »). Des leviers d'actions pour susciter les investissements privés pourraient compléter les commandes publiques. La filière française bénéficie de nombreux atouts favorables au développement d'un écosystème riche et dynamique (« Il faut que les startups et grands groupes coopèrent plus pour arriver à des masses critiques et des filières d'excellence »). L'État doit envoyer un message de confiance aux entrepreneurs et aux investisseurs à travers l'élaboration d'une politique publique de soutien au secteur, dont France 2030 et l'organisation de la commande publique devront être les éléments centraux.

Des choix stratégiques à réaliser à court et moyen terme. Les différents acteurs auditionnés ont fait part de leur préoccupation quant à la stratégie à venir de l'État en matière de financement des technologies immersives, et des priorités qui y seront données. Anticiper l'émergence des métavers est indispensable pour lancer une stratégie dédiée aux technologies immersives et aux briques constitutives du Métavers, notamment par l'intermédiaire de France 2030, afin que ces transformations ne se réalisent pas sans acteur européen. Plusieurs arbitrages stratégiques à court et moyen terme se dessinent. Les sujets sont souvent évoqués sous forme de questions, davantage que de réponses catégoriques. Sur la plupart, les avis sont partagés. Parmi les questions clés, on note notamment : faut-il créer ou non des moteurs de jeux concurrents à ceux de Unity et Unreal Engine ? Faudrait-il travailler avec des entreprises comme Ubisoft pour rendre certains de ces moteurs de jeu ouverts en open source ? Faudrait-il investir massivement dans un constructeur de casques, comme les casques à réalité mixte proposés par Lynx, un des rares acteurs européens sur le sujet et qui intègre son propre OS ? Comment éviter de dépendre des OS des casques développés par les acteurs américains (avec les risques associés que ces casques soient vendus à perte, comme en témoigne une enquête en cours de la FTC) ? Devrait-on créer un opérateur européen de réalité mixte ou plutôt investir dans des briques technologiques en devenir quitte à ce qu'elles soient rachetées par la suite par des acteurs non européens ? Faut-il investir dans le hardware et les infrastructures ou davantage se concentrer sur les couches de création et servicielles ? Quelle place pour l'open source (avec les logiciels de modélisation et animation comme Blender, ou les moteurs de jeu comme Godot) ? Comment anticiper les conséquences d'un « splinternet » avec des pays comme la Russie qui créent leurs propres points d'entrée ? Faudrait-il créer un « Dailymotion du métavers » ou au contraire éviter d'enfermer la distribution dans un format particulier ? Comment assurer la diffusion des expériences immersives via des standards ouverts ? Faudrait-il établir des règles de rémunération pour les développeurs de contenus et/ou services,

indépendants de l'App Store qui les diffuse? Ces questions apparaissent dans les entretiens conduits par la mission exploratoire, et dans nos travaux préparatoires : la mission n'a pas vocation à les trancher, mais plutôt à les faire ressortir, ainsi qu'à souligner la présence d'un écosystème déjà informé et vertueux en France devant être mobilisé pour pouvoir y répondre.

Mieux coordonner les investissements. Les modes de financement compétitifs sur projets ont tendance à favoriser les consortiums de circonstance et la fracturation des forces en présence. Ils créent une compétition artificielle qui décourage certains acteurs et ils rendent difficile la nécessaire coordination entre la recherche académique, les entreprises et les institutions culturelles, qui répondent à des appels différents et sur des calendriers différents, parfois incompatibles ou contradictoires. Dans le cas des métavers, il serait judicieux de mieux coordonner ces différents appels, pour faciliter les collaborations entre chercheurs de toutes les disciplines et industriels de tous les secteurs sur des objets communs. Il faut également faciliter l'accès aux thèses CIFRE pour les petites structures, les startups et les institutions culturelles, qui en bénéficient moins que les grandes entreprises privées et les multinationales. En ce qui concerne les collaborations art et sciences, elles sont trop souvent considérées comme des « commandes » passées par les institutions culturelles « clientes » aux organismes de recherche publics et privés « fournisseurs ». Il serait vertueux de faire évoluer ces perceptions pour envisager de véritables partenariats où les différents acteurs mènent ensemble des actions de recherche et d'innovation sur un objet commun avec un financement commun. En particulier, les attelages hybrides entre structures françaises technologiques et institutions culturelles pourraient permettre de dépasser la dichotomie qui oppose parfois la nécessité de choisir entre investissements technologiques et culturels dans les mondes immersifs. Ces attelages hybrides (soutenus par la commande publique, et qui seraient prétexte à mieux réunir l'écosystème français des métavers dans la totalité) pourraient permettre de réconcilier ambitions de souveraineté technologique et de souveraineté culturelle.

Cartographie des métavers et des acteurs

Affiner la compréhension de l'écosystème français. Une cartographie exhaustive à date paraît difficile à réaliser dans le cadre des délais serrés de cette mission exploratoire. Afin de commencer à représenter certaines typologies d'acteurs de l'écosystème français, le schéma illustratif suivant regroupe quelques entreprises françaises selon quatre catégories importantes de la chaîne de valeur du métavers :

- **Contenus et expériences :** studios de création immersive, éditeurs de jeux, mondes virtuels et protométavers.
- **Plateformes :** plateformes de diffusion, outils de création, moteurs de jeu, logiciels de support et de création.
- **Infrastructures et hardware :** cloud, visiocasques, casques audio, installations et contrôleurs de réalité virtuelle.
- **Facilitateurs :** solutions de gestion des identités, de sécurisation, de tokénisation, stockage décentralisé.



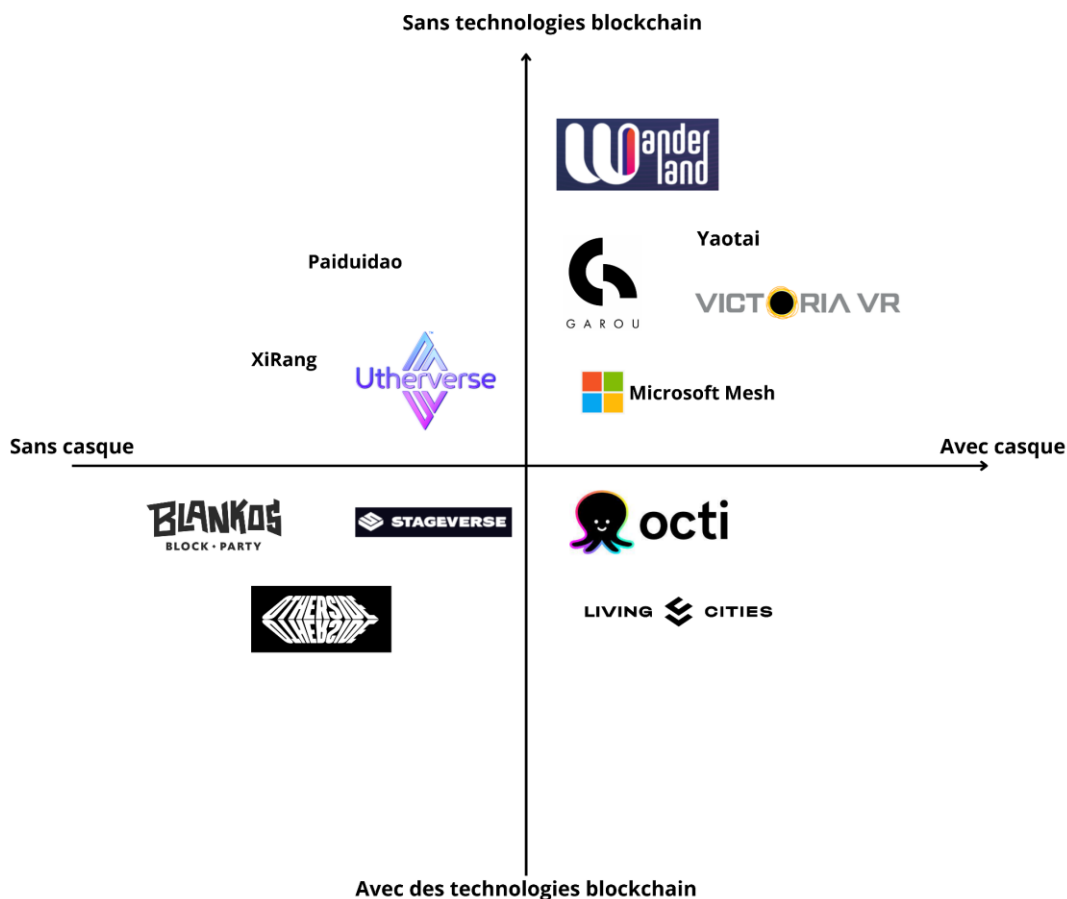
L'écosystème français est riche d'acteurs sur la majorité de la chaîne de valeur. De l'incontournable Ubisoft, dans le développement, l'édition et la distribution de jeux vidéo, à Kinetix, plateforme qui permet la création d'animations en 3D en utilisant la capture des mouvements sans capteur et sans matériel professionnel, en passant par Atlas V, studio de création de contenus immersif pionnier de l'informatique spatialisée en France (avec des créations des programmes immersifs notamment pour la Grotte Chauvet, Le Mobilier national, La Gaîté lyrique, Arte), notre pays bénéficie de nombreuses ressources et talents dans la création de contenus et d'univers 3D. Dans le domaine de l'industrie, Dassault Systèmes est même leader mondial avec sa plateforme 3DExperience qui présente des attributs d'un métavers souverain, du logiciel (CATIA) au cloud (Outscale). Concernant l'identification, l'authentification et la sécurité des transactions au sein des métavers, la filière française de la carte à puces a donné naissance à un acteur clé, Ledger. Les enjeux d'identité numérique et de sécurité informatique seront décisifs et la France doit soutenir les initiatives en la matière. D'autres actions sont à saluer, comme le programme Lidar HD de l'Institut national de l'information géographique et forestière (IGN). Proposant «*la description 3D la plus fine jamais établie à l'échelle de la France entière*», l'objectif de ce programme est de répondre aux besoins d'observations et d'analyse spatiale dans de nombreux domaines de l'action publique (prévention des risques, observation de la ressource forestière, aménagement du territoire...) pour ensuite proposer de futurs services. Toutes les ressources sont diffusées librement et gratuitement en open source.

Suivre les tendances de développement de métavers à l'international. Afin d'innover, il convient également de suivre avec précision les tendances internationales. À cet égard, plusieurs grandes plateformes américaines et asiatiques (Zepeto en Corée du Sud, Yaotai en Chine) ont déjà lancé des projets d'envergure, soutenus par des investissements importants. Il est intéressant de constater la variété des types de projets. Ceux axés sur

une approche B2C de métavers grand public à des fins de divertissement, comme Horizon Worlds de Meta. À l'inverse, d'autres ont une approche B2B, beaucoup plus axée sur l'industrie, comme Omniverse de Nvidia. Avec son appareil holographique autonome HoloLens, Microsoft cherche de son côté à conquérir des parts de marché dans le secteur professionnel. Les principaux débouchés affichés par le groupe sont : l'utilisation de jumeaux numériques et de la visualisation 3D par les professionnels du domaine de la santé, l'ingénierie et de la construction et de la production industrielle, pour des cas d'usage bien précis avec HoloLens; l'utilisation d'outils immersifs de visioconférence en 3D avec la solution Mesh for Teams; la mise à disposition d'outils permettant de créer des univers virtuels pour les entreprises (Microsoft Azure).

L'écosystème international est divers, si bien que sa représentation ne peut être exhaustive. Le nombre d'utilisateurs varie substantiellement, entre des jeux comme Fortnite et Roblox qui comptent respectivement 270 millions et 150 millions d'utilisateurs, et des mondes virtuels comme Sandbox qui — bien que valorisé à un montant supérieur à Ubisoft — ne compte à l'heure de ce rapport que 300 000 utilisateurs. Une cartographie (en Annexe 1 du rapport) s'attache à mettre en valeur les métavers actuels et ceux en cours de construction. Elle a l'objectif de faire la lumière sur la diversité des métavers et leurs caractéristiques propres : l'utilisation des technologies de registres distribués, leur accès via un visiocasque ou non, le public cible (professionnels ou grand public).

En parallèle, de nombreux projets sont en cours de développement. On peut citer des plateformes de création d'univers virtuels partagés en temps réel hyperréalistes comme Garou en France, ou Paidu Dao soutenue par ByteDance en Chine. En 2022, la société Yuga Labs a fait couler beaucoup d'encre avec une importante levée de fonds à plus de 300 millions d'euros pour le lancement de son univers virtuel Otherside basé sur la blockchain. D'autres outils, comme le réseau social français en réalité augmentée Wanderland, ou le service de conférence en réalité augmentée pour les professionnels Mesh de Microsoft sont en construction. En avril 2022, Epic Games a quant à lui annoncé un financement de 2 milliards de dollars, afin de développer un métavers en partenariat avec Sony et Kirkbi, société mère du groupe Lego.



Légende : typologie de métavers en cours de développement

Les métavers font également l'objet de nombreuses politiques publiques. Sans toutes les énumérer, on peut néanmoins citer l'exemple de la Corée du Sud où le Métavers est inscrit parmi les grandes priorités d'investissement du plan de relance économique post-COVID. Dans ce contexte, une prévision d'investissement de deux milliards d'euros a ainsi été fixée dans les entreprises sud-coréennes du Métavers à l'horizon 2025. En sus du plan de relance économique, le gouvernement coréen a dévoilé fin janvier 2022 un « plan stratégique pour les nouvelles industries du Métavers », doté d'une enveloppe publique de 400 millions d'euros pour l'année 2022. L'objectif de ce plan est de faire de la Corée du Sud l'un des cinq premiers marchés du Métavers au monde et de créer 220 entreprises de plus de 4 milliards d'euros de chiffre d'affaires dans le secteur d'ici 2026. Dix secteurs sont en particulier visés (Life, Tourisme, Culture/Art, Éducation, Médecine, Media, Créativité, Production, Travail, Government). Le soutien à la création d'entreprises spécialisées dans le Métavers se fera en particulier au travers du « Metavers Hub », situé à Pangyo, et ouvert en mai 2021. À noter également, le déploiement d'un « jumeau virtuel » du territoire entier du pays annoncé pour 2024, avec pour objectif l'amélioration des services administratifs à travers les technologies du métavers. Au niveau national, un budget de 156 milliards de dollars a été réparti entre sept ministères pour l'année 2022. Le gouvernement coréen évoque ainsi la gestion d'un « centre d'innovation sociale du métavers » pour développer des services sociaux dans cinq piliers (engagement citoyen sur les requêtes civiles, santé et traitement numérique, environnement de travail sûr et

sécurité, gestion des catastrophes et décarbonation, résolution de la fracture numérique, offre de formations aux personnes défavorisées du numérique pour une société inclusive, renforcer l'éthique digitale pour prévenir la cyberintimidation dans les métavers). Au niveau local, les villes de Séoul et Jeonju semblent sur le point de finaliser leur propre jumeau virtuel en 3D pour proposer prochainement des services de simulation sur la gestion des infrastructures urbaines et des phénomènes climatiques éventuels. En novembre 2021, le gouvernement municipal de Séoul a annoncé sa volonté de construire une plateforme métavers d'ici 2023, nommée «Metaverse 120 Center», qui sera un centre virtuel de services publics à destination des Coréens. Le gouvernement a par ailleurs annoncé la création d'une «Metaverse Academy» pour la formation des experts opérationnels de métavers, ainsi que de deux écoles d'études avancées sur le métavers pour la formation des experts académiques, et dix-sept «Metaverse Lab» d'ici 2025 à destination des diplômés de master et doctorat afin de soutenir leurs études et la commercialisation de leurs solutions de métavers.

Derrière des investissements massifs, une prudence de mise. La route des métavers est semée d'échecs successifs dont il faut se souvenir. À en juger par l'histoire récente, il y a beaucoup d'argent à perdre dans ce domaine. Second Life n'a pas tenu ses promesses. Même si la société Linden Lab est rentable, force est de constater qu'elle n'a pas fait fortune. Linden Lab avait causé la surprise en rachetant «Little Text People», une petite société très innovante dans le domaine du drame interactif et de la simulation sociale, responsable du projet «Versu», qui a été abandonnée depuis. Google a essuyé un échec important lorsqu'ils ont introduit leurs lunettes de réalité augmentée («Google glasses»). Magic Leap n'a pas réussi à imposer son casque de réalité augmentée holographique, malgré des levées de fonds importantes (de l'ordre de 2 milliards de dollars). High Fidelity n'a pas non plus réussi à remplacer Second Life avec son métavers de nouvelle génération, immersif et enrichi d'interactions non verbales naturelles, qui se sont avérées difficiles à mettre au point.

Ces dernières années, Google Studio et Oculus Studio ont produit à grands frais des œuvres de réalité virtuelle de grande qualité, qui ont été présentées dans de nombreux festivals, avant de fermer brutalement par manque de rentabilité. D'anciens membres d'Oculus Studio ont créé depuis Fable Studio, qui se fait remarquer par la qualité de ses productions, mais avec des moyens plus limités. Les premières tentatives de développement de mondes virtuels open source (Solipsis, OpenSimulator, Croquet) n'ont pas rencontré le succès espéré dans les années 2000. Aujourd'hui, Mozilla Hubs est le principal acteur du métavers open source, mais son avenir reste incertain. On peut espérer que l'engouement actuel pour les métavers permettra à ce courant de se développer à nouveau. À titre d'exemple, on peut se féliciter du retour des développeurs de Croquet qui proposent des briques logicielles open source pour construire des «microverses» décentralisés.

Les modèles économiques des métavers. Quel est le modèle souhaitable pour les métavers? Est-il possible d'empêcher les grandes plateformes du numérique d'imposer les modèles de l'écosystème mobile à ce nouvel écosystème? Les récents procès d'Apple concernant l'unicité et l'imposition de son store et de son système de paiement

rappellent les procès ayant opposé Microsoft et son OS Windows à l'Union européenne. Tous ces procès sont basés sur des abus de position dominante, et tous se sont joués sur la frontière très mince entre un « operating system » et les applicatifs. Que ce soient le navigateur web ou le lecteur de fichier multimédia, il est difficile d'appréhender où commence et où finit la « couche basse » du logiciel permettant l'exploitation du micro-ordinateur. L'apparition des stores sur les smartphones a posé le même problème et la plainte en cours de Spotify contre Apple démontre bien cette problématique d'entrave à la concurrence. Dans ce procès, Apple est poursuivi pour fournir un service (Apple Music) entrant en concurrence avec Spotify, mais échappant aux contraintes mêmes d'Apple quant à la taxation des contenus. De plus, Apple propose « par défaut » son application de lecture de musique, lorsque l'utilisateur est obligé de télécharger celui de Spotify sur le store d'Apple. L'application du droit de la concurrence sera certainement un aspect majeur pour la structuration de cet écosystème. En ce sens, le Digital Market Act (DMA) qui vient d'être acté au niveau européen devra veiller à pouvoir intégrer dans son application ces nouvelles parties prenantes.

Pour comprendre ces enjeux, revenons sur les modèles proposés respectivement par Apple et Google dans le mobile. Le modèle Apple est de type « walled garden », biface, avec un seul et même acteur qui contrôle toute la chaîne de valeur, depuis ses composants matériels jusqu'à son store d'applications, en passant par un système d'exploitation propriétaire. Apple ne vend pas ses systèmes d'exploitation à d'autres acteurs, ce qui a pour effet de lier le hardware au software. L'utilisation du matériel Apple implique l'acceptation de la licence logicielle. À l'inverse, Google propose son système d'exploitation aux constructeurs de smartphones et d'ordinateurs sans le lier à un hardware spécifique, et ce, pour capter le plus grand marché possible, dans un modèle biface. Pour les couches basses, Android, est open source. Au niveau applicatif, Google incite fortement les constructeurs et les utilisateurs à conclure (à titre gracieux) une licence d'utilisation de Google Mobile Services (GMS), dont Google Play, Google Search, Gmail, Google Maps, etc., ce qui permet à Google de capter les données d'usage et de comportement des utilisateurs sans s'imposer le contrôle de tout le stack hardware et software. Il permet par ailleurs de customiser les couches hautes (interface), et d'intégrer d'autres stores. Ainsi, les constructeurs Samsung et Xiaomi proposent leurs propres environnements graphiques et magasins d'application, respectivement avec One Ui et Galaxy Store pour le coréen, et MiUI5 et MiMarket pour le chinois, tout en s'appuyant sur une version d'Android non compatible avec la version mère de Google.

D'autres éditeurs ont tenté de proposer des alternatives aux deux écosystèmes précédents, dont Microsoft (Windows Phone), Mozilla (Firefox OS) ou Amazon (Fire Phone). Toutes ces tentatives n'ont pas eu le succès escompté et une des rares possibilités d'avoir un smartphone non lié à un éditeur est d'installer la seule couche open source Android (AOSP).

La Joconde Métaversique et les différents contrôleurs d'accès (gatekeepers) du Métavers. Afin de démontrer à la fois les enjeux, la complexité et les possibilités des différentes modalités d'expression des œuvres culturelles dans le métavers, la mission propose un exercice ouvert, celui de la *Joconde Métaversique*. Cet exercice est une invitation à penser l'ensemble des déclinaisons possibles de la Joconde dans les formats

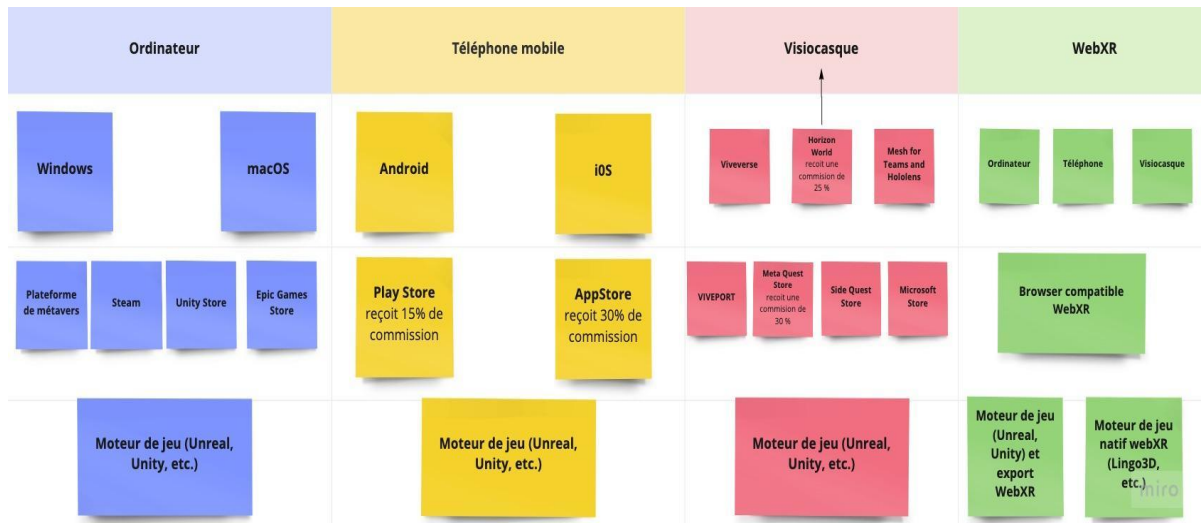
divers des technologies de l'immersion, pour mieux en comprendre les implications (notamment économiques) pour les institutions culturelles.

C'est aussi un clin d'œil à André Malraux, qui aimait prendre l'exemple de la Joconde pour expliciter sa politique culturelle. En 1963, se félicitant d'avoir fait voyager la Joconde aux États-Unis, il raconte à l'Assemblée nationale son émotion face aux Américains recevant la Joconde à Washington « comme aucun être vivant n'avait été reçu » : « *En définitive, ces centaines de milliers d'êtres qui venaient admirer la Joconde venaient dire merci à la France* ». Les métavers permettent d'ores et déjà à la Joconde de continuer ses voyages, et pour le 500e anniversaire de la mort de Léonard de Vinci, le Musée du Louvre a créé « *Mona Lisa : Beyond the Glass* », une expérience immersive en réalité virtuelle de 8 minutes réalisée par la société Emissive VR en partenariat avec HTC VIVE Arts et diffusée gratuitement sur une série de plateformes.

On peut continuer à imaginer des *Jocondes* en réalité virtuelle, par exemple que l'on pourrait explorer avec un casque Lynx en se promenant dans les différentes couches de peintures originelles du tableau; ou une Joconde en réalité augmentée, qui permettrait aux jeunes visiteurs du Louvre présents sur site de *taguer* l'œuvre et de voir dans une galerie immersive les créations d'autres artistes et amateurs ayant été invités à *taguer* la Joconde; ou encore une Joconde en tokens, permettant une levée de fond et la constitution d'un DAO des *Amis de la Joconde*, etc. C'est presque ce que propose Stéphane Distinguin dans son analyse du marché de l'art et des NFTs dans *Et si on vendait la Joconde?*

Bref, les déclinaisons de la *Joconde Métaversique* sont quasiment infinies et permettent de mieux expliciter la variété des formats et des canaux de distribution de ces projets, et la prédominance de certains *contrôleurs d'accès (gatekeepers)* qui sont souvent absents des débats sur la capture de valeur dans le secteur culturel pour les œuvres immersives (par exemple Apple, pour toutes les déclinaisons qui nécessitent une application smartphone). Au-delà des questions de captation de valeur, d'autres questions de contrôle apparaissent. Si la *Joconde Métaversique* est une application mobile distribuée par Apple et que les utilisateurs sont invités et produire et à partager leurs propres contenus autour de l'œuvre, alors les conditions d'utilisation de l'Apple Store dictent que l'éditeur de l'application est tenu de modérer le contenu produit par ses utilisateurs, sans quoi l'application reste d'être retirée du store. Si une *Joconde Métaversique* est développée en VR et distribuée sur le portail « *Quest Store* » d'Oculus (donc de Meta/Facebook), alors ce sont les règles et les politiques de contenus de Meta/Facebook qui s'appliqueront au contenu.

Ce schéma très simplifié en résumé quelques possibilités et met en évidence les «gatekeepers» qui apparaissent avec chaque choix de format et de canal de distribution :



On peut énumérer quelques-uns des canaux de diffusion possibles pour la *Joconde Métaversique* :

- Sur les plateformes mobiles Google Play Store ou Apple Store. Dans ce cas, la plateforme prend généralement 30 % des revenus.
- Sur les plateformes VR propriétaires Steam, MetaQuest Store, VIVEPORT. Dans ce cas, la plateforme prend également entre 20 % et 30 % des revenus.
- Sur le Unity Store pour les expériences créées avec Unity ou le Epic Games Store pour les expériences créées avec Unreal Engine. Dans ce dernier cas, le musée doit reverser 5 % de ses revenus au-delà de 1 million de dollars.
- Sur un métavers propriétaire (Horizon Worlds, Rec Room, VRChat). Dans ce cas, le métavers prend une commission (25 % pour Horizon Worlds) qui s'ajoute à celle de la plateforme utilisée.
- Sur un métavers Web3 où les transactions se font par cryptomonnaies. Les modèles économiques sont très différents selon les plateformes et doivent être analysés au cas par cas. Ils sont également susceptibles de changer. Si les tokens de la Joconde Métaversique s'accompagnent de structure de gouvernance, comme des DAO, alors de nouvelles contraintes (et de nouvelles possibilités) s'ouvrent également.
- Sur un métavers open source comme Mozilla Hubs. Dans ce cas, aucune commission n'est due mais l'expérience doit être diffusée dans un format compatible avec Mozilla Hubs.
- Sur un site WebXR, dans ce cas, aucune commission n'est due, quelle que soit la plateforme utilisée. Mais les performances peuvent être insuffisantes et toutes les fonctions proposées par les autres moteurs temps réel ne sont pas encore disponibles sur ces sites.

On voit que ces différents modes de diffusion ne sont pas neutres. Chacun relève d'un modèle économique qui lui est propre et qui peut pénaliser lourdement les institutions culturelles qui s'y risquent. Pour compliquer les choses, les modes de paiement peuvent utiliser des monnaies réelles, des monnaies virtuelles (type Linden dollar) ou des cryptomonnaies, et prendre différentes formes : abonnements, locations, achats, NFT, etc. Ce tour d'horizon très incomplet montre la difficulté pour les institutions de choisir séparément leurs partenaires et leurs stratégies dans un paysage encore très incertain. Une expertise globale et partagée à l'échelle nationale semble souhaitable pour aborder ces questions avec la prudence qui s'impose.



André Malraux et la Joconde dans le Métavers imaginé par l'intelligence artificielle DALL-E

Actifs numériques et économie des créateurs

Mieux comprendre les enjeux de l'économie numérique. Lors de notre mission, nous avons été frappés par la complexité du sujet de l'économie numérique et par la difficulté de penser cette complexité. Il nous est apparu que ce sujet devait être également un objet de recherche à part entière. En effet, les économistes et les informaticiens ne sont capables de s'en emparer séparément. Mais chacun dans sa spécialité ressent le besoin d'une meilleure connaissance du sujet — l'économiste en raison de l'importance croissante des biens intangibles dans l'économie, qu'il ne sait pas suffisamment comprendre et évaluer; et l'informaticien parce qu'il s'inquiète des dimensions économiques et sociales de sa discipline, qu'il ne sait plus ni mesurer ni prévoir.

Du e-commerce au v-commerce, l'émergence de l'économie virtuelle. Les métavers sont aussi le lieu de l'émergence d'un nouveau pan de l'économie qui se veut, en partie, éloigné des standards de régulations centralisés. Le développement de métavers est aujourd'hui communément associé à l'usage de monnaies virtuelles (cryptomonnaies), mais aussi de programmes informatiques pour tracer l'acquisition de biens virtuels (smart contracts), ainsi que de certificats d'authenticité dématérialisés (NFTs). Néanmoins, il faut rappeler que le rapprochement entre le Métavers et les cryptomonnaies est un lien artificiel. Il est tout à fait possible de développer une économie du Métavers via l'usage de devises traditionnelles. Bien que souvent confondus, métavers et blockchain ne sont

pas consubstantiels, tout comme métavers et web3 ne renvoient pas aux mêmes concepts. L'apparition des métavers s'accompagne du développement d'une économie spécifique, où l'acquisition d'un bien ou d'un produit virtuel donne lieu à une contrepartie/valorisation financière. Le développement du métavers est associé à des levées de fonds massives destinées au financement de la mise en place de cette nouvelle économie. Les entreprises traditionnelles comme les consommateurs sont sollicités pour investir dans ces univers, pressentis à tort ou à raison comme de futurs eldorados économiques. À ce jour, le moteur principal de ces investissements est l'espoir de spéculer sur l'achat de ces biens virtuels (l'exemple des NFTs récemment), ou bien de posséder un « espace » dans le métavers à moindre coût ou bien d'apprendre les codes de ce nouvel écosystème en testant certaines expérimentations.

Les actifs numériques, nouveaux moyens d'échange dans les métavers. Dans les métavers, notamment vus comme des mondes virtuels ou des lieux d'échanges d'actifs, les biens numériques deviennent une des bases importantes de l'économie de ces univers. À l'inverse des métavers sur lesquels il est impossible d'exporter ses avatars ou autres objets virtuels, que certains qualifient de « métavers type web 2.0 » (comme le jeu Minecraft où il est impossible d'exporter ses créations sur une place de marché puisque chaque création restant bloquée dans le jeu), d'autres métavers (que certains qualifient de « web3 ») utilisant les systèmes de blockchain tels que The Sandbox, Decentraland, Cryptovoxels, Somnium Space, Bloktopia (qui utilisent la blockchain Ethereum) et Star Atlas (qui utilise la blockchain Solana). En permettant de transférer actifs numériques vers d'autres plateformes de marché de NFT, telles qu'Opensea ou Rarible, cela crée une liquidité des actifs numériques sur un marché secondaire. Sur le réseau Ethereum, c'est par exemple le cas des jetons ERC-721, un jeton avec un standard technique garantissant son unicité et son indivisibilité. Grâce aux cryptoactifs natifs du protocole (SAND, MANA, AXIE, etc.) — utilisés comme un moyen d'échange au sein des métavers — et aux jetons non fongibles détenus dans ces mondes virtuels, les utilisateurs peuvent donc acheter et vendre des biens et des services entièrement digitalisés, ouvrant le champ des possibles de l'économie numérique. La capacité d'organiser des transactions permettant la valorisation et l'échange d'objets virtuels uniques.

Token is eating the world. La tokénisation de l'économie peut être décrite comme la tendance d'inscrire des actifs numériques et les droits qui y sont associés sur un token afin d'en permettre l'échange et la gestion en pair-à-pair, via des technologies de registre distribué. Cette inscription sur des blockchains permet de rendre ces actifs liquides, créant de fait un marché secondaire. Ainsi, les actifs numériques apparaissent comme une modalité des échanges qui pourraient se réaliser au sein des métavers. En effet, à date, de nombreux projets de métavers ont déjà émis un jeton applicatif totalement fongible, utilisé comme moyen d'échange entre les utilisateurs au sein de leur espace virtuel. C'est le cas de The Sandbox avec le jeton fongible SAND — un jeton ERC-205 et de consensus *proof-of-stake* — qui permet aux joueurs d'acheter et de vendre les différents actifs disponibles dans le jeu ; de bénéficier d'une sauvegarde du jeton détenu grâce au jalonnement (*staking*) de ce jeton ; de participer à la gouvernance du jeu via la DAO ; d'acquérir des parcelles de terrain sur le jeu et ainsi agrandir ses domaines. D'autres

métavers reposent sur le modèle du play-to-earn (P2E), en permettant de gagner des récompenses en cryptoactifs au fur et à mesure qu'ils jouent et développent leur avatar dans le monde virtuel. Dans le P2E Axie Infinity, les utilisateurs peuvent gagner des jetons SLP en accomplissant leurs quêtes quotidiennes, en affrontant d'autres joueurs dans l'arène ou en jouant dans le mode aventure, c'est-à-dire contre la machine. Il y a donc plusieurs finalités à cette tokénisation : fractionner la propriété d'un actif en plusieurs tokens, créer une forme de rareté numérique, programmer et automatiser des opérations sur ces tokens par l'intermédiaire de smart contracts, fluidifier le transfert de la propriété sous forme numérique, conserver dans des registres sans organe central de contrôle la trace des propriétaires successifs, etc. Dans ce contexte, les portefeuilles pour conserver ces tokens tout comme les outils de gestion des identités des utilisateurs seront des éléments centraux pour les utilisateurs des métavers. De nouveaux développements et type de tokens ne manqueront pas d'apparaître : en 2022, le co-fondateur d'Ethereum, Vitalik Buterin, avançait par exemple le concept de *Soulbound Token* (SBT), à savoir des jetons non transférables liés à un portefeuille dédié (une adresse «Soul» pourrait ainsi stocker des SBT représentant des diplômes ou le hash d'œuvres d'art), afin d'améliorer les mécanismes de gouvernance décentralisée, notamment en se fiant à des attestations sociales pair-à-pair.

Les NFT, nouveaux titres de propriété? Un NFT peut être présenté comme un jeton unique, visant à certifier à son détenteur la propriété d'un bien — matériel (œuvre d'art, bien immobilier et autres) ou numérique (objets de collection ou collectibles, avatars numériques, œuvres d'art numériques et autres) — sur le registre public de la blockchain. Juridiquement, il s'agit d'un bien meuble incorporel, qui pourrait être assimilé à un titre de propriété sur le jeton inscrit dans la blockchain, auquel peuvent être associés d'autres droits sur le fichier numérique vers lequel il pointe. Selon le rapport de juillet 2022 du CSPLA sur les jetons non fongibles (dits JNF) : *« Cette définition semble d'ailleurs correspondre à l'ambition des JNF, qui veulent en faire l'avenir de la propriété, notamment dans le métavers et interrogent dans tous les cas notre rapport à la propriété et à la possession d'objets. C'est un des sens que l'on peut donner à l'initiative de la société Injective Protocol qui a transformé "Morons" du Street Artiste Banksy en JNF, vendu à 380 000 \$, après avoir brûlé cette gravure authentique valorisée à près de 80 000 € en direct sur Twitter. »* Généralement, le NFT est accompagné d'informations relatives à l'auteur de l'œuvre, aux précédents propriétaires et à d'autres descriptions plus techniques inhérentes à l'actif sous-jacent. Les NFT sont utilisés pour développer de nouveaux objets exclusifs (en créant de la rareté artificielle), les valoriser (en y associant du sens ou des avantages/utilisations spécifiques), puis les monétiser.

Dans le domaine spécifique du jeu vidéo, l'utilisation des NFT devient une mécanique de jeu à part entière, en même temps qu'un nouveau mode de monétisation fondé sur le «play to earn», à l'instar de Sorare, un jeu qui allie management sportif et cartes NFT à collectionner. La startup a réuni 680 millions de dollars en septembre 2021, réalisant la plus grosse levée de fonds de l'histoire de la French Tech. Parmi les projets à venir, spécifiquement conçus pour une diffusion dans les métavers, *Infinite Drive* du studio lyonnais Tiny Digital Factory est un jeu de courses automobiles qui prévoit, dans un monde 3D persistant, la création de NFT de voitures en collaboration avec Porsche. C'est

également l'approche privilégiée par le jeu *Missing parts* (développé par le studio Vertical), destiné à une exploitation sur le métavers *The Sandbox*, et proposant aux joueurs d'acquérir des éléments du jeu échangeables comme des accessoires pour les avatars, des œuvres d'art à collectionner, des bâtiments dans le métavers. Certains NFT pourraient être liés à des expériences sociales réelles (accès à des canaux Discord ou invitation à des soirées par exemple). Au-delà du jeu vidéo, l'émission et la vente de NFT représentent pour les ayants droit et les talents de nouvelles sources de revenus potentiels, mais surtout l'opportunité d'animer et de communiquer auprès de sa communauté ainsi que de proposer de nouvelles expériences aux fans autour d'un projet. Il s'agit donc en pratique d'un nouvel outil marketing et financier. Tout le monde n'aura pas les compétences pour réaliser ces environnements 3D, des places de marché vont se créer afin d'acheter, d'échanger et d'introduire les objets dans ces environnements 3D. C'est d'ailleurs un des fondamentaux nécessaires aux métavers. Pour que la notion de propriété fonctionne dans les métavers, il ne faut pas qu'elle ne soit rattachée qu'à une application ou qu'à une entreprise. C'est là que la notion de web décentralisé (que l'on retrouve dans le web3) peut s'avérer intéressante. Les biens numériques possédés par un utilisateur seront enregistrés via des NFT. Les assets seront stockés dans un système de fichiers décentralisé comme IPFS (InterPlanetary File System, un système distribué de fichiers pair à pair qui ne dépend pas de serveurs centralisés, et que certains présentent comme un complément indispensable au HTTP pour l'évolution du web; utilisé par de nombreuses plateformes comme Decentraland ou encore Audius) et librement accessibles. Dans ces circonstances, la sécurité des protocoles et des programmes informatiques — notamment des smart contracts — ressort comme un enjeu essentiel, tant les attaques de cybersécurité augmentent dans le domaine, en témoignent de nombreuses actualités récentes dont le hack du jeu Axie Infinity.

Les NFT, modes alternatifs de financement et de diffusion des œuvres. Les métavers se prêtent particulièrement bien à des expériences qui présentent une dimension événementielle – adaptés aux concerts, aux projections en avant-première ou aux festivals. Pour les films, cela participe pleinement du travail de promotion en amont et en aval de la sortie. Pour les institutions culturelles, les NFT peuvent être envisagés comme une source de valorisation du patrimoine des musées. Dans un contexte marqué par la baisse de fréquentation de certains lieux culturels du fait de la pandémie, certains musées ont ainsi choisi d'organiser des ventes aux enchères de NFTs associés à des répliques numériques. C'est le cas de l'Ermitage, à Saint-Pétersbourg, sur des collections d'œuvres de de Vinci, Monet et d'autres grands maîtres en partenariat avec l'entreprise Binance, ou encore du British Museum, en partenariat avec la startup française LaCollection.io, pour des NFTs associés à des œuvres d'Hokusai. La production de NFTs permet de diversifier les manières de créer du lien avec sa communauté, ce qui pourrait offrir aux artistes et institutions culturelles une possibilité d'atteindre de nouveaux publics. En France, c'est l'approche prônée par la NFT Factory, un lieu dédié à Paris, lancé par un collectif d'artistes et entrepreneurs du domaine, pour notamment mieux faire connaître au grand public l'univers des objets numériques certifiés. En ce sens le rapport du CSPLA de juillet 2022 sur les NFTs recommande de « *Soutenir les projets JNF les plus innovants qui répondent aux critères du 4e programme des investissements d'avenir* » et d'« *engager une*

réflexion de long terme sur les priorités de développement des industries culturelles et créatives dans le métavers, incluant notamment un axe relatif à la valorisation du patrimoine culturel français dans un musée universel virtuel». Cela semble d'autant plus important à l'heure où l'on ne peut que constater en l'état l'absence d'initiative des établissements publics, ce qui ne saurait pour autant empêcher la libre création de NFTs sur les œuvres des collections publiques des musées, *a fortiori* lorsqu'elles sont des œuvres tombées dans le domaine public. Le rapport du CSPLA pointe ainsi : « *le principal risque d'une telle posture est de manquer le positionnement stratégique des établissements publics culturels dans le métavers, dont la création précoce de JNF destinés à être exposés dans des musées numériques pourrait constituer une première étape.* » Est ainsi préconisée la mise en œuvre d'expérimentations progressives.

Une économie des créateurs qui pose question. Le « web3 » est souvent présenté — en particulier par certains fonds d'investissement en capital risque américain telle la structure Andreessen Horowitz (a16z) — comme une évolution de l'Internet que nous connaissons aujourd'hui. Selon eux, Internet pourra être « détenu » par les créateurs et non plus par les grandes plateformes. Dans cette optique, le développement d'outils de création 3D mis à disposition de chacun est clairement affiché. Cela correspond d'une certaine manière à une tendance de rendre le « no-code » accessible à tous pour être non plus seulement en mesure de créer son propre site internet ou blog, mais également de pouvoir disposer de moyens de réaliser son propre contenu 3D ou monde virtuel. Sur The Sandbox par exemple, un logiciel VoxEdit est mis à la disposition des utilisateurs pour leur permettre de créer des images en trois dimensions directement commercialisables dans le jeu. La question reste toutefois posée de savoir si ce « web3 » est une projection, une sorte d'idéal vers lequel tendre, ou bien s'il constitue une évolution qui adviendra véritablement ? Autrement dit, le « web3 » contribuera-t-il à l'émergence de nouveaux modèles d'affaires offrant une meilleure répartition de la valeur auprès des créateurs ? Ce « web3 » présenté comme un Internet orchestré par les token, postule que chacun sera en mesure de reprendre le contrôle de ses données et de ses contenus, et ainsi de monétiser directement ses créations auprès de ses audiences. Si les potentialités d'usage — comme les DAO, les *cold wallet*, la DeFi, les protocoles de stockage décentralisé type IPFS, Arweave, ou encore les différents types de tokens — paraissent importantes, rien ne garantit par contre que chaque créateur pourra trouver par lui-même une source de revenus suffisante. Les effets de réseaux requièrent la faculté de constituer d'importantes communautés, ce qui est loin d'être évident, et c'est historiquement caractérisé par l'apparition de nouvelles plateformes venant justement réintermédiaire cette chaîne de valeur. Des promesses similaires étaient d'ailleurs présentées lors de l'avènement de l'économie collaborative, alors qu'aujourd'hui les conditions de travail précaires des travailleurs du clic et des *jobbers* sont régulièrement dénoncées dans des enquêtes journalistiques ou devant les tribunaux. Verra-t-on apparaître un Mechanical Turk des métavers, par le passage de l'économie du clic à celle du geste, de la parole et de nos expressions faciales ? Enfin, cette tokénisation à l'origine de l'économie des créateurs suppose de monétiser la plupart de nos activités et interactions en ligne, ce qui soulève des questions d'ordre éthique. Toutes nos activités en ligne méritent-elles d'être monétisées ? Est-ce souhaitable ?

III. Des freins structurels technologiques à dépasser

Si les métavers font l'objet de multiples conférences et événements, nombreux sont ceux qui soutiennent que le Métavers est une ligne d'horizon encore lointaine et que les initiatives actuelles constituent davantage de protométavers que des mondes virtuels persistants tels qu'ils pourraient exister dans dix, vingt ou trente années. Loin de tout pronostic et autre exercice divinatoire, il nous revient de décrire ici les freins structurels technologiques qui devront être dépassés pour faire advenir ces transformations : temps de latence, saturation des réseaux, mais également les enjeux majeurs de la standardisation et de l'interopérabilité.

Des infrastructures technologiques à perfectionner

Pourquoi les métavers (re)viennent au goût du jour ? Cela s'explique par un discours marketing, mais aussi par des progrès technologiques : la combinaison de progrès récents en microélectronique (nano-OLED, capteurs de mouvement, audio spatialisée), associée à une puissance de calcul permettant une immersion en haute résolution vidéo comme audio, ainsi qu'un rendu de plus en plus réaliste des environnements immersifs permis par la puissance de traitement des processeurs graphiques embarqués (dans le casque ou le smartphone qui le pilote) tout en maintenant une consommation basse et en accroissant l'autonomie. D'autres limitations (spatiales, physiques, temporelles, linguistiques, anthropologiques) sont énumérées et précisées en annexe et méritent d'être prises en compte.

Pourquoi le Métavers n'est pas déjà disponible ? La réalisation d'un Métavers se heurte à l'impossibilité technique d'accueillir plusieurs millions de personnes sur une même expérience virtuelle de manière synchrone. Citons l'exemple du concert du rappeur américain Travis Scott s'étant déroulé sur Fortnite et ayant rassemblé plus de 12 millions de joueurs. En réalité, ces millions de joueurs n'ont pas vécu l'expérience ensemble puisque des centaines d'instances rassemblant chacune seulement quelques centaines de personnes au plus ont dû être créées pour permettre la tenue de l'événement. La technologie permettant une expérience entièrement partagée et simultanée n'existe donc pas encore même si l'impression peut en être donnée. Pour certains, le métavers correspond en réalité à des multivers.

Un besoin en technologies de réseau. Un Métavers de masse à grande échelle nécessite la généralisation des technologies de réseau de nouvelle génération (5G et 6G, Wifi 6, edge computing, XR Cloud). La Corée du Sud a commencé le déploiement de son réseau 5G depuis avril 2019, leur permettant de rassembler 8,6 millions d'utilisateurs 5G (vs 1,6 million en France au dernier trimestre 2021, selon les données de l'ARCEP). Ce déploiement massif de la 5 G leur permet d'atteindre un plus fort taux de pénétration d'espaces de réalité virtuelle (plus de 200 espaces d'exploitation dans le pays : salles de jeux, cinéma, musées), qui ont permis une adoption rapide ces technologies par les populations et un taux d'équipement individuel largement supérieur à la moyenne mondiale.

Les défis technologiques de la VR. Il peut être utile de se référer aux enjeux techniques de la réalité virtuelle afin de mieux comprendre les défis qui peuvent se poser pour les métavers. On peut ainsi citer quelques défis scientifiques qui doivent être encore résolus pour assurer le succès des métavers :

- La qualité des visiocasques n'est pas encore suffisante, leur champ de vision est encore limité à 100 x 100 degrés avec 20 pixels par degré. Une expérience immersive nécessiterait 180 x 180 degrés avec 60 pixels par degré.
- La communication entre les participants d'un même métavers est limitée à des interactions verbales (parlées ou écrites). Il reste difficile de mettre en œuvre une véritable communication non verbale (par le geste et les expressions du visage). Le visiocasque ne facilite pas les choses. Les manettes associées aux visiocasques permettent de suivre les mouvements des mains, et peuvent être complétées par des marqueurs placés sur d'autres parties du corps. Mais il n'existe pas encore de solution permettant l'échange des mouvements du corps et du visage entre l'immersant et son avatar.
- La programmation des personnages non joueurs (PNJ) fait des progrès rapides, mais ne permet pas encore de simuler des comportements sociaux complexes et crédibles.
- La manipulation des équipements (casques de réalité virtuelle, lunettes de réalité augmentée, vêtements haptiques) reste encore difficile dans les métavers. Le déplacement des utilisateurs à l'aide de manettes et de boutons dans l'espace 3D est fastidieux, imprécis et fatigant.
- La programmation des mondes virtuels est complexe, les langages utilisés (C/C++ et C#) ne sont pas non plus toujours adaptés, et évoluent peu. Les moteurs de jeu les plus avancés permettent la programmation visuelle en 2D mais ne permettent pas aisément les allers et retours entre le monde réel où l'on programme et le monde virtuel où l'on vérifie les résultats. À notre connaissance, il n'existe pas encore de langages de programmation visuelle en 3D permettant de programmer dans les mondes virtuels.

Rassembler les disciplines concernées. Comme indiqué plus haut, ces défis nécessitent de briser les frontières disciplinaires artificielles qui divisent la réalité virtuelle au sens large, afin de mener des recherches coordonnées dans tous les domaines concernés :

- **Physique** : pour simuler fidèlement les phénomènes physiques présents dans le métavers (mécanique des solides, mécanique des fluides, éléments finis, thermodynamique, processus irréversibles, phénomènes naturels, etc.).
- **Informatique graphique** : pour animer en temps réel des avatars expressifs à partir d'un petit nombre de capteurs et permettre une communication non-verbale aussi riche que dans la vraie vie; pour faciliter la création de mondes virtuels originaux à partir d'esquisses et dessins d'artistes; pour développer les formats de données et les méthodes de compression de scènes tridimensionnelles permettant leur diffusion sur le web; pour développer de nouvelles méthodes d'authentification et de protection contre la copie, etc.

- **Vision par ordinateur** : pour créer des modèles 3D de scènes réelles à partir d'une ou plusieurs caméras. Par exemple, les techniques de vidéo volumétriques ont beaucoup évolué depuis vingt ans mais ne permettent pas encore de reproduire les mouvements coordonnés de plusieurs dizaines d'acteurs ou danseurs sur une scène de 100 m² pendant plusieurs heures de spectacle.
- **Technologies immersives** : pour développer de nouvelles technologies visuelles (visiocasques, écrans, lunettes de RA), technologies haptiques, interfaces de locomotion, suivi de mouvement/interfaces gestuelles, capteurs physiologiques et cognitifs, etc.
- **Interaction humain-machine** : pour développer de nouvelles techniques d'interaction spatiale spécialement dédiées à la réalisation de tâches 3D en immersion (sélection, manipulation, navigation, contrôle d'application).
- **Design d'expérience utilisateur** : pour maintenir les sentiments de présence, immersion, incarnation virtuelle, co-présence au cours du temps, etc.
- **Sciences cognitives** : pour mieux comprendre la perception humaine en réalité virtuelle (biais perceptifs), les boucles sensorimotrices, le cybermalaise et ses remèdes, les transferts de compétences entre virtuel et réel, etc.
- **Intelligence artificielle** : pour développer des modèles génératifs de scènes tridimensionnelles pouvant être appris à partir d'exemples et contrôlés par un petit nombre de paramètres afin de faciliter la création d'univers virtuels riches en détails à toutes les échelles; et pour programmer les comportements des différents « agents » autonomes présents dans les mondes virtuels (animaux, personnages non joueurs).
- **Calcul haute performance** : pour paralléliser les calculs sur des architectures complexes et distribuées afin de minimiser la latence, les transferts de données et la charge des processeurs.
- **Recherche translationnelle** : pour prendre en compte les connaissances des différents domaines d'application (jeu vidéo, patrimoine, santé/clinique, usine du futur, construction, sport, etc.) et permettre aux experts de ces domaines de créer leurs expériences immersives de façon autonome.

Dans chacun de ces domaines, la recherche publique française est active et reconnue dans la communauté internationale (la France organise la conférence internationale Web3D en 2023 et la conférence IEEE VR en 2025) mais il lui manque un horizon commun pour se mobiliser sur le sujet des métavers et répondre aux nombreux défis scientifiques et technologiques qui restent à résoudre.

Développer les outils de création 3D

La gestion des données 3D. Les données 3D peuvent être créées nativement ou transformées à partir de données réelles. Elles viennent pour l'instant principalement des producteurs de design et des industriels qui créent des fichiers 3D. Des modelleurs reproduisent des modèles de la vie réelle (grâce notamment à des technologies qui scannent le monde réel) ou en créent des imaginaires. Ainsi, des entreprises comme Unity ont comme stratégie de permettre à n'importe quel acteur de créer des jumeaux

numériques à partir de plateforme cloud : des marques pour proposer des objets virtuels ; les constructeurs automobiles pour réaliser des simulations de conduites autonomes dans des environnements avec des simulations comportementales (flux de trafic, piétons...); la représentation cellulaire du corps humain pour des applications médicales. D'autres entreprises, comme la société américaine Matterport, proposent des solutions logicielles permettant de scanner avec un téléphone des données pour produire des modèles 3D — c'est aussi le cas de l'application Scaniverse, qui propose aux consommateurs de scanner rapidement les objets qui les entourent pour en faire des modèles 3D exportables. Dans les iPhone, les caméras embarquent déjà des systèmes Lidar, de nouveaux capteurs qui détectent la profondeur de champ pour de meilleures photos. Cette technologie est annonciatrice des futurs usages de la réalité augmentée.

L'IA, un investissement indispensable au soutien de la création de contenus 3D. Les capacités amenées par l'intelligence artificielle sont indispensables pour générer des avatars à l'apparence et aux mouvements réalistes. Il s'agit donc d'une autre brique technologique cruciale pour le succès des métavers sur laquelle se positionnent les grands acteurs du marché. La création de scènes 3D représentait jusqu'à présent un processus long (plusieurs heures) selon la complexité et la résolution de la visualisation visées. Les technologies de champs de radiance neuronaux (NeRF) qui se basent sur les réseaux neuronaux pour représenter et rendre des scènes 3D réalistes à partir d'une collection d'images 2D pourrait grandement changer la donne, en réduisant le processus de production à quelques minutes seulement. Cette technologie a été décrite comme pouvant constituer une des briques prometteuses, par nos auditions, dans les développements à venir des métavers. Un NeRF entraîne effectivement un petit réseau neuronal à remplir les blancs en prédisant la couleur de la lumière rayonnant dans n'importe quelle direction depuis n'importe quel point de l'espace 3D. La société Nvidia a ainsi développé des technologies dites d'«instant nerf». Cette entreprise spécialisée dans la conception de puces graphiques pour PC et consoles de jeux vidéo, a lancé Omniverse Avatar, une plateforme permettant de générer des avatars interactifs grâce à l'intelligence artificielle. L'écosystème français est également présent sur ce volet. Plusieurs équipes d'Inria développent ensemble un programme de recherche ambitieux sur les avatars. Pionnier dans l'univers de l'animation 3D assistée par l'intelligence artificielle, la startup française Kinetix vient de lever 11 millions de dollars en amorçage pour financer sa plateforme capable de générer automatiquement un avatar animé en 3D en répliquant les mouvements d'une personne filmée, par exemple à l'aide d'un téléphone portable.

La dépendance aux technologies du temps réel. Un autre enjeu technologique, directement lié au développement des formats hybrides, est la maîtrise des outils de création temps réel, issus des moteurs de jeu vidéo qui ont atteint un niveau de qualité visuelle compatible avec les attentes du secteur de l'audiovisuel et du cinéma. Deux moteurs de jeu 3D ont pris une position dominante dans le domaine de la réalité virtuelle et des métavers — Unity 3D et Unreal Engine d'Epic Games. L'accès à ces deux moteurs est aujourd'hui très aisé et peu coûteux, avec des licences commerciales généreuses. Mais aucun de ces logiciels n'est open source et les licences peuvent être révisées. C'est une

situation satisfaisante pour la plupart des acteurs actuels, mais qui peut donc changer du jour au lendemain. Cela deviendrait alors un enjeu de tout premier plan. Plusieurs réponses peuvent être apportées et chacune présente des risques et des bénéfices spécifiques :

- Le développement d'un moteur open source généraliste. Cela représente un effort de développement considérable, sans garantie d'adoption par les développeurs. On peut noter que le consortium Open3D a été formé en 2021 autour de la fondation Linux pour diffuser le moteur de jeu O3DE, version open source du moteur Lumberyard développé par Amazon, sous licence Apache 2.0. Il est difficile de prévoir si cette initiative permettra de faire émerger une alternative aux moteurs propriétaires. En Europe, Blender 3D est un logiciel open source très utilisé pour la création des mondes virtuels, y compris par les grandes entreprises américaines, qui soutiennent financièrement la fondation Blender. À ce stade, Blender ne projette pas de reprendre le développement de son moteur de jeu temps réel (Blender Game Engine), qui n'a jamais remporté le succès de ses logiciels de modélisation et animation.
- Le développement d'un moteur open source dédié au métavers. Dans la mouvance des standards développés par le W3C, plusieurs initiatives sont en cours pour proposer des moteurs de jeu en JavaScript dédiés au web (Neos, Babylon.js, Mozilla). Bien qu'ils restent encore limités techniquement, ils pourraient à l'avenir offrir une alternative aux moteurs de jeu propriétaires.
- La mise à disposition d'un moteur de jeu propriétaire français ou européen, selon un système de licence similaire à ceux qui sont proposés par Epic Games et Unity. On peut penser en particulier à Ubisoft et Dassault Systèmes qui développent en interne leurs propres moteurs 3D temps réel. Mais l'adoption d'un troisième entrant dans ce marché n'est cependant pas garantie, et nécessiterait un fort investissement de la part de ces sociétés.

Une piste plus prometteuse consiste à adopter une stratégie « leapfrog » en engageant des recherches à plus long terme pour préparer le développement de moteurs 3D temps réel de nouvelle génération, capables de remédier aux manquements des moteurs de jeu actuels, par exemple dans leur gestion de l'animation et de la simulation physique en temps réel. Pour l'animation de personnages, les moteurs actuels sont basés sur la capture de mouvement et l'animation par keyframes. Les moteurs de prochaine génération seront probablement basés sur l'animation procédurale et l'animation physique. Les équipes de recherche françaises ont une excellente réputation dans ce domaine (on peut citer par exemple les moteurs de simulation physique XDE Physics de CEA-LIST et SOFA d'Inria) et doivent être soutenues, car elles préparent cette nouvelle génération de moteurs temps réel qui remplaceront les moteurs actuels dans 10 ou 20 ans. Ce sont des domaines très compétitifs où la recherche française, académique et industrielle, peut conserver sa place si elle s'en donne les moyens.

La quête de l'interopérabilité

Garantir un modèle ouvert et interopérable. Alors que le « web 2.0 », dominé par les réseaux sociaux et le marché des magasins d'applications, a abouti à une situation de

duopole sur le marché de la vente d'applications (Apple/Google), mais également sur le marché de la publicité digitale (Facebook/Google), le Métavers apparaît comme l'opportunité de revenir à la promesse d'un web interopérable et concurrentiel. C'est à la seule condition d'avoir l'assurance d'opérer en «jardin ouvert», sans captation de la valeur produite, que les investissements dans les technologies de génération de contenus se justifient. Dans ces circonstances, il semble décisif de développer et proposer une norme d'interopérabilité des équipements d'accès aux métavers en s'appuyant sur une réglementation restrictive, au-delà du DMA si nécessaire (certains auditionnés faisaient référence à l'éventuelle nécessité d'imposer l'ouverture des *Operating System*. En somme une régulation forte pour avoir des OS ouverts). De même, l'intégration des instances de création de standards techniques : les institutions de standardisation des couches techniques du web (IETF, W3C, Web3D, Khronos...) sont ouvertes, accessibles aux personnes physiques comme morales. La présence de cadres de haut niveau représentant le secteur public pourrait permettre la co-crédation de l'infrastructure du Métavers. Et, alors que plus que jamais «Code is law», l'information immédiate, à la source, des pouvoirs publics et des citoyens pourrait permettre un débat démocratique *a priori*, et des esquisses de régulation *ex ante*.

Le Metaverse Standards Forum. Créé en juin 2022, le Metaverse Standards Forum se présente comme un espace de discussions et de prise de décisions entre les organismes de standardisation internationaux et les entreprises qui se positionnent dans les métavers. Il se donne pour mission d'identifier les lacunes en matière d'interopérabilité pour les technologies nécessaires à la création de «métavers ouverts» et de proposer des standards interopérables aux entreprises. Cela concerne des technologies telles que la réalité virtuelle et augmentée, les jumeaux numériques, la gestion de l'identité en ligne et de la vie privée, la gestion des transactions financières ou encore la localisation géospatiale. Le Metaverse Standards Forum fonctionne sur la base de deux niveaux d'adhésion. D'une part, les participants principaux («principals») financent le fonctionnement du Forum, supervisent ses activités et définissent ses grandes orientations. Des acteurs des métavers comme Samsung, Baidu, Intel, VRrOOm, Google, W3C, Nvidia, Meta et Microsoft font partie des contributeurs financiers au fonctionnement du Forum. Les autres participants («participants»), qui ne financent pas les activités du Forum, sont impliqués dans les discussions plénières autour des standards d'interopérabilité. Le Metaverse Standards Forum est hébergé par The Khronos Group, un consortium industriel fondé en 2000 qui développe et assure la gestion des normes d'interopérabilité libres de droits pour les représentations graphiques en 3D ainsi que la réalité virtuelle et augmentée. S'il a pour ambition de rassembler l'ensemble des acteurs des métavers autour de projets communs, plusieurs acteurs de grande envergure n'ont pas encore adhéré au Forum. En témoigne l'absence d'entreprises comme Roblox, Niantic et Apple de la liste des participants. De plus, les acteurs français et européens sont minoritaires dans le fonctionnement du Forum. Il en va de même pour les représentants de la société civile et les organismes de recherche. Ces standards restent également un outil de contrôle important pour les plateformes : Apple par exemple est souvent pointé du doigt pour sa réticence à adopter le standard WebXR (notamment dans les navigateurs Safari sur iPhone), qui a été adopté par Chrome et Android dès 2018.

Cela réduit *de facto* la surface possible de diffusion des contenus web de réalité augmentée. Cette réticence est généralement vue comme un « frein majeur à l'innovation en réalité augmentée », comme le pointe du doigt le spécialiste Christopher Lepkowski, et peut également s'expliquer par le fait qu'en l'absence d'une surface de diffusion en WebXR, les contenus AR doivent donc passer par l'Apple Store pour être visionnés sur iPhone. Cela en retour crée une obligation pour les créateurs de contenu de reverser 30 % de leurs revenus à Apple.

L'interopérabilité de la valeur se pose aussi pour les blockchains. Pour les métavers reposant sur des technologies de registres distribués se pose la question de l'interopérabilité de la valeur. En effet, certains registres distribués permettent d'échanger non seulement de l'information, mais de la valeur, en pair-à-pair sur des réseaux décentralisés mais ne reposant pas nécessairement sur les mêmes standards. La dispersion de la liquidité sur plusieurs infrastructures pourrait devenir problématique si celles-ci ne parviennent pas à établir des ponts (*bridges*) entre elles. Actuellement, de nombreux projets travaillent sur les défis de scalabilité des blockchains, notamment à des fins de décongestion du réseau. C'est le cas de protocoles de Layer 1 comme le Lightning Network ou des protocoles de Layer 2 comme les rollups comme Starkware ou Arbitrum. Il y a également d'importantes recherches sur la manière dont rendre les chaînes de blocs interopérables entre elles. Plus récemment, une autre initiative intitulée « Open Metaverse Alliance », comprenant notamment The Sandbox et Decentraland, vient également d'être lancée en vue de promouvoir des standards interopérables.

En absence de standards, quid de la pérennité des données et des œuvres. En l'absence de standards, rien ne garantit la pérennité des données et des œuvres 3D créées et diffusées dans les métavers. C'est un enjeu économique important pour les créateurs et les ayant droits, ainsi que pour la société. Les premiers formats (VRML, H-ANIM) élaborés par le consortium Web3D dans les années 1990 n'ont pas réussi à s'imposer, et sont en concurrence avec d'autres formats propriétaires (FBX) ou open source (glTF, USD). L'enjeu est donc également d'assurer la pérennité ou durabilité des mondes et des œuvres créées dans les métavers. Se pose ainsi la question de savoir s'il sera nécessaire à terme de répliquer les données sur différents métavers pour rendre ces mondes « permanents » et « persistants ».

Un autre enjeu essentiel concerne la protection des objets 3D qui composent les mondes virtuels. En l'état, les certificats de propriété (NFT) n'offrent aucune protection contre le vol, la copie et la contrefaçon des données 3D elles-mêmes. La seule chose qui est protégée par la chaîne de blocs, c'est le certificat lui-même. Pour les auteurs et les propriétaires, cela ne constitue pas nécessairement une protection suffisante. Cette question fondamentale est insuffisamment prise en compte aujourd'hui, peut-être parce qu'elle pose des problèmes techniques complexes dont les solutions paraissent lointaines et incertaines. Les expériences passées de la musique et du cinéma démontrent pourtant que cette question est primordiale pour les créateurs et les auteurs et doit être abordée en amont. Les « assets » des jeux vidéo, les données de capture de mouvement et les programmes d'œuvres interactives devront être protégés contre le vol, la copie et la contrefaçon lors des échanges entre métavers « interopérables ».

Démocratiser la création des contenus 3D. Du point de vue de la création des mondes virtuels, nous sommes encore loin de disposer des formats et des protocoles qui permettraient une véritable économie de créateurs, où des communautés d'artistes pourraient créer des sites 3D immersifs innovants et esthétiques à moindres frais. Comme le théorise Florian Hoenig, le web est régi depuis 30 ans par une règle qui distribue les internautes entre les créateurs (1 %), les imitateurs (9 %) et les consommateurs (90 %). Mais dans les mondes virtuels 3D immersifs, la création reste limitée à un petit nombre d'acteurs. Si le monde compte plus de 2 milliards de consommateurs de jeux vidéo, la communauté des créateurs est loin de compter 20 millions d'artistes. Les formats de données envisagés actuellement dans les organismes de standardisation font la part belle aux objets virtuels qui reproduisent le monde réel (scan 3D, capture de mouvement), mais ne permettent pas encore de créer et d'échanger facilement des mondes imaginaires sculptés et animés par les artistes. Une première génération prometteuse d'outils permettant aux artistes de sculpter et d'animer en immersion 3D a été proposée dans les années 2010 (Tilt Brush, Quill, Poly, AnimVR, Dreams, Clayxels) avant d'être progressivement abandonnée par les principaux acteurs du domaine (Google, Facebook, Sony). Il paraît important de se saisir de cette opportunité pour inventer à l'échelle des studios français et européens, les formats et les outils logiciels adaptés à la création indépendante, et pour défendre ces formats et ces outils auprès des organismes de standardisation, afin de permettre aux artistes français et européens de devenir les créateurs des métavers, et non leurs imitateurs ou leurs consommateurs.

Des nouveaux modèles de gouvernance. La désaffection progressive des communautés d'artistes et des communautés universitaires de Second Life est en grande partie due au fait que les contenus qui se développent dans ces espaces, restent *de facto* dépendants de l'éditeur du monde virtuel et captifs de sa politique de droit des contenus et d'évolution de ses choix technologiques et marketing, souvent en contradiction avec les besoins d'indépendance, de stabilité et de pérennité nécessaires à des démarches de création, de recherche ou d'éducation. Le Web3 est ainsi souvent présenté dans les discussions comme nouvelle modalité d'organisation des métavers. Illusion ou réelle possibilité, seul le temps pourra le dire. En tout état de cause, cela pourrait préfigurer une expérience utilisateur inédite basée sur de nouvelles formes d'interaction. Certains métavers pourraient par exemple reposer sur des DAO (*Decentralised Autonomous Organisation*), mode de gouvernance basé sur la blockchain où les règles prédéfinies sont appliquées par des programmes informatiques appelés smart contracts. Dans les métavers, les DAO permettent de fixer les différentes politiques qui régissent le monde virtuel et le font évoluer. Dans le métavers Decentraland par exemple, la DAO — dirigée démocratiquement par les détenteurs de jetons de gouvernance — permet de déterminer les objets autorisés ou interdits après son lancement, certains éléments de modération des contenus, la politique, l'organisation des enchères.

IV. Repenser notre rapport au numérique

Les débats autour des développements des métavers constituent une formidable occasion de repenser notre rapport au numérique. Le métavers affiche un concentré de toutes les questions éthiques classiques du numérique : neutralité des réseaux, protection des données personnelles, identité numérique, harcèlement en ligne, addiction, isolement mais aussi exclusion. Certaines questions plus inédites concernent la collecte de données mentales et la manipulation de nos émotions, tout comme la vulnérabilité mentale et physique des participants. Comment le virtuel peut-il améliorer le réel, et non être présenté comme une échappatoire ? Comment inventer la façon d'habiter des mondes virtuels ? Tour d'horizon des enjeux éthiques et sociaux soulevés par ces transformations et qui devront être collectivement débattus pour être en mesure d'en anticiper tous les effets.

Acceptabilité sociale, enjeux environnementaux : pourquoi le métavers soulève de véritables questions de société

Ne pas se contenter de demander un « métavers éthique ». Les risques évoqués à propos des métavers sont souvent des calques des enjeux communs à de nombreux écosystèmes numériques et en particulier aux réseaux sociaux (harcèlement, désinformation, radicalisation, etc.). Beaucoup des publications actuelles et des projets de « métavers éthique » s'arrêtent sur ce calque, apportant peu de précisions et de réponses concrètes et nouvelles à ces enjeux sociétaux émergents. Ceux qui pensent que les enjeux des réseaux sociaux vont se manifester dans les métavers ont raison, mais il y a urgence à investir dans des réflexions plus spécifiques et précises, sans quoi le retard pris sur la régulation des réseaux sociaux adviendra également pour les métavers. De la même manière qu'il existe une tendance à promouvoir les promesses de ces transformations, il existe une tendance de fond visant à critiquer ces évolutions sans s'en donner les moyens. Les enjeux sociétaux et éthiques sont fondamentalement différents en fonction des types de métavers considérés. Dans le cas de la réalité virtuelle apparaît par exemple une inquiétude liée à l'utilisation de casques pouvant entraîner des expériences de déréalisation ou de dépersonnalisation. Pour les métavers en relation avec des registres distribués se pose des questions relatives à la propriété des actifs immatériels, les conditions de leur protection notamment informatique, ainsi que des enjeux de recouvrement de l'impôt sur les transactions en cryptomonnaies. La réalité augmentée de son côté vient amener des « couches digitales invisibles » sur le monde partagé, ouvrant de nouvelles possibilités d'abus à la fois industriels (comme la publicité invasive) et sociétaux. Il existe enfin des préoccupations communes, comme l'enjeu de la transition écologique, de la sécurité informatique ou encore de l'acceptation sociale voire du désir même de l'avènement de ces nouveaux usages. En bref, il s'agit pour mieux comprendre et aborder ces impacts éthiques et sociétaux de réaliser un investissement réfléchi dans des initiatives de recherche ciblées et sérieuses, qui pourront aller au-delà d'un discours un peu simpliste qui peut se résumer à dire que « les problèmes que l'on a connus sur les réseaux sociaux vont être pires dans les métavers. »

L'acceptabilité sociale des métavers. À l'heure actuelle, les métavers sont poussés par l'industrie dans une logique de l'offre, beaucoup plus que par le public dans une logique de la demande. Les enquêtes montrent même une certaine défiance vis-à-vis des métavers, surtout en France et en Europe. Cette défiance intègre plusieurs aspects qui se cumulent. Les visiocasques sont perçus négativement par une grande majorité de la population qui y voit l'expression d'une séparation du monde réel et surtout du monde social. Selon Jaron Lanier, pionnier de la réalité virtuelle, « *le visiocasque n'est pas compatible avec la vie sociale. Un chirurgien peut le porter, un ingénieur peut le porter, mais pas un citoyen* ». En revanche, il peut servir de poste de télévision ou d'écran de cinéma pour apprécier la beauté d'une œuvre immersive, mais c'est alors une expérience privée et de durée limitée. Les cryptomonnaies font quant à elles pour l'instant l'objet d'une perception encore plus délicate. Les métavers avec casque et avec blockchain cumulent ces effets et présentent donc un risque d'acceptabilité sociale plus important. Les métavers sans casque ni blockchain, ne souffrent pas de ces effets, mais ne semblent toutefois pas recevoir non plus les faveurs du public, car ils paraissent peu innovants et peu imaginatifs. Il convient donc de s'interroger sur la taille prévisible du phénomène des métavers. Quels usages nécessitent le public le plus large ? Quels usages restent pertinents dans l'hypothèse d'un public plus limité ? Rappelons que le métavers de Neal Stephenson, dans son roman *Snow Crash* de 1992, ne représentait que les 1 % les plus riches de la population mondiale. Si effectivement les métavers à venir suivent cette pente, au moins pour quelques années, l'analyse des risques et des opportunités en sera assez profondément modifiée. C'est un scénario qui n'est pas envisagé assez sérieusement par les discours dominants actuels et qui mériterait plus d'attention. Un métavers limité à quelques millions d'utilisateurs dans le monde pour des usages positifs et utiles à la société peut être préférable à un métavers généralisé à toute la population pour des usages nocifs et qui ne serviraient que des intérêts privés. Le créateur de *Second Life*, Philip Rosedale, remarque que la taille de sa clientèle est restée stable au cours des années. Selon lui, les utilisateurs qui se tournent vers *Second Life* doivent avoir une bonne raison de sortir du monde réel pour socialiser, parce qu'elles sont isolées, malades, immobilisées ou minoritaires.

Des enjeux écologiques fondamentaux. Le déploiement des métavers pose des questions de dépenses énergétiques, de nouvelles infrastructures qu'il faut quantifier dans l'équation de son développement. L'augmentation considérable des moyens techniques à mettre en œuvre pour fournir le service au plus grand nombre pose la question du contrôle de son impact environnemental. Alain Berthoz souligne également le risque d'une forme de déni du réel face aux enjeux climatiques. Dans ce contexte, certains auditionnés recommandent le développement d'un système de mesure de l'impact environnemental des infrastructures du Métavers, au-delà du champ de la loi du 15 novembre 2021 visant à réduire l'empreinte environnementale du numérique en France, dite loi REEN, et envisager une régulation (par exemple, de type autorisation de mise sur le marché) assurant que cette industrie naissante n'est pas exempte de contribution à la réduction des gaz à effet de serre. La valeur apportée par un métavers devrait pouvoir être supérieure aux impacts environnementaux générés, autrement dit dépasser le simple divertissement ou la simple spéculation en permettant un progrès

significatif par rapport à ce qui pourrait être accompli sans recourir à de tels dispositifs technologiques.

Les principaux moteurs d'augmentation de l'empreinte carbone seraient :

- Les services de stockage de données dans le cloud, et la consommation d'énergie requise, qui vont augmenter considérablement avec la croissance du nombre d'utilisateurs connectés au Métavers et la multiplication des univers 3D navigables, donc stockés dans des formats peu économes en volume de données. Faudra-t-il limiter les heures de connexion ? Les métavers — en tant que mondes persistants — nécessitent la mise en réseau de nombreux appareils, ce qui induit d'être dimensionnés pour les pics d'affluence.
- L'entraînement des modèles d'intelligence artificielle, très présents dans le Métavers. Avec l'augmentation de la data captée, les traitements réalisés vont augmenter de manière exponentielle afin de maximiser la valeur extraite de ces immenses jeux de données.
- La production de microprocesseurs puissants, pour les équipements d'accès au Métavers, mais aussi pour le pilotage de l'infrastructure, va connaître une concurrence féroce du fait du contexte mondial, dans lequel l'accès aux matières premières nécessaires est difficile. Ceci va repousser les efforts «verts» des fabricants de microprocesseurs, pour une durée indéterminée.
- L'impact environnemental des NFTs et des cryptomonnaies.

L'estimation de ces impacts est difficile à mener rigoureusement. Les données sont difficiles à obtenir des acteurs privés. Nous n'avons pas connaissance d'estimations fiables et indépendantes, même pour les métavers existants. Nicholas Carr avait tenté de chiffrer la consommation énergétique d'un avatar dans Second Life en 2006 et estimé qu'elle était comparable à celle d'un habitant d'un pays émergent comme le Brésil. Cette estimation n'a pas été vérifiée et mériterait d'être mise à l'épreuve d'un examen plus systématique. Dans le cas de l'empreinte carbone future des métavers, l'estimation devient encore plus difficile. Les questions sont nombreuses. Dans quel scénario doit-on se placer ? Combien d'internautes seront concernés ? Avec quels équipements ? Dans quelle échelle de temps ? Selon Raja Koduri, responsable de l'informatique graphique d'Intel, la démocratisation des métavers à l'échelle de la planète nécessiterait de multiplier par 1000 la puissance de calcul disponible. Difficilement vérifiable, cette affirmation a le mérite de poser clairement la question de la viabilité écologique des métavers. Une hypothèse est formulée par certains défenseurs des métavers, c'est qu'ils pourraient à terme généraliser le télétravail et se substituer aux transports en commun (automobile, avion) pour les déplacements entre le domicile et le lieu de travail. Mais dans le domaine des transports, l'ouverture d'une nouvelle voie se traduit souvent par une augmentation du trafic, jamais une diminution. On peut donc craindre également que les déplacements métaversiques s'ajoutent aux déplacements routiers et aériens, sans les diminuer très significativement. Pour autant, cela reste une hypothèse prometteuse à examiner sérieusement. En tout état de cause, l'effort d'investissement dans l'innovation ne s'oppose pas à des objectifs de durabilité mais doit au contraire permettre de développer des solutions au service de la sobriété numérique.

Accéder et sortir des métavers. Il conviendra d'anticiper les conséquences des métavers sur ceux qui en seront utilisateurs, tout comme pour ceux qui ne pourraient en devenir utilisateurs. En effet, la question des inégalités d'accès se décline sous plusieurs formes : sensorielles et cognitives, mais aussi économiques et sociales (ex. : illettrisme, moyens financiers pour avoir accès à du matériel et à une connexion de qualité). Les métavers pourraient conduire à une forme d'exclusion des personnes malvoyantes ou ayant une déficience cognitive par exemple. Il existe aussi de nombreux enjeux en termes d'équipement (nécessité de bénéficier d'une connexion internet performante, de matériels avec une carte graphique ou une puissance suffisante). L'illettrisme électronique constituera également un défi de taille, au vu du matériel et des compétences pour accéder à ces nouveaux services. Il conviendrait donc de conduire une réflexion sur cet aspect dans la conception des métavers. Voici quelques illustrations :

- **Enfants** : Pour l'heure, les enfants ont peu accès au matériel permettant l'immersion dans les environnements virtuels ; et la maturation cérébrale en développement chez l'enfant questionne sur le recours à ce matériel. Les constructeurs de casques VR par exemple déconseillent souvent les usages avant 10 ans environ. Les enfants pourront tout de même expérimenter les métavers sans casque de VR ou lunettes de RA, dans une conception semi-immersive. Les métavers pourront être co-conçus avec les enfants de façon à les impliquer dans les enjeux de ces usages. Une question importante reste de savoir à quel âge un utilisateur devrait pouvoir accéder à des métavers. Sur Roblox, par exemple, vous pouvez y accéder même si vous avez moins de 13 ans. Est-ce souhaitable ? En tout état de cause, cela emporterait plusieurs conséquences, notamment la question de la vérification d'identité des mineurs. Il faut alors distinguer deux hypothèses : l'accès à un service dans le métavers strictement interdit aux mineurs et l'accès aux métavers avec autorisation des parents ou tuteurs légaux. Par ailleurs, pour les accès via des wallets se pose la question de la capacité d'un mineur d'ouvrir un compte sur un wallet
- **Exclusion du réel** : il est possible de créer un avatar échappant aux contraintes du monde réel et revêtant un aspect différent, conforme à nos désirs. Cet attachement pourrait cependant entraîner une réduction des interactions dans le monde réel, notamment en ce qui concerne les personnes ayant des difficultés relationnelles. Il convient donc d'être attentif quant à l'effet Proteus, phénomène au travers duquel le comportement d'un individu est modifié en fonction des caractéristiques de son avatar.
- **Dépréciation du réel** : En passant plus de temps dans des mondes hybrides, quelles seront les conséquences et éventuelles déformations de nos perceptions du monde tel que nous le connaissons actuellement ? Certaines personnes pourraient, dans les métavers, vivre des expériences plus intenses, plus gratifiantes que dans le monde physique avec le risque d'avoir des difficultés à en sortir, en particulier dans les situations où les personnes peuvent avoir un quotidien moins réjouissant.
- **Les bulles de métavers** : Les caractéristiques interactionnelles particulières dans les métavers pourraient aussi inciter des personnes en difficultés dans les relations IRL à

rester dans ces environnements pouvant, pour ces aspects, leur sembler plus rassurants. L'aspect immersif des métavers pourra rendre ces expériences plus réelles avec le risque de plus vécu négatif des situations de harcèlement et de plus fortes adhésions à des discours pouvant sembler alternatifs.

En finir avec la captation de nos attentions

Faut-il interdire la publicité dans les métavers? La question est posée par les chercheurs Heller et Bar-Zeev, qui remarquent que dans l'état des connaissances que nous avons des effets de la réalité virtuelle et de la réalité augmentée sur le cerveau, il n'est pas responsable d'autoriser la publicité dans les mondes virtuels immersifs sans prendre des précautions extrêmes. Ils remarquent en particulier que les casques de VR et AR permettent l'enregistrement et l'analyse des regards, qui doivent être considérés comme des données personnelles sensibles, au même titre que les données médicales. Selon eux, la protection de la vie privée doit primer sur les intérêts des entreprises publicitaires et nécessite une action résolue et immédiate. Ils proposent d'imposer le consentement éclairé des utilisateurs et la signature d'un code de bonne conduite des industriels. Mais sans interdiction de la publicité dans les mondes virtuels immersifs, il leur paraît peu semblable que les acteurs du web cherchent d'autres modèles économiques par eux-mêmes et résistent aux tentations d'une publicité toujours plus intrusive et ciblée.

D'autres modèles économiques que la captation de nos attentions sont-ils possibles? Depuis l'avènement d'Internet, les modèles d'affaires étaient largement fondés sur la collecte de données personnelles, la captation des attentions, à des fins de monétisation via des contenus payants ou des publicités. Avec le développement de métavers se pose la question de savoir si de nouveaux modèles d'affaires pourraient émerger ou si les mêmes logiques se reproduiront. La publicité continuera-t-elle de jouer un rôle central? S'exprimera-t-elle sous de nouvelles formes, comme le traçage et profilage des utilisateurs par les traces librement accessibles sur des registres distribués ou par leurs wallets? Quelles autres approches seraient possibles? Sous peine de ne pas étudier ces tendances, le risque de voir se répéter les mêmes phénomènes que lors de l'émergence d'un Internet est grand. En effet, après une période d'effervescence et certains rebondissements, des opérations de consolidation massive ne manqueront pas d'advenir. Ainsi, de nouvelles plateformes et acteurs se répartiraient alors la domination sur des marchés clés, limitant toute possibilité d'entrée pour un nouvel acteur de taille moins importante. Il y a dix ans, Marc Andreessen déclarait « *Software is eating the world* ». Serions-nous désormais à l'ère du « *Token is eating the world* », et si oui en quoi la *tokenomics* constituerait désormais une disruption des chaînes de valeur? La question des modèles d'affaires et des *gatekeepers* devra faire l'objet d'une attention particulière, afin d'être en mesure de déterminer collectivement la société vers laquelle nous nous dirigerons demain.

L'ère du capitalisme cognitif. Jusqu'à présent, la plupart des modèles d'affaires sont fondés sur la captation de nos données personnelles. Avec les métavers, ce capitalisme de surveillance, notamment décrit par Shoshana Zuboff, pourrait évoluer vers un

capitalisme cognitif marqué par des velléités de valorisation d'une partie des activités mentales des individus. Aujourd'hui des procédés techniques tels que l'«emotion AI» ou l'«affective computing» visent à développer des systèmes ayant la capacité de reconnaître, de modéliser et de synthétiser les émotions humaines. Dans ce contexte, les cookies et autres témoins de connexion ne seraient plus seulement déposés sur nos ordinateurs et téléphones, mais directement sur les interfaces que nous utiliserons pour accéder aux métavers — comme les lunettes ou les lentilles connectées — offrant une surface de collecte encore plus importante qu'auparavant, aussi bien quantitativement que qualitativement («*full body tracking*»). Pour fonctionner de manière efficace, ces interfaces nécessitent par défaut de collecter un volume croissant d'informations. C'est le cas des casques qui ont besoin des données de positionnement et d'orientation, à partir de la mesure de nos gestes. Pour transmettre des émotions et refléter des expressions précises, les avatars seront ainsi alimentés par des données en continu, ouvrant des enjeux inédits de profilage en temps réel. Le capitalisme cognitif présente dès lors le risque de la monétisation en temps réel de nos attentions, nos gestes et émotions. Le laboratoire d'innovation de la CNIL, le LINC, évoqué à ce sujet le risque du passage du marketing géolocalisé au marketing émotionnel, en citant l'exemple du projet Fun II, mené en 2013 en collaboration avec Ubisoft et l'Université Laval au Québec qui «*cherchait à "mieux comprendre les émotions des joueurs afin de créer des jeux mieux adaptés". Les travaux menés auprès de volontaires visaient à "extraire une signature physiologique du plaisir", à partir de données du rythme cardiaque, du regard des joueurs ou de l'expression faciale, ou même sur l'analyse des mouvements*». Détection des pics émotionnels, analyse des propos des interlocuteurs sur la base du rythme de leur voix et de la nature de leurs propos, selon Régis Chatellier : «*L'extension du domaine de la collecte permis par le développement des métavers est aussi longue que celles des pratiques déjà permises par le numérique d'aujourd'hui, avec une augmentation au cube, une collecte et un traitement 3D.*»

Des sujets de santé publique

Protéger la santé publique. Une étude récente d'Alexis Souchet et al. dans la revue *Virtual Reality* nous rappelle que les symptômes et effets indésirables de la réalité virtuelle — cinétose, fatigue visuelle, fatigue musculaire, stress et charge mentale — ne permettent pas d'envisager à court terme un usage prolongé des technologies immersives notamment dans un contexte professionnel. Les auteurs s'inquiètent à juste titre de l'engouement actuel suscité par le Métavers, qui ignore très largement ces effets, et proposent un programme de recherche en ergonomie de la réalité virtuelle afin de mieux comprendre et maîtriser ces effets indésirables dans des situations de travail prolongé. Leur recommandation doit s'appliquer plus généralement à tous les usages du métavers qui nécessitent une utilisation prolongée des visiocasques.

Anticiper les conséquences des métavers sur nos cerveaux. Ces univers virtuels, par leur dimension immersive, ont un effet sur nos cerveaux qui dépasse largement les effets de l'animation sur écran. À titre d'illustration, le cerveau a tendance à considérer l'expérience de la réalité virtuelle comme réelle. Le comportement des personnes évolue en fonction de leurs représentations numériques. L'effet Proteus décrit ainsi la tendance

des personnes à être affectées par leurs représentations numériques, telles que les avatars. Au regard de l'impact de ces univers virtuels sur nos corps et nos cerveaux, la nécessité de préparer en amont à la massification de leur utilisation des règles et des outils de modération performants et adaptés paraît fondamentale. En ce sens, le chercheur Mel Slater partage son inquiétude de voir la réalité virtuelle se répandre lentement mais sûrement dans tous les foyers, alors qu'on ignore presque tout de ses effets en dehors des laboratoires.

La nécessité d'étudier l'impact des espaces et différents modes d'immersion. En France, Daniel Bennequin et Alain Berthoz ont développé un programme de recherche original et innovant sur la façon dont le cerveau humain traite les informations géométriques et spatiales. Leur hypothèse est que le cerveau construit plusieurs modèles du monde, qui correspondent à plusieurs échelles spatiales et plusieurs modalités d'interaction avec le monde. Cette hypothèse est résumée par Francois Garnier, qui en discute les implications possibles dans le domaine des arts immersifs. Il distingue autour de l'immersant plusieurs espaces emboîtés :

- L'espace corporel jusqu'à une distance de 20 cm environ.
- L'espace de préhension, qui entoure l'espace corporel jusqu'à une distance de 1 à 2 m et contient tout ce que l'immersant peut toucher.
- L'espace locomoteur, qui entoure l'espace de préhension jusqu'à une distance de 10 à 20 m et correspond à l'espace de déplacement de l'immersant.
- L'espace environnemental ou imaginaire, qui s'étend au-delà de l'espace locomoteur jusqu'à l'infini et qui est souvent représenté sous forme d'une carte « allocentrée » indépendante du point de vue, mais pas toujours.

Ces distinctions sont importantes parce que la réalité virtuelle et la réalité augmentée agissent sur ces quatre espaces simultanément. Dès lors, il faut ici soigneusement distinguer les deux principales modalités d'immersion présentées par Philippe Fuchs :

- **L'immersion extéroceptive** par projection dans un avatar, également nommé « embodiment » (incarnation), typique des jeux vidéo et des mondes virtuels classiques.
- **L'immersion proprioceptive**, obtenue à l'aide de casques de réalité virtuelle, qui permet à l'internaute de se tourner dans toutes les directions (vidéo 360, VR 3DOF, cinématique) et de se déplacer dans l'espace de la simulation (room-scale VR, VR 6DOF).

Dans le cas de la projection avatoriale, Garnier et Berthoz proposent un dispositif expérimental destiné à étudier scientifiquement les expériences artistiques dans les mondes virtuels. Leur étude est consacrée aux relations de co-présence médiatisées par des avatars dans le contexte d'une galerie d'art virtuelle. Mais des études similaires pourraient être menées avec avantage sur les relations de co-présence en VR proprioceptive, lors de concerts ou pièces de théâtre virtuelles par exemple. Dans le cas de l'immersion/interaction « room scale » à six degrés de liberté, l'expérience fait appel à tous les espaces simultanément, ce qui donne une force émotionnelle tout à fait nouvelle,

sans rapport avec l'expérience du cinéma ou de la télévision. Des études expérimentales plus poussées doivent être menées afin de mieux comprendre ces nouvelles expériences. En particulier, il faut noter l'importance des espaces « privés » (espace corporel et espace de préhension) qui sont préservés dans l'expérience du cinéma et de la télévision, et qui peuvent être mis à contribution dans l'expérience immersive « room scale ». Cela pose des problèmes de protection de la vie privée et d'intégrité physique, qui sont encore amplifiés par l'immersion sonore et haptique.

Le phénomène d'incorporation. L'« embodiment » que procure l'immersion, c'est-à-dire la sensation que le corps de l'avatar est notre propre corps, a été étudié depuis longtemps et est très puissant. Il génère des réactions psycho-physiologiques semblables à des expériences similaires dans le monde physique. On connaît bien la perception de membres fantômes par des amputés lorsqu'ils sont recréés en réalité virtuelle. Des chercheurs de l'INRIA, notamment l'équipe d'Anatole Lécuyer, ont poussé ce phénomène en montrant que l'on peut même percevoir que l'on a 6 doigts au lieu de 5 grâce à l'immersion. Mel Slater a aussi montré que l'expérience de Milgram sur l'obéissance à l'autorité produit les mêmes effets sur le participant lorsque le patient est virtuel (et que le participant en est conscient). On peut aussi noter les travaux d'Alessandro Farne à Lyon qui a montré que l'incarnation dans un avatar de genre ou de couleur de peau différente de soi produit des effets à moyen terme (plusieurs jours ou semaines après l'expérience immersive) sur la perception de l'autre et la réaction aux discriminations. L'incorporation peut donc être utilisée de manière positive, mais aussi négative. Si les effets d'une agression sont similaires, sinon identiques, à une agression dans le monde réel, alors on pourrait imaginer les risques psychologiques importants (stress post-traumatique, etc.) qui peuvent en découler pour les personnes agressées.

Promouvoir la recherche scientifique pour le développement d'un Métavers responsable et durable. Parmi les grandes familles de sujets de recherche possible, plusieurs sont à considérer, notamment :

- Études cognitives, psychologiques et physiologiques sur l'identité entre les avatars et les personnes physiques (au niveau de l'individu et du groupe)
- Renforcement des études et modélisations comportementales qui permettent de développer les « personnages non joueurs » et de faciliter leur interaction avec les avatars
- Analyses des méthodes et impacts des solutions métavers au service de la société et des entreprises (comportement des organisations, sociologie des individus et des groupes, mais aussi techniques financières, mode de diffusion marketing et communication, détection des fraudes)
- Optimisation des ressources computationnelles et renforcement de l'efficacité énergétique
- Science des données (data science) pour analyser l'audience et les comportements dans le Métavers, tant dans un but de développement que de contrôle des risques et de prévention des dangers

- Science économique pour la valorisation des biens et services dans le Métavers
- Science politique pour la régulation du Métavers et de ses interactions avec le monde physique
- Philosophie et sciences sociales pour analyser les enjeux d'éthique et de confidentialité des acteurs/utilisateurs du Métavers
- Étudier la déréalisation et ses conséquences, avec des ingénieurs, des médecins et des psychologues, pour mesurer et prévenir les risques avant qu'ils ne menacent notre société
- Problématiques de diversité, d'inclusion et de discrimination dans le Métavers
- Questions d'archivage, d'accès et de capacités d'analyses historiques et scientifiques du Métavers
- Analyser et proposer des solutions pour renforcer la «confiance» et la «responsabilité» au sein du Métavers

Vers un appauvrissement ou une démultiplication des émotions? Pr préférant au terme de métavers celui d'«*environnements virtuels numériques immersifs et interactifs*» (EVNII), le psychiatre Serge Tisseron soutient que «*si les technologies numériques nous font courir le risque d'établir avec le monde des relations virtuelles dominées par le désir d'emprise, elles favorisent tout autant les démultiplications créatives*». Le développement de ces univers nous pousse à nous interroger sur la capacité des individus à s'émouvoir et à comprendre les émotions. À ce titre, l'immersion dans des mondes au réalisme plus ou moins grand est aujourd'hui problématique. Les mimiques des avatars étant encore très caricaturales, il existe un risque que les usagers soient amenés à caricaturer leurs propres mimiques sur le modèle des avatars et donc d'entraîner un appauvrissement des émotions et de la compréhension de l'autre. La compréhension des mondes virtuels numériques immersifs et interactifs dépend de facteurs génétiques mais également de facteurs éducatifs et culturels. Il appartient de favoriser la culture et l'éducation au numérique, tant à l'égard des enfants que des adultes.

V. Anticiper des cadres de régulation adaptés

Est-il acceptable d'avoir dans les métavers des comportements interdits dans la vie réelle? Les pouvoirs publics doivent inciter les concepteurs à établir des règles précises et contraignantes pour empêcher que les comportements en ligne ne débordent dans le monde réel. Loin de vouloir calquer les règles des mondes virtuels sur celles du monde réel, il s'agit de trouver un équilibre entre l'expression de la créativité et la mise en place de principes, garants du vivre ensemble. Sans évoquer des «dark metaverse», on comprend bien que les espaces de créativité et libre expression peuvent être aussi des espaces de transgression dont il convient de déterminer collectivement le curseur (il peut par exemple être intéressant de visiter des espaces normalement fermés au public de monuments nationaux, voire de voler au-dessus ou à l'intérieur d'eux, ou de peindre dessus, mais d'autres comportements seraient certainement plus problématiques). Les principes et dispositions de textes français ou européens comme le RGPD, le DSA ou le DMA peuvent guider les métavers mais ne seront pas suffisants et doivent être précisés et adaptés.

Par-delà le RGPD, le DSA et le DMA

L'analyse de nos émotions. Les technologies immersives sont extrêmement invasives en termes d'acquisition de données personnelles, non seulement il est possible de savoir ce que dit la personne, mais également ce qu'elle fait et comment elle le fait. L'analyse de sa gestualité, pouvant informer sur son état émotionnel, voire médical. Demain, la construction de valeur pourrait se réaliser à partir d'éléments inédits. Le suivi des endroits où se portent nos yeux, les expressions de nos visages, les inflexions, les textures de nos voix, constituent autant d'éléments, pour ne citer qu'eux, pouvant alimenter des algorithmes d'analyse de nos comportements et émotions. Dans ce contexte, le recours à des visiocasques, des lunettes ou lentilles collectées, contribueront à démocratiser ces méthodes de captation. Dès lors, le développement des métavers présente un enjeu important, celui de la préservation de nos espaces mentaux et de données qui jusqu'à présent étaient peu ou pas collectées, mais qui seront à n'en pas douter très convoitées. En effet, les lentilles connectées, en tant que capteurs biométriques, soulèvent d'importantes questions sur la collecte, la détection et l'interprétation du comportement de nos yeux, et de ce qu'ils transcrivent. Nos réactions, craintes, doutes, baisses d'attention, excitations, ennuis, désirs pourraient faire l'objet d'un suivi encore plus ubiquitaire. La navigation au sein des métavers pourrait ne pas être anodine. L'interprétation des émotions humaines par des algorithmes est certes un enjeu qui existe déjà dans le contexte du *quantified self* par exemple lors de la mesure des données de santé ou de bien-être. La mesure des données physiques et physiologiques comme la vitesse de battements du cœur, la variation du diabète, la position des yeux, du corps permettent déjà de tirer des analyses. Toutefois, ces mesures ne visaient pas la collecte de données mentales ni les états d'esprit d'une personne.

Encadrer les traitements des données mentales. Les chercheurs Marcello Lenca et Gianclaudio Malgieri définissent les données mentales comme « toute donnée qui peut être organisée et traitée pour inférer l'état d'esprit d'une personne, soit ses états cognitif,

affectif et conatif». Cet ensemble pourrait ainsi regrouper notamment les images cérébrales, les émotions, les souvenirs, les intentions. Il fait peu de doute que les données mentales, aussi bien les signaux physiques extérieurs d'émotions que leurs inférences, pourraient entrer dans la qualification juridique existante de données à caractère personnel, dès lors qu'elles permettent notamment de singulariser un individu. En revanche, l'état d'esprit d'une personne, son état affectif ou ses émotions ne figurent actuellement pas dans la liste des données dites sensibles et définies en tant que catégorie particulière par le RGPD impliquant une interdiction de principe de leurs traitements. La question se pose ainsi de savoir s'il serait opportun d'étendre la définition de l'article 9 du RGPD pour intégrer ce type de données. Selon de nombreux chercheurs dont les professeurs de droit Judith Rochfeld et Célia Zolynski « face à de tels défis, on peut se demander s'il ne faudrait pas basculer vers une appréhension de ce type de situation en termes de "traitements sensibles" plutôt que de données "sensibles" : le glissement permettrait de saisir des traitements particulièrement intrusifs, présentant des dangers particuliers, quand bien même ils ne porteraient pas sur des données dites "sensibles" ». En tout état de cause, ces données ou ces traitements correspondent aux hypothèses nécessitant la réalisation et la documentation écrite d'une étude d'impact préalable au lancement du projet. Dans la perspective du règlement européen sur l'intelligence artificielle, se pose également la question de savoir si ces traitements seront ou non considérés à un niveau de risque inacceptable et donc interdit, ou élevé et nécessitant alors de fait également une étude d'impact au sens de ce texte. En 2017, le bioéthicien, Marcello Lenca, anticipait ces dangers potentiels, et proposait dès lors de créer des « neurodroits », à savoir la liberté de décider qui est autorisé ou non à surveiller, lire ou modifier votre cerveau. En 2021, le Chili est devenu le premier pays à adopter une régulation spécifique aux « neurodroits », via un amendement à la constitution chilienne. La « Neuro-rights Foundation », a depuis été fondée pour appliquer les droits humains aux technologies cognitives, poursuivre de manière internationale le travail engagé au Chili, et promouvoir cinq « neurodroits » essentiels autour de la « vie privée mentale », de l'identité personnelle, du libre arbitre, de l'accès équitable à l'augmentation mentale et de la protection contre les biais.

Consacrer un nouveau droit fondamental, le droit au respect de l'intégrité psychique

Si la loi Informatique et Libertés et le règlement européen protègent contre les collectes illicites de données personnelles, ces textes n'adressent pas les enjeux d'intégrité mentale, d'autodétermination mentale, ni de liberté cognitive. Le débat ne porte donc pas seulement sur la protection des données personnelles, mais plus globalement sur la défense des droits fondamentaux. En Europe, la Charte des droits fondamentaux consacre notamment en son article 3 « *chacun a droit à son intégrité physique et mentale* ». Le *Digital Service Act* introduit à cet égard un principe important d'interdiction des interfaces truquées, visant à limiter les manipulations de comportements par des interfaces qui ne seraient pas transparentes et loyales pour les utilisateurs. Cet apport s'inscrit dans la volonté de renforcer la lutte contre les « dark patterns » visant à limiter l'impact des traitements algorithmiques agissant dynamiquement sur les stimuli des utilisateurs pour exploiter leur vulnérabilité. Dans ce contexte, les professeurs de droit Judith Rochfeld et Célia Zolynski soutiennent la nécessité de consacrer l'interdiction de

principe des systèmes de reconnaissance et de manipulation émotionnelle. Cela pourrait notamment passer par l'inscription légale du principe d'autodétermination cognitive, notamment face aux risques de manipulation que ces systèmes comportent. Dans le même sens, le Conseil de l'Europe a déjà pu rappeler la faculté des outils d'apprentissage automatique (*machine learning*) d'influencer les émotions et les pensées et de modifier le déroulement d'une action, parfois de façon subliminale, très subtile, voire subconsciente, ce qui contribue à avoir des effets significatifs sur « l'autonomie cognitive » des citoyens.

Des avatars humains, trop humains. Le grand public pourrait à terme avoir accès à des avatars de plus en plus réalistes, reprenant les caractéristiques physiques de ceux qui les jouent. Dans ce contexte de réalisme absolu se pose la question de savoir si certains usages devraient être strictement encadrés, voire proscrits. À titre d'illustration, faudrait-il réfléchir à une « limite » de réalisme interdisant des jeux vidéo de combat sur des avatars trop personnalisés ? Pour les utilisateurs, qu'est-ce qui le relèvera du jeu ou d'une mise en situation réelle ? Ces interrogations ne doivent pas être sous-estimées et appelleront des réponses nuancées basées sur des travaux de recherche et des décisions philosophiques et politiques. De manière plus générale, cela soulève la problématique du rapport à la fiction : dans les jeux de « bataille royale » comme Fortnite, le but est de tuer tous les autres joueurs, on gagne si on est le seul survivant, comme dans « Hunger Games », ainsi les comportements violents sont à la base du jeu, et ne sont donc pas en soi interdits.

Par ailleurs, des avatars pilotés par des IA et donc autonomes (les « personnages non joueurs » des jeux vidéo) pourront être déployés en grand nombre pour mener des attaques (harcèlement, fake news, etc.). Il pourrait ainsi devenir difficile de distinguer un avatar associé à un vrai humain derrière des personnages entièrement virtuels pilotés par une intelligence artificielle, doublée d'une voix humaine, capable de passer pour un véritable humain. Cela soulève aussi des risques d'attaques groupées par des avatars d'IA sur des utilisateurs, créant des effets de meute aux conséquences particulièrement impactantes.

La modération des comportements, en temps réel. Alors qu'il est déjà difficile de modérer les contenus haineux et illégaux en ligne, les métavers poseraient des défis nouveaux puisqu'il ne s'agirait plus seulement de modérer du contenu mais également des comportements dans leur globalité, et de gérer de nouveaux formats, souvent en temps réel. On peut imaginer que le développement des métavers amène la multiplication des échanges visuels et sonores. Ceux-ci ne seront pas nécessairement enregistrés et peuvent disparaître très rapidement. La modération de milliards d'interactions en temps réel sera un réel challenge pour les plateformes et exigera des coûts très importants. En effet, si Horizon Worlds, le réseau social immersif de Meta, a mis au point un système permettant aux modérateurs de la plateforme, en cas de signalement, de revisionner les quelques minutes précédant ce dernier ; d'autres plateformes ne déploieront pas nécessairement cette fonctionnalité, ou n'en auront pas les moyens. La possibilité de bloquer des utilisateurs ou la création de « safe zone » permettant de s'isoler, ne suffiront pas. Il s'agira dans ces cas-là de repenser un modèle de modération de contenu adapté à ces nouvelles frontières technologiques, que certains souhaitent davantage inspiré des procédés de la vie réelle

(témoins/preuves/témoignages) plus que ceux des réseaux sociaux. Se pose également la question de savoir comment détecter en temps réel des agissements problématiques. Comment par exemple détecter la création d'environnements virtuels visant à organiser des attaques terroristes? Le recrutement et l'engagement en ligne sont des caractéristiques de l'extrémisme moderne, et le métavers menace d'étendre cette capacité en facilitant les rencontres. Ces comportements appellent à une attention particulière des plateformes, à travers un renforcement des effectifs des équipes de modération. Roblox fait figure de cas d'étude intéressant. La reconstitution de la fusillade de Christchurch sur le jeu en ligne a été découverte à plusieurs reprises par Daniel Kelley, chercheur de l'Anti Defamation League. Roblox a assuré avoir retiré le contenu et avoir banni l'utilisateur qui a avait créé l'expérience. Toutefois, la plateforme explique ne pas pouvoir bloquer le terme «Christchurch» à des fins de modération étant donné qu'il s'agit d'une des plus grandes villes néo-zélandaises. Il y aurait alors un risque de restriction de contenu ne contrevenant pas aux conditions d'utilisation de la plateforme. La détection par algorithmes présente des limites et dans de nombreuses instances la modération humaine apparaît nécessaire. Il apparaît donc important de vérifier l'applicabilité des réglementations existantes aux spécificités du métavers ou, le cas échéant, d'en prévoir une mise à jour, afin de protéger la vie privée en ligne et de préserver les utilisateurs de campagnes de publicités ultraciblées.

Ces comportements appellent enfin à une prise de conscience technologique des autorités chargées de contrôler la licéité des contenus ainsi que de coordonner les demandes de retraits aux plateformes : ministère de l'Europe et des Affaires étrangères, Office central de lutte contre la criminalité liée aux technologies de l'information et de la communication (OCLCTIC), Pharos, Europol. Cette prise de conscience implique aussi la création d'outils techniques innovants pour repérer, suivre, retirer les contenus problématiques et permettre un travail d'enquête non entravé. L'Appel de Christchurch, en lien avec le Global Internet Forum to Counter Terrorism, forte d'une expérience en matière de mise en place de protocoles de crise multiacteurs, de négociations avec les plateformes numériques sur la transparence des algorithmes et de la mise en place d'outils techniques pour faciliter le retrait de contenus terroristes (notamment via la création d'une base de données de hash) pourrait être utile en la matière. Une approche multiacteurs impliquant la société civile et les acteurs privés paraît pertinente en la matière et gagnerait à être développée.

Les identités numériques au sein des métavers

L'identité numérique, un enjeu central pour les métavers. A priori, les utilisateurs du métavers pourraient se mouvoir dans cet espace numérique sous couvert d'un pseudonyme et d'un avatar, ce qui soulève des questions en termes de vérification de l'identité et de traçabilité des actions. Comment tracer l'identité des personnes dans le Métavers en cas de comportement prohibé? Comment vérifier qu'une personne est bien celle qu'elle prétend être? Comment éviter la fraude et l'usurpation d'identité avec l'utilisation des avatars dans le métavers? Est-ce qu'une identité devra nécessairement être associée à un avatar? Comment passera-t-on d'un métavers à un autre? Pourra-t-on explorer anonymement les métavers? Comment concilier désir d'anonymat et responsabilisation des actions dans les métavers?

Les portefeuilles d'identité numérique. Un portefeuille d'identité numérique est une application qui permet de s'identifier auprès de divers prestataires sans avoir à systématiquement créer un compte, saisir son identifiant et son mot de passe. Les champs requis sont automatiquement remplis à partir des données enregistrées dans le wallet. L'authentification s'appuie sur les informations personnelles. On y trouve ainsi des renseignements administratifs d'état civil, comme les noms, prénoms, dates de naissance, adresses, nationalités... Des certificats et des éléments biométriques peuvent aussi être intégrés. Le wallet s'accompagne de clés d'identification : une clé publique pour se connecter à un site identifié et une clé personnelle sécurisée qui permet d'être reconnu à chaque visite en quelques secondes seulement. Un portefeuille d'identité numérique vise également à garantir l'authenticité d'une identité, par exemple pour répondre aux obligations en matière de lutte contre la corruption et de financement du terrorisme. L'Union européenne finalise actuellement son propre portefeuille digital d'identité : l'European Digital Identity Wallet. Celui-ci permettra une harmonisation des wallets de ses ressortissants et une sécurisation renforcée par rapport aux moyens actuels, comme la réglementation eIDAS. Le projet de wallet européen sous-entend également la possibilité de créer des attributs pour les personnes morales. Il sera alors possible d'attester d'un rôle ou d'une qualité associée à une personne via un *Verifiable Credential*, telle que la capacité à exercer une profession ou une délégation de pouvoir dans le métavers. Afin de simplifier les délégations de pouvoir en interne, les attributs pourront être intégrés dans des certificats qualifiés et seront inclus et protégés dans une signature numérique. Il serait alors possible de lier la personne morale avec une personne physique grâce aux attributs contenus dans leurs wallets respectifs pour déléguer la signature ou le mandat d'une entreprise à un associé ou à un collaborateur.

L'identité, un enjeu de souveraineté. L'architecture d'Internet ne repose sur aucun système d'authentification des utilisateurs. L'absence de couche d'identité intégrée a conduit à l'apparition d'une pluralité de solutions d'authentification et de logins, gérés individuellement par différentes applications. Les identités numériques sont des outils qui peuvent ainsi être supervisés par une entité étatique ayant autorité en la matière, un acteur public ou une société privée. Dans ce contexte, des systèmes d'authentification par les principaux réseaux sociaux et acteurs du numérique, comme Facebook Connect ou Google Connect, ont proposé une solution de facilité, au détriment de tout contrôle par les utilisateurs sur les identités et les données associées. Les grandes plateformes se présentent ainsi comme des fournisseurs d'identité en ligne. En poussant cette logique, dans les métavers, les plateformes pourraient venir concurrencer directement les États dans l'émission de passeport pour circuler dans les métavers. Plutôt que d'une identité au singulier, il semble indispensable de s'intéresser aux conditions nécessaires à l'émergence d'une ou de plusieurs identités numériques certifiées par l'État. Il est question de service public et également de souveraineté, dans un contexte géopolitique nouveau marqué par l'émergence d'acteurs que sont les géants du numérique. L'État est désormais concurrencé dans ses prérogatives régaliennes. L'urgence d'offrir une solution d'identité numérique régalienne s'explique par la crainte, justifiée, de voir arriver des acteurs systémiques extranationaux. Une urgence d'autant plus forte lorsque l'on

considère que les citoyens ne disposent pas d'une grande maîtrise du numérique. Dans un contexte de dématérialisation croissante des services publics, proposer une offre étatique accessible et inclusive qui permette de répondre aux besoins de l'ensemble des citoyens est primordial pour favoriser l'adhésion et la participation éclairée à une future citoyenneté numérique.

Promouvoir des solutions françaises de portefeuilles d'identité numérique. Dans ce contexte, les offres de portefeuilles d'identité numérique (*Digital ID Wallet*), à savoir des applications digitales rassemblant différents documents liés à l'identité d'une personne, vont se développer, et la France devra se positionner tôt — au travers de FranceConnect ou d'autres modalités — sur ce sujet. Actuellement, les citoyens n'ont pas d'outils de wallet décentralisé et souverain leur permettant d'accéder à toutes leurs données d'identité entre différents services. Dans ce contexte, il semble important de pouvoir investir dans des outils permettant de mettre à disposition une identité numérique, transposable dans différents environnements métavers, pour que les utilisateurs puissent s'identifier auprès de services dans le métavers, de manière sécurisée. Tout l'enjeu étant de permettre de garantir l'information sans qu'il y ait une obligation à donner accès à l'information elle-même. Par exemple, en fonction des exigences et des informations strictement nécessaires à l'utilisation d'un service, si une personne souhaite bénéficier d'un service métavers réservé aux adultes, celui-ci n'accédera qu'à la donnée « date de naissance » certifiée dans le wallet, sans qu'il y ait besoin de fournir une photocopie de la carte d'identité. Pour aller encore plus loin — et sachant que la date de naissance est l'un des meilleurs vecteurs pour retrouver l'identité d'une personne et hacker ses comptes —, il est possible d'appliquer un algorithme de cryptographie sur la date de naissance, permettant d'indiquer si la personne est majeure ou mineure de façon certifiée, et ce sans que le service n'accède à la date de naissance elle-même. Le service n'accédera alors qu'à l'information : « La personne est majeure » ou « La personne est mineure ».

Investir dans des solutions d'identité numérique décentralisée. L'identité décentralisée ou *Decentralized Identity* correspond au mécanisme permettant une authentification sécurisée d'un sujet grâce à une identité numérique propre stockée dans une blockchain. Cette gestion décentralisée de l'identité numérique permet à l'utilisateur de se placer au centre de chacune de ses interactions numériques en choisissant les informations qu'il souhaite partager sous forme d'attestation. Ce concept s'oppose à l'identité centralisée, fondée sur des accès et une authentification permise par des fournisseurs d'identité. La confiance est établie différemment et repose sur une notion d'authenticité, de vérifiabilité permise par la blockchain. L'identité décentralisée est fondée sur la base d'une relation de pair-à-pair entre trois acteurs : l'émetteur de justificatif (*issuer*), le titulaire de l'identité (*holder*) et le vérificateur d'identité (*verifier*).

- **L'émetteur** (*issuer*) est l'entité qui génère et délivre un justificatif d'identité prouvant les attributs d'identité d'une personne.
- **Le titulaire de l'identité** (*holder*) est l'utilisateur qui souhaite prouver son identité. Il demande à l'émetteur des justificatifs portant sur son identité sous la forme d'attestation ou attribut vérifiable (*verifiable credentials*) afin de les conserver dans son portefeuille numérique et pouvoir les présenter au vérificateur lors d'une

demande. Le titulaire de l'identité est au centre de ce mécanisme tripartite, lui conférant le choix de révéler ou non ses attributs d'identité.

- **Le vérificateur d'identité** (*verifier*) est le destinataire qui fait la demande d'accès à un justificatif d'identité et qui vérifie les informations partagées par le titulaire d'identité afin de lui permettre d'exercer ses droits ou d'utiliser ses services.

Cette identité numérique décentralisée permet donc à l'utilisateur un meilleur contrôle de ses données personnelles — puisqu'il est le seul à choisir quels seront les attributs qu'il souhaite fournir — une sécurisation des données personnelles grâce à la décentralisation et une fluidification de l'expérience utilisateur grâce à des processus de vérification automatisés et quasi-instantanés.

Garder le contrôle sur ses données d'identité, avec la pseudonymisation certifiée. Le Groupe La Poste et Docaposte proposent d'adopter et mettre en œuvre dans le métavers un concept de «pseudonymisation certifiée» ou de «pseudonymisation opposable» (KYP pour *Know Your Pseudonym*) pour assurer aux utilisateurs un fort contrôle de leurs données. La pseudonymisation consiste à faire usage d'un pseudonyme et d'un avatar pour converser, se mouvoir et agir dans les différents métavers. Ce pseudonyme fera toutefois l'objet d'une possible opposabilité grâce à l'utilisation d'une technologie dite «ZKP» pour *Zero Knowledge Proof* ou technologies à preuve nulle de connaissances. En fonction de la façon dont est conçu le ZKP, il sera possible pour les autorités compétentes de remonter à l'identité réelle d'un individu après émission d'un mandat alors même que ce dernier utilise un pseudonyme. Ce concept est appelé «pseudonymisation opposable». Dans un autre registre, cela permettrait d'attester l'identité d'entreprises et d'artistes lors de la vente de produits, de sorte à authentifier les produits et œuvres, et éviter la fraude. Cette méthode ZKP est une méthode de base utilisée en cryptologie par laquelle une partie (*prover*) peut prouver à une autre partie (*verifier*) qu'une déclaration est vraie sans que ne soient transmises d'autres informations que celle attestant l'authenticité de cette dernière. Ainsi, le ZKP permettrait d'affirmer que la personne est bien liée à une identité réelle certifiée, sans pour autant divulguer cette identité aux services du métavers.

Il serait possible de créer un ID wallet utilisable spécifiquement dans le métavers reposant sur une interface unique et donnant accès à des attributs vérifiables provenant de plusieurs autres wallets (cryptomonnaies, NFT, futur wallet européen, identité numérique...). L'utilisation de ce méta-wallet permettrait de stocker l'identité numérique et d'attester de l'identité réelle de l'utilisateur malgré l'usage d'un pseudonyme et/ou d'un avatar dans le Métavers. La liaison des deux identités (réelles et numériques) via le pseudonyme opposable ou certifié — en mobilisant l'ID wallet, le ZKP et les solutions de certification de l'identité — permet ainsi une meilleure authentification et traçabilité pour lutter contre l'usurpation d'identité et les comportements illégaux. L'ID wallet, contenant de l'identité numérique, permettrait de récupérer et stocker les attributs de l'identité de leurs détenteurs (prénom, nom, date de naissance, adresse, nationalité...) certifiés et normalisés grâce aux technologies de vérification. En leur appliquant le ZKP, on pourrait garantir l'authenticité d'une information sans qu'il y ait l'obligation de donner l'accès à l'information en elle-même. Les qualités de ces attributs certifiés permettraient

en outre, pour une personne physique ou morale, l'octroi à un tiers de la capacité à exercer une profession ou un pouvoir délégué. Ils permettraient également pour un adulte de transmettre son consentement — dont l'authenticité pourra être vérifiée — pour l'activité de son enfant mineur dans les métavers.

Vers la privatisation des outils d'enquête et des procédures de justice

Les infractions virtuelles. Certains actes, comme la prostitution, l'inceste, la torture, la pédophilie ou encore les meurtres constituent des thèmes sensibles dans les mondes virtuels qui ne pourront être étudiés en détails dans ce rapport mais devraient être analysés pour voir si certaines spécificités sont propres à leur commission dans des univers immersifs. Cette question du droit et du corps numérique est donc un thème qui ne pourra être ignoré des autorités publiques. Certains chercheurs se sont d'ores et déjà saisis du sujet et imaginent — parfois de manière un peu disproportionnée — une cyberjustice pour les avatars. Le droit devra étudier l'opportunité — ou non — de créer des dispositions spécifiques en cas d'atteinte à l'image virtuelle d'un individu ou de son avatar. Les développeurs des métavers devront s'entourer de spécialistes de la sécurité des cryptos-actifs, car un système faillible représenterait une cible de choix pour des attaquants mal intentionnés. Au-delà des usurpations classiques et de la vente de faux jetons, le recours à des robots afin de manipuler les prix de marché (illustration récente : l'attaque du réseau Ronin et le hack de Axie Infinity). Un échange de compétences au sein des institutions sera également nécessaire, en associant par exemple l'Agence nationale de la sécurité des systèmes d'information (ANSSI) pour une meilleure prise en compte de ces enjeux.

La fiscalité des métavers. La question de la régulation de ces marchés virtuels et notamment la question de la fiscalité des revenus et de la valeur qui s'y crée se posent, le métavers étant appelé à se baser principalement sur l'utilisation de monnaies virtuelles. Dans la mesure où les biens détenus dans un métavers associé à une blockchain sont valorisés par un actif numérique propre au métavers, comment considère-t-on la fiscalité? Faut-il retenir le régime applicable aux actifs numériques ou celui applicable au bien ou au service sous-jacent (chaussure / immobilier/ etc.)? Plus largement, comment les revenus générés et utilisés dans un métavers sont-ils appréhendés, à partir de l'instant où ils ne sont pas liquidés et perçus entre les mains des contribuables en monnaie fiduciaire? Quelle différence fait-on si le bien n'existe que dans un métavers, ou s'il est lié à un bien qui existe dans le monde physique? À ce jour, l'article 150 VH bis du Code général des impôts prévoit que la cession par les particuliers d'actifs numériques contre d'autres actifs numériques n'est pas imposable. Dès lors, peut-on considérer que l'ensemble des achats et ventes dans un métavers, au moyen d'actifs numériques ne sont pas des faits générateurs de l'impôt? Dans le cas où ces échanges seraient sujets à l'impôt, quelle serait la valorisation retenue? Dans le cas où la plateforme est une organisation autonome décentralisée (DAO), il semble légitime de s'interroger sur le fait que l'entreprise soit redevable de l'impôt sur les sociétés, et si oui, auprès de quelle juridiction? Dans le cas où les biens et services vendus ont une matérialisation physique, la question ne pose pas de difficulté particulière. En revanche, dans le cas où ces derniers seraient immatériels, la détermination du droit fiscal applicable est un exercice périlleux.

La volonté d'intégrer ou non les NFT dans la définition des actifs numériques se révèle être une décision aux conséquences majeures dans cette nouvelle économie, notamment en matière de fiscalité. Les débats au niveau européen, dans le cadre de l'examen du règlement MiCA (Markets in crypto-assets), ont constitué une étape fortement débattue dans l'approche juridique qu'il faut avoir à l'égard du secteur.

Le recueil des preuves. Le recueil des preuves des infractions interroge à double titre. Tout d'abord sur la nature des traces collectées : seront-elles des traces écrites ou orales ? Accessibles à tous sur les registres distribués ou au contraire impossibles à collecter du fait de l'usage de technologies en temps réel ? Jusqu'à présent les réseaux sociaux conservaient sur un support accessible les messages, posts ou commentaires qui y étaient échangés. Entre pérennité et suppression des informations, le curseur a déjà suscité de nombreux débats et contentieux. La permanence des contenus a d'ailleurs pu soulever des enjeux en matière de droit à l'oubli, pour des contenus qui seraient inexacts, trompeurs ou erronés. Ensuite, sur la nature des personnes qui collecteront ces preuves : seront-elles des personnes représentant l'autorité publique, ou des community managers de plateformes privées ? Les technologies de registres distribués consultables par la police et/ou par la justice. Les juridictions devront en outre être formées afin d'être en mesure d'accéder à ces informations. Cela soulève deux autres enjeux de taille, à savoir : 1) la dépendance à des outils de forensics américains, et 2) le risque de privatisation de la justice qui ne serait plus rendue dans une enceinte judiciaire mais directement par les plateformes éditeurs de mondes virtuels.

Se doter de nos propres outils de forensics. Au-delà des investissements de recherche pour comprendre avec précision les risques sociétaux des différents métavers, il est fondamental d'investir dans les outils et les techniques d'analyse qui permettront la détection de ces risques. Sans cela, un réel risque de souveraineté se profile. Il est indispensable de disposer d'outils et de méthodes d'analyse français pour comprendre et suivre ce qui se passe dans les métavers. Cela sert aussi bien à identifier des infractions et remonter aux auteurs qu'à percevoir l'impôt. En effet, à défaut de connaître la nature et le montant des opérations réalisées en cryptomonnaies, ainsi que l'identité des agents économiques, les taux et les assiettes des impôts ne pourront être correctement déterminés par l'État français. Or, à date, on ne peut que constater notre dépendance à l'entreprise américaine, Chainalysis, incubée par In-Q-Tel, le fonds d'investissement de la CIA, ayant bénéficié de dizaines de millions de dollars de commande publique, pour l'analyse des enjeux de criminalité dans les cryptomonnaies. D'autres acteurs de forensics et d'analyse de chaînes de blocs, comme Elliptic et Reactor vont également prendre une importance croissante. Ces acteurs ont déjà acquis des avantages compétitifs forts, en taggant l'ensemble des données ouvertes en relation avec des clés cryptographiques (des adresses détenues par des particuliers jusqu'à celles des casinos). C'est un sujet d'intelligence économique. Ces sociétés ont ainsi connaissance des recherches que réalisent nos ministères, en utilisant leurs outils, en temps réel. Les services étatiques français concluent des contrats de licences particulièrement onéreux pour bénéficier de ces services d'analyse de réseaux, ce qui contribue à renforcer les capacités d'apprentissage de ces acteurs étrangers avec des données particulièrement sensibles,

comme celles des contribuables français. La France doit investir ou permettre l'émergence d'un acteur de taille dans ce domaine. Nous recommandons donc de créer un «Chainalysis français» pour limiter nos dépendances technologiques et économiques.

La privatisation de la justice par les plateformes. Dans le métavers du roman *Snow Crash*, la justice est rendue par des «*burbclaves*» que Neal Stephenson décrit comme des «*Franchise-Organized Quasi-National Entities*». Chacune de ces «*burbclaves*» édicte ses propres règles, agissant comme des «*city-state with its own constitution, a border, laws, cops, everything*». Cette description évoque curieusement certaines polémiques contemporaines autour de l'avènement des Big Tech, que ce soit lors de la création du Facebook Oversight Board, chargé de statuer sur la politique de modération du réseau social, ou encore des débats autour de la «dé-plateformisation» du compte de Donald Trump sur Twitter. On observe déjà comment les plateformes ont renversé les logiques de pouvoir et de gouvernance traditionnelles. Cela s'est illustré à plusieurs reprises, notamment lors de l'opposition entre Apple et le FBI sur l'accès aux données des iPhone chiffrés des terroristes décédés après l'attaque de San Bernardino, et plus récemment encore dans d'autres juridictions avec d'autres opérateurs.

Aux lois nationales, chaque géant numérique oppose sa propre constitution, ses conditions générales d'utilisation. Ces documents contractuels, rarement lus, sont pourtant juridiquement contraignants. Ainsi ils peuvent édicter des règles, des interdictions très spécifiques. Ce choc de souveraineté entre États-nations et plateformes internationales s'accroît avec le temps, car l'attractivité de ces dernières augmente au point de devenir des moyens de communication incontournables (un horizon vers lequel les métavers tendront certainement). Il suffit d'ailleurs de comparer : Meta (Facebook) rallie plus de deux milliards de comptes utilisateurs, alors que la France compte moins de 70 millions d'habitants. Non seulement le numérique devient un enjeu décisif de *soft power*, permettant d'imposer subrepticement sa norme, son pouvoir, mais de manière croissante avec les réseaux et demain avec les métavers, nous pourrions assister à une forme de privatisation de la justice, à savoir un recul du judiciaire au profit d'une gouvernance par les règles des plateformes. En effet, nous risquons de voir se démultiplier les initiatives de justice privée. Dans le secteur du jeu vidéo, certains éditeurs publient déjà des «jugements» en ligne. C'est par exemple le cas de l'éditeur de *League of Legends*, Riot Games, qui a prononcé des sanctions de plusieurs dizaines de milliers d'euros à l'encontre de ses utilisateurs du fait de la violation de ses «*competitive rulings*».

Dans ces circonstances, faudra-t-il encourager la création de systèmes d'arbitrage et de modes de règlement des litiges indépendants des éditeurs des plateformes? Pour l'instant, afin d'éviter toute décision unilatérale qui ne pourrait être contestée, le Digital Services Act a notamment prévu la possibilité d'introduire un recours juridictionnel ou une réclamation auprès d'une autorité de contrôle. Il n'en demeure pas moins que le premier filtre, à grande échelle, est réalisé par les plateformes qui, de fait, par les pratiques et règles, vont façonner les comportements d'une quantité importante de citoyens à travers le monde. En ce sens, l'opportunité d'encadrer plus précisément la justice des plateformes mériterait d'être étudiée. Pourquoi? Car dans certains cas les plateformes pourraient devenir juge et partie. Or, les mécanismes judiciaires ont précisément été créés pour assurer toutes les conditions d'impartialité par un juge

qui intervient comme un tiers au litige. C'est la base même de la Convention de sauvegarde des droits de l'homme et libertés fondamentales qui garantit le droit de tous d'avoir sa cause entendue équitablement, par un tribunal indépendant, impartial et établi par la loi. Assisterons-nous à la démultiplication d'ordres juridiques propres aux plateformes parallèles aux ordres juridiques nationaux? Toute l'ambivalence des États-nations par rapport à cette situation est, qu'étant eux-mêmes dépassés par le volume et la variété des contenus publiés chaque jour, ils se retrouvent dans cette situation paradoxale de déléguer — sans sembler le vouloir totalement — cette supervision des activités aux plateformes, quitte à prévoir dans la loi la possibilité pour un utilisateur de formuler un recours interne directement auprès des plateformes. Or, les exigences applicables à ces mécanismes de recours internes au sein des plateformes sont à date largement laissés à la libre appréciation des dites plateformes.

Annexe 1 — Lettre de mission



GOUVERNEMENT

*Liberté
Égalité
Fraternité*

Destinataires :

Mme Camille François

M. Adrien Basdevant

M. Rémi Ronfard

Paris, le **14 FEV. 2022**

Madame, Messieurs,

La promesse technologique du métavers est de permettre à ses utilisateurs de s’immerger dans un monde numérique distinct (réalité virtuelle) ou parallèle (réalité augmentée) du monde physique, tout en y permettant des interactions en temps réel, que ce soit en recourant au clavier et à la souris ou à des interfaces homme-machine encore plus avancées (casque de réalité virtuelle, bras à retour d’effort, etc.).

Depuis deux ans, la multiplication des événements et espaces virtuels et, récemment, l’annonce d’investissements massifs dans de nouveaux métavers par certains grands groupes du numérique ont remis en lumière ce nouveau territoire de l’innovation technologique, dont la définition et les différentes formes restent toutefois floues.

Le développement de ces environnements numériques pourrait transformer profondément les pratiques et les usages numériques, qu’ils soient liés à la création, à la visite de lieux culturels, aux interactions sociales - personnelles comme professionnelles - ou à l’entrepreneuriat et l’industrie.

C’est dans ce contexte que nous souhaitons vous confier la mission de nous éclairer sur les grands enjeux économiques, sociétaux et culturels que soulève selon vous le développement des métavers. Cette mission a pour objet d’explorer :

- d’une part, les opportunités liées à l’émergence de métavers (économiques, culturelles, créatives, éducatives, sociales...);

- d'autre part, les défis soulevés par ces innovations (présence de la France et de l'Europe dans les chaînes de valeur, souveraineté numérique, protection des mineurs et de la vie privée, préservation d'infrastructures ouvertes et de communs numériques, respect des règles de concurrence et de la propriété intellectuelle, sécurité, impact environnemental...) et la manière dont la France pourrait y répondre.

Vous vous attacherez en outre à :

- présenter un panorama à date des types de métavers qui pourraient émerger et procéder à l'identification des cas d'usages les plus novateurs ou en rupture, qu'ils existent ou soient susceptibles d'apparaître. Vous pourrez utilement produire une cartographie des acteurs en présence, des produits qu'ils développent et de leurs caractéristiques distinctives ainsi que du positionnement des acteurs français dans ce nouvel écosystème ;
- proposer un ensemble de mesures susceptibles de favoriser l'émergence de technologies et de services européens du métavers, ainsi que le bon positionnement de notre industrie dans la chaîne de valeur ;
- identifier les freins persistants à l'appropriation de ces métavers par les citoyens, qu'il s'agisse des freins technologiques ou en termes d'usage et d'expérience utilisateur, ainsi que les moyens de les lever ;
- proposer un socle de valeurs et de principes devant guider le développement du métavers tout en identifiant les enceintes nationales ou internationales susceptibles d'en être les garantes dans la durée, afin que la France puisse jouer un rôle moteur dans le déploiement de ce nouvel environnement numérique ;
- étudier les enjeux soulevés par les échanges de valeurs qui se produiront dans le métavers, notamment les liens existants entre le métavers, la blockchain et les crypto-actifs.

Ces éléments pourront servir à alimenter les réflexions du gouvernement sur l'élaboration d'une stratégie nationale afin que la France tire profit des opportunités offertes par le déploiement de ce nouvel environnement numérique, tout en assurant que ces évolutions demeurent conformes à nos valeurs.

Vous associerez à ces travaux Bruno Sportisse, président-directeur général d'Inria.

Pour mener à bien ces travaux, vous vous appuyerez sur les services de la direction générale du Trésor, de la direction générale des entreprises, de la direction générale des médias et des industries culturelles, du pôle d'expertise de la régulation du numérique.

Vous veillerez à élaborer vos recommandations dans le respect des règles d'indépendance, d'impartialité et d'objectivité qui s'imposent au titre de la loi n° 2013-907 du 11 octobre 2013 relative à la transparence de la vie publique et à nous informer des éventuelles mesures prises à cet effet.

Nous souhaitons être destinataires d'une note d'étape fin mars et de votre rapport final fin mai 2022.

Nous vous prions de croire, Madame, Messieurs, à l'assurance de nos sentiments les meilleurs.



Bruno Le Maire
Ministre de l'Economie,
des Finances et de la Relance



Roselyne Bachelot
Ministre de la Culture



Cédric O
Secrétaire d'Etat
chargé de la Transition numérique
et des communications électroniques

Annexe 2 — Panorama de certains métavers en 2022

Nom	Date de création	Entreprise	Descriptif	Juridiction applicable	Immatriculation	Estimation du nombre d'utilisateurs mensuels actifs
Roblox	2006	Roblox Corporation	Jeux vidéo générés par les utilisateurs	État de Californie	États-Unis	150 millions
Fortnite	2017	Epic Games	Jeu vidéo multijoueur sur un modèle freemium	État de Caroline du Nord	États-Unis	268-272 millions
The Sandbox	2012	Animoca Brands	Univers virtuel partagé en temps réel basé sur la blockchain	Hong Kong	Hong Kong	350 000
Horizon Worlds	2021	Meta	Univers virtuel partagé en temps réel à vocation sociale où les utilisateurs peuvent créer des contenus en ligne.	État de Californie	États-Unis	200 000
Zepeto	2018	Naver Z	Univers virtuel partagé en temps réel où les utilisateurs peuvent interagir et créer des contenus en ligne.	Corée du Sud	Corée du Sud	20 millions
Decentraland	2020	The Decentraland Foundation	Univers virtuel partagé en temps réel basé sur la blockchain	Panama	États-Unis	300 000
SecondLife	2003	Linden Lab	Univers virtuel partagé en temps réel où les utilisateurs peuvent interagir et créer des contenus de l'univers.	État de Californie	États-Unis	N/A

VRchat	2017	VRchat Inc	Univers virtuel partagé en temps réel où les usagers peuvent créer des contenus et expériences en ligne.	État de Californie	États-Unis	673 000
Minecraft	2011	Mojang Studios	Jeu vidéo multijoueurs accessible sur des serveurs privés	État ou province où l'utilisateur réside	États-Unis	141 millions
RecRoom	2016	Rec Room Inc	Salles de discussion en temps réel et en réalité virtuelle où les usagers peuvent interagir	État de Washington	États-Unis	1 million
Yaotai	2021	NetEase	Service de conférences en réalité virtuelle pour les professionnels	Hong Kong	Chine	N/A
Core	2019	Manticore Games	Univers virtuel partagé en temps réel où les usagers peuvent interagir, et créer des contenus et expériences en ligne.	État de Californie	États-Unis	N/A
VestaVR	2019	JanusXR	Plateforme hébergée sur le web de salles de chat	Province de l'Ontario / Canada	Canada	N/A
Sansar	2017	Linden Lab	Plateforme proposant des événements virtuels partagés en temps réel	État de Californie	États-Unis	N/A
Hiberworld	2017	Hiberworld Inc	Plateforme de création de mondes virtuels où les usagers peuvent jouer, créer et partager des jeux en ligne.	Suède / État de New-York pour les résidents américains	Suède	N/A

NeosVR	2018	Solirax	Plateforme de création d'univers virtuels	Tchéquie	Tchéquie	N/A
Mozilla Hubs	2018	Mozilla	Plateforme open source pour la création de mondes virtuels	État de Californie	États-Unis	N/A
Virbela	2012	Virbela Inc	Plateforme de création d'univers virtuels immersifs partagé en temps réel	État du Delaware	États-Unis	N/A
XiRang	2021	Baidu	Plateforme de création d'univers virtuels partagés en temps réel, qui se présente comme un fournisseur SaaS (Software as a service). Les usagers peuvent créer des expériences en ligne.	Pékin	Chine	N/A
Omniverse (Nvidia)	2020	Nvidia	Plateforme de collaboration de conception 3D en temps réel et de simulation de mondes virtuels / jumeau numériques	État de Californie	États-Unis	N/A
Octi	2017	Octi Inc	Réseau social en réalité augmentée	État de Californie	États-Unis	Moins de 500 000
Bigsreen	2017	Bigsreen Inc	Salles de discussion en temps réel et en réalité virtuelle où les usagers peuvent interagir	État de Californie	États-Unis	Moins de 500 000

Annexe 3 — Limites des métavers

Le Métavers trouve son origine dans la science-fiction qui ne lui impose aucune limite. En réalité, les métavers présents et futurs sont soumis à des limites de différentes natures, qui dépendent de leurs caractéristiques et ne sont pas sans conséquences. Nous en recensons de nombreuses, applicables en particulier dans les métavers en lien avec une dimension de réalité virtuelle (limites spatiales, physiques et de crédibilité) d'autres de manière plus large (limites temporelles, linguistiques, anthropologiques, et d'imagination) et qui pourraient également s'appliquer pour plusieurs métavers.

- **Limites de distance.** Les ondes électromagnétiques se propagent à la vitesse de la lumière. Il faut 120 millisecondes à la lumière pour faire le tour complet de la terre. Les interactions entre deux internautes vivant aux antipodes sont donc limitées par une durée d'aller et retour (ping) indépassable de 120 ms et une fréquence indépassable de 8 Hz. Sauf à prédire les actions des internautes, il ne sera donc jamais possible d'interagir naturellement sur le Métavers à l'échelle planétaire. Une interaction fluide qui nécessite une boucle d'interaction plus rapide, de l'ordre de 12 ms, impose une limite spatiale à chaque « monde virtuel » qui doit s'inscrire dans un rayon de 3600 km environ.
- **Limites de taille.** De nombreux commentateurs remarquent également que les métavers actuels sont limités par le nombre d'internautes qui peuvent interagir en temps réel dans un même espace virtuel (100 personnes pour Fortnite et Second Life, 40 personnes pour VRChat). Mais cette limitation paraît correspondre assez naturellement aux limites habituelles de notre vie sociale. Il n'est en effet pas très courant d'interagir avec plusieurs milliers de personnes au cours d'une même journée. Même une salle de spectacle virtuelle de quelques centaines de personnes est un format qui favorise l'interaction sociale et la relation entre les artistes et le public, alors que l'expérience d'un concert ou d'une messe partagée par plusieurs millions de spectateurs ou fidèles peut être relayée plus efficacement par les media traditionnels de la radio et de la télévision.
- **Limites linguistiques.** Nombreux sont les commentateurs qui remarquent que le Métavers marque un retour vers la communication orale, après une longue domination de l'écrit sur le web et les réseaux sociaux. Le Métavers va donc être limité très probablement à des communautés linguistiques. Certains acteurs de la Big Tech pensent y remédier en faisant appel à la traduction automatique, mais celle-ci tarde à s'imposer dans le domaine de l'écrit, et les défis posés par la langue orale sont encore bien plus difficiles. La traduction en temps réel n'est pas une option et va donc imposer un délai dans les communications entre plusieurs langues. On peut imaginer des agents de traduction automatique qui traduiraient les conversations dans les deux sens, phrase par phrase. Mais le traducteur saura-t-il interpréter et reproduire les accents, les intonations des locuteurs ? Saura-t-il prendre en compte et reproduire leur langage non verbal ? Autant de difficultés qui semblent aujourd'hui nécessiter des recherches plus poussées.
- **Limites anthropologiques.** De nombreux commentateurs remarquent que la frontière entre le monde réel et le monde virtuel des réseaux sociaux et d'Internet s'estompe. Pour les jeunes générations, les mondes virtuels et les jeux en ligne font tout simplement partie de la réalité. En revanche, l'opposition entre espace privé et espace public garde toute son importance. L'expérience des mondes virtuels en ligne nous place dans des espaces

«intermédiaires» où nous sommes à la fois dans notre espace physique, que nous partageons avec nos proches, et dans un espace virtuel que nous partageons avec les internautes. Certains y voient un exemple d'hétérotopie (du grec «autre lieu»), concept forgé dans les années 1960 par Michel Foucault et qui désigne la différenciation des espaces, souvent clos ou enclavés, caractérisés par une discontinuité avec ce qui les entoure. Contrairement à l'utopie qui est un monde imaginaire sans lieu réel, l'hétérotopie, elle, correspond à un monde imaginaire qui se déploie dans un lieu réel, comme une scène de théâtre ou une église. Dans ce sens, un monde virtuel ou métavers est effectivement une hétérotopie, qui prend place dans le monde réel mais introduit de nouvelles pratiques guidés par la simulation 3D d'un monde virtuel. Cette comparaison est utile, car elle permet de penser aux métavers comme des «espaces» plutôt que des mondes. Michel Foucault prend l'exemple des lieux dans lesquels on n'entre pas librement, parce que leur accès est contrôlé ou payant : aéroport, discothèque, musée, parc d'attraction, quartier résidentiel fermé. Ces lieux fermés imposent des différences de comportements, des écarts à la norme ou la fabrication de nouvelles normes, un accès à des nouvelles libertés ou le respect de nouvelles règles ou contraintes. Le passage de la voix haute au chuchotement (bibliothèque, musée), ou au cri (discothèque) peut marquer l'entrée dans l'hétérotopie. Elle peut être éphémère, comme lorsqu'un événement public change provisoirement les règles et les normes dans la rue ou dans un espace public. Dans le Métavers, il faudra probablement respecter également des règles spécifiques pour passer d'un espace à un autre et adapter nos comportements à chaque espace. Sans quoi nous risquerions d'être condamnés à «surfer» d'une expérience indifférente à une autre. Dans le cas d'une expérience «room scale», ce sera d'autant plus compliqué que l'espace physique qui entoure chaque internaute est un espace privé qui est transporté et partagé dans le monde virtuel. De ce point de vue, le métavers de Stephenson est limité à l'espace public de la rue et des commerces et n'affronte pas la complexité des espaces de la vie sociale.

- **Limites spatiales.** Même dans ses incarnations les plus récentes, qui permettent de se déplacer en immersion («room scale vr») les expériences de réalité virtuelle sont limitées par l'espace physique qui entoure l'immersant. Cela n'est pas sans poser de problèmes lorsqu'on utilise des casques de réalité virtuelle, qui masquent l'espace physique. Les déplacements ne sont pas sans danger. Il est aisé de se cogner contre les murs de la pièce où l'on évolue, contre d'autres personnes avec qui on partage l'espace (sauf si elles sont elle-mêmes représentées par un avatar), de trébucher sur un objet posé par terre (sauf si il est lui-même représenté par un double numérique). De plus, les déplacements naturels sont limités aux dimensions de la pièce dans laquelle on évolue. Pour parcourir des distances plus importantes, il faut se téléporter, ce qui nécessite des interactions laborieuses qui occupent l'attention de l'immersant et diminuent le sentiment de présence. Cette question est actuellement un sujet de recherche actif, qui n'a pas encore reçu de solution définitive. En réalité augmentée, la question est différente puisque les objets virtuels sont projetés dans le monde qui nous entoure, dans lequel on peut se déplacer librement et sans risque. La difficulté dans ce cas consiste à créer des mondes virtuels («mirror worlds») à l'échelle du monde.
- **Limites physiques.** Les interactions avec les mondes virtuels sont également sources de problème aussi bien en réalité virtuelle qu'en réalité augmentée. Même si la réalité

augmentée permet de se déplacer dans la scène, de nombreux problèmes restent en suspens. Dans les deux cas, on peut traverser les objets virtuels comme des fantômes et perdre le sentiment de présence. Les manipulations sont également malaisées. Les actions les plus simples, comme prendre un objet, le porter et le poser, doivent être programmées et nécessitent d'estimer avec précision la forme et le mouvement des mains de l'immersant. Il en va de même des interactions entre les immersants. De manière plus générale, les interactions «naturelles» entre immersants et mondes virtuels nécessitent d'estimer les formes, postures et mouvements des immersants en temps réel et d'effectuer des calculs complexes de simulation physique en temps réel. C'est une difficulté technique pour la plupart des dispositifs actuels de réalité virtuelle et augmentée. La nature des données ainsi recueillies sur l'immersant pose par ailleurs la question de la protection de sa vie privée. Les interactions les plus efficaces (mais pas les plus naturelles) sont actuellement obtenues dans le domaine du jeu vidéo à l'aide des manettes de jeu, que les joueurs utilisent avec une grande dextérité, voire une certaine virtuosité. Mais il n'est pas certain que leur usage se généralise facilement à d'autres tâches.

- **Limites de crédibilité.** Comme le fait remarquer la chercheuse Janet Murray, les sentiments d'immersion et de présence en réalité virtuelle ne sont ni absolus ni irrésistibles. Ils font l'objet d'une «suspension volontaire de la crédulité», comme toute immersion narrative dans une œuvre de fiction, qu'elle soit écrite, dessinée ou filmée. L'immersant doit toujours faire un effort pour croire à la réalité du monde virtuel et l'illusion est facilement brisée. Ce qu'il faudra juger à l'avenir, ce n'est pas tant la technologie utilisée, que la force de la mise en scène opérée par les logiciels de simulation. Janet Murray compare la réalité virtuelle avec le cinéma pour remarquer qu'aujourd'hui, on a tout juste inventé la caméra (le moteur de jeu) et le projecteur (le casque de réalité virtuelle). Pour elle, nous sommes encore à l'âge des frères Lumière et il reste à inventer une «grammaire de la réalité virtuelle» pour raconter des histoires et construire des expériences mémorables. Cette remarque vaut pour la réalité virtuelle en général et pour les métavers en particulier.
- **Limites d'imagination.** Dans l'état actuel de la technologie, les mondes virtuels immersifs sont surtout limités par l'imagination de leurs auteurs. Mark Wolf remarque que les mondes de fiction ne se démarquent jamais complètement du monde réel, et lui empruntent beaucoup d'éléments par défaut et par manque d'imagination. C'est ainsi que le métavers de Neal Stephenson reproduit l'avenue centrale de Las Vegas, ville qui elle-même reproduit les grandes capitales du monde. Certains métavers actuels semblent prendre la même voie, qui consiste à reproduire à l'identique les villes et les centres commerciaux du monde réel, sans en corriger les défauts. Une telle approche nous paraît peu prometteuse, car l'expérience qu'elle propose ne peut rivaliser avec le monde réel. En revanche, certains mondes virtuels sont eux-mêmes de véritables créations qui suscitent des expériences mémorables. On peut citer à titre d'exemple «Le Bal de Paris» de Bianca Li, prix de la meilleure œuvre VR au festival de Venise en 2021, qui propose une voie plus exigeante et plus prometteuse.

Références et remerciements

Entretiens

- **Wagner James Au**, chercheur, auteur du livre *Second Life*
- **Sébastien Badault**, vice-président « Metaverse & web3 », Ledger
- **Fabrice Baeli**, head of Pixyz, Unity 3D
- **Mike Bargain**, membre du conseil d'administration, Inria
- **Alain Berthoz**, professeur émérite, Collège de France
- **Antoine Bordes**, directeur du laboratoire de recherche en IA, Meta
- **Sébastien Borget**, CEO, The Sandbox
- **Alexandre Bouchet**, CEO, Clarté
- **Morgan Bouchet**, responsable XR, Orange
- **Louis Boulanger**, ingénieur système, Dassault Aviation
- **Mathias Briatta**, director corporate, M&A and compliance, Ledger
- **Louis Cacciuttolo**, CEO, VRrOOm
- **Laurent Chrétien**, président, Laval Virtual
- **Frédéric Colas**, co-fondateur, CEO, Fast-Up Partners
- **Julie Corver**, co-fondatrice, Artpoint, membre NFT Factory
- **Marie Danet**, psychologue clinicienne et maîtresse de conférences à l'université de Lille
- **Axel Dauchez**, CEO, Make.org
- **Bertrand de la Chapelle**, directeur exécutif, Internet & Jurisdiction Policy Network
- **Romain Delassus**, chef du service du numérique, Ministère de la Culture
- **Ivan de Lastours**, blockchain lead, Bpifrance
- **Constance de Marliave**, chargée du déploiement de la marque, Musée d'Orsay
- **Alban Denoyel**, CEO, Sketchfab
- **Hector de Rivoire**, government affairs manager, Microsoft
- **Virginie Donzeaud**, administratrice générale adjointe du Musée d'Orsay
- **Nicolas Dupain**, président, Immersive Learning Lab
- **Laure Durand-Viel**, déléguée à la régulation des plateformes numériques, Direction générale des Médias et des Industries culturelles (DGMIC)
- **Alban Duverdiér**, directeur scientifique délégué, Ministère de l'Enseignement Supérieur, de la Recherche et de l'Innovation
- **Touradj Ebrahimi**, professeur, École polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL)
- **Pascal Estrailier**, conseiller scientifique en numérique et chargé de mission STIC-Informatique, Ministère de l'Enseignement Supérieur, de la Recherche et de l'Innovation
- **David Fiala**, maître de conférences à l'Université de Tours, Chargé de mission à la DGRI, département SHS, représentant le Ministère de l'Enseignement supérieur, de la recherche et de l'innovation
- **Philippe Fuchs**, ancien professeur de réalité virtuelle à l'école Mines Paris — PSL
- **Frédérique Gérardin**, déléguée générale du Comité stratégique de filière mode et luxe
- **Gaspard Giroud**, CEO, Garou
- **Olivier Godest**, directeur, Virtuality Paris
- **Christophe Guilmart**, ingénieur en chef, Direction générale de l'armement
- **Pascal Guitton**, directeur de recherche en réalité virtuelle, Inria
- **Dominique Hazaël-Massieux**, immersive web strategy expert, W3C
- **Laura Hiel**, directrice de projets innovation, économie numérique et culture, Direction générale des entreprises (DGE)
- **Isis Hobéniche**, cheffe de cabinet de Jean-Baptiste Gourdin, Direction générale des Médias et des Industries culturelles (DGMIC)
- **Soraya Jaber**, CEO, Wanderland
- **Jean-Michel Jarre**, auteur-compositeur-interprète
- **Patrick Johnson**, vice-president corporate science and research, Dassault Systèmes
- **Karen Jouve**, consultante blockchain, Wavestone
- **Luc Julia**, directeur scientifique, Renault
- **Olga Kokshagina**, enseignante-chercheuse en management de l'innovation, EDHEC Business School, membre, Conseil national du numérique (CNNum)

- **Stan Larroque**, CEO, Lynx
- **Pierre-Emmanuel Lecerf**, directeur de l'Établissement Public du Musée d'Orsay
- **Akli Le Coq**, expert technique cryptomonnaies pour la France auprès de l'OCDE, Direction Générale des Finances Publiques (DGFIP)
- **Anatole Lecuyer**, directeur de recherche en VR et technologies haptiques, Inria
- **Elizabeth Le Hot**, cheffe de service, adjointe au directeur général, Direction générale des Médias et des Industries culturelles (DGMIC)
- **Flaminia Le Maignan**, responsable des affaires publiques, Orange
- **Audrey Lohard**, chercheure, Media Lab de Sciences Po Paris
- **Micaela Mantegna**, chercheure associée, Centre Berkman Klein de l'université d'Harvard
- **Emmanuel Martin**, vice-président des affaires corporatives, Ubisoft
- **David Mas**, directeur du développement commercial, Make.org
- **Sébastien Massart**, directeur de la stratégie d'entreprise, Dassault Systèmes
- **Laure Merlin**, CEO, PlayMyTech
- **Thomas Nigro**, CTO, Wanderland
- **Julien Nivot**, head of regulatory affairs, Ledger
- **Béatrice Oeuvarard**, responsable des affaires publiques, Meta
- **Nicolas Parpex**, responsable du pôle des industries créatives, Bpifrance
- **Claude Pénicand**, vice-directeur des programmes et de la stratégie, Institut national de l'information géographique et forestière
- **Guénohé Plémert**, chef de cabinet du directeur de l'Agence de l'innovation et défense
- **Nicolas Pouard**, vice-président de l'Innovation Lab, Ubisoft
- **Mathieu Quiniou**, avocat, maître de conférences en info-com (SIC), Univ. Paris 8
- **Manal Rachdi**, architecte d'espaces virtuels et CEO, OXO Architectes
- **Olivier Rameil**, directeur senior des investissements en seed et pre-seed, Bpifrance
- **Michel Reilhac**, réalisateur de films en réalité virtuelle
- **Thomas Reynaud**, directeur général Free, Groupe Iliad
- **Rémi Rousseau**, ex-CEO, MagicLeap
- **Guillaume Roux**, Directeur du développement et des relations internationales, Musées d'Orsay et de l'Orangerie
- **Jean-Renaud Roy**, directeur, corporate affairs, Microsoft
- **Laurent Schlosser**, directeur général du développement commercial et des partenariats stratégiques, Microsoft
- **Martin Signoux**, responsable des affaires publiques, Meta
- **Guillaume Simonaire**, directeur des investissements dans les industries créatives, Bpifrance
- **Sébastien Soriano**, directeur général, Institut national de l'information géographique et forestière (IGN)
- **Lyne Stambouli**, CEO, EverRose
- **Justine Strauz**, secrétaire générale, Institut national de l'information géographique et forestière
- **Yassine Tahy**, CEO, Kinetix
- **Thomas Tassin**, directeur général, Garou
- **Sébastien Thevenet**, délégué aux entreprises culturelles, Direction générale des Médias et des Industries culturelles (DGMIC)
- **Antoine Thibault**, avocat associé, Ledger
- **Serge Tisseron**, psychiatre et membre du Conseil national du numérique (CNNum)
- **Joris Weijdom**, chercheur en réalité virtuelle, Hogeschool voor de Kunsten Utrecht (HKU)
- **Mathieu Weill**, chef de service de l'économie numérique (SEN), Direction générale des entreprises (DGE)
- **Elise Yoshida**, directrice de la communication digitale, Louboutin
- **Yingzi Yuan**, présidente, Metaverse Summit

Contributions reçues

- **ADAN**, Association pour le développement des actifs numériques
- **Rafael Alvarado**, professeur en data science à l'université de Virginie
- **Dominique Boullier**, professeur des universités, Sciences Po Paris
- **Laurent Da Dalto**, président-fondateur, Mimbus
- **Direction générale des entreprises**
- **Marie Danet**, psychologue et maître de conférences à l'université de Lille
- **Audrey Dauvet**, group general counsel, Tarkett, pour Le Cercle Montesquieu
- **Cécilie de Saint Venant**, directrice de la communication, de la marque et du mécénat, Domaine national de Chambord
- **Philippe Dewost**, directeur général, EPITA
- **EdTech France**
- **Philippe Fuchs**, ancien professeur de réalité virtuelle à l'école Mines Paris — PSL
- **François Garnier**, professeur Ecole des Arts Décoratifs, Paris
- **Frédérique Gérardin**, déléguée générale du comité stratégique de filière mode et luxe
- **Laetitia Germain-Thomas**, coordinatrice générale, PXN — Producteur-ices d'Expériences Numériques
- **Institut français**
- **La Poste — DocaPoste**
- **Make.org**
- **Metalab, Essec Business School** : Pr. **Julien Malaurent**, co-directeur académique, Pr. **Guillaume Chevillon**, co-directeur académique, **Benoit Bergeret**, co-directeur exécutif, M. **Julien Breitfeld**, consultant indépendant.
- **Nathalie Laneret**, directrice des affaires publiques, Criteo
- **Mindoza**
- **Leila Mörch-Pinchinat**, Content Policy and Society Lab, Université de Stanford
- **Franck Multon**, directeur de recherche Inria — équipe MimeTIC Rennes
- **Manal Rachdi**, architecte d'espaces virtuels et CEO, OXO Architectes
- **Judith Rochfeld** et **Célia Zolynski**, professeures de droit privé, Paris 1 Panthéon-Sorbonne
- **François-Gabriel Roussel**, maître de conférences honoraire et chercheur au laboratoire Communication, Information, Médias de l'université Sorbonne Nouvelle-Paris 3
- **Service Économique régional et Service de Coopération et d'Action Culturelle de l'Ambassade de France en Chine**
- **Syndicat des Éditeurs des Logiciels de Loisirs**
- **Syndicat national du Jeu Vidéo**
- **Indira Thouvenin**, enseignante-chercheuse HDR - UMR CNRS, Sorbonne Universités, Université de technologie de Compiègne
- **Ambre Toulemonde**, doctorante à l'Université de Versailles sur les protocoles de consensus pour les blockchains
- **Siva Vaidhyanathan**, professeur en études des médias à l'université de Virginie
- **Henri Verdier**, ambassadeur de la France pour le numérique
- **Fred Volhuer**, PDG, Atlas V

Références bibliographiques

- M. Ball, *The Metaverse: And How It Will Revolutionize Everything*. Norton & Co, 2022.
- F. Bauchard, « Le théâtre à distance à l'ère du numérique », *L'Observatoire*, 2022.
- D. Bennequin et A. Berthoz, « Several Geometries for Movements Generations », in *Geometric and Numerical Foundations of Movements*, J.— P. Laumond, N. Mansard, et J.— B. Lasserre, Éd. Cham: Springer International Publishing, 2017, p. 13-42.
- A. Berthoz, « Le déni du réel, cause de la destruction de la nature? », in *Sapiens: métamorphose ou extinction?*, Human Sciences, 2022.
- N. Carr, « Avatars consume as much electricity as Brazilians », *ROUGH TYPE*, 5 décembre 2006. <https://www.roughype.com/?p=611> (consulté le 14 juillet 2022).
- R. Caillois, *Les Jeux et les hommes*. Gallimard, Folio Essais, 1967.
- A. Coulombe, D. Gochfeld, B. Bradley, K. Laibson, R. Long, et R. Miletitch, « Virtual Reality Live Theatre on No Budget: A Model for Independent Theatrical Productions using Open-Source Social VR », in *ACM SIGGRAPH 2021 Educators Forum*, Virtual Event USA, août 2021, p. 1-2.
- D. Cureton, « Croquet Releases Beta Open Microverse IDE », *XR Today*, 21 juin 2022.
- J. Damiani, « 'The Under Presents' Is A Novel Exploration Of VR And Live Immersive Theater », *Forbes*, novembre 2019.
- J. D. N. Dionisio, W. G. B. Iii, et R. Gilbert, « 3D Virtual worlds and the metaverse: Current status and future possibilities », *ACM Comput. Surv.*, vol. 45, n° 3, p. 1-38, juin 2013.
- S. Distinguin, *Et si on vendait la Joconde?* JC Lattès, 2022.
- T. Elmasry et al., *Value creation in the metaverse, the real business of the virtual world*. McKinsey & Company, 2022.
- M. Foucault, « Des espaces autres », in *Architecture-Mouvement-Continuité*, 1984.
- D. Frey, J. Royan, R. Piegay, A.-M. Kermarrec, E. Anceaume, et F. L. Fessant, « Solipsis: A Decentralized Architecture for Virtual Environments », présenté à *1st International Workshop on Massively Multiuser Virtual Environments*, mars 2008.
- Ph. Fuchs, *Théorie de la réalité virtuelle – les véritables usages*. Les presses des Mines, 2018.
- F. Garnier, « Artistic Practices in Digital Space: An Art of the Geometries of Movement? », in *Space-Time Geometries for Motion and Perception in the Brain and the Arts*, T. Flash et A. Berthoz, Éd. Cham : Springer International Publishing, 2021, p. 237-250.
- F. Garnier, A. Berthoz, et S. Lambrey, « Art - Distance Sharing: A Virtual 3D paradigm for the study of the influence of co-presence through avatars on the emotional perception of fine arts », in *Proceedings of the Virtual Reality International Conference - Laval Virtual 2017*, New York, NY, USA, mars 2017, p. 1-6.
- C. Gartenberg, « Intel thinks the metaverse will need a thousand-fold increase in computing capability », *The Verge*, déc. 2021.
- E. Gent, « Lessons from a Second Life », *IEEE Spectr.*, vol. 59, n° 1, p. 19-19, janv. 2022.
- W. Gibson, *Neuromancer*. Ace Books, 1984.
- D. Gochfeld et al., « Holojam in Wonderland: Immersive Mixed Reality Theater », 2018.
- B. Heller, « Watching Androids Dream of Electric Sheep: Immersive Technology, Biometric Psychography, and the Law », *Vanderbilt J. Entertain. Technol. Law*, vol. 23, n° 1, p. 1, déc. 2020.
- B. Heller et A. Bar-Zeev, « The Problems with Immersive Advertising: In AR/VR, Nobody Knows You Are an Ad », *J. Online Trust Saf.*, vol. 1, n° 1, Art. n° 1, oct. 2021.
- F. Hoenig, « Why HTML is still more « Metaverse » than 3D », *Unbound Blog*, 3 mai 2022. <https://medium.com/unboundblog/why-html-is-still-more-metaverse-than-3d-8029e71e3cd7> (consulté le 19 juillet 2022).
- J. Lanier, *The Dawn of the New Everything - A Journey Through Virtual Reality*. Bodley Head Ltd, 2015.

- P. Ludlow et M. Wallace, *The Second Life Herald: the virtual tabloid that witnessed the dawn of the metaverse*. Cambridge, Mass.; London : MIT Press, 2009.
- J. Keller et G. Simon, « Toward a peer-to-peer shared virtual reality », juill. 2002, p. 695-700.
- M. Madary et T. K. Metzinger, « Real Virtuality: A Code of Ethical Conduct. Recommendations for Good Scientific Practice and the Consumers of VR-Technology », *Front. Robot. AI*, vol. 3, 2016.
- S. Malcomson, *Splinternet: How geopolitics and commerce are fragmenting the world wide web*. OR Books, 2016.
- A. Malraux, « Présentation du budget des affaires culturelles », présenté à Assemblée nationale, nov. 1963.
- C. Morningstar et R. Farmer, « The Lessons of Lucasfilm's Habitat », in *Cyberspace: First Steps*, MIT Press, 1990.
- J. H. Murray, « How Close Are We to the Holodeck? », in *Clash of Realities*, Éd. Springer Verlag, 2017, p. 29-44.
- E. Nal, « Les hétérotopies, enjeux et rôles des espaces autres pour l'éducation et la formation », *Rech. Éducatives*, n° 14, Art. n° 14, oct. 2015.
- C. Newport, « Can Virtual Reality Fix the Workplace? », *The New Yorker*, 6 décembre 2021.
- S. Nover, « Intel wants to take you inside the metaverse », *Quartz*, décembre 2021.
- J. Oloman, « Staying in to go out: exploring the VRChat club scene », *New Musical Express*, mai 2021.
- K. Perlin, « Future reality lab: inventing the XR future », in *ACM SIGGRAPH 2021 Courses*, New York, NY, USA, août 2021, p. 1-63.
- R. Ronfard et G. Taubin. *Image and Geometry Processing for 3-D Cinematography*. Springer, 2010.
- J. Rothman, « Are We Already Living in Virtual Reality? », *The New Yorker*, 26 mars 2018.F. Rousseaux et I. Thouvenin, « Exploring informed virtual sites through Michel Foucault's heterotopias », *Int. J. Humanit. Arts Comput.*, vol. 3, n° 1-2, p. 175-191, oct. 2009.
- J.M. Smart, J. Cascio, et J. Paffendorf, *Metaverse Roadmap Overview*, 2007.
- D. A. Smith, A. Kay, A. Raab, et D. P. Reed, « Croquet - a collaboration system architecture », in *First Conference on Creating, Connecting and Collaborating Through Computing*, 2003. C5 2003. Proceedings., janv. 2003, p. 2-9.
- A. Soloski, « Theater's Next Act? A Show That's All in Your Head », *The New York Times*, 8 juillet 2020.
- A. D. Souchet, D. Lourdeaux, A. Pagani, et L. Rebenitsch, « A narrative review of immersive virtual reality's ergonomics and risks at the workplace: cybersickness, visual fatigue, muscular fatigue, acute stress, and mental overload », *Virtual Reality*, juillet 2022.
- N. Stephenson, *Snow Crash*. Bantam Books, 1992.
- I. Sutherland, « The Ultimate Display », 1965, p. 506-508.
- T. J. Tanenbaum, *Nonverbal Communication in Virtual Worlds: Understanding and Designing Expressive Characters*. Carnegie Mellon University, 2014.
- P. Valery, « La conquête de l'ubiquité. », in *De la musique avant toute chose.*, Éditions du Tambourinaire., 1928.
- V. Vinge, *True Names*. Dell Publishing, 1981.
- M. M. Vopson, « The information catastrophe », *AIP Adv.*, vol. 10, n° 8, p. 085014, août 2020.
- K. Walton, *Mimesis as Make-Believe: On the Foundations of the Representational Arts*. Harvard University Press, 1990.
- J. Weijdom, *Mixed reality and the theatre of the future*. IETM, 2017.
- M. Wolf, *Building imaginary worlds*. Routledge, 2012.

Remerciements

Les co-missionnaires souhaiteraient chaleureusement remercier l'ensemble des personnes ayant contribué à partager leurs vues sur ce sujet complexe et mouvant, lors des entretiens et aux travers des nombreuses contributions écrites. Cette mission exploratoire pose les jalons d'une réflexion qu'il conviendra de poursuivre et affiner avec l'ensemble des acteurs de l'écosystème.

Un grand merci tout particulièrement à **Marie Bernhard**, rapporteure au Conseil national du numérique, et **Shanna Leduc-Morin**, qui sont intervenues au soutien tout au long de la mission. Sans leur précieux concours nous n'aurions pu mener à bien ces travaux et ces auditions.

Un mot de remerciement également aux services de la direction générale du Trésor, de la direction générale des entreprises, de la direction générale des médias et des industries culturelles, du pôle d'expertise de la régulation du numérique, ainsi que Bruno Sportisse, président-directeur général d'Inria. Nous remercions également Emmanuel Caquot et Paul Jolie pour leurs contributions. Merci enfin à l'ensemble du Conseil national du numérique, ses membres et son secrétariat général, pour leurs perspectives croisées.

Les co-missionnaires

Camille François enseigne à l'Université de Columbia, à New York, et est chercheuse à l'Institut français de Géopolitique (centre GEODE) de l'Université Paris-8 ainsi que chercheuse associée au centre Berkman-Klein Center de Harvard sur la technologie et la société. Elle travaille également pour la société Niantic, dont elle dirige l'équipe en charge de la gestion des risques sociotechniques (Trust & Safety). Ses recherches et publications portent principalement sur des questions liées à la cybersécurité, aux biais et injustices algorithmiques et à la modération des contenus.

Adrien Basdevant est avocat au Barreau de Paris, passionné par l'impact des technologies sur la société. Diplômé de l'ESSEC et de l'Université Panthéon-Assas, il travaille à l'intersection du droit, des technologies et des politiques publiques. Principalement sur des questions liant innovation (données, algorithmes, blockchain), modèles économiques (propriété intellectuelle, logiciel, plateforme) et société (libertés individuelles, cybercriminalité). Membre du Conseil national du numérique (CNNum), il a écrit plusieurs ouvrages et rapports sur les enjeux stratégiques et réglementaires du numérique.

Remi Ronfard est directeur de recherche Inria et chercheur associé à l'École des Arts Décoratifs. Il a reçu une double formation d'ingénieur et docteur en informatique à l'École des Mines de Paris et a partagé sa carrière entre la recherche privée (Dassault Systèmes, IBM TJ Watson Research Center, Xtranormal) et publique (INA, Inria). Depuis 2020, il dirige l'équipe ANIMA de l'Univ. Grenoble Alpes sur la création et la mise en scène des mondes virtuels.

