

NUMÉRIQUE & DÉVELOPPEMENT DURABLE

*ÉVOLUTIONS TECHNOLOGIQUES,
ENJEUX GÉOPOLITIQUES
ET PERSPECTIVES DE RÉGULATION EN EUROPE*

**Rapport coordonné par Bernard Benhamou secrétaire
général de l'Institut de la Souveraineté Numérique**

TABLE DES MATIÈRES

NUMÉRIQUE & DÉVELOPPEMENT DURABLE	5
INTRODUCTION	5
« <i>GREEN FOR TECH</i> » ET « <i>TECH FOR GREEN</i> »	5
ÉVALUER L'EMPREINTE CARBONE DU NUMÉRIQUE	7
I. NUMÉRIQUE DURABLE : ÉTUDES DE CAS	14
1. VILLES INTELLIGENTES ET DEVELOPPEMENT DURABLE	14
Un « exemple » de ville intelligente : Toronto	15
2. INTERNET DES OBJETS ET ENJEUX ÉNERGETIQUES	18
a. Les technologies du <i>nexus</i> « eau-alimentation-énergie »	18
b. Thermostats connectés et compteurs électriques intelligents	21
c. Vers l'autonomie énergétique des objets connectés	24
3. SANTE NUMERIQUE ET DEVELOPPEMENT DURABLE	26
a. Numérique et mutations de la chaîne de soins	26
b. Numérique et assurance : vers la prévention numérique en santé	33
II. AMÉLIORER LA DURABILITÉ DU NUMÉRIQUE	38
1. NUMERIQUE : VERS DES ÉNERGIES RENOUVELABLES	38
2. LES 4 « R » DU NUMERIQUE DURABLE REUTILISATION, REEMPLOI, RECONDITIONNEMENT ET RECYCLAGE	42
a. Obstacles technologiques et perspectives industrielles	44
b. L'indispensable consolidation de l'économie circulaire	46
c. Susciter des initiatives industrielles sur la collecte et le recyclage	48
d. Lever les freins au réemploi et au recyclage	50
e. Améliorer la réparabilité des terminaux numériques	51

f.	Union Européenne : les enjeux de la standardisation des chargeurs _____	55
III.	USAGES NUMÉRIQUES ET DÉVELOPPEMENT DURABLE _____	56
1.	MUTATIONS DES USAGES : VERS UNE « ZOOM GENERATION » ? _____	56
2.	SENSIBILISER LES USAGERS AU NUMERIQUE DURABLE _____	59
3.	VERS UN LABEL EUROPEEN SUR LE NUMERIQUE DURABLE _____	59
4.	DES MODELES ÉCONOMIQUES INCOMPATIBLES AVEC LE NUMERIQUE DURABLE ? _____	61
IV.	ÉVOLUTIONS TECHNOLOGIQUES ET MAÎTRISE DE L'ÉNERGIE _____	69
1.	DES INTELLIGENCES ARTIFICIELLES DURABLES ? _____	69
2.	CRYPTOMONNAIES : VERS UNE INDISPENSABLE OPTIMISATION ÉNERGETIQUE _____	72
3.	LA REPOSE DES ÉTATS FACE AUX CRYPTOMONNAIES _____	77
4.	METAVERS : OPTIMISATION OU GOUFFRE ÉNERGETIQUE ? _____	79
5.	VERS UN INTERNET PLUS ECONOMIQUE EN ENERGIE ? _____	81
V.	RUPTURES TECHNOLOGIQUES ET IMPACT CLIMATIQUE _____	85
1.	PERSPECTIVES DES ORDINATEURS QUANTIQUES _____	85
2.	VERS LE STOCKAGE DES DONNEES DE TRES LONGUE DUREE _____	88
3.	SUPRACONDUCTEURS : PROMESSES ET REALITES _____	90
4.	GEO-INGENIERIE : LES TECHNOLOGIES DE L'APOCALYPSE _____	92
VI.	GÉOPOLITIQUE DES TECHNOLOGIES DURABLES _____	95
1.	GUERRE EN UKRAINE : DE NOUVELLES FRACTURES TECHNOLOGIQUES _____	95
2.	GÉOPOLITIQUE DES TERRES RARES ET DES METAUX CRITIQUES _____	97
3.	PERSPECTIVES EUROPEENNES POUR LES MATIERES PREMIERES INDISPENSABLES AU NUMERIQUE _____	99
4.	LES CONSEQUENCES DES TENSIONS SINO-AMERICAINES SUR LES TECHNOLOGIES _____	100
VII.	QUELLE RÉGULATION POUR UN NUMÉRIQUE DURABLE ?	104
1.	PUISSANCE PUBLIQUE ET NUMERIQUE DURABLE _____	104

2.	VERS UNE POLITIQUE INDUSTRIELLE EUROPEENNE DU NUMERIQUE DURABLE	107
3.	EUROPE : LE ROLE CLE DE LA COMMANDE PUBLIQUE	113
4.	UN NUMERIQUE DURABLE A VISAGE EUROPEEN	116
VIII. CONCLUSIONS & RECOMMANDATIONS		118
	VERS UN LABEL EUROPEEN SUR LE NUMERIQUE DURABLE	119
RECOMMANDATIONS POUR UN NUMÉRIQUE EUROPÉEN DURABLE		121
	<i>À PROPOS DE L'ISN ET DU CITC EURARFID</i>	126
	<i>PRÉSENTATION ET REMERCIEMENTS</i>	128

NUMÉRIQUE & DÉVELOPPEMENT DURABLE

ÉVOLUTIONS TECHNOLOGIQUES, ENJEUX GÉOPOLITIQUES ET PERSPECTIVES DE RÉGULATION EN EUROPE

Rapport réalisé conjointement par l'Institut de la Souveraineté Numérique
(ISN) et le Centre d'Innovation des Technologies sans Contact (CITC)

INTRODUCTION

« GREEN FOR TECH » ET « TECH FOR GREEN »

Avec plus de 5 milliards d'utilisateurs de l'Internet soit près des deux tiers de la population mondiale et 6,5 milliards de smartphones en circulation, les technologies numériques « irriguent » aujourd'hui la totalité des secteurs de l'activité humaine. Ces technologies constituent le système nerveux de l'ensemble des organisations. Les smartphones sont ainsi devenus les « exo-cerveaux » de leurs utilisateurs et les objets connectés deviennent une extension de leurs récepteurs sensoriels. Cette diffusion du numérique dans l'ensemble des activités des personnes et des organisations rend plus complexe l'évolution de ces technologies pour les inscrire dans une trajectoire de développement durable. En effet, pour la plupart, les technologies numériques ont été élaborées avant que les préoccupations écologiques ne deviennent centrales dans nos sociétés. De surcroît, les modèles économiques qui ont permis la croissance des principaux acteurs des technologies étaient basés sur des cycles courts et sur

l'augmentation constante des ressources énergétiques et des matières premières nécessaires au fonctionnement des infrastructures numériques. Or, au même titre que l'ensemble des secteurs économiques, les acteurs du numérique doivent désormais opérer leur transition environnementale.

Cette double préoccupation sur l'impact des mesures de réduction de l'empreinte carbone du numérique et sur la réduction *via* le numérique des émissions carbone des autres industries est ainsi résumée par les experts des technologies de l'*International Journal of Information Management* :

« Il est largement établi que les technologies, sous toutes leurs formes, en sont un élément important et font partie intégrante de la solution, mais l'industrie et la société dans son ensemble considèrent également que les technologies font partie du problème. De plus en plus, les chercheurs soulignent l'importance d'une numérisation responsable pour réduire de manière significative le niveau de déchets électroniques. Les technologies font partie intégrante des efforts déployés à l'échelle mondiale pour atteindre l'objectif de neutralité carbone. Toutefois, cet objectif exigera des compromis pragmatiques pour faire évoluer nos comportements afin d'aller vers une société plus respectueuse du climat. »¹

Au vu de l'importance des infrastructures qui constituent le numérique, cette transition représente désormais un triple défi pour l'ensemble de nos sociétés. Défi technologique et industriel pour réduire l'empreinte carbone du numérique et réduire dans le même temps l'empreinte de l'ensemble des autres secteurs d'activité industrielle. Défi politique pour la puissance publique qui devra élaborer des mesures permettant d'atteindre la neutralité carbone sans pour autant remettre en cause les principes et les valeurs de nos sociétés. Défi stratégique enfin pour permettre à l'Union européenne d'occuper à l'avenir une place centrale dans le développement de ces technologies cruciales pour le développement durable et plus largement pour le devenir de nos sociétés.

¹ *Climate change and COP26: Are digital technologies and information management part of the problem or the solution? An editorial reflection and call to action* (International Journal of Information Management Volume 63, April 2022)
www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0268401221001493

ÉVALUER L'EMPREINTE CARBONE DU NUMERIQUE

Pour être en mesure d'effectuer un diagnostic sur les technologies numériques et leur impact environnemental, une évaluation quantitative précise est indispensable. Or, force est de constater que cette évaluation est encore l'objet de nombreuses controverses sur les éléments qu'il convient de prendre en compte ou encore les

“ Les technologies font partie intégrante des efforts déployés à l'échelle mondiale pour atteindre l'objectif de neutralité carbone. Cet objectif exigera des compromis pragmatiques pour faire évoluer nos comportements afin d'aller vers une société plus respectueuse du climat... ”

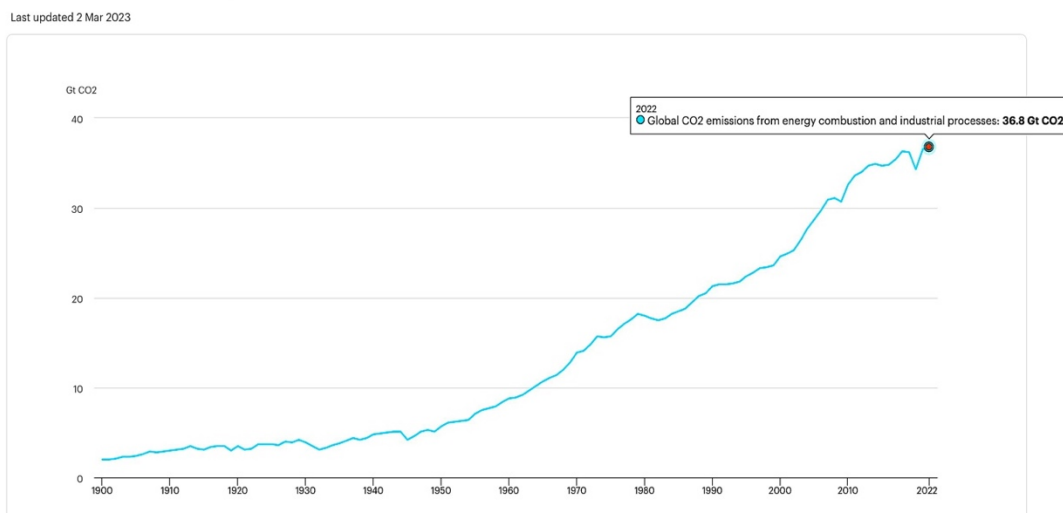
répercussions directes ou indirectes du numérique. Si un consensus relatif existe sur la part de la consommation énergétique liée au numérique, les évolutions technologiques qui pourraient faire évoluer l'empreinte carbone du numérique font encore l'objet de vives discussions tant auprès des chercheurs, de la société civile ou encore des acteurs industriels. Ces discussions prennent désormais un tour géopolitique avec la montée en puissance des tensions internationales entre les États-Unis et

la Chine autour des technologies, avec comme corollaire la remise en cause des circuits d'approvisionnement des matériaux indispensables à la fabrication de ces technologies. L'impact que pourra avoir le numérique sur la réduction de l'empreinte carbone de l'ensemble des filières industrielles fait l'objet de querelles à la fois scientifiques et politiques.

Du fait de la complexité des interactions entre le numérique et l'ensemble des processus de production industrielle, le chiffrage de cet impact reste en effet difficile à évaluer. D'autres querelles portent sur le bien-fondé des démarches qui viseraient à retarder les évolutions des secteurs les plus massivement émetteurs. C'est le cas par exemple des technologies de capture du carbone aussi appelées *CSC (Capture et Stockage du Carbone)*.

En effet, si le principe de ces technologies est soutenu par le *Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC)* ces technologies font encore l'objet de controverses sur leur faisabilité technologique ainsi que sur les conséquences qu'elles pourraient induire sur la réduction des émissions carbone des industries les plus polluantes².

Global CO2 emissions from energy combustion and industrial processes, 1900-2022



Évolution entre 1900 et 2022 des émissions mondiales de CO2 liées aux procédés industriels et aux combustibles utilisés comme source d'énergie (Agence internationale de l'énergie, 2 mars 2023)³

DETECTER LES MARGES DE PROGRESSION POSSIBLES

Pour l'Agence internationale de l'énergie, les technologies numériques sont directement responsables d'environ 2 % des émissions mondiales de gaz à effet de serre⁴. De nombreuses études envisagent un impact significativement plus élevé pour le secteur

² *La Capture et le Stockage/Utilisation du CO2. S'agit-il d'une solution déterminante pour lutter contre le réchauffement climatique ?* (Les controverses de Mines Paris, 2023)

controverses.minesparis.psl.eu/public/promo22/PC6Captage%20et%20stockage%20du%20CO2.pdf

³ *Global CO2 emissions from energy combustion and industrial processes, 1900-2022* (IEA 2 Mar 2023)

www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-co2-emissions-from-energy-combustion-and-industrial-processes-1900-2022

⁴ *Digital technologies are directly responsible for around 2% of energy-related GHG emissions today* (International Energy Agency Tracking report, September 2022)

www.iea.org/reports/digitalisation

des technologies numériques. Ainsi une étude réalisée par des chercheurs de l'université de Lancaster, a estimé que l'empreinte carbone du secteur numérique s'inscrit dans une fourchette de 2,1 à 3,9 % des émissions mondiales en 2020⁵. Enfin, le *Shift Project* dans son étude sur l'impact environnemental direct et indirect du numérique parue en 2021 établissait à 3,5 % la part des émissions mondiales liée au numérique en 2019. Cette étude analysait aussi la croissance inquiétante de son impact (+6 % par an) et décrivait cette croissance comme incompatible avec une trajectoire de +2 °C.⁶

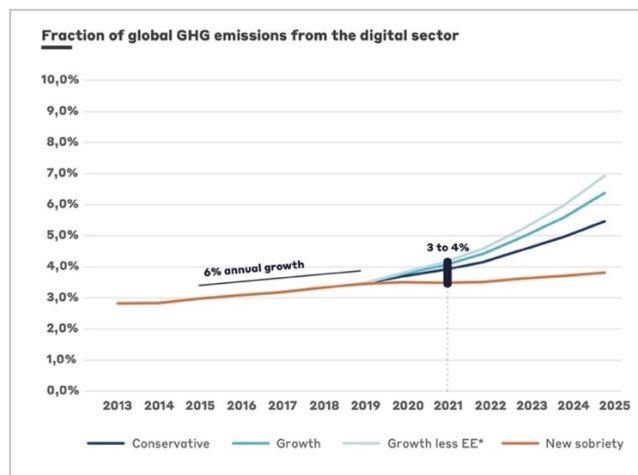


Figure 1: fraction of global GHG emissions from the digital sector from 2013 to 2025 (The Shift Project – Forecast Model 2021)
* Growth less Energy Efficiency

Scénarios d'évolution des émissions carbone liées au numérique (Shift Project, mars 2021)

Aux États-Unis, la *National Science Foundation* estime qu'en réunissant les secteurs de l'information, de la communication et des technologies, le bilan énergétique combiné de ces 3 secteurs représenterait 5 à 9 % de la consommation totale d'électricité dans le

⁵ *The real climate and transformative impact of ICT: A critique of estimates, trends, and regulations* (Charlotte Freitag, Mike Berners-Lee, Kelly Widdicks, Bran Knowles, Gordon S. Blair, Adrian Friday - Patterns Volume 2, Issue 9, 10 September 2021, 100340)
www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666389921001884

⁶ *Environmental Impacts of Digital Technology: 5-Year Trends and 5G Governance* (The Shift Project March 2021)
theshiftproject.org/wp-content/uploads/2023/02/TSP_5G_SYNTHESIS_ENG.pdf

monde. Et si cette tendance devait se poursuivre, l'informatique pourrait à elle seule représenter un cinquième de la production mondiale d'électricité d'ici à 2030⁷.

L'analyse de la distribution des émissions entre les différents acteurs et utilisateurs des technologies permet de mieux appréhender les marges de progression possibles dans les temps à venir.

Les ordinateurs portables, tablettes, smartphones et imprimantes - génèrent globalement 1,5 à 2,0 fois plus de carbone que les centres de données. Cela s'explique notamment par le fait que les entreprises possèdent beaucoup plus d'appareils destinés aux utilisateurs finaux que de serveurs dans les centres de données sur site. En outre, les appareils sont généralement remplacés beaucoup plus souvent : les smartphones ont un cycle de rafraîchissement moyen de deux ans, les ordinateurs portables de quatre ans et les imprimantes de cinq ans. En moyenne, les serveurs sont remplacés tous les cinq ans, mais 19 % des entreprises attendent plus longtemps⁸.

En plus du rythme de leur renouvellement, de la complexité des processus de production et des matériaux nécessaires à leur conception, ce sont les terminaux des utilisateurs qui concentrent l'essentiel des émissions carbone. Ainsi, pour le cabinet *McKinsey*, les premiers responsables des émissions carbone liées au numérique sont les terminaux des utilisateurs plus encore que les data centers. Selon *l'Agence internationale de l'énergie* : la consommation mondiale d'électricité des grands centres de données augmente de 10 à 30 % par an, en raison de l'augmentation constante de leur charge de travail. Et ces pourcentages seraient bien plus élevés si l'on tenait compte du minage de cryptomonnaies⁹.

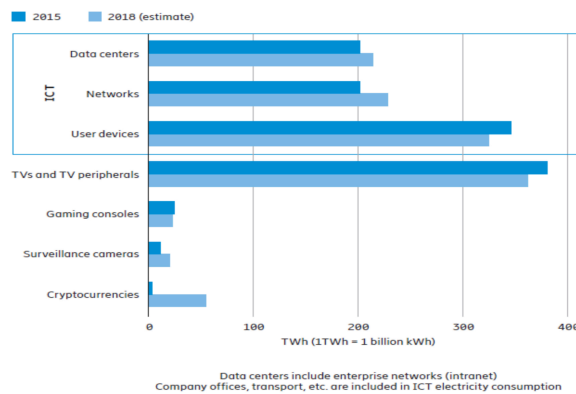
⁷ *New material for computer chips could reduce energy consumption* (National Science Foundation, Feb 2023)
www.nsf.gov/news/new-material-computer-chips-could-reduce-energy

It's estimated that the information, communication and technology sector accounts for 5% to 9% of total electricity consumption worldwide. If growth continues unabated, computing could demand up to 20% of the world's power generation by 2030.

⁸ *The green IT revolution: A blueprint for CIOs to combat climate change* (McKinsey Insights, 15 Sep 2022)
www.mckinsey.com/capabilities/mckinsey-digital/our-insights/the-green-it-revolution-a-blueprint-for-cios-to-combat-climate-change

⁹ *How to lower IT's digital carbon footprint* (TechTarget 21 Dec 2022)
www.techtarget.com/searchcio/feature/Understand-the-digital-carbon-footprint-of-enterprise-IT

Figure 5: The operation aspects of ICT electricity consumption in perspective



Consommation électrique par catégorie d'activité technologique (Ericsson 2020)¹⁰

En France, le rapport de *l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME)* et de *l'Autorité de régulation des télécommunications (ARCEP)* publié en 2022 qui visait à mesurer l'empreinte environnementale du numérique indique que ces technologies représentent actuellement 10 % de la consommation d'électricité et 2,5 % de l'empreinte carbone de la France¹¹. Des trois composantes du numérique présentées dans l'étude (terminaux et objets connectés, réseau et data centers), cette étude confirme que ce sont les terminaux (et en particulier les écrans et les téléviseurs) qui sont à l'origine de 65 à 90 % de l'impact environnemental : « 90 % de la consommation énergétique globale d'un smartphone est réalisée avant même l'achat, qu'un ordinateur portable fait en réalité 100 fois son poids en matières premières, que l'empreinte carbone d'un iPhone 7 est deux fois plus grande que celle d'un iPhone 4, et que le volume des déchets électroniques dans le monde augmente de 20 % tous les 5 ans... »¹²

Dans le cadre de son étude sur les évolutions du numérique, le *CEA* précise, que la fabrication des terminaux représente près du tiers de l'énergie consacrée au numérique :

¹⁰ *A Quick Guide to Your Digital Carbon Footprint* (Ericsson 2020)

www.ericsson.com/4ac671/assets/local/reports-papers/consumerlab/reports/2020/ericsson-true-or-false-report-screen.pdf

¹¹ *Évaluation environnementale des équipements et infrastructures numériques en France* (ARCEP-ADEME 2022)

www.arcep.fr/actualites/actualites-et-communiqués/détail/n/environnement-190122.html

¹² *Tech it Green, Transformation numérique et transition écologique : construire la double révolution du 21^e siècle* (coordonné par Isabelle Albert pour le G9+, 2020)

Environ 30 % de la consommation d'énergie liée aux technologies numériques peut être attribuée aux processus de fabrication. Le reste correspond à leur utilisation et se répartit entre les utilisateurs (44 %), les réseaux (32 %) et les data centers (24 %). Les ordinateurs, les téléviseurs, les smartphones et les objets connectés sont les principaux responsables (par ordre décroissant) de la consommation d'énergie. Les écrans et les processeurs étant particulièrement gourmands en énergie.¹³

L'Union européenne souhaite ainsi que les data centers deviennent neutres en carbone d'ici à 2030. L'efficacité énergétique des data centers est ainsi évaluée par le *PUE* (*Power Usage Effectiveness*). Cet indicateur correspond à l'énergie consommée par le data center, divisée par l'énergie utilisée par les équipements informatiques. Les data centers traditionnels ont ainsi vu leur *PUE* passer de 2,23 en 2010 à 1,93 en 2020. En revanche, les plus grands fournisseurs de cloud affichent désormais un *PUE* entre 1,18 et 1,25.¹⁴

Cependant, l'impact environnemental des data centers ne saurait être réduit à leur seule efficacité énergétique. La consommation d'eau de ces data centers apparaît désormais comme un autre indicateur essentiel pour leur durabilité. En effet, dans le même temps, la progression de l'efficacité énergétique des data centers ne s'est pas traduite par une plus grande sobriété dans la consommation d'eau. Jusqu'à une période récente, la consommation d'eau des data centers faisait l'objet d'un embargo de la part des principaux acteurs de ce secteur. À titre d'exemple, les data centers de *Google* ont vu leur consommation d'eau d'augmenter de 20 % en 2022 pour un total de 21 milliards de litres d'eau dont la majorité était de l'eau potable¹⁵. Or, la montée en puissance des systèmes d'intelligence artificielle pourrait encore augmenter les besoins en puissance (et donc en refroidissement) des data centers dans les années à venir.

¹³ *The Digital Future, The CEA's vision and strategy* (CEA, Oct 2021)
www.cea.fr/english/Documents/ces/Rapport_MN_EN_final.pdf

¹⁴ *Data centre water consumption* (Mytton, D. npj Clean Water 4, 11 (15 Feb 2021)).
www.nature.com/articles/s41545-021-00101-w

¹⁵ *Google's water use is soaring. AI is only going to make it worse* (Business Insider, 25 Jul 2023)
www.businessinsider.com/google-water-use-soaring-ai-make-it-worse-data-centers-2023-7

Des dispositifs spécifiques ont aussi été élaborés pour inciter les data centers à accélérer leur transition vers les énergies renouvelables. Ainsi, la *loi visant à réduire l'empreinte environnementale du numérique (REEN)*¹⁶ prévoit de renforcer les conditionnalités environnementales qui s'appliqueront au tarif réduit de la *taxe intérieure de consommation finale d'électricité (TICFE)* applicable aux data centers. Ainsi que des mesures de réutilisation de la chaleur fatale [*chaleur dérivée d'un site de production, qui n'en constitue pas l'objet premier, et n'est pas nécessairement récupérée*], et de limitation dans la consommation d'eau à des fins de refroidissement seront valorisées.

Cependant, malgré les progrès réalisés ces dernières années en termes de maîtrise de la consommation électrique des data centers, et de réduction de leurs besoins de refroidissement, leur consommation d'énergie continue d'augmenter. Ainsi, d'après une étude commandée par la Commission européenne en 2020, malgré les mesures envisagées, la consommation d'énergie des data centers devrait augmenter de 28 % d'ici à 2030.¹⁷

CONJUGUER TRANSITION NUMERIQUE ET ÉCOLOGIQUE

Plus encore que la seule sobriété des data centers, c'est l'architecture générale des usages technologiques qu'il convient aujourd'hui d'analyser pour le cas échéant remettre en cause certains des usages (ou des modèles économiques) qui conduisent au recours massif à des technologies fortement émettrices de carbone. Conjuguer les transitions numériques et écologiques doit désormais constituer une priorité pour les pays de l'Union. Cette double transition doit aussi épouser les principes et les valeurs des Européens. Pour cela, l'Europe doit être en mesure de concevoir et développer une "troisième voie européenne" pour

¹⁶ *Loi n° 2021-1485 du 15 novembre 2021 visant à réduire l'empreinte environnementale du numérique en France*
www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000044327272

¹⁷ *Energy-efficient Cloud Computing Technologies and Policies for an Eco-friendly Cloud Market* (Environment Agency Austria & Borderstep Institute 2020)
www.actu-environnement.com/media/pdf/news-36483-etude-UE-consommation-energie-centre-donnees-cloud.pdf

des technologies numériques qui seront à la fois plus durables et plus protectrices des libertés et des individus. Ainsi, devront être conjuguées à la fois des évolutions technologiques mais aussi des mesures de sensibilisation des citoyens et des acteurs industriels ainsi que les mesures d'encadrement juridique pour permettre de développer un numérique durable à visage européen.

I. NUMÉRIQUE DURABLE : ÉTUDES DE CAS

1. VILLES INTELLIGENTES ET DEVELOPPEMENT DURABLE

En l'espace de quelques années, le champ d'application des technologies de « l'Internet des objets » (*IdO/IoT*) n'a cessé de s'étendre : de l'optimisation des processus industriels à la maîtrise de l'énergie, des transports autonomes au contrôle environnemental, de la sécurité sanitaire à la santé et l'agriculture. Ces technologies ont contribué au développement de nouvelles filières industrielles et aident à la mise en œuvre des politiques publiques en particulier dans le domaine environnemental. Les projets des gouvernements, des administrations et des collectivités territoriales intègrent déjà de nombreux volets basés sur l'Internet des objets, qu'il s'agisse de l'organisation des transports, de la sécurité sanitaire ou encore des villes intelligentes.

Pour les acteurs industriels des technologies, les villes intelligentes constituent parmi les plus importants débouchés en termes de marchés en particulier pour l'Internet des objets. Les technologies de l'Internet des objets participent déjà à la mise en œuvre de l'ensemble des politiques publiques à l'échelle locale ; avec en premier lieu la maîtrise de l'énergie et le contrôle environnemental, mais aussi l'organisation des transports, le contrôle des grands réseaux d'infrastructures ou encore la sécurité sanitaire. La gouvernance des projets de villes intelligentes est désormais un enjeu stratégique et politique pour les acteurs publics comme pour les citoyens.

Les bâtiments intelligents permettent de réduire la consommation d'énergie, de diminuer les coûts et de générer des revenus. Les entreprises de haute technologie peuvent développer des produits et

des services de bâtiments intelligents pour les vendre, tout en les testant et en les utilisant pour atteindre leurs propres objectifs de durabilité. Les processus automatisés peuvent aider à contrôler les opérations des bâtiments, telles que la climatisation, l'éclairage et la sécurité. Cela permet aux entreprises de réduire la consommation d'énergie, d'optimiser l'espace et de minimiser l'impact environnemental de leurs bâtiments. ¹⁸

Les collectivités territoriales seront ainsi amenées à jouer un rôle essentiel dans le déploiement des prochaines générations des technologies des villes intelligentes et plus généralement des projets d'aménagement numérique du territoire. L'architecture de ces projets ainsi que les orientations stratégiques de ces projets devront pouvoir être analysées par les acteurs de ces collectivités afin d'en mesurer les impacts environnementaux à court, moyen et long terme ainsi que les conséquences sur les modalités d'organisation de la vie des citoyens des collectivités. En effet, ces technologies pourront avoir des conséquences profondes à la fois sur l'organisation économique, sociale et culturelle de la vie dans les territoires. Au sens premier du terme, ces choix technologiques des collectivités seront politiques et devront donc relever de la décision des représentants de ces collectivités en plein accord avec l'ensemble des citoyens. À cet effet, des fonctions de coordinateurs des technologies durables des territoires devront être créées à l'échelle des régions et des communautés d'agglomération afin d'accompagner la mise en place de ces projets au sein des collectivités.

Un « exemple » de ville intelligente : Toronto

Dans le monde entier, de nombreuses collectivités territoriales mettent en place de projets de territoires intelligents à l'échelle des villes mais aussi des régions voire de pays entiers. En effet, les informations recueillies par les capteurs des objets connectés présents dans les villes constituent des éléments essentiels pour l'optimisation des transports ou encore la maîtrise de l'énergie. Mais ces données constituent aussi un

¹⁸ *How IoT helps environmental, social and governance goals (Vikrant Viniak senior managing director at Accenture, TechTarget 28 Mar 2023)*

www.techtarget.com/iotagenda/post/How-IoT-helps-environmental-social-and-governance-goals

important gisement de valeur pour les acteurs publicitaires qui peuvent ainsi bénéficier d'analyses comportementales de plus en plus précises. Ainsi, ces projets peuvent aussi donner lieu à des dérives lorsque les acteurs publics ne sont pas en mesure de contrôler les orientations stratégiques des sociétés à qui ils concèdent ces marchés de villes intelligentes. Cela a été le cas avec la ville de Toronto lorsqu'elle a confié à une filiale de *Google (Sidewalk Labs)* le soin d'organiser les fonctions et les services de ville intelligente du quartier *Quayside*. Ce projet avait pour objectif de créer une expérimentation de ville du futur en taille réelle et ainsi d'installer *Google* comme l'un des acteurs majeurs des technologies des villes intelligentes, sobres et durables.

Cependant, les observateurs ont progressivement noté d'étranges et dérangeantes similarités entre le projet de ville intelligente de *Google* et les orientations du « *Crédit social* » chinois : notation des « bons » comportements et sanctions pour les autres. En particulier pour les citoyens qui refusent la « transparence » et ne communiquent pas leurs informations personnelles. Le journal canadien *Globe & Mail* a ainsi obtenu les documents préparatoires à ce projet qui décrivaient comment la filiale de *Google* comptait : « *percevoir ses propres taxes, suivre et prédire les mouvements des personnes et contrôler certains services publics. [...] Cette expérience serait en partie basée sur la quantité de données que les usagers acceptent de partager, et qui pourraient finalement servir à récompenser les gens pour « bon comportement... »*¹⁹. Il est à noter que c'est l'intervention des citoyens de Toronto, relayée par une intense campagne de presse²⁰, qui a remis en question l'existence même de cette initiative. Ainsi, en mai 2020, la filiale de *Google* annonçait qu'elle abandonnait définitivement son projet de ville intelligente à Toronto²¹.

¹⁹ *Sidewalk Labs document reveals company's early vision for data collection, tax powers, criminal justice* (Globe & Mail 30 Oct 2019)

www.theglobeandmail.com/business/article-sidewalk-labs-document-reveals-companys-early-plans-for-data/

²⁰ *Google wants to run cities without being elected. Don't let it* (The Guardian 24 Oct 2017)

www.theguardian.com/commentisfree/2017/oct/24/google-alphabet-sidewalk-labs-toronto

²¹ *Why we're no longer pursuing the Quayside project — and what's next for Sidewalk Labs* (Daniel L. Doctoroff, Medium May 7 2020)

medium.com/sidewalk-talk/why-were-no-longer-pursuing-the-quayside-project-and-what-s-next-for-sidewalk-labs-9a61de3fee3a

La connexion à l'Internet de l'ensemble des objets qui nous environnent, constitue un défi stratégique et politique pour l'ensemble des acteurs industriels et des États européens. En effet, en l'espace de quelques années, le champ d'application des technologies de l'Internet des objets n'a cessé de s'étendre : de l'optimisation des processus industriels à la maîtrise de l'énergie, des transports autonomes au contrôle environnemental, de la sécurité sanitaire à l'agriculture. Les projets des gouvernements, des administrations et des collectivités territoriales intègrent déjà de nombreux volets basés sur l'Internet des objets, qu'il s'agisse de l'organisation des transports, de la sécurité sanitaire ou encore des villes intelligentes. Ces technologies ont aussi contribué au développement de nouvelles filières industrielles et peuvent aussi aider à la mise en œuvre des politiques publiques en particulier dans le domaine environnemental.

“ *L'Internet des objets pourrait permettre à l'Europe de faire entrer en synergie les politiques environnementales et les politiques liées à la protection des données...* ”

L'Internet des objets représente un enjeu politique, industriel et technologique majeur pour les acteurs européens. En effet, les technologies des objets connectés sont en mesure de transformer l'ensemble de nos économies mais aussi nos modes de vie.

L'Internet des objets pourrait aussi permettre à l'Europe de faire entrer en synergie les politiques environnementales et les politiques liées à la protection des données. En effet, les technologies de la maîtrise de l'énergie et du contrôle environnemental (que l'on nomme aussi *climate tech*²²) reposent largement sur l'analyse d'informations issues des capteurs des objets connectés.

²² *The State of Climate Tech 2020* (Price Waterhouse Cooper - Sept 2020)
www.pwc.com/gx/en/services/sustainability/assets/pwc-the-state-of-climate-tech-2020.pdf

À mesure que ces technologies se diffuseront auprès des entreprises mais aussi dans l'espace public, la maîtrise de l'empreinte carbone des objets connectés ainsi que la protection des données issues de ces objets deviendront des éléments clés pour leur acceptabilité et constitueront des facteurs de différenciation et de confiance pour les technologies européennes au-delà même des frontières de l'Union.

2. INTERNET DES OBJETS ET ENJEUX ÉNERGETIQUES

a. Les technologies du *nexus* « eau-alimentation-énergie »

Selon les prévisions du cabinet *Statista*, plus de 75 milliards d'appareils connectés à l'Internet des objets (*IdO* ou *IoT* pour *Internet of Things*) seront en service en 2025. Il s'agit d'un quasi-triplement de la base d'appareils connectés installés en 2019²³. Du fait de leur croissance et des aspects spécifiques liés à leurs durées de vie et à leur recyclage, les appareils qui constituent l'Internet des objets constituent un ensemble hétérogène et un défi environnemental complexe.

Ces objets connectés souvent équipés de capteurs constituent aussi une opportunité de rendre plus efficaces la gestion des ressources énergétiques mais aussi hydriques et alimentaires dans l'ensemble des filières industrielles et agricoles. Ces objets connectés sont au cœur de ce que les *Nations unies* appellent désormais le "*nexus eau-alimentation-énergie*" :

« L'eau, l'alimentation et l'énergie forment un « nexus » au cœur du développement durable. L'agriculture est le plus grand consommateur des ressources mondiales en eau douce, et l'eau est utilisée pour produire la plupart des formes d'énergie... La demande pour les trois éléments de ce nexus augmente rapidement. Pour affronter les demandes actuelles et futures, les gouvernements

²³ *Internet of Things (IoT) connected devices installed base worldwide from 2015 to 2025* (Statista 2023)
www.statista.com/statistics/471264/iot-number-of-connected-devices-worldwide/

doivent assurer une gestion intégrée et durable de l'eau, de l'alimentation et de l'énergie afin d'équilibrer les besoins des personnes, de la nature et de l'économie. »²⁴

L'Internet des objets pourrait ainsi jouer un rôle crucial dans la réduction de l'empreinte carbone du secteur des technologies et plus largement dans l'ensemble des filières de production et de distribution. En effet, l'une des utilisations prioritaires des capteurs

“ L'eau, l'alimentation et l'énergie forment un « nexus » au cœur du développement durable. L'agriculture est le plus grand consommateur des ressources mondiales en eau douce, et l'eau est utilisée pour produire la plupart des formes d'énergie... ”

**United Nations
UN Water 2023**

présents dans les objets connectés de ce que l'on nomme *Internet industriel* ou *Industrie 4.0*, correspond à l'optimisation énergétique en temps réel sur les sites de productions²⁵.

Mais, au-delà des appareils électroniques et autres capteurs intelligents, de nouveaux dispositifs d'identification des objets traditionnels (denrées alimentaires, médicaments, meubles, vêtements...) font désormais partie intégrante de ce que l'on nomme « Internet des objets ». En effet, en plus d'identifier les objets, ces dispositifs permettent d'effectuer un suivi en temps réel des objets et aussi

d'optimiser les différentes étapes du cycle de vie de ces objets au-delà de leur conception et après leur distribution.

Parmi les plus anciennes technologies utilisées pour le traçage des objets figurent les puces à identification par radiofréquence (ou puces *RFID*). Ces puces dont les principes

²⁴ *Water, Food and Energy UN Water 2023*

www.unwater.org/water-facts/water-food-and-energy

²⁵ Voir sur ce point le rapport "*Internet des objets & Souveraineté numérique : perspectives industrielles et enjeux de régulation*" publié conjointement par l'Institut de la Souveraineté Numérique et l'AFNIC en 2021

www.souverainetenumerique.fr/sites/default/files/IO_TetSouveraineteNum-ISN-AFNICvFR.pdf

ont été découverts à l'issue de la seconde guerre mondiale ont été conçues à l'origine pour l'identification des objets en particulier dans le domaine militaire. Les puces *RFID* les plus simples sont équipées d'un processeur et d'une antenne. Cette antenne permet l'activation du processeur via une brève impulsion électromagnétique. Leur fonction est alors de répondre à cette impulsion en déclinant la série de chiffres codée sur leur processeur.

À mesure que leur prix diminuait, ces puces *RFID* ont progressivement été utilisées pour optimiser les opérations logistiques dans l'ensemble des secteurs liés aux transports et à la distribution. Dans un premier temps, les fonctions associées à ces puces n'intervenaient pas au-delà du point de vente. Par la suite, comme cela a été le cas pour les codes-barres, de nouveaux dispositifs de lecture ont permis aux utilisateurs de disposer d'informations sur les produits : origine, modalité d'emploi, composition ou encore qualités nutritionnelles.

Mais, à la différence des codes-barres qui permettent l'identification générique des objets de la grande distribution, les puces *RFID* permettent d'identifier chaque objet de manière unique. Ces puces permettent ainsi d'associer à l'identifiant individuel d'un objet des informations sur l'ensemble de son cycle de vie de depuis son assemblage jusqu'à sa distribution. Durant la vie du produit ces puces pourraient ainsi fournir des informations sur sa composition, ses conditions d'utilisations, les modalités de son recyclage ou l'évolution de son empreinte carbone. Désormais des puces *RFID* peuvent être utilisées pour effectuer le suivi des produits depuis la conception jusqu'à la distribution et le recyclage. Ces technologies pourraient ainsi aider à quantifier ainsi qu'à optimiser l'empreinte carbone des produits. Grâce à cet identifiant unique associé à l'objet, il devient possible de connaître l'empreinte carbone spécifique d'un produit qui peut varier durant le cycle de vie et aussi en fonction des processus de conception ou de fabrication. Ainsi, deux produits identiques peuvent avoir des empreintes carbone très différentes.

L'un des acteurs pionniers dans l'utilisation de ces technologies d'identification des produits est la société *Decathlon*, première chaîne de distribution mondiale de matériel

sportif, qui a choisi en 2018 d'équiper de puces *RFID* la quasi-totalité de ses articles²⁶. Pour *Decathlon*, l'équation économique de l'étiquetage *RFID* était différente des autres acteurs de la grande distribution. En effet, 80 % des produits vendus par l'enseigne sportive sont issus de ses propres marques. Cela permet dès l'origine d'intégrer l'ensemble des informations sur les matériaux utilisés, les processus de fabrication, de production et de distribution et de suivre les produits jusqu'au recyclage. Pour chaque ligne de produits, l'ensemble des émissions carbone liées à la fabrication et au transport peuvent alors être analysées et optimisées.

À terme, des puces *RFID* devraient même permettre aux utilisateurs de connaître l'empreinte carbone individuelle de chacun des objets qui seraient alors dotés d'identifiants uniques. Pour un même produit cette empreinte carbone pourrait être amenée à évoluer en fonction des lieux ou des processus de production. Ces puces *RFID* permettent déjà d'optimiser les flux logistiques en particulier pour réduire les transports nécessaires à l'acheminement des produits. À terme des puces intégrées sous forme de fil textile pourraient même faciliter les démarches de recyclage des vêtements et aussi aider les démarches liées à l'économie circulaire²⁷.

b. Thermostats connectés et compteurs électriques intelligents

Les appareils connectés liés à la maîtrise de l'énergie (compteurs électriques intelligents, thermostats connectés, capteurs pour l'optimisation énergétiques en entreprise...) constituent l'un des secteurs clés de la croissance des technologies de l'Internet des objets. En effet, l'optimisation de la consommation d'énergie par les usagers mais aussi

²⁶ *Decathlon aura 100 % de produits étiquetés en RFID en juin* (Revue du Digital, 20 mars 2018)

www.larevuedudigital.com/decathlon-atteindra-100-de-produits-etiquetes-rfid-en-juin/

²⁷ *Primo1D s'associe à Decathlon pour optimiser le recyclage des textiles grâce à sa technologie E-Thread RFID* (EIN Presswire 06 juin 2023)

www.einpresswire.com/article/637935659/primod-s-associe-decathlon-pour-optimiser-le-recyclage-des-textiles-gr-ce-sa-technologie-e-thread-rfid

par les entreprises est devenue un impératif et ce tout particulièrement depuis la guerre en Ukraine et ses conséquences sur l'augmentation des prix de l'énergie.

En 2021, on estimait à 9 milliards le nombre de dispositifs automatisés numériques utilisés dans le monde, dont 1 milliard de compteurs électriques intelligents. L'analyse de *l'Agence internationale de l'énergie*, indique une forte croissance dans le déploiement de ces technologies, qui pourrait encore être stimulée par l'évolution des cadres politiques et réglementaires.²⁸

Selon le cabinet *Market.us*, à lui seul le marché mondial des thermostats connectés représentait 3,7 milliards de dollars en 2022 et devrait atteindre 27,8 milliards de dollars en 2032²⁹. En plus des économies individuelles en énergie à l'échelle des foyers, ces thermostats permettent d'améliorer la gestion de la consommation à l'échelle d'un quartier ou même d'une ville. Ils permettent ainsi de lisser la consommation et ainsi de diminuer le « pic » de consommation entre 18 et 20 heures. En effet, ce sont les dépenses nécessaires à soutenir la charge de ces pics de consommation électrique qui génèrent les plus importantes dépenses d'infrastructure pour les fournisseurs et distributeurs d'énergie. Parce qu'ils permettent à la fois d'acquérir une connaissance plus fine des habitudes des usagers et un contrôle de leur consommation, ces thermostats connectés initialement perçus comme des produits *B2C (Business to Consumer)* sont devenus l'un des leviers de l'optimisation des activités de la production et de la distribution d'énergie pour les opérateurs.

Dans l'Union européenne, les systèmes de contrôle automatisés des bâtiments seront obligatoires à partir de 2025 pour les bâtiments non résidentiels utilisant des équipements de refroidissement ou de chauffage consommant plus de 290 kW aux heures de pointe, lorsque cela est techniquement

²⁸ *International Energy Agency Tracking report* (Sept 2022)
www.iea.org/reports/digitalisation

²⁹ *Global Smart Thermostat Market by Product (Connected, Standalone, and Learning), Market Assessment, Competition Scenario, Trends, and Forecast 2023-2032* (Market.us March 2023)
market.us/report/smart-thermostats-market/

et économiquement faisable. La Commission européenne a également publié récemment son plan d'action pour la numérisation de l'énergie.³⁰

Un autre aspect important lié à l'essor de ces technologies sera lié à la protection des données personnelles des utilisateurs des dispositifs d'économie d'énergie. En effet, l'analyse des données comportementales sur les usages numériques ou encore sur les schémas de consommation énergétique (avec les compteurs intelligents de type *Linky*) pourrait aussi être utilisée à des fins de profilage publicitaire mais aussi (de manière plus inquiétante) pour permettre le profilage ethnique ou religieux des usagers. Ainsi, l'absence ou la diminution de consommation électrique à des périodes précises permettent de déduire si l'utilisateur modifie sa consommation par exemple lors du mois du ramadan ou le vendredi soir et le samedi pour les personnes qui observent le shabbat. Ces questions avaient déjà commencé à se poser lors de la mise en place de l'initiative américaine *Green Button* d'ouverture sélective des données de consommation énergétique mise en place en 2012 par l'administration Obama³¹.

Dans la perspective de la mise en place d'un espace européen des données sur l'énergie (*European Energy Data Space*³²), les initiatives qui permettront de transmettre les informations issues des compteurs électriques intelligents vers des sociétés tierces afin de proposer de nouveaux services d'optimisation énergétique devront prendre en compte ces nouvelles formes d'analyses des données à des fins d'analyse comportementale. En effet, l'analyse des données en masse s'est largement démocratisée et pourrait l'être plus encore avec la généralisation des outils d'intelligence artificielle.

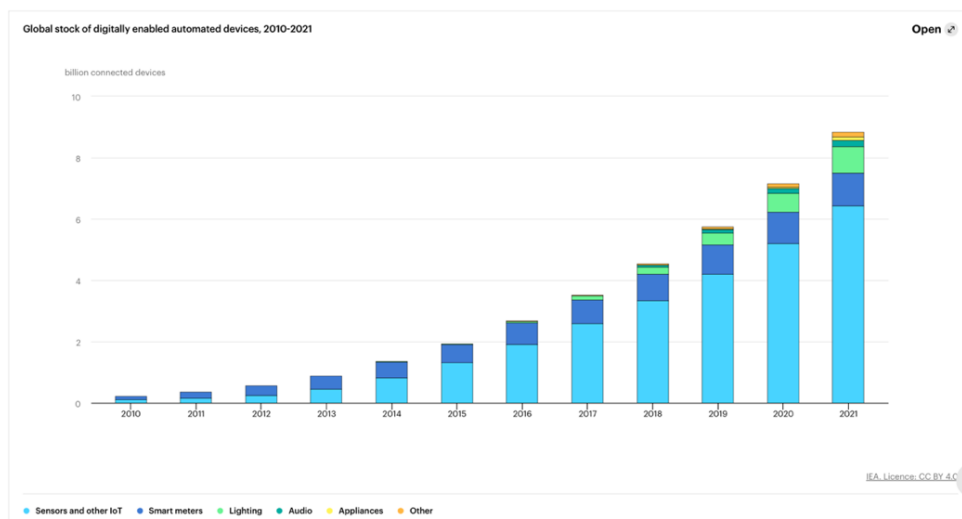
³⁰ Ibid.

³¹ *Green Button Momentum* (White House Jun 7, 2012)

obamawhitehouse.archives.gov/blog/2012/06/07/green-button-momentum

³² *Digitalisation of energy: best practices for data sharing* (European Commission 18 Feb 2022)

digital-strategy.ec.europa.eu/en/news/digitalisation-energy-best-practices-data-sharing



Objets et compteurs électriques connectés (International Energy Agency Tracking report, Sept 2022)³³

c. Vers l'autonomie énergétique des objets connectés

Au-delà des terminaux ordinateurs et des smartphones ou encore des téléviseurs ou autres tablettes connectées, de très nombreux autres dispositifs sont désormais connectés à l'Internet : qu'il s'agisse d'objets médicaux connectés, de capteurs environnementaux, ou encore de réseaux de capteurs présents dans les villes ou les usines intelligentes. Du fait de leur nombre, les milliards de dispositifs connectés qui forment l'Internet des objets posent des questions nouvelles sur leur durabilité ainsi que sur leur empreinte carbone.

Les capteurs (ou *sensors*) forment en effet le « cœur » de la plupart de ces objets connectés³⁴. Leur rôle est souvent de témoigner des modifications de leur environnement et en particulier de mesurer l'efficacité énergétique des processus

³³ *International Energy Agency* (Tracking report, September 2022)

www.iea.org/reports/digitalisation

³⁴ *Sensors - the Heart of the IoT* (TechBriefs, 27 Jul 2023)

www.techbriefs.com/component/content/article/tb/stories/blog/48649

industriels en temps réel³⁵. Ainsi, au-delà de l'identification des objets, des capteurs ont progressivement été associés aux puces *RFID*. Si les puces *RFID* dites passives ne disposent pas de source d'énergie interne, les capteurs actifs nécessitent une source permanente d'énergie le plus souvent sous forme de batteries. Ainsi, la consommation ou plutôt l'autonomie énergétique des capteurs constitue déjà un enjeu majeur pour les acteurs de l'Internet des objets. Cette autonomie représente un enjeu stratégique tant d'un point de vue environnemental qu'industriel. En effet, les capteurs actifs nécessitent des batteries qui constituent une limitation importante en termes de durée de vie (et donc de risque d'obsolescence programmée) mais aussi en termes de coût énergétique lors de leur remplacement. Ainsi, de nombreux industriels établissent des programmes de recherche sur la récolte d'énergie ambiante (aussi appelée en anglais *energy harvesting*)³⁶. Cela permet à ces capteurs d'utiliser l'énergie liée aux variations physiques de leur environnement plutôt que d'emporter leur propre source d'énergie sous forme de batterie. Cette « moisson » d'énergie peut utiliser les vibrations de l'objet, les variations thermiques, lumineuses ou encore l'énergie issue d'autres ondes électromagnétiques comme les fréquences utilisées par le wifi³⁷.

Un autre aspect crucial de la durabilité des objets connectés sera lié à la capacité des utilisateurs de ces objets à pouvoir les mettre à jour en cas de défaillance de la société qui les a conçus. En effet, à la différence des produits industriels traditionnels, les objets connectés dépendent de la connexion vers les serveurs de leurs constructeurs pour fonctionner. Ainsi, en cas d'arrêt d'activité de la société qui a conçu le produit, l'objet cesse lui aussi de fonctionner. En plus des risques d'obsolescence ou de « mort programmée », cette particularité pose aussi des problèmes de sécurité et ce d'autant plus que ces objets peuvent n'être que difficilement accessibles lorsqu'ils sont présents

³⁵ *IoT Devices Are Changing the Global Emissions Game* (Industry Week, 2 Dec 2022)

www.industryweek.com/technology-and-iiot/energy/article/21255774/iot-devices-are-changing-the-global-emissions-game

³⁶ *Battery-free smart devices to harvest ambient energy for IoT* (European Commission - Horizon Mag 30 Sept 2022)

ec.europa.eu/research-and-innovation/en/horizon-magazine/battery-free-smart-devices-harvest-ambient-energy-iiot

³⁷ *WiFi Energy-Harvesting Antenna Inspired by the Resonant Magnetic Dipole Metamaterial*. Sun Z, Zhao X, Zhang L, Mei Z, Zhong H, You R, Lu W, You Z, Zhao J. (Sensors (Basel), Aug 30 2022)

www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC9460457

dans l'environnement urbain. En effet, lorsque le logiciel interne (*firmware* ou *micrologiciel*) d'un objet n'est plus mis à jour, cet objet devient encore plus vulnérable aux cyberattaques et aux intrusions.

Afin de prolonger la vie des objets connectés et ainsi diminuer leur empreinte carbone, des mesures d'encadrement des technologies devront être mises en place afin d'être en mesure de continuer à effectuer des mises à jour sur ces objets connectés lorsqu'ils ne seront plus « supportés » par la société qui les a produits.

Pour les acteurs des technologies, il s'agit désormais de prendre en compte l'ensemble de la consommation d'énergie durant le cycle de vie d'un produit depuis sa conception jusqu'à son recyclage. On évoque dans ce cas la notion *d'énergie intrinsèque* ou *énergie grise* ou encore *énergie incorporée* (en anglais *emergy* pour *embodied energy*) *c'est l'énergie consommée pour construire un objet. Elle comprend l'énergie provenant de l'extraction, du raffinage, du traitement, du transport et de la fabrication des matériaux*³⁸. À cette notion d'énergie intrinsèque est désormais associée l'empreinte carbone totale d'un objet.

La mention de cette énergie intrinsèque pourrait utilement figurer sur les terminaux et autres objets connectés afin de permettre aux utilisateurs ainsi qu'aux acheteurs en entreprises mais aussi auprès des administrations et des collectivités territoriales de mieux percevoir les conséquences environnementales de leurs choix technologiques.

3. SANTE NUMERIQUE ET DEVELOPPEMENT DURABLE

a. Numérique et mutations de la chaîne de soins

La montée en puissance des questions liées à l'empreinte carbone des différents secteurs d'activité a progressivement permis de développer récemment des recherches sur

³⁸ Définition de l'Encyclopédie Energie de l'Université de Calgary (2023)
energyeducation.ca/fr/Énergie_grise

l'empreinte carbone du secteur de la santé. Ces études signalent le niveau élevé des émissions carbonées liées aux structures de soins et leur lien étroit avec le niveau des dépenses de santé :

- *L'empreinte carbone des soins de santé équivaut à 4,4 % des émissions nettes mondiales (2 gigatonnes d'équivalent CO₂).*
- *Les trois principaux émetteurs, les États-Unis, la Chine et les pays de l'Union européenne, représentent plus de la moitié de l'empreinte climatique totale du secteur de la santé dans le monde (56 %).³⁹*

“ L'empreinte carbone des soins de santé équivaut à 4,4 % des émissions nettes mondiales, soit environ 2 gigatonnes d'équivalent CO₂...”

L'évolution du système de santé a souvent été analysée sous l'angle économique et en particulier sur la part des dépenses rapportées au *produit intérieur brut (PIB)* des pays de l'Union européenne. À chaque génération, les technologies médicales liées au soin et au diagnostic ont été perfectionnées et sont devenues plus coûteuses et plus énergivores en particulier dans le domaine de l'imagerie. **Ainsi, l'étude publiée en 2022 par le *Journal of***

clinical medicine estime qu'à elles seules les technologies d'imagerie médicale comme la tomodensitométrie (scanners) et l'*IRM* (imagerie par résonance magnétique) sont responsables de 1 % des émissions mondiales de carbone⁴⁰.

³⁹ *Health Care's Climate Footprint* (Health Care Without Harm, September 2019)
noharm-global.org/sites/default/files/documents-files/5961/HealthCaresClimateFootprint_092319.pdf

⁴⁰ *Climate Change, Carbon Dioxide Emissions, and Medical Imaging Contribution* (E, Picano Mangia C, D'Andrea A. *Journal of clinical medicine* 27 Dec 2022)
www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC9820937/

En effet, les évolutions technologiques majeures dans le domaine de la médecine se sont concentrées sur les technologies du diagnostic et des soins. Ainsi, avec l'allongement de la durée de vie des populations des pays développés et l'augmentation du coût des plateaux techniques des structures de soins, la part des dépenses de santé rapportée au *PIB* n'a cessé d'augmenter.

Les innovations technologiques n'ont pas permis jusqu'ici de modifier favorablement les grands équilibres économiques du secteur de la santé et aussi de limiter son impact environnemental. L'un des moyens envisagés pour réduire l'empreinte carbone du secteur de la santé serait de développer des mesures de prévention qui permettraient de réduire les dépenses liées aux pathologies chroniques qui génèrent les plus grandes demandes de soins et d'examen complexes. En effet les plus importantes de ces pathologies chroniques concentrent à elles seules une part décisive des ressources allouées à la santé en particulier auprès des personnes les plus âgées. Ainsi, pour Kris De Decker le créateur de "*Low-tech Magazine*" : *“Près de la moitié des dépenses de santé au cours d'une vie - et donc de la consommation d'énergie et des émissions - sont engagées pendant la vieillesse (+65 ans). Pour les personnes âgées de 85 ans et plus, plus d'un tiers des dépenses de toute une vie s'accumuleront pendant les années restantes.”*⁴¹

Prévenir la survenue de pathologies chroniques et donc les dépenses et les émissions carbone afférentes, constitue désormais l'un des objectifs prioritaires des acteurs de la santé. Cependant, jusqu'à une période récente, la médecine préventive ne disposait pas d'outils permettant de prévenir efficacement la survenue de pathologies. Il n'était en particulier pas possible d'influer de manière significative sur le comportement des individus. Les campagnes de prévention en santé publique se heurtaient à des limites à la fois technologiques, sociales et économiques. Des limites économiques tout d'abord. En effet, le coût élevé des campagnes d'information et de sensibilisation de masse

⁴¹ *Les soins de santé high-tech sont-ils écologiquement durables ?* (Low-Tech Magazine Kris De Decker 18 février 2021) solar.lowtechmagazine.com/fr/2021/02/how-sustainable-is-high-tech-health-care

“The lifetime distribution of health care costs.” Alemayehu, Berhanu, and Kenneth E. Warner (Health services research 39.3 (2004))

www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1361028/

obligeait à concentrer celles-ci sur un nombre réduit de messages à destination du grand public et ceci avec une efficacité relative. L'impact de ces campagnes était aussi limité en raison des techniques utilisées pour les réaliser. En effet, ces campagnes utilisaient les médias traditionnels (presse, radio, télévision) et leur efficacité était contrainte par les limites intrinsèques de chacun de ces médias. Il était alors techniquement impossible d'individualiser les campagnes de prévention et plus encore de mesurer l'impact de ces campagnes sur les modifications des comportements individuels. Il était également trop coûteux d'analyser ces comportements individuels ou d'effectuer le suivi des personnes en temps réel.

Or, l'essor des technologies de l'Internet mobile et des objets médicaux connectés ainsi que la diminution du prix des capteurs pourraient désormais être en mesure de transformer le parcours de soins et à terme faire évoluer le paysage de l'économie de la santé. Ainsi, en plus du suivi à distance des paramètres physiologiques des patients, il devient également possible de suivre et d'informer en temps réel les individus sur les risques liés à certains comportements. Cela afin de les accompagner au quotidien pour leur permettre de faire évoluer leurs habitudes et limiter les comportements à risque : lutte contre la sédentarité, réguler le sommeil, suivre les activités physiques et sportives, modifier des habitudes alimentaires... En effet, les modifications individuelles du comportement peuvent avoir des conséquences majeures sur la prévention en santé et donc sur l'économie de la santé et donc sur la diminution de l'empreinte carbone des soins. Des études ont ainsi démontré que la moitié des cancers était liée à des causes environnementales ou encore à des habitudes de vie ou de consommation⁴². De même, des experts ont estimé que 40 % des cas de démence et en particulier la maladie d'Alzheimer, pourraient être évités ou retardés grâce à certains facteurs modifiables, par exemple par l'exercice physique, la régulation du sommeil, la limitation des pertes d'audition, le contrôle de l'hypertension ou encore les modifications du régime alimentaire.⁴³

⁴² *The global burden of cancer attributable to risk factors, 2010–19: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2019* (The Lancet, August 20, 2022)

[www.thelancet.com/journals/lancet/article/PIIS0140-6736\(22\)01438-6](http://www.thelancet.com/journals/lancet/article/PIIS0140-6736(22)01438-6)

⁴³ *Does the MIND Diet Prevent Dementia?* (New York Times, 1 Sept 2023)

www.nytimes.com/2023/08/31/well/eat/mind-diet-dementia.html

Les technologies numériques pourraient jouer un rôle essentiel dans la mise en place de ces nouvelles formes de prévention et d'accompagnement des patients. Ainsi, le suivi et l'accompagnement à distance des patients pourraient devenir l'une des missions prioritaires des structures de soin. Pour le spécialiste américain de la santé connectée Eric Topol, les hôpitaux pourraient bientôt être transformées par l'utilisation croissante des technologies numériques : « *Exceptés pour certaines fonctions clés comme les soins intensifs et la chirurgie, les hôpitaux seront entièrement transformés en centre de surveillance des données. Les gens souriront en repensant aux visites chez leur médecin avec le légendaire stéthoscope ainsi qu'à l'ensemble des pratiques qui existaient avant l'ère numérique...* »⁴⁴

Au-delà des structures de santé actuelles, le parcours de soins commence à être associé à des objets médicaux connectés qui évitent aux patients d'avoir à se rendre à l'hôpital ou dans des laboratoires médicaux (et évitent alors des déplacements générateurs d'émissions carbone). Ces objets connectés permettent un suivi à distance des paramètres de santé ainsi qu'un développement de mesures de prévention individualisées.

D'autres pistes de réductions de l'empreinte carbone des soins de santé sont désormais envisagées. Ainsi, certains acteurs technologiques ont envisagé de substituer des applications mobiles à certains médicaments traditionnels. Un nouveau terme a même été créé pour illustrer la fusion possible entre les technologies numériques et les alternatives numériques aux médicaments : les *Digicenticals*, contraction des mots anglais de *Digital* et *Pharmaceuticals*⁴⁵ on utilise aussi le terme *Digital Therapeutics* (ou *DTx*). Des applications mobiles ont ainsi été conçues pour aider à soigner ou accompagner certaines pathologies en lieu et place des médicaments traditionnels. Ces applications ont été développées en particulier pour le diabète, la lutte contre l'obésité, les maladies

⁴⁴ Eric Topol *on the Future of Medicine* (Wall Street Journal, 7 juillet 2014)
www.wsj.com/articles/eric-topol-on-the-future-of-medicine-1404765024

voir aussi son ouvrage *The Creative Destruction of Medicine* (Eric Topol, Ed. Basic Books janvier 2012)

⁴⁵ *Les applis de santé des médicaments comme les autres ?* (L'Obs, 27 avril 2018)

www.nouvelobs.com/rue89/rue89-sante/20160427.RUE2761/les-applis-de-sante-des-medicaments-comme-les-autres.html

cardiovasculaires, les maladies du système nerveux central, les maladies respiratoires, le sevrage tabagique ou encore les troubles gastro-intestinaux. Ces applications de santé ont ainsi fait l'objet de tests cliniques dans de nombreux pays⁴⁶. Ces formes de traitements alternatifs commencent déjà à être remboursées par certaines autorités de santé⁴⁷ comme le *NHS* au Royaume-Uni, le *DiGa* en Allemagne, mais aussi en France avec le dispositif *PECAN*⁴⁸ (*prise en charge anticipée des dispositifs médicaux numériques*). Des études devront aussi être menées pour connaître avec précision l'impact de ces nouvelles formes de thérapeutiques numériques en termes d'émissions carbone.

Les technologies d'intelligence artificielle pourraient elles aussi jouer un rôle dans la réduction de l'empreinte carbone du secteur de la santé. Les algorithmes d'*IA* permettent en effet de développer de nouvelles méthodes d'analyses des données et ainsi révéler (ou déduire) des éléments sur l'état de santé d'une personne à partir d'informations en apparence anodines sur le comportement des personnes. Ainsi, lorsque l'on analyse dans la durée les déplacements d'une personne, il devient possible d'anticiper la survenue possible de troubles cardiaques ou circulatoires. *Facebook* a ainsi développé des brevets portant sur l'analyse en continu des déplacements de ses utilisateurs⁴⁹.

C'est dans cette perspective que s'inscrit la création par le ministère de la Santé de la *Plateforme de données de santé (Health Data Hub)*. Cette plateforme a été conçue pour devenir un guichet unique d'accès à l'ensemble des données de santé et elle préfigure les évolutions de la santé connectée. En effet, elle vise à développer de nouveaux

⁴⁶ *Digicenticals Market Snapshot 2023 to 2033* (Future Market Insights)

www.futuremarketinsights.com/reports/digicenticals-market

⁴⁷ *Digital Therapeutics (DTx): how to get reimbursed in the EU, UK and the US. An overview of the existing regulatory frameworks* (Chino.io Blog Jul 29, 2022)

blog.chino.io/dtx-how-to-get-reimbursed-in-the-eu-uk-and-the-us-an-overview-of-the-existing-regulatory-frameworks/

⁴⁸ *Lancement de la prise en charge anticipée des dispositifs médicaux numériques* (Agence du Numérique en Santé, 31 mars 2023)

esante.gouv.fr/espace-presse/lancement-de-la-prise-en-charge-anticipee-des-dispositifs-medicaux-numeriques

⁴⁹ *What 7 Creepy Patents Reveal about Facebook* (New York Times, 21 Juin 2018)

nytimes.com/interactive/2018/06/21/opinion/sunday/facebook-patents-privacy.html

services d'IA appliquée à la santé. Ces services pourront concerner l'amélioration des démarches de diagnostic ainsi que les thérapeutiques, mais ils pourront aussi aider à concevoir de nouvelles mesures de prévention en santé. Cependant, comme l'ont fait remarquer des professionnels de santé ainsi que des spécialistes de l'informatique médicale, l'hébergement de ce dispositif par la société *Microsoft*⁵⁰ constitue à la fois un risque en termes de souveraineté sur des données sensibles et une opportunité manquée pour développer des savoir-faire essentiels dans l'écosystème français et européen de la santé connectée⁵¹.

Les objets et capteurs connectés de santé pourraient aussi être utilisés pour lutter contre les grandes crises de santé publique comme les pandémies. Ainsi, pour le cabinet d'étude *Frost & Sullivan*, la réponse la plus « efficace » en termes de lutte contre les pandémies consisterait à établir un réseau mondial de capteurs qui permettrait de détecter de manière précoce les menaces biologiques où qu'elles apparaissent dans le monde. Cependant, comme le soulignent les auteurs, cette proposition qui correspondrait à l'une des plus importantes opportunités de marchés technologiques, se heurterait à l'opposition des opinions publiques du fait des risques de dérives liberticides :

La solution la plus simple serait de permettre aux entreprises, aux villes et aux gouvernements de créer collectivement un vaste réseau mondial de capteurs pour détecter les virus. Cependant, cela nécessiterait une planification et une mise en œuvre à l'échelle mondiale qui s'attaquerait aux fondements mêmes de la démocratie et exigerait des gouvernements qu'ils placent les besoins de la planète devant les besoins de leurs citoyens. La solution la plus logique est souvent la plus difficile à mettre en œuvre. Le degré de planification nécessaire pour mettre en œuvre cette solution en ferait

⁵⁰ « L'exploitation de données de santé sur une plate-forme de Microsoft expose à des risques multiples » (tribune parue dans Le Monde du 10 décembre 2019)

www.lemonde.fr/idees/article/2019/12/10/l-exploitation-de-donnees-de-sante-sur-une-plate-forme-de-microsoft-expose-a-des-risques-multiples_6022274_3232.html

⁵¹ *Health Data Hub* : « Le choix de Microsoft, un contresens industriel ! » (Entretien avec Bernard Benhamou, *Le Point* 18 juin 2020)

www.lepoint.fr/technologie/health-data-hub-le-choix-de-microsoft-et-un-contresens-industriel-10-06-2020-2379394_58.php

L'une des réalisations les plus importantes de l'histoire de l'humanité [...] et à long terme cela représente le « Saint Graal » des opportunités de marché pour l'IoT⁵².

Ainsi, la fascination pour la « techno-efficience » de certains acteurs technologiques rappelle le « *solutionnisme technologique* » évoqué par Evgeny Morozov dans son ouvrage « *Pour tout résoudre cliquez ici* »⁵³. Cette fascination est encore plus présente lorsqu'il est question des objets connectés de santé. Cette tendance n'est pas uniquement le fait de régimes autoritaires, mais bien d'acteurs économiques ou de gouvernements qui évaluent le rapport bénéfique/risque de ces technologies ainsi que leurs conséquences environnementales et pourraient considérer que démocratie et protection des libertés ne sont que de simples variables d'ajustement...

b. Numérique et assurance : vers la prévention numérique en santé

La prévention dans le domaine de la santé a connu de réels succès dans le passé mais s'est souvent heurtée à des obstacles liés à la difficulté d'influer sur les comportements des personnes afin de diminuer les risques de survenue de pathologies. Ainsi, en 1903, l'inventeur Thomas Edison, évoquait le futur de la médecine en ces termes : "*Le médecin du futur ne donnera plus de médicaments mais il instruira ses patients afin qu'ils prennent soin de leur corps, modifient leur régime alimentaire et préviennent la survenue de maladies...*"⁵⁴.

⁵² *The Next Generation of IoT – Addressing the Coronavirus and Preventing Future Outbreaks* (Frost & Sullivan, Jan 31, 2020)

ww2.frost.com/frost-perspectives/the-next-generation-of-iot-addressing-the-coronavirus-and-preventing-future-outbreaks/

⁵³ *Pour tout résoudre cliquez ici - l'aberration du solutionnisme technologique* (Evgeny Morozov, Ed. Fyp 2014)

To Save Everything, Click Here: Technology, Solutionism, and the Urge to Fix Problems that Don't Exist (Evgeny Morozov, Ed. Penguin 2013)

⁵⁴ "*Wizard Edison*" (The Newark Advocate, p. 119032 January 1903)

Là où auparavant, le contact entre patients et structures de santé correspondait à des moments précis dans des lieux déterminés (cabinet médical, laboratoire ou encore structures hospitalières...), il devient possible d'être en contact avec les structures de

“ Le médecin du futur ne donnera plus de médicaments mais il instruira ses patients afin qu'ils prennent soin de leur corps, modifient leur régime alimentaire et préviennent la survenue de maladies...”

Thomas Edison 1903

soins de manière permanente sans avoir besoin de se déplacer. Désormais, les évolutions technologiques et en particulier le développement de l'IA associée aux objets connectés de santé rendent possibles non seulement le suivi à distance des pathologies mais aussi la création d'un canal d'information et d'analyse en continu des données de santé du patient. De plus, il devient également possible d'aider les

personnes (*via* des informations et des messages ciblés) à éviter les facteurs de risque et donc la survenue de certaines pathologies. Les dispositifs de santé connectée et en particulier les technologies de suivi et de prévention des pathologies sont ainsi devenus le nouveau terrain d'expansion pour les industriels des technologies. Comme en témoigne l'intérêt d'*Apple* pour les dispositifs de suivi des paramètres physiologiques de l'*Apple Watch* ou encore le rachat récent de la société *Nuance* spécialiste dans l'IA en santé par *Microsoft* pour un montant de 20 milliards de dollars⁵⁵. La captation et le traitement des données de santé sont déjà devenus des enjeux stratégiques pour les acteurs des technologies. Associées aux technologies d'intelligence artificielle, ces données pourraient dans les années à venir donner naissance à de nouveaux services d'assurance santé basés sur la prévention des pathologies.

En effet, l'autre secteur clé qui pourrait être transformé par l'arrivée de ces nouvelles générations de services numérique de santé est celui de l'assurance. Le rapport 2015 de

⁵⁵ *After clearing all regulatory hurdles, Microsoft closes \$20B Nuance deal* (TechCrunch, 4 Mar 2022) techcrunch.com/2022/03/04/after-clearing-all-regulatory-hurdles-microsoft-closes-20b-nuance-deal

*Goldman Sachs*⁵⁶ sur la santé connectée estime à 305 milliards de dollars les économies que pourrait induire aux États-Unis l'introduction des technologies de *l'IoT* dans le système de santé. Parmi ces économies, 200 milliards de dollars seraient liés à l'amélioration de la prévention et la gestion des pathologies chroniques, en particulier les maladies cardiovasculaires, l'asthme et le diabète. Ces économies représentaient aux États-Unis près de 10 % du total des dépenses de santé (qui s'élèvent à 4300 milliards de dollars en 2021)⁵⁷. Selon ce rapport, les modifications comportementales utilisées à des fins de prévention pourraient générer des économies sur l'ensemble des dépenses de santé si élevées qu'elles seraient potentiellement impossibles à calculer...

Aux États-Unis, des tentatives « radicales » ont déjà été envisagées pour systématiser la prévention en santé. Ces initiatives prenaient appui sur les évolutions technologiques en particulier dans le domaine de la génomique. Cela a été le cas avec la proposition de loi *H.R.1313* introduite en 2017 au Congrès américain. L'objectif affiché de cette proposition de loi était, grâce à des tests génétiques réalisés à grande échelle en entreprise, de développer des mesures de prévention et de détection précoce des maladies. Cette loi prévoyait de déployer ces tests génétiques dans les entreprises américaines et d'imposer des pénalités de 4 000 à 5 000 dollars par an à l'encontre des employés qui refuseraient de se soumettre à ce « screening génétique »⁵⁸.

Ainsi, le secteur de l'assurance santé est devenu l'une des cibles prioritaires des grands acteurs des technologies. En plus d'utiliser leurs produits et services traditionnels au profit des acteurs de la santé, qu'il s'agisse de solutions de clouds destinées au traitement des données de santé ou encore à la réalisation des essais cliniques pour *AWS*, *Google Cloud* ou *Microsoft Azure* ou des objets connectés utilisés dans le domaine de la santé (comme *l'Apple Watch* ou les casques de réalité mixte *Apple Vision Pro*, *Meta Quest 2* ou

⁵⁶ *The Digital Revolution comes to US Healthcare* (Goldman Sachs Equity Research 2015)

www.anderson.ucla.edu/documents/areas/adm/acis/library/DigitalRevolutionGS.pdf

⁵⁷ *National Health Expenditure Fact Sheet 2021* (Centers for Medicare & Medicaid Services)

www.cms.gov/Research-Statistics-Data-and-Systems/Statistics-Trends-and-Reports/NationalHealthExpendData/NHE-Fact-Sheet

⁵⁸ *Employees who decline genetic testing could face penalties under proposed bill* (Washington Post, 11 mars 2017)

www.washingtonpost.com/news/to-your-health/wp/2017/03/11/employees-who-decline-genetic-testing-could-face-penalties-under-proposed-bill/

Microsoft HoloLens 2). Désormais ces sociétés envisagent de créer de nouveaux services qu'elles pourront commercialiser directement auprès des usagers et des entreprises en particulier dans le domaine de la prévention en santé et donc dans l'assurance santé.

La prévention en santé pourrait en effet devenir l'un des plus importants marchés pour les acteurs des technologies dans les années à venir. Et ce d'autant plus que la crise climatique augmente déjà à l'échelle mondiale la survenue de pathologies cardiorespiratoires⁵⁹ qui induisent un accroissement des dépenses de santé qui à leur tour se traduisent par des émissions carbone supplémentaires...

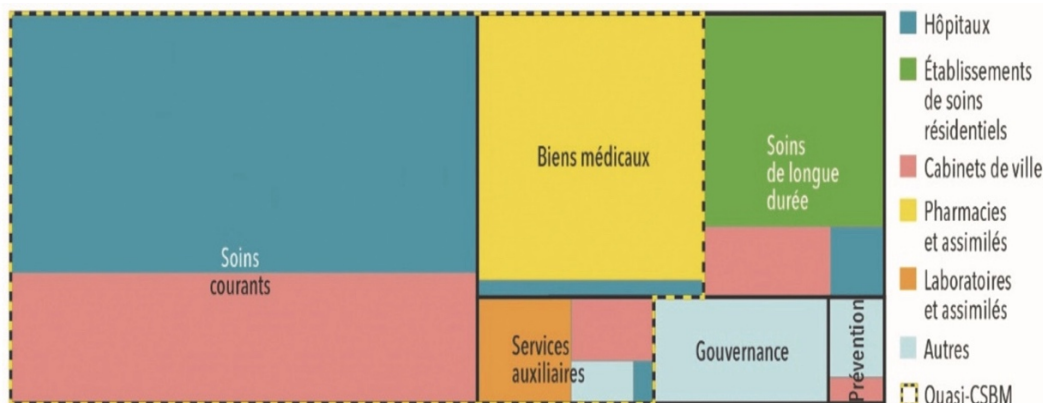
Plutôt que devenir des acteurs du soin, secteur qui nécessite des investissements importants qui peuvent se révéler aléatoires sur le long terme, les grandes plateformes de l'Internet comptent désormais utiliser les immenses collections de données dont elles disposent sur le comportement de leurs utilisateurs pour fournir des profils de risque santé plus précis et ainsi optimiser les profits de leurs services d'assurances santé. C'est déjà le cas de *Google* (via *Alphabet*) qui s'est lancé dans le secteur de l'assurance santé avec *Granular Insurance* qui est actuellement sa filiale la plus lucrative⁶⁰.

Parallèlement à leurs initiatives dans le domaine bancaire, les grands acteurs technologiques peuvent désormais prendre pied dans le secteur de l'assurance santé. Leur objectif est ainsi de déplacer le centre de gravité de l'économie de la santé du soin vers la prévention. En effet, les dépenses de santé sont actuellement massivement axées sur les soins⁶¹. Grâce aux évolutions des nouvelles générations de services liées à la santé connectée, il deviendrait possible pour ces sociétés de générer un marché de taille mondiale pour la prévention en santé.

⁵⁹ *Climate change and the prevention of cardiovascular disease* (Jacobsen AP, Khiew YC, Duffy E, O'Connell J, Brown E, Auwaerter PG, Blumenthal RS, Schwartz BS, McEvoy JW. The American Journal of Preventive Cardiology, Dec 12 2022)
www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC9508346/

⁶⁰ *Google's fastest-growing business is insuring companies against their workers' health* (The Verge Feb 2, 2023)
www.theverge.com/2023/2/2/23583289/alphabet-google-verily-granular-coefficient

⁶¹ *Santé : « En France, la culture de la prévention n'est clairement pas acquise »* (David Simard, Le Monde 27 août 2023)
www.lemonde.fr/idees/article/2023/01/05/sante-en-france-la-culture-de-la-prevention-n-est-clairement-pas-acquise_6156771_3232.html



La DCSi (*Dépense Courante de Santé au sens international*) et son financement (DREES 2020)⁶²

La diminution de l’empreinte carbone du secteur de la santé ira en effet de pair avec la réduction des dépenses de santé⁶³. Les technologies numériques pourraient jouer un rôle majeur dans cette réduction dans les années à venir. Cependant, l’un des enjeux pour la puissance publique en France et en Europe sera de veiller à ce que les évolutions de numérique en santé ne remettent pas en cause notre modèle social au profit d’une logique de contrôle systématisé des individus. Et ce d’autant plus que seront bientôt intégrées à ces plateformes numériques des données issues de la génomique. La mise en place d’une logique d’hyper-individualisation de la couverture santé irait à l’encontre de notre modèle social fondé sur la solidarité et la mutualisation des risques au niveau de la société tout entière. La tentation d’imposer ces solutions technologiques non seulement pour des raisons économiques mais aussi pour de légitimes raisons environnementales devra là aussi être analysée en fonction

⁶² La DCSi (*Dépense Courante de Santé au sens international*) et son financement (DREES 2020)

[drees.solidarites-sante.gouv.fr/sites/default/files/2021-](https://drees.solidarites-sante.gouv.fr/sites/default/files/2021-01/7%20La%20d%C3%A9pense%20courante%20de%20sant%C3%A9%20au%20sens%20international%20et%20son%20financement.pdf)

[01/7%20La%20dépense%20courante%20de%20santé%20au%20sens%20international%20et%20son%20financement.pdf](https://drees.solidarites-sante.gouv.fr/sites/default/files/2021-01/7%20La%20d%C3%A9pense%20courante%20de%20sant%C3%A9%20au%20sens%20international%20et%20son%20financement.pdf)

⁶³ *The Relationship Between Health Expenditure, CO2 Emissions, and Economic Growth in G7: Evidence from Heterogeneous Panel Data*

(Dritsaki M, Dritsaki C, Journal of the Knowledge Economy, Apr 4 2023)

link.springer.com/article/10.1007/s13132-023-01349-y

de ses conséquences possibles sur l'évolution de notre système de soin, de notre couverture sociale et plus largement de nos libertés.

II. AMÉLIORER LA DURABILITÉ DU NUMÉRIQUE

1. NUMÉRIQUE : VERS DES ÉNERGIES RENOUVELABLES

Les conséquences directes sur l'environnement du secteur des technologies numériques peuvent être rattachées aux catégories suivantes :

- Production des terminaux (ordinateurs, smartphones, tablettes, téléviseurs...),
- Production des objets connectés (capteurs connectés des usines et villes intelligentes, objets médicaux connectés, compteurs électriques connectés, etc.),
- Production des imprimantes (et gestion du cycle du papier),
- Fonctionnement des infrastructures réseaux et télécommunications,
- Conception et fonctionnement des data centers,
- Traitement de l'ensemble des déchets liés au numérique,
- Déplacements liés aux technologies numériques (maintenance).

Dans chacune de ces catégories, il convient de rendre les processus de production plus économes en énergie mais aussi de faire évoluer la nature de l'énergie utilisée afin d'en limiter à chaque étape les conséquences environnementales. En effet, un important levier de décarbonation des technologies numériques réside dans l'origine de l'énergie utilisée. **Selon l'étude réalisée par la société suédoise de télécommunication Ericsson, l'empreinte carbone du secteur des technologies pourrait être réduite**

de plus de 80 % si l'électricité consommée provenait exclusivement de sources d'énergie renouvelables⁶⁴.

“ *L'empreinte carbone des technologies pourrait être réduite de plus de 80 % si l'électricité consommée provenait exclusivement de sources d'énergie renouvelables...* ”

Cependant, comme le rappellent Freitag et Berners-Lee de l'Université de Lancaster dans leur étude sur l'impact environnemental des technologies numériques⁶⁵, cette transition vers les énergies renouvelables n'est pas en elle-même une garantie de décarbonation sur le long terme. En effet, des limites physiques à la capacité de montée en puissance des énergies renouvelables

pourraient exister (par exemple la disponibilité des métaux rares). De surcroît, s'il apparaît relativement simple d'alimenter des data centers en énergies renouvelables, il est plus difficile d'alimenter les infrastructures des réseaux avec des énergies renouvelables en raison de leur nature décentralisée. Enfin, l'un des risques serait de ne comptabiliser que les émissions directes. En effet, ce sont les émissions indirectes en amont et en aval qui constituent les plus importants gisements de réductions possibles des émissions carbone :

Le Greenhouse Gas Protocol [projet non gouvernemental considéré comme la référence dans ce domaine] classe les émissions de gaz à effet de serre d'une entreprise en trois "scopes". Les émissions du scope 1 sont des émissions directes provenant de sources détenues ou contrôlées par une entreprise. Les émissions du scope 2 sont des émissions indirectes provenant de la production d'énergie achetée.

⁶⁴ *A quick guide to your digital carbon footprint* (Ericsson 2020)

www.ericsson.com/4ac671/assets/local/reports-papers/consumerlab/reports/2020/ericsson-true-or-false-report-screen.pdf

⁶⁵ *The climate impact of ICT: A review of estimates, trends and regulations* (C. Freitag, M. Berners-Lee. Small World Consulting (SWC) K. Widdicks, B. Knowles, G. Blair and A. Friday (School of Computing and Communications, Lancaster University Dec 2020)

www.researchgate.net/publication/349044966_The_climate_impact_of_ICT_A_review_of_estimates_trends_and_regulations

Les émissions du scope 3 sont toutes les émissions indirectes (non incluses dans le scope 2) qui se produisent dans la chaîne de valeur de l'entreprise, y compris les émissions en amont et en aval.⁶⁶

En plus de la consommation énergétique directe, il convient en effet de prendre en compte les processus qui en amont accompagnent la fabrication des technologies. C'est le cas en particulier des processus liés à la gestion de l'eau. Ainsi, à titre d'exemple, si l'on analyse la consommation d'eau nécessaire à la fabrication des microprocesseurs :

Une usine de fabrication de puces peut utiliser dizaines [voire centaines] de milliers de mètres cubes par jour, chaque mètre cube générant plus de 10 kilogrammes d'émissions de carbone liés au transport et à la purification de l'eau. Durant l'année 2020, les émissions de la société TSMC (Taiwan Semiconductor Manufacturing Company⁶⁷) provenant de ses activités [scope 1] et de l'énergie qu'elle a achetée [scope 2] s'élevaient à environ 10 millions de tonnes, soit un niveau proche de celui de la ville de Taipei. De son côté, en Corée du Sud, la société Samsung a émis 15,6 millions de tonnes de CO2 en 2021.⁶⁸

Il est à noter que des évolutions pourraient avoir lieu dans la conception même des énergies décarbonées. Ainsi, le recours à l'hydrogène natif comme source d'énergie connaît un regain d'intérêt. En effet, jusqu'ici l'hydrogène était encore majoritairement produit via des sources fossiles (hydrogène noir, brun ou gris) ou encore via des processus d'électrolyse (hydrogène vert, rose ou jaune)⁶⁹. Cependant ces processus sont soit associés à d'importantes émissions carbone soit coûteux en énergie (même si les sources d'énergie utilisées sont renouvelables). Des évolutions pourraient ainsi avoir lieu en raison de la découverte d'importants gisements d'hydrogène natif dans le monde

⁶⁶ *Greenhouse Gas Protocol (2023)*

ghgprotocol.org/sites/default/files/standards_supporting/FAQ.pdf

⁶⁷ *L'histoire de l'entreprise taïwanaise TSMC est celle de la mondialisation... et de ses limites* (Le Monde 14 oct 2021)

www.lemonde.fr/economie/article/2021/10/14/tsmc-une-breve-histoire-de-la-mondialisation-et-de-ses-limites_6098282_3234.html

⁶⁸ *Chipmakers race to curb emissions as demand surges* (Financial Times, 15 Jun 2023)

www.ft.com/content/5880d4aa-a88a-4514-afcd-798e8f29e9ff

⁶⁹ *[Repères] Gris, vert, bleu, turquoise ou fluo... Les huit nuances (connues) de l'hydrogène* (Aurélié Barbaux, L'Usine Nouvelle 24 août 2021)

www.usinenouvelle.com/article/reperes-gris-vert-bleu-turquoise-ou-fluo-les-huit-nuances-connues-de-l-hydrogene.N1133819

et en particulier en France⁷⁰ (on parle dans ce cas d'hydrogène blanc). Si les processus liés à l'exploitation de ces ressources en hydrogène devenaient économiquement rentables, l'utilisation de ces gisements d'hydrogène natif pourrait constituer à terme un élément clé de la transition énergétique européenne.⁷¹

En plus des évolutions des sources d'énergie utilisées, il conviendra aussi d'agir en amont de l'utilisation de ces technologies sur l'ensemble des processus de fabrication et de transport. Ainsi, le *Forum économique mondial* décrit les évolutions industrielles ainsi que les mesures d'incitation qui permettraient de réduire, depuis la phase de production, l'empreinte carbone de l'ensemble des industries émettrices⁷² :

- Favoriser l'accès à des énergies renouvelables abordables et aider à leur déploiement constitueront des facteurs clés pour la décarbonation des industries lourdes,
- Aider à développer les technologies nécessaires à la décarbonation des secteurs les plus polluants : utilisation de l'hydrogène pour réduire le minerai de fer⁷³, utilisation de « l'ammoniac vert » pour alimenter les navires⁷⁴, ou le captage et le stockage du carbone⁷⁵. En effet, ces technologies ne sont pas encore disponibles ou pas encore commercialement viables,
- Enfin, favoriser un marché qui récompense l'offre de technologies à faibles émissions, de produits issus de l'économie circulaire et aussi de promouvoir les technologies biosourcées.

⁷⁰ Excitement grows about 'natural hydrogen' as huge reserves found in France (EURACTIV 30 Jun 2023)
www.euractiv.com/section/energy-environment/news/excitement-grows-about-natural-hydrogen-as-huge-reserves-found-in-france/

⁷¹ Prospectors hit the gas in the hunt for 'white hydrogen' (The Guardian 12 Aug 2023)

www.theguardian.com/environment/2023/aug/12/prospectors-hit-the-gas-in-the-hunt-for-white-hydrogen

⁷² What are low-carbon emitting technologies? An expert explains (World Economic Forum Feb 3, 2022)

www.weforum.org/agenda/2022/02/what-are-low-carbon-emitting-technologies-an-expert-explains/

⁷³ L'hydrogène pour la production d'acier, mythe ou réalité ? (Alcimed 8 avril 2019)

www.alcimed.com/fr/les-articles-d-alcim/lhydrogene-pour-la-production-dacier-mythe-ou-realite/

⁷⁴ Amogy to unveil world's first ammonia-powered, zero-emission ship (Energy Monitor 14 Mar 2023)

www.energymonitor.ai/tech/cleaner-fuels/amogy-to-unveil-worlds-first-ammonia-powered-zero-emission-ship/

⁷⁵ Le captage et stockage du CO₂, solution d'avenir pour le climat ou mirage ? (Le Monde, 26 janvier 2022)

www.lemonde.fr/planete/article/2022/01/26/le-captage-et-stockage-du-co2-solution-d-avenir-pour-le-climat-ou-mirage_6110976_3244.html

Cependant, pour que l'ensemble de ces mesures aient un effet durable, il convient en priorité de rendre économiquement viables les différentes filières qui accompagneront la décarbonation des industries liées au numérique. Cette viabilité sera liée à la fois à des actions qui porteront sur l'offre et sur la demande de ces technologies. Ainsi, il s'agira à la fois d'inciter et de stimuler les acteurs économiques pour qu'ils effectuent leur migration vers des solutions "bas carbone" et dans le même temps de mieux sensibiliser les utilisateurs aux enjeux du développement numérique durable.

2. LES 4 « R » DU NUMÉRIQUE DURABLE

REUTILISATION, REEMPLOI, RECONDITIONNEMENT ET RECYCLAGE

L'une des premières conditions de la durabilité des technologies porte justement sur l'allongement de la durée des cycles de vie des produits technologiques. En effet, pour la plupart, ces produits ont été conçus dès l'origine pour avoir une durée de vie limitée. Ainsi, dans un premier temps, les mesures liées au recyclage des appareils électroniques ont été essentiellement envisagées sous l'angle des risques de pollution par des déchets électroniques. En effet, des substances toxiques comme le plomb, le cadmium ou le mercure (qui entrent couramment dans la composition des produits électroniques) pouvaient contaminer le sol, l'eau et l'air. Dans un second temps, avec la montée en puissance des questionnements liés au réchauffement climatique, c'est l'impact en termes d'émissions carbone de la filière technologique qui a commencé à être pris en compte. Parallèlement, la réutilisation ainsi que le réemploi des produits technologiques ont aussi dû être mieux intégrés par les constructeurs et les utilisateurs.

Dans le *Code de l'environnement* figurent les définitions suivantes pour le réemploi, la réutilisation et le recyclage⁷⁶ :

- **Réemploi** : toute opération par laquelle des substances, matières ou produits qui ne sont pas des déchets sont utilisés de nouveau pour un usage identique à celui pour lequel ils avaient été conçus.
- **Réutilisation** : toute opération par laquelle des substances, matières ou produits qui sont devenus des déchets sont utilisés de nouveau.
- **Recyclage** : toute opération de valorisation par laquelle les déchets, y compris les déchets organiques, sont retraités en substances, matières ou produits aux fins de leur fonction initiale ou à d'autres fins. Les opérations de valorisation énergétique des déchets, celles relatives à la conversion des déchets en combustible et les opérations de remblayage ne peuvent pas être qualifiées d'opérations de recyclage.

Du fait de l'explosion en volume des ventes de terminaux informatiques et en particulier des smartphones, cette prise de conscience a obligé à repenser les circuits de recyclage et de réparation des appareils. Pour l'ADEME, l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie, les marges de progression en matière de recyclage mais aussi en termes d'allongement de la durée de vie des terminaux numériques demeurent considérables :

- *En France, le taux de collecte des smartphones pour recyclage est à ce jour estimé à seulement 5 % (et jusqu'à 113 millions de portables dormiraient dans nos tiroirs...).*
- *Les Français changent en moyenne de téléphone tous les deux ans [en moyenne tous les 23 mois], alors qu'ils fonctionnent encore dans 88 % des cas...⁷⁷*

⁷⁶ Article L541-1-1 du Code de l'environnement

www.legifrance.gouv.fr/codes/article_lc/LEGIARTI000042176087

⁷⁷ *Garder son smartphone le plus longtemps possible* (ADEME, 16 janvier 2023)

agirpourlatransition.ademe.fr/particuliers/conso/conso-responsable/garder-smartphone-plus-longtemps-possible

a. Obstacles technologiques et perspectives industrielles

Pour les Nations unies, le traitement et le recyclage des déchets technologiques sont devenus des enjeux environnementaux majeurs mais aussi des enjeux politiques et économiques dans la perspective de la réduction de l'empreinte carbone des technologies. Ainsi, dans le rapport *The Global E-waste Monitor 2020*, les experts de l'ONU notaient l'importance du développement des filières de l'économie circulaire : « *En améliorant les pratiques de collecte et de recyclage des déchets électroniques dans le monde, une quantité considérable de matières premières secondaires - précieuses, critiques et non critiques - pourrait être rendue facilement disponible pour réintégrer le processus de fabrication tout en réduisant l'extraction continue de nouveaux matériaux.* »⁷⁸

“ *En améliorant les pratiques de collecte et de recyclage des déchets électroniques, une quantité considérable de matières premières secondaires pourrait être rendue facilement disponible pour réintégrer le processus de fabrication tout en réduisant l'extraction de nouveaux matériaux...*

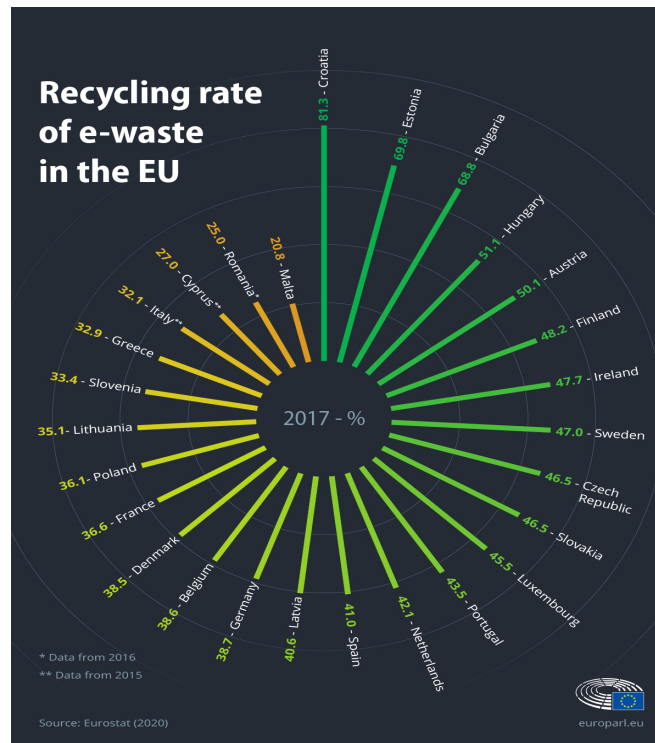
United Nations Global E-waste Monitor 2020

Cependant, à l'échelle internationale, les filières du recyclage des *déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE)* sont encore de taille modeste et les technologies de retraitement en particulier des métaux sont encore largement perfectibles. Ainsi, dans leur baromètre mondial sur la gestion des déchets électroniques, les experts des Nations unies précisent :

Avec un taux de collecte et de recyclage officiel de 17,4 %, une valeur potentielle en matières premières de 10 milliards de dollars peut être récupérée à partir des déchets électroniques, et

⁷⁸ *The Global E-waste Monitor 2020: Quantities, flows and the circular economy potential* (United Nations University UNITAR ITU & ISWA 2020)
collections.unu.edu/eserv/UNU:7737/GEM_2020_def_july1.pdf

4 millions de tonnes de matières premières secondaires deviendraient disponibles pour le recyclage. Si l'on se concentre uniquement sur le fer, l'aluminium et le cuivre et que l'on compare les émissions résultant de leur utilisation en tant que matières premières vierges ou matières premières secondaires, leur recyclage a permis d'économiser jusqu'à 15 millions de tonnes d'émissions d'équivalent CO2 en 2019⁷⁹.



Part des déchets électroniques recyclés dans les pays de l'UE (Eurostat 2020)⁸⁰

En plus du volume des déchets effectivement recyclés en par les éco-organismes, les marges de progression technologiques et industrielles en termes d'efficacité des processus de recyclage sont considérables. Cependant, même si l'on devait assister à une évolution significative des taux de recyclage des métaux critiques, cela ne s'avérerait pas suffisant au vu des réserves connues : « *Au regard des tensions géopolitiques et environnementales engendrées par la demande croissante en métaux rares, le recyclage aurait pu*

⁷⁹ Ibid.

⁸⁰ *E-waste in the EU: facts and figures* (infographic 2020)
www.europarl.europa.eu/news/en/headlines/society/20201208STO93325/e-waste-in-the-eu-facts-and-figures-infographic

constituer une alternative durable. En réalité, une grande majorité des métaux nécessaires au numérique est peu recyclable : l'indium, le tantale ou le germanium ont un taux de recyclage inférieur à... 1 %. »⁸¹

À terme, des alternatives devront donc être envisagées pour éviter l'épuisement progressif des ressources en métaux rares. À cette fin, des recherches devront être poursuivies et intensifiées afin de limiter la perte définitive de ces matériaux critiques comme c'est encore majoritairement le cas.

b. L'indispensable consolidation de l'économie circulaire

Comme le note le rapport *Pour une transition numérique écologique* remis au Sénat en 2020, le prolongement de la durée de vie des terminaux informatiques et le développement de l'économie circulaire reposent sur une double nécessité ; nécessité environnementale tout d'abord afin de réduire l'empreinte carbone du numérique mais aussi une nécessité de souveraineté économique pour développer les emplois non délocalisables liés aux filières de l'économie circulaire :

Il s'agit là d'un impératif environnemental mais aussi économique : en passant du tout-jetable - alimenté par des imports qui grèvent la balance commerciale du pays - à un modèle circulaire - s'appuyant sur un écosystème industriel capable de proposer des terminaux reconditionnés et d'offrir des solutions de réparation les politiques publiques peuvent favoriser la création durable d'emplois non délocalisables, et implantés dans les territoires. À cet égard, la réduction de l'empreinte environnementale du numérique en France constitue également un acte de souveraineté économique. La relocalisation des activités contribuera à réduire le bilan carbone du numérique français, dont 80 % des émissions sont produites à l'étranger.⁸²

De nombreuses expérimentations ont ainsi été mises en place au sein des pays de l'Union européenne afin de prolonger la durée de vie des matériels numériques et de stimuler dans le même temps l'économie circulaire. Au travers de diverses formes

⁸¹ *Tech it Green, Transformation numérique et transition écologique : construire la double révolution du 21^e siècle* (coordonné par Isabelle Albert pour le G9+, 2020)

⁸² *Pour une transition numérique écologique* (rapport d'information n° 555 déposé au Sénat le 24 juin 2020)
www.senat.fr/rap/r19-555/r19-555_mono.html

d'incitations financières, ces mesures ont dans un premier temps visé à favoriser les filières de réparation.

Dès 2016, la Suède a mis en place une réduction de la TVA de 50 % pour la réparation des ordinateurs :

Le gouvernement suédois a introduit des allègements fiscaux sur les réparations de biens de consommation, dans le but d'inciter les gens à réparer leurs objets cassés plutôt que de les jeter. Le gouvernement, composé d'une coalition de partis sociaux-démocrates et verts, a soumis au parlement en 2016 des propositions visant à réduire le taux de TVA sur les réparations de 25 % à 12 %. Il soumettra également une proposition visant à permettre aux citoyens de bénéficier de déductions d'impôt sur le revenu pour les réparations de gros appareils électroménagers. Grâce à ces mesures, le gouvernement espère s'attaquer aux émissions liées à la consommation, en incitant les consommateurs à réparer leurs biens et en rendant cette activité plus financièrement attractive.⁸³

En Autriche et en Allemagne, la création d'un « Bonus réparation »

Dans le cadre du « Bonus réparation » (Reparaturbonus) autrichien, chaque bon couvre 50 % du coût de la réparation, jusqu'à concurrence de 200 euros par réparation de produit. Il subventionne également 50 % du prix d'un devis de réparation, jusqu'à un maximum de 30 euros. La prime peut être utilisée au moment du paiement de la facture et doit être valable à ce moment-là, quelle que soit la date à laquelle la commande a été passée. La prime, qui peut être échangée dans 3 153 ateliers de réparation en Autriche, est financée par 130 millions d'euros provenant du fonds de relance Covid-19 de l'UE et a déjà permis de subventionner 353 196 réparations sur les 9 derniers mois de l'année 2022.⁸⁴

En France la mise en place du « Fonds réparation »

Ce fonds a été mis en place en décembre 2022 et il correspond à l'une des mesures de la loi *Anti-gaspillage pour une économie circulaire (AGEC)*⁸⁵. Il concerne l'ensemble des appareils

⁸³ *Swedish government tax break programme for repair* (Knowledge Hub 1 Oct 2020)
knowledge-hub.circle-lab.com/article/3624

⁸⁴ *There is life on Mars! Success stories of financial incentives to make repair affordable* (Repair.eu 9 mars 2023)
repair.eu/fr/news/there-is-life-on-mars-financial-incentives-to-make-repair-affordable/

⁸⁵ La loi anti-gaspillage pour une économie circulaire (Agec) Ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires / Ministère de la Transition énergétique (13 juillet 2023)
www.ecologie.gouv.fr/loi-anti-gaspillage-economie-circulaire

électroniques (et pas seulement les terminaux numériques). Sa mise en place correspond à des réductions auprès de réparateurs agréés (qui devraient être environ 4 000 au début de l'année 2024). L'objectif de cette initiative est de faire passer le pourcentage de matériels réparés hors garantie de 10 % à 60 % durant l'année 2026. L'enveloppe initiale de ce fonds est d'environ 20 millions d'euros et elle est gérée par les deux éco-organismes agréés par l'État ; *Ecosystem* et *Ecologic*.⁸⁶

Liste des bonus réparation (TTC)¹

2022 – 2023				2024		2025	
Produit	Bonus TTC	Produit	Bonus TTC	Produit	Bonus TTC	Produit	Bonus TTC
Appareil de sport (vélo d'appartement, rameur, tapis de course, plateforme vibrante)	15 €	Four encastrable (hors micro-onde)	20 €	Perceuse / visseuse	15 €	Four posable	15 €
Appareil photo numérique	20 €	Hotte	20 €	Petit-déjeuner : bouilloire, centrifugeuse et extracteur, grille-pain, presse-agrumes	10 €	Friteuse	10 €
Aspirateur : balai, robot, traineau	15 €	Instrument de musique	15 €	Plaque de cuisson	20 €	Imprimante et scanner (seuil décl. : 150€)	35 €
Audio / Vidéo hors enceinte et vidéoprojecteur : amplificateur (dont amplificateur home-cinéma), chaîne hi-fi, lecteur DVD, lecteur Enregistreur Audio Vidéo, home-cinéma, table de mixage, tuner / démodulateur	15 €	Lave-linge	25 €	Réfrigérateur / Congélateur	25 €	Four micro-onde	20 €
Cave à vin	25 €	Lave-vaisselle	25 €	Repassage hors centrale vapeur : défroisseur à main, fer à repasser	10 €	Moniteur (seuil décl. : 100€)	30 €
Centrale vapeur	20 €	Machine à café avec filtre	10 €	Sèche-linge	25 €	Ordinateur fixe / tout-en-un (seuil décl. : 180€)	45 €
Console de jeux	20 €	Machine à café tout automatique	25 €	Tablette	25 €	Robot culinaire	10 €
Cuisinière	20 €	Machine à café proportionné (capsule et dosette)	15 €	Téléphone portable	25 €	Téléphone fixe	10 €
Drone	15 €	Mobilité urbaine : vélo à assistance électrique, trottinette électrique, hoverboard, gyroroue	15 €	Téléviseur	30 €		
Enceinte (dont enceinte home-cinéma)	20 €	Ordinateur portable (seuil décl. : 180€)	45 €	Vidéoprojecteur	30 €	Soutien financier moyen = -20% du coût de la réparation	
Entretien jardin : taille haie électrique, tondeuse à gazon électrique	15 €						

Note (1) Soutiens financiers proposés pour le lancement du dispositif, sous réserve de modification le cas échéant
 Note (2) Le soutien financier s'applique à concurrence du montant de la facture réparation - i.e. si le montant TTC de la facture est inférieur au montant du soutien financier, la réparation n'est pas prise en charge par le Fonds
 * : les produits concernés seront définis en concertation avec la filière ABJ

Montant des bonus réparation par type de matériel électrique/électronique (Source : Label QualiRépar⁸⁷)

c. Susciter des initiatives industrielles sur la collecte et le recyclage

Des mesures prises par les industrielles commencent aussi à voir le jour pour améliorer le niveau de collecte et de recyclage des smartphones. Ainsi, l'Association mondiale des opérateurs télécoms (GSMA) et douze opérateurs ont annoncé le 27 juin 2023 une série d'engagements pour s'attaquer aux « plus de cinq milliards » de téléphones portables, actuellement inutilisés dans le monde, qui pourraient être « réutilisés », ou « recyclés ».

⁸⁶ Conso : Tout comprendre du fonds réparation qui entre en vigueur ce jeudi (20 Minutes 13 décembre 2022)

www.20minutes.fr/planete/4014533-20221213-conso-tout-comprendre-fonds-reparation-entre-vigueur-jeudi

⁸⁷ Liste des bonus réparation (Label QualiRépar 2022)

www.label-qualirepar.fr/wp-content/uploads/2022/07/soutiens-financiers-fonds-reparation.pdf

Les douze opérateurs (dont *BT, Orange, Telefonica, Iliad...*) se sont notamment engagés à ce que d'ici à 2030, le nombre d'appareils mobiles usagés dans le cadre de programmes de reprise représente « au moins 20 % » du nombre d'appareils mobiles neufs distribués directement aux clients, ou encore que « 100 % des appareils mobiles usagés collectés » dans le cadre des programmes de reprise soient « réparés, réutilisés ou transférés à des organismes de recyclage contrôlés ».⁸⁸

La *GSM A* estime que plus de 5 milliards de téléphones portables usagés dans le monde ne sont ni réutilisés ni recyclés et que 8 milliards de dollars d'or, de palladium, d'argent, de cuivre, d'éléments de terres rares et d'autres minéraux essentiels pourraient ainsi être récupérés. Cela permettrait de fournir suffisamment de cobalt pour alimenter 10 millions de batteries de voitures électriques⁸⁹.

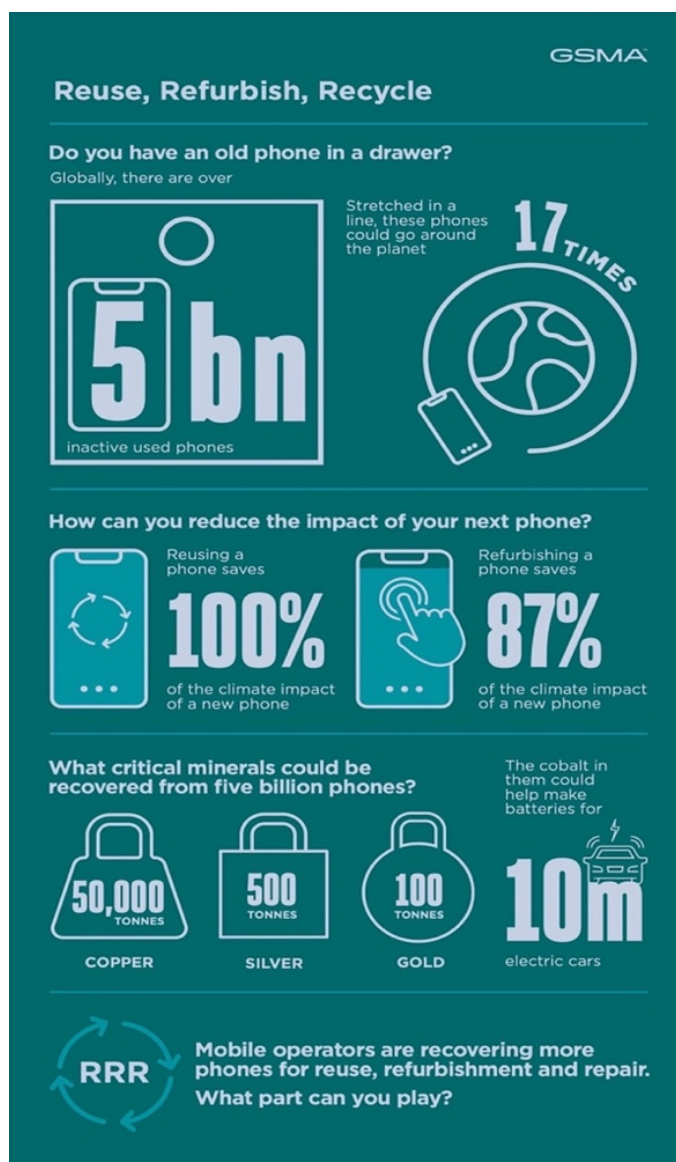
Pour les acteurs industriels et en particulier les opérateurs télécoms, il s'agit de prendre en compte de manière préventive des impératifs du développement durable afin d'éviter que ne leur soient imposés par les acteurs publics des calendriers ou des engagements jugés économiquement trop contraignants (comme cela a pu être le cas dans le secteur automobile avec l'interdiction en 2035 de la vente de voitures neuves à moteur thermique).

⁸⁸ *Les opérateurs mobiles veulent recycler les « cinq milliards » de portables inutilisés* (Le Monde 27 juin 2023)

www.lemonde.fr/economie/article/2023/06/27/les-operateurs-mobiles-veulent-recycler-les-cinq-milliards-de-portables-inutilises_6179474_3234.html

⁸⁹ *Mobile Industry Eyes Five Billion 'Dormant' Phones Sitting In Desk Drawers For Reuse Or Recycling* (GSM A 27 Jun 2023)

www.gsma.com/newsroom/press-release/mobile-industry-eyes-five-billion-dormant-phones-sitting-in-desk-drawers-for-reuse-or-recycling



Communication sur l'initiative de recyclage des smartphones par la GSMA⁹⁰

d. Lever les freins au réemploi et au recyclage

Les difficultés liées à la montée en puissance du recyclage des terminaux (et en particulier des smartphones) n'ont pas toujours d'origine économique ou technologique. L'une des préoccupations évoquées pour le refus du reconditionnement

⁹⁰ *Reuse, Refurbish, Recycle* (GSMA Jun 2023)

www.gsma.com/betterfuture/wp-content/uploads/2023/06/Reuse-refurbish-recycle-infographic.pdf

du recyclage ou même parfois de la revente des smartphones usagés est liée à la crainte que des données personnelles encore présentes dans ces smartphones ne puissent être divulguées à des tiers ou utilisées à des fins malveillantes. La possibilité d'obtenir de manière ergonomique un effacement physique complet des données des terminaux connectés devrait ainsi devenir une obligation pour les opérateurs ainsi que les constructeurs de smartphones. En effet, à la différence de l'effacement logique qui permet la réutilisation la mémoire occupée par les données, l'effacement physique rend ces informations définitivement inaccessibles. Des mesures de même nature devront être envisagées auprès de l'ensemble des constructeurs afin que des solutions d'effacement physique soient rendues accessibles sur les matériels informatiques.

Même si les sources et la nature des matériels informatiques sont plus diversifiées que les seuls smartphones, des dispositifs équivalents devraient pouvoir être mis en œuvre à terme auprès de l'ensemble des fabricants d'ordinateurs et d'objets connectés. Il s'agirait là encore d'aider à organiser le recyclage, le reconditionnement et la réutilisation de ces matériels. D'autres pistes sont aussi envisagées par les experts de l'impact environnemental du numérique pour prolonger la durée de vie des matériels et en assurer une meilleure traçabilité. Ainsi, parallèlement aux circuits de réparation et de reconditionnement, des solutions de location pour les terminaux informatiques et les objets connectés pourraient aussi être généralisées auprès de l'ensemble des publics.

e. Améliorer la réparabilité des terminaux numériques

Les marges de progrès en termes de réparabilité restent considérables pour les industriels des technologies. En effet, pour de nombreuses marques, le surcoût lié aux réparations est un élément clé de leur modèle économique. De même qu'il est nécessaire d'envisager une meilleure interopérabilité des systèmes logiciels, une plus grande interopérabilité des pièces des matériels informatiques devrait permettre à la fois de diminuer le volume des déchets électroniques et de favoriser la réparabilité ainsi que le recyclage des matériels informatiques.

Des travaux de la Commission européenne sont aussi en cours pour imposer une obligation de réparabilité des terminaux numériques⁹¹. Ainsi les mesures envisagées à la fois sur la conception interne des terminaux numériques et sur l'organisation des filières de réparation devraient permettre de prolonger la vie de ces terminaux et diminuer les coûts de réparation et de reconditionnement :

Les fabricants de smartphones rendent [intentionnellement] leurs batteries difficiles à remplacer. De nouvelles règles européennes strictes devraient changer la donne. L'Union européenne exigera bientôt des fabricants de smartphones qu'ils permettent aux utilisateurs de remplacer leurs batteries. Ces nouvelles règles strictes, approuvées par le Parlement européen cette semaine, pourraient permettre d'éviter la mise en décharge de millions de téléphones. Chaque année, plus de 150 millions de smartphones sont jetés. Faciliter le remplacement des batteries permettrait de réduire ce flux de déchets électroniques. Les téléphones actuels enferment les batteries dans la tablette, ce qui signifie que leur remplacement peut être presque aussi coûteux que l'achat d'un nouveau téléphone. Les nouvelles mesures contribueront à briser le cycle de la consommation effrénée, a déclaré le député européen Achille Variati. "Pour la première fois, nous disposons d'une législation sur l'économie circulaire qui couvre l'ensemble du cycle de vie d'un produit - une approche qui est bonne à la fois pour l'environnement et pour l'économie".⁹²

Ces évolutions se heurtent jusqu'ici aux modèles économiques des acteurs des technologies, qui ont privilégié le renouvellement de plus en plus rapide de leurs produits et services. L'intégration des préoccupations environnementales ne constitue pas encore un élément de différenciation, et donc un avantage concurrentiel suffisant, pour justifier les investissements nécessaires à une décarbonation de l'industrie des

⁹¹ Proposition de directive du parlement européen et du conseil établissant des règles communes visant à promouvoir la réparation des biens et modifiant le règlement (UE) 2017/2394 et les directives (UE) 2019/771 et (UE) 2020/1828 (22 mars 2023)

eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:cdbcaa83-c94e-11ed-a05c-01aa75ed71a1.0012.02/DOC_1&format=PDF

Proposal for a Directive of the European Parliament and of the Council on common rules promoting the repair of goods and amending Regulation (EU) 2017/2394, Directives (EU) 2019/771 and (EU) 2020/1828

eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:cdbcaa83-c94e-11ed-a05c-01aa75ed71a1.0001.02/DOC_1&format=PDF

⁹² New EU law to force smartphone makers to build easily replaceable batteries (Euronews 30 Jun 2023)

www.euronews.com/green/2023/06/22/new-eu-law-to-force-smartphone-makers-to-build-easily-replaceable-batteries

technologies. Dans ce domaine, les grandes sociétés technologiques n'ont fait évoluer leurs modèles économiques que de manière lente et le plus souvent en réponse à une contrainte liée aux évolutions du marché ou encore à des obligations réglementaires.

Ainsi, la société *Apple* dont le modèle économique est lié à l'intégration de plus en plus poussée de ses matériels et services a progressivement souhaité devenir la seule structure à pouvoir réparer ses ordinateurs et smartphones. Elle a ainsi éliminé progressivement les réseaux de réparation agréés ainsi que la possibilité par des tiers de « cannibaliser » des matériels à partir de pièces fonctionnelles prélevées sur des machines en panne pour en réparer d'autres. Ce contrôle sur sa chaîne de réparation évolue lentement du fait des préoccupations exprimées par les usagers ainsi que des sollicitations des acteurs publics⁹³. Ainsi, après l'avoir longuement combattue, *Apple* a récemment accepté de soutenir la loi californienne sur la réparation qui impose aux fabricants de fournir des pièces pendant une durée imposée à l'issue de la production d'un produit électronique ou informatique⁹⁴.

Sous l'impulsion de Steve Jobs, la société Apple a en effet théorisé cette intégration poussée entre logiciel et matériel en reprenant les propos d'Alan Kay "*Les personnes qui s'intéressent vraiment aux logiciels devraient fabriquer leur propre matériel*"⁹⁵. C'est ce qui a poussé *Apple* à éliminer progressivement ses fournisseurs extérieurs y compris pour la fabrication de ses processeurs. Cependant, si l'intégration verticale des produits technologique peut avoir du sens en termes de maîtrise de l'ergonomie (via le contrôle de l'expérience utilisateur), elle a surtout pour *Apple* d'indéniables avantages économiques.

⁹³ *Apple expands Self Service Repair and updates System Configuration process* (Apple Newsroom 20 Jun 2023)
www.apple.com/newsroom/2023/06/apple-expands-self-service-repair-and-updates-system-configuration-process/

⁹⁴ *Apple's U-Turn: Tech Giant Finally Backs Repair in California!* (iFixit, 23 Aug 2023)
www.ifixit.com/News/79902/apples-u-turn-tech-giant-finally-backs-repair-in-california

⁹⁵ *Keynote de Steve Jobs lors du lancement de l'iPhone* (9 Jan 2007)
www.youtube.com/watch?v=x7qPAY9JqE4

People who are really serious about software should make their own hardware, Alan Kay

“ L’encadrement des pratiques liées à la réparation des terminaux numériques pourrait rendre plus difficiles les modèles économiques liés aux écosystèmes fermés...”

Cependant, le contrôle absolu de la chaîne de valeur pour la réparation des terminaux est désormais perçu comme une pratique prédatrice et contraire aux politiques environnementales européennes. De nombreux régulateurs en Europe considèrent désormais que des règles plus strictes devraient être mises en place pour éviter cet « hypercontrôle » des producteurs sur le cycle de vie de leurs produits numériques⁹⁶.

Ces évolutions de l’encadrement des pratiques liées à la réparation des terminaux numériques pourraient aussi avoir pour conséquence de rendre plus difficile la poursuite des modèles économiques liés à des écosystèmes fermés (*walled garden*).

Ces évolutions législatives pourraient ainsi avoir un double impact : d’une part sur la durée de vie des produits technologiques ainsi que sur la montée en puissance et la professionnalisation des circuits locaux de réparation. Or, tant d’un point de vue environnemental que d’un point de vue économique et même de souveraineté, la croissance des pratiques de réparation des technologies numériques apparaît cruciale pour la poursuite de la réduction de l’empreinte carbone du numérique.

De plus, la mutualisation des ressources ainsi que des données et des savoir-faire sur la réparation apparaît indispensable à la mise en place d’un écosystème

⁹⁶ Proposition de Directive du Parlement Européen et du Conseil établissant des règles communes visant à promouvoir la réparation des biens et modifiant le règlement (Commission Européenne 22 Mar 2023)
eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/HTML/?uri=CELEX:52023PC0155

local mais aussi national et européen dans le domaine du reconditionnement et du recyclage. En ce sens, le renforcement des acteurs locaux de l'économie circulaire des technologies apparaît comme un objectif prioritaire pour la France et l'Europe dans les mois et années à venir.

f. Union Européenne : les enjeux de la standardisation des chargeurs

La directive européenne visant à unifier les systèmes de charge des téléphones portables autour du standard *USB-C* devrait prendre effet en 2024⁹⁷. Elle s'appliquera à l'ensemble des téléphones portables mais aussi des appareils électroniques rechargeables vendus dans l'Union européenne. L'impact de cette seule mesure sur le plan environnemental mais aussi économique est évalué par la Commission européenne en ces termes : « *Ces nouvelles obligations entraîneront une plus grande réutilisation des chargeurs et aideront les consommateurs à économiser jusqu'à 250 millions d'euros par an en achats de chargeurs inutiles. Les chargeurs mis au rebut et inutilisés représentent environ 11 000 tonnes de déchets électroniques par an dans l'Union européenne.* »⁹⁸

Cette mesure a été accueillie diversement par les constructeurs. À l'exception des sociétés *Samsung* et *Huawei* qui avaient développé leurs propres systèmes de connexion, les autres fabricants de téléphone *Android* utilisaient déjà la prise *USB-C* et ne percevaient pas cette obligation comme un obstacle économique majeur. En revanche, du fait de sa stratégie de connectique propriétaire, *Apple* a souhaité éviter que cette mesure ne lui soit imposée. Par la suite, la société a fini par adopter ce standard pour les prochaines générations d'iPhone vendus dans le monde mais devrait empêcher les câbles *USB-C* « non certifiés par *Apple* » d'effectuer la charge rapide mais aussi le

⁹⁷ *Chargeur universel pour les appareils portables : une réalité en 2024* (Parlement Européen, Communiqué de presse 4 octobre 2022)

www.europarl.europa.eu/news/fr/press-room/20220930IPR41928/chargeur-universel-pour-les-appareils-portables-une-realite-en-2024

⁹⁸ Long-awaited common charger for mobile devices will be a reality in 2024 (4 Oct 2022)

www.europarl.europa.eu/news/en/press-room/20220930IPR41928/long-awaited-common-charger-for-mobile-devices-will-be-a-reality-in-2024

transfert rapide des données depuis leurs téléphones⁹⁹. Ce qui détournerait *de facto* le principe d'un standard européen unifié pour l'alimentation électrique des smartphones. Au-delà des câbles et des chargeurs, la prochaine étape du « *droit à la réparation* » prévu en Europe concernera l'obligation pour les constructeurs de permettre le changement par les usagers des batteries sur les ordinateurs et les smartphones. Cependant, cette obligation ne devrait s'imposer qu'à partir de l'année 2027.¹⁰⁰

III. USAGES NUMÉRIQUES ET DÉVELOPPEMENT DURABLE

1. MUTATIONS DES USAGES : VERS UNE « ZOOM GENERATION » ?

Avec l'essor des solutions de vidéoconférence et leur impact sur les habitudes de travail des usagers des technologies numériques, la pandémie aura été marquée par un accroissement considérable de la demande de télétravail. La pandémie aura ainsi montré qu'il était possible de remettre en cause des habitudes de travail ancrées des utilisateurs en particulier pour s'adapter à des situations exceptionnelles. De même, la guerre en Ukraine aura contraint l'ensemble des usagers à économiser l'énergie en raison de la hausse des coûts.

Le Baromètre annuel Télétravail 2021 de Malakoff Humanis considère que le télétravail concernait 30 % des salariés avant la pandémie Covid-19. Il aurait connu un essor sans précédent en 2020 pour atteindre 41 % des salariés en mai lors du premier confinement. Un contexte

⁹⁹ *The USB-C iPhone 15 might finally deliver fast charging that's actually fast* (Macworld, 18 Aug 2023)
www.macworld.com/article/2035413/iphone-15-usb-c-35w-charging.html

¹⁰⁰ *Big win for right to repair with new EU rules for batteries - but legislators must get the implementation right* (Repair.eu 14 Jun 2023)
repair.eu/news/big-win-for-right-to-repair-with-new-eu-rules-for-batteries-but-legislators-must-get-the-implementation-right/

exceptionnel durant lequel 44 % des télétravailleurs expérimentaient cette forme de travail pour la première fois. Selon ce baromètre, à la fin de l'année 2020, 86 % des télétravailleurs souhaitent continuer à le faire après le confinement. En revanche, la perspective d'un télétravail rendu obligatoire après la crise inquiéterait 30 % des salariés. Pour salariés et dirigeants, la durée idéale de télétravail serait en moyenne de 2 jours par semaine.¹⁰¹

En effet, les salariés qui ont expérimenté durant le confinement un éloignement forcé de leurs lieux de travail ont aussi pris conscience des risques de « désocialisation » voire des problèmes de santé mentale et physique qu'entraînent les technologies de télétravail¹⁰². Les usages de l'Internet ont connu des cycles d'adoption de plus en plus rapides à mesure qu'apparaissaient de nouvelles générations de technologies en particulier dans les réseaux sociaux. Cependant, si les usages des outils de visioconférence ont connu une brusque accélération lors de la pandémie de *Covid*, des limites à l'acceptation de ces technologies continuent cependant à exister pour le travail à distance dans sa forme actuelle. Ces limites sont à la fois technologiques, sociales et psychologiques. Si les outils de visioconférence ont connu des améliorations en termes de qualité du son et de définition des images, la sensation « d'immersion » reste insuffisante et ne permet pas aux utilisateurs d'échanger de manière fluide avec leurs interlocuteurs. Les nouvelles générations de technologies immersives (réalité virtuelle, réalité augmentée, réalité mixte ou hybride...) sont parfois évoquées comme la prochaine étape dans l'intégration du télétravail dans nos sociétés. Cependant, des préoccupations liées aux habitudes sociales continuent d'être évoquées pour expliquer les difficultés à modifier les interactions au travail et plus largement dans la vie sociale.

Dans ce domaine, l'échec industriel des lunettes de réalité augmentée *Google Glass* en 2013 est emblématique des limites sociales auxquelles peuvent être confrontés les concepteurs de technologies. En effet, les personnes choisies par *Google* pour tester ces lunettes qui étaient équipées d'une caméra et d'un micro, ont rapidement suscité des

¹⁰¹ *Évolution des modes de travail, défis managériaux : comment accompagner entreprises et travailleurs ?* (Rapport d'information du Sénat n° 759 (2020-2021), déposé le 8 juillet 2021)
www.senat.fr/rap/r20-759/r20-7591.html

¹⁰² *La pandémie de covid-19, tournant dans la pratique du télétravail ?* (Malo Mofakhami, (Le travail à distance, pages 19 à 39 Ed. La Découverte 2023)
www.cairn.info/le-travail-a-distance--9782348079481-page-19.htm

réactions négatives des personnes lorsqu'elles les portaient. Leurs interlocuteurs craignaient en particulier d'être soumis à leur insu à des enregistrements. Il s'agissait d'un appareil qui remettait directement en cause des normes sociales établies en matière de communication interpersonnelle. Ces craintes ont été à l'origine d'une intense campagne de lobbying « *Anti-Glass* » organisée par les associations de protection des libertés individuelles aux États-Unis. Ainsi, au début 2015, *Google* a été contraint d'annoncer la fin anticipée du projet *Glass* avant même les débuts de la commercialisation auprès du grand public... Il est aussi à noter que la controverse autour des *Google Glass* a commencé avant les révélations d'Edward Snowden sur la surveillance de masse. Les raisons évoquées par les détracteurs de ces lunettes ne se limitaient pas aux seuls risques de surveillance ou d'atteinte à la vie privée par *Google*. En effet, à la différence des smartphones utilisés pour enregistrer des vidéos, il devenait impossible de savoir si et quand une personne effectuait ou non un enregistrement audio ou vidéo en particulier dans le cercle privé et quel usage pourrait en être fait par la suite. Plus récemment les mêmes raisons ont été évoquées¹⁰³ pour expliquer l'échec relatif des lunettes de réalité augmentées *Ray-Ban Stories* conçues par *Facebook*¹⁰⁴.

Là encore, dans les temps à venir, les questions d'acceptabilité sociale continueront d'être déterminantes pour les évolutions des technologies dans le domaine du travail et plus largement dans la vie sociale. L'accompagnement et la sensibilisation des usagers aux nouvelles technologies « *frugales* » constitueront des volets cruciaux des démarches d'évolution des usages du numérique durable.

¹⁰³ *Through The Looking Glass: Why Facebook's Camera-Enabled Glasses Will Fail* (Forbes Sep 19, 2021)
www.forbes.com/sites/jonpicoult/2021/09/19/through-the-looking-glass-why-facebooks-camera-enabled-glasses-will-fail/

¹⁰⁴ *Why you shouldn't buy Facebook Ray-Ban smart glasses* (Access Now, EDRI October 6, 2021)
edri.org/our-work/why-you-shouldnt-buy-facebook-ray-ban-smart-glasses/

2. SENSIBILISER LES USAGERS AU NUMÉRIQUE DURABLE

De nombreuses organisations et structures d'enseignement commencent à sensibiliser leurs usagers aux meilleures pratiques liées à la sobriété numérique. Des initiatives permettent aussi de sensibiliser les usagers au développement durable *via* les technologies numériques.

Ainsi, *La Banque Postale* a créé une application dédiée à la sensibilisation de ses usagers à l'empreinte carbone de leurs achats¹⁰⁵. Cette initiative se rapproche des dispositifs de sensibilisation des utilisateurs avec les étiquettes énergie pour les appareils électriques ou encore des codes couleurs du *Nutri-Score* ou d'applications comme *Yuka* dans le domaine de l'alimentation. Des dispositifs équivalents pourraient progressivement être étendus à l'ensemble des achats de technologies et de services numériques.

3. VERS UN LABEL EUROPÉEN SUR LE NUMÉRIQUE DURABLE

Mais plus que des informations générales sur le développement durable, il devient possible de créer de nouveaux services d'informations qui permettront d'associer les usagers des technologies dans des démarches participatives autour du numérique durable. Ces services liés à un *Label européen sur le numérique durable* leur permettront à la fois de mieux appréhender les enjeux du numérique durable et d'effectuer des choix qui auront un impact sur l'ensemble de l'empreinte carbone. Ainsi, en plus de recommandations sur la sobriété numériques, il deviendrait alors possible de faire connaître aux usagers des technologies l'empreinte carbone réelle des technologies qu'ils utilisent quotidiennement. La mise en œuvre d'un tel projet nécessitera une concertation auprès de l'ensemble des acteurs des technologies et des acteurs de la société civile afin d'établir quels sont les indicateurs les plus pertinents.

¹⁰⁵ *Calculer son empreinte carbone avec Carbo* (La Banque Postale 2023)

www.labanquepostale.fr/particulier/solutions-citoyennes/transition-ecologique/carbo.html

En effet, la création d'indicateurs simples à destination de l'ensemble des publics (citoyens et professionnels) exigera d'avoir accès aux données de fabrication et de fonctionnement auprès de l'ensemble des concepteurs et distributeurs des technologies numériques. De plus, la complexité d'une classification qui synthétisera l'ensemble des caractéristiques environnementales des produits et services relèvera du fait qu'il conviendra de pondérer certains critères (réparabilité, empreinte carbone initiale, consommation énergétique directe et indirecte...¹⁰⁶). Ces choix pourraient en effet avoir un impact majeur sur les choix effectués par les citoyens et à terme par les entreprises.

Ces indicateurs devront donc être à la fois assez accessibles pour être utiles à la sensibilisation des citoyens aux enjeux du développement durable. Mais ces indicateurs ou ces alertes devront aussi être assez pertinents sur le plan industriel pour permettre de privilégier les solutions technologiques les plus vertueuses en matière d'empreinte carbone. Ces dispositifs devraient aussi permettre d'analyser les conséquences des usages numériques en termes d'émissions carbone durant l'utilisation des dispositifs technologiques.

Là encore, la protection des données issues des usagers devra être prise en compte dès la conception de ces dispositifs. En effet, comme on a pu le constater sur d'autres types d'incitations (comme celles liées au bien-être et à la santé) la limite entre sensibilisation des usagers et conditionnement des comportements reste délicate à fixer. Et ce d'autant plus qu'il devient possible grâce aux objets présents autour ou sur les personnes, d'analyser les comportements des usagers dans l'ensemble de leurs activités quotidiennes. Cette tendance au contrôle des populations à des fins politiques pourrait en effet marquer le passage de l'ingénierie sociale au contrôle social assisté par les technologies numériques. Les nécessités environnementales pourraient rendre ce contrôle politiquement acceptable comme cela a pu être le cas pour des raisons sanitaires pendant la pandémie covid.

¹⁰⁶ L'indice de réparabilité des ordinateurs est déjà exigé dans le cadre de la loi anti-gaspillage pour une économie circulaire (AGEC)

www.ecologie.gouv.fr/loi-anti-gaspillage-economie-circulaire

Un autre aspect essentiel du développement d'un *Label sur le numérique durable* sera lié à la sensibilisation et l'incitation à l'écoconception auprès des industriels des technologies. En effet, parallèlement aux mesures prises par les éco-organismes et les distributeurs pour augmenter (en aval) la part des terminaux recyclés, il conviendra de mieux intégrer (en amont) les évolutions des technologies de recyclage afin de concevoir des dispositifs qui intégreront en priorité des matériaux plus facilement recyclables. Ainsi, ce *Label sur le numérique durable* permettra aux usagers mais aussi aux concepteurs des technologies, de mieux prendre en compte les évolutions liées à la recyclabilité des terminaux.

4. DES MODELES ÉCONOMIQUES INCOMPATIBLES AVEC LE NUMÉRIQUE DURABLE ?

Un autre aspect de la sensibilisation des citoyens au numérique durable portera sur les évolutions nécessaires des technologies et des services développés dans les temps à venir. En effet, la seule sobriété numérique vis-à-vis des technologies actuelles ne permettra pas d'inscrire le numérique dans une trajectoire durable. Une véritable discussion démocratique doit avoir lieu sur la nature des services mis en place auprès des citoyens, leurs modèles économiques et leur impact réel en termes d'émissions carbone.

En effet, plus que l'impact environnemental de la fabrication de telle ou telle technologie, il convient désormais d'analyser la dynamique générale qui a conduit à rendre « non durable » la trajectoire de l'écosystème du numérique. Ainsi, parallèlement à la remise en question des modèles économiques des grandes plateformes sur Internet, les contraintes liées au développement durable pourraient amener à faire évoluer les modèles économiques de l'ensemble de l'industrie des technologies. En effet, au vu des enjeux climatiques, la poursuite de la performance technologique en elle-même ne saurait constituer une fin en soi. Ainsi, l'évolution de la puissance des processeurs ne

peut plus être l'objectif unique des industriels des technologies. Au point que certains experts envisagent désormais de remettre en cause le « dogme » de la *loi de Moore*. Cette « loi empirique » décrit le doublement du nombre de transistors dans les processeurs tous les 2 ans. Or c'est précisément cette augmentation de la puissance qui a fondé la croissance des industries du matériel informatiques mais aussi des logiciels depuis qu'elle a été formulée en 1965 par le fondateur de la société *Intel*.

Si la loi de Moore venait à s'arrêter, la fuite en avant pour construire de nouvelles usines de fabrication de processeurs s'arrêterait, elle aussi. De telles usines pourraient alors durer beaucoup plus longtemps. Mais surtout, les circuits intégrés cesseraient de se démoder et pourraient alors durer considérablement plus longtemps, et nous en fabriquerions beaucoup moins. En réduisant très sensiblement la fabrication du matériel, nous réduirions d'autant ce qui est la principale source de gaz à effet de serre du numérique, à savoir la fabrication du matériel (terminaux, réseau et data centers), laquelle représente 78 % de l'empreinte du numérique en France. Nous le savons, le numérique est autant un remède qu'un poison pour le changement climatique. En réduisant massivement son empreinte, il basculerait ainsi clairement du côté remède à ce qui est un des plus grands défis de l'humanité au XXI^e siècle avec le dépassement des limites planétaires, qui comprend l'effondrement de la biodiversité. ¹⁰⁷

La démocratisation des technologies numériques a été marquée par d'importantes ruptures ergonomiques suivies de longues phases de « consolidation ». Cela a été le cas avec le développement des ordinateurs personnels à la fin des années soixante-dix, puis avec la diffusion des interfaces graphiques au milieu des années quatre-vingt, jusqu'au web et la navigation hypertexte dans les années quatre-vingt-dix, ou plus récemment encore avec l'essor des smartphones et des interfaces tactiles à la fin des années 2000. Cependant, à l'issue de chacune de ces innovations majeures, de longues périodes « d'absorption » des performances des processeurs et de la vitesse des transmissions des données ont été mises en place. Ainsi les évolutions ultérieures n'avaient que peu de traductions visibles pour les utilisateurs. Cependant, pour utiliser les nouvelles versions des systèmes, le remplacement des ordinateurs ou des smartphones s'avérait « nécessaire ». Des cycles courts ont ainsi été artificiellement créés pour éviter que les terminaux numériques ne puissent durer. Or, ce que certains industriels des

¹⁰⁷ *Pour en finir avec la loi de Moore* (Fristan Nitot - Octo Talks, 27 juin 2023)

blog.octo.com/pour-en-finir-avec-la-loi-de-moore/

technologies décrivent comme des innovations « incrémentales » n'a souvent été que le moyen de prolonger artificiellement des cycles industriels déjà rentabilisés. Désormais, ces cycles courts s'inscrivent en contradiction avec les objectifs du développement durable tant sur le plan énergétique que sur le plan des ressources nécessaires au fonctionnement des infrastructures numériques. Quelques exemples illustrent à quel point l'augmentation de la puissance des ordinateurs n'a pas été corrélée à des changements perceptibles par les utilisateurs :

- *Le site archive.org nous apprend que la page Web moyenne a vu son poids multiplié par 150 en 25 ans,*
- *La consommation de données d'un foyer américain a été multipliée par 38 en 10 ans,*
- *Le temps de latence pour afficher un caractère sur l'écran a été multiplié par 5 entre un Apple II de 1983 et un Lenovo X1 plus jeune de 33 ans,*
- *Le couple Office/Windows a vu sa configuration minimale de mémoire vive multipliée par 171 en deux décennies.¹⁰⁸*

En effet, le développement d'innovations technologiques de rupture est à la fois plus coûteux en termes d'investissement et plus aléatoire sur le plan industriel. Des situations de « capture » de l'innovation ont souvent été décrites dans les situations de duopole ou d'oligopole où l'innovation était perçue comme un risque par des acteurs dominants¹⁰⁹.

Ce mouvement de stagnation technologique allant de pair avec la satisfaction immédiate de l'utilisateur parfois au détriment de ses intérêts à long terme. Ce que l'universitaire et ancien conseiller pour les technologies de la présidence des États-Unis, Tim Wu résume en ces termes : « *Au XXI^e siècle dans les pays développés, la « commodité » [ou l'ergonomie], c'est-à-dire le fait de pouvoir accomplir des tâches de manière plus efficaces et plus faciles, est peut-être la force la plus puissante pour modeler nos existences individuelles et nos économies. C'est particulièrement vrai aux États-Unis où, malgré tous les hommages rendus à la liberté et à l'individualisme, on se demande parfois si la commodité n'est pas en fait devenue la valeur suprême...* »¹¹⁰

¹⁰⁸ Ibid.

¹⁰⁹ *The Curse of Bigness: Antitrust in the New Gilded Age* par Tim Wu (Columbia Global Reports Nov 2018)

¹¹⁰ *The Tyranny of Convenience* (Op-Ed Pr Tim Wu, *New York Times* 16 Feb 2018)

www.nytimes.com/2018/02/16/opinion/sunday/tyranny-convenience.html

Dans le même temps, l'explosion du volume des données échangées s'est poursuivie et avec elle la démultiplication des capacités de traitement et de stockage et de transmission de ces informations. En effet parallèlement à l'accroissement de la puissance des processeurs, les technologies de transmission et de stockage des informations ont connu des progrès (et des effondrements de prix) comparables.

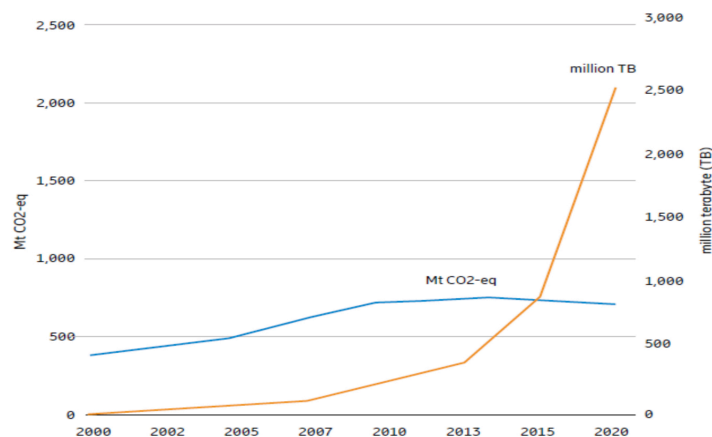


Figure 2 Carbon footprint of ICT and data traffic development
Évolution des émissions carbone du numérique et volumes d'informations générés (Ericsson 2020)¹¹¹

L'explosion en volume des informations traitées par les systèmes informatiques est désormais jugée insoutenable et cela dans tous les sens du terme. En effet, comme le fait remarquer le physicien Melvin M. Vopson, cette augmentation exponentielle des volumes d'informations ne sera soutenable dans la durée ni énergétiquement, ni même technologiquement :

Pour répondre à la demande croissante de stockage de données numériques, tous les deux ans, une centaine de nouveaux centres de données à grande échelle sont construits. Notre étude récente a examiné ces tendances et conclu que, avec un taux de croissance annuel de 50 %, dans 150 ans environ, le nombre de bits numériques atteindra une valeur impossible à atteindre, dépassant le nombre de tous les atomes de la Terre. Dans 110 ans environ, l'énergie nécessaire pour soutenir

¹¹¹ *A quick guide to your digital carbon footprint* (Ericsson 2020)

www.ericsson.com/4ac671/assets/local/reports-papers/consumerlab/reports/2020/ericsson-true-or-false-report-screen.pdf

cette production numérique dépassera la consommation électrique totale de la planète aujourd'hui...¹¹²

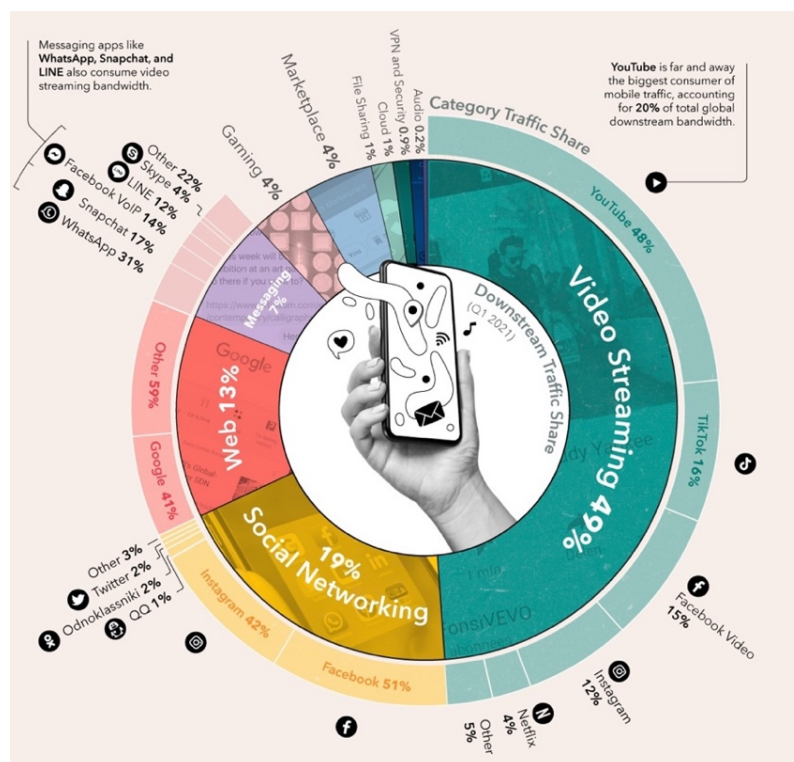
Parallèlement aux constructeurs informatiques, certaines des grandes plateformes de l'Internet ont aussi développé des modèles économiques qui mènent à une utilisation « non durable » des ressources du numérique. Ces modèles économiques ont pour objectif de rendre de plus en plus addictifs les contenus et services proposés aux usagers afin qu'ils soient exposés au plus grand nombre de messages publicitaires. Ces modèles économiques sont ainsi à l'origine d'une augmentation considérable des flux d'informations (en particulier des flux vidéo très consommateurs de bande passante). Dans le même temps, ces plateformes ont collecté toujours plus d'informations sur leurs usagers pour les exposer à davantage de messages publicitaires ciblés. Cette accumulation des données personnelles au sein des grandes plateformes de l'Internet a déjà conduit à de nombreux scandales liés aux manipulations issues de l'exploitation incontrôlée de ces données avec parfois des conséquences sur nos démocraties elles-mêmes. Cela a été en particulier le cas pour *Facebook* lors du scandale *Cambridge Analytica*. En ce sens, les préoccupations environnementales et celles qui sont liées à la protection des données personnelles se rejoignent. Comme le rappelle la sociologue Zeynep Tufekci, plus encore que les technologies qui les sous-tendent, ce sont des modèles économiques devenus « toxiques » qu'il convient désormais de remettre en cause. En effet, cette logique publicitaire conduit à amplifier les contenus les plus addictifs qui sont aussi les contenus les plus radicaux : *Les [concepteurs des] algorithmes de YouTube se sont rendu compte que si vous incitez les gens à penser que vous pouvez leur montrer quelque chose de plus « hardcore », ils seront susceptibles de rester plus longtemps, pendant que Google leur montre des publicités...¹¹³*

Or les dérives de cette logique publicitaire ne sont en rien une évolution « inéluctable » de l'Internet. Ces évolutions contreviennent même aux principes qui ont fondé l'architecture de l'Internet. En effet, deux des innovations majeures qui ont transformé

¹¹² *The world's data explained: how much we're producing and where it's all stored* (The Conversation, 4 mai 2021) theconversation.com/the-worlds-data-explained-how-much-were-producing-and-where-its-all-stored-159964

¹¹³ *On a construit une infrastructure de surveillance pour que les gens cliquent sur des pubs* (Usbek & Rica 2 novembre 2017) usbeketrica.com/article/notre-attention-et-nos-data-ne-sont-pas-a-vendre-au-demagogue-le-plus-offrant

l'univers numérique n'ont pas fait l'objet de dépôts de brevets par leurs inventeurs. Cela a été le cas pour l'invention des technologies fondamentales de l'Internet (*TCP/IP*) par Vinton Cerf, Robert Kahn et Lawrence Roberts au début des années soixante-dix puis celles du *World Wide Web* par Tim Berners-Lee et Robert Cailliau à la fin des années quatre-vingt. Il s'agissait en effet d'une volonté explicite de la part de leurs inventeurs que ces innovations restent librement accessibles à l'ensemble des utilisateurs. C'est aussi ce principe d'innovations ouvertes présent à l'origine de l'Internet qui a été progressivement remis en cause par de grandes plateformes propriétaires (que l'on nomme aussi *Big Tech*) qui centralisent les informations de leurs usagers et sont à l'origine des flux d'informations toujours plus importants. À titre d'exemple, *YouTube*, *TikTok*, *Instagram* et *Facebook Video* sont à l'origine de près de la moitié de la bande passante distribuée vers les mobiles dans le monde.



Bande passante utilisée par applications mobiles (Visual Capitalist, 2021)¹¹⁴

¹¹⁴ *The World's Most Used Apps, by Downstream Traffic* (Visual Capitalist, 2021)
www.visualcapitalist.com/the-worlds-most-used-apps-by-downstream-traffic/

Ces grandes plateformes ont constitué les vecteurs majeurs de l'augmentation de la consommation des ressources énergétiques sur Internet. Ainsi, en moins d'une décennie la consommation d'énergie de *Google* a quintuplé et elle est passée de 2,8 térawatt-heure en 2011 à 15,4 térawatt-heure en 2020¹¹⁵. Désormais c'est l'évolution des *Big Tech* vers l'utilisation d'énergies renouvelables et l'optimisation énergétique de leurs data centers qui constituent les axes principaux de la réduction de leur empreinte carbone. Ainsi, pour la plupart, les *Big Tech* affichent leur volonté d'atteindre leurs objectifs de neutralité carbone voire de devenir "*carbon negative*" entre 2030 et 2040 en utilisant pour certaines des technologies d'élimination du carbone pour compenser les émissions carbone restantes¹¹⁶.

Cependant, même si des progrès ont été effectués sur la consommation énergétique des ordinateurs ou encore des data centers, l'évolution de l'empreinte carbone des technologies numériques reste marquée par une croissance importante. De plus, les demandes issues des prochaines évolutions technologiques pourraient remettre en cause les prévisions de consommation énergétiques au-delà des seules grandes plateformes des *Big Tech*. Ces évolutions majeures apparaissent liées à l'essor des systèmes d'intelligence artificielle ou des technologies immersives (réalité virtuelle, réalité augmentée ou encore réalité mixte) ou à l'avenir aux technologies de projections holographiques. Ces ruptures technologiques suscitent désormais des questions sur leur impact environnemental et sur les conséquences qu'elles pourraient avoir sur l'ensemble de l'écosystème technologique.

D'autres évolutions technologiques pourraient aussi dans les années à venir diminuer le recours aux clouds issus des grandes plateformes et donc le besoin en data centers. C'est le cas du mouvement vers le logiciel local ou "*Local-First Software*" qui a pour but de concevoir des outils collaboratifs sous la forme de logiciels libres permettant le

¹¹⁵ www.statista.com/statistics/788540/energy-consumption-of-google/

¹¹⁶ How tech went big on green energy (Financial Times, 10 Feb 2021)
www.ft.com/content/0c69d4a4-2626-418d-813c-7337b8d5110d

traitement local des données sans avoir à recourir à des machines distantes. Son principe fondamental est simple : *"Il n'y a pas de cloud. Il n'y a que l'ordinateur de quelqu'un d'autre..."*.

En effet, l'usage du cloud qui s'est généralisé en l'espace de quelques années induit à la fois la création d'infrastructures massives pour le traitement et le stockage des données (*via* les data centers) mais cela induit aussi d'importants transferts des données entre les ordinateurs des utilisateurs et ceux des fournisseurs de clouds. Ainsi, au-delà des coûts importants de ces solutions de cloud, en particulier pour les petites et moyennes entreprises, cette dimension liée à la forte consommation de ressources par les clouds des grandes plateformes a incité des développeurs à envisager des solutions alternatives qui mettent à contribution les capacités de traitement local au plus près des usagers.

L'intérêt de disposer de logiciels qui fonctionnent localement en lieu et place des systèmes de clouds distants est triple. Il s'agit en premier lieu d'un intérêt pratique (pour accélérer les vitesses de traitement), d'un intérêt économique (par l'absence de coûts liés à l'intervention d'une société tierce) et enfin d'un intérêt environnemental par la réduction de l'empreinte carbone liée aux infrastructures de cloud (stockage, traitement et transmission des données).

"Lorsqu'une application est basée sur le cloud, ses performances sont limitées par la vitesse de sa connexion au serveur central et par la rapidité de réponse de ce dernier. Avec une application locale, c'est l'appareil de l'utilisateur qui exécute tout le code. Plus votre ordinateur portable (ou votre smartphone) est performant, plus l'application est performante..."¹¹⁷

La pression pour mettre en œuvre des solutions logicielles "bas carbone" pourrait rendre ces architectures décentralisées plus attractives pour les utilisateurs individuels mais aussi pour les entreprises. Dans cette perspective, il serait utile de créer un répertoire des solutions logicielles européennes alternatives aux clouds des grandes plateformes. Ce répertoire, en plus de permettre de connaître les applications disponibles dans ce domaine pourrait

¹¹⁷ *The Cloud Is a Prison. Can the Local-First Software Movement Set Us Free?* (Wired, 3 Aug 2023)
www.wired.com/story/the-cloud-is-a-prison-can-the-local-first-software-movement-set-us-free/

indiquer le bilan carbone prévisionnel de ces applications dans les différentes configurations qui pourraient être déployées auprès des utilisateurs.

IV. ÉVOLUTIONS TECHNOLOGIQUES ET MAÎTRISE DE L'ÉNERGIE

1. DES INTELLIGENCES ARTIFICIELLES DURABLES ?

Les systèmes d'IA générative (et en particulier des *Large Language Models* comme *ChatGPT* d'*OpenAI* ou *Bard* de *Google* mais aussi les IA destinées à la création d'images ou de vidéos comme *Midjourney*, *Stable Diffusion*, *DALL-E 2*, *Pictory*, *Synthesia*, *Wave Video*, *Designs.AI...*) nécessitent lors de leur phase d'entraînement d'importantes ressources de calcul sur des systèmes dédiés (via des puces graphiques ou GPU) mais aussi d'immenses ressources de stockage des informations. Un article de l'université du *Massachusetts* à *Amherst* paru en 2019 a montré que l'entraînement d'un algorithme d'apprentissage profond (*Natural Language Processing ou NLP*) produisait 300 000 kg d'équivalent CO₂, soit près de cinq fois plus que les émissions d'une voiture américaine moyenne durant l'ensemble de sa durée de vie¹¹⁸. Les dernières versions des technologies d'intelligence artificielle pourraient nécessiter des niveaux d'énergie encore plus conséquents. L'essor de ces technologies d'IA a d'ailleurs créé un début de pénurie en raison de la difficulté des constructeurs de puces graphiques (comme *NVIDIA*)¹¹⁹ pour répondre à la demande. Cette pénurie surviendrait aussi du fait que les sociétés qui souhaitent développer des services liés à l'IA, se sont précipitées de manière

¹¹⁸ *Energy and Policy Considerations for Deep Learning in NLP* (E. Strubell A. Ganesh A. McCallum College of Information and Computer Sciences University of Massachusetts Amherst, 5 Jun 2019) arxiv.org/pdf/1906.02243.pdf

¹¹⁹ *Nvidia GPUs see massive price hike and huge demand from AI* (Digital Trends May 23, 2023) www.digitaltrends.com/computing/nvidia-ai-gpus-shortage-price-hikes/

« défensive » vers les fournisseurs de cloud de haut niveau qui proposent des services d'IA¹²⁰.

La charge énergétique de ces nouvelles générations d'IA en ressources de stockage et de calcul est telle que les plus grands acteurs des technologies aux États-Unis, en Europe et en Chine tiennent désormais faire valoir leurs savoir-faire dans le domaine de l'optimisation énergétique des data centers. Ainsi, *Huawei* décrit sa stratégie pour développer des data centers « écoresponsables » centrés sur l'IA :

Huawei a présenté sa stratégie pour relever les défis croissants auxquels sont confrontés les centres de données à l'ère de l'IA tout en garantissant la durabilité lors d'une récente présentation au Mobile World Congress (MWC) à Shanghai. Ce plan, axé sur un refroidissement efficace, une densité de puissance accrue et une construction modulaire rapide, vise à garantir que ses centres de données répondent à la demande des consommateurs tout en respectant les pratiques écologiques.¹²¹

La montée en puissance des nouvelles générations de services d'intelligence artificielle pourrait remettre en cause les modèles économiques d'apparente gratuité publicitaire. En effet, des services comme *ChatGPT* sont basés sur la souscription d'abonnements et ils pourraient même inciter les autres grandes plateformes comme *Google* à faire évoluer le modèle économique pour s'éloigner du modèle et du microciblage basé sur l'extraction massive de données personnelles.

« Nous avons une tradition de d'abord chercher les usages, puis de trouver des moyens de les monétiser. » Jack Krawczyk, chargé chez Google du développement du chatbot Bard, explique ainsi l'absence, pour l'heure, de toute source de revenus pour ce robot conversationnel lancé ce jeudi 13 juillet en France. En cas de succès, ajoute le dirigeant, le géant de la recherche aura, pour rentabiliser ce concurrent de ChatGPT, une palette de moyens disponibles : les publicités ciblées,

¹²⁰ *Big cloud server shortage could slow generative AI's breakneck pace* (Insider Intelligence Apr 13, 2023)
www.insiderintelligence.com/content/big-cloud-server-shortage-could-slow-generative-ai-s-breakneck-pace

¹²¹ *Balancing AI and sustainability: Huawei's strategy for green data centers* (Light Reading, 6 Jul 2023)
www.lightreading.com/balancing-ai-and-sustainability-huaweis-strategy-for-green-data-centers/a/d-id/785572

*l'abonnement, l'application mobile payante, la vente au volume d'activité à destination des entreprises...*¹²²

Lors de la survenue de la pandémie de *Covid-19*, même la très influente revue du MIT reconnaissait l'échec de la Silicon Valley à créer des innovations utiles aux citoyens. Et cela est en partie lié au modèle économique publicitaire de ces sociétés dont l'objectif est de recueillir (ou extraire) le plus de données sur les individus et ce le plus rapidement possible afin de qualifier précisément des cibles publicitaires (on parle dans ce cas de "micro-ciblage" ou "microtargeting").

*"La pandémie a mis en évidence un problème lancinant : les États-Unis ne sont plus très doués pour trouver les nouvelles idées et technologies en rapport avec nos besoins les plus fondamentaux. Nous sommes très doués pour concevoir des produits brillants, principalement des logiciels, qui rendent nos vies plus pratiques à bien des égards. Mais nous sommes beaucoup moins doués pour réinventer les soins de santé, repenser l'éducation, rendre la production et la distribution alimentaires plus efficaces et, d'une manière générale, mettre notre savoir-faire technique au service des plus grands secteurs de l'économie."*¹²³

L'évolution des modèles économiques des plateformes de l'Internet pourrait aussi avoir des conséquences importantes sur leur consommation d'énergie et de ressources. En effet, les contenus les plus gourmands en bande passante sont souvent directement liés à des plateformes publicitaires (comme les vidéos et les images échangées sur les principaux réseaux sociaux ; *Facebook, YouTube, TikTok, Instagram*). L'évolution vers des systèmes de souscriptions payantes pourrait ainsi avoir un effet sur le volume de données échangées et donc sur la consommation d'énergie des réseaux de communication. Ainsi, la diffusion des systèmes d'IA "locales" (y compris via des logiciels libres) pourrait accélérer la remise en cause du duopole *Google / Microsoft-OpenAI*. C'est la stratégie qu'essaye de mettre en place *Mark Zuckerberg, le P.-D.G. de*

¹²² « *Le modèle économique de l'intelligence artificielle définira l'avenir du secteur* » (Le Monde 13 juillet 2023)
www.lemonde.fr/idees/article/2023/07/13/le-modele-economique-de-l-intelligence-artificielle-definira-l-avenir-du-secteur_6181796_3232.html

¹²³ *Covid-19 has blown apart the myth of Silicon Valley innovation* (MIT Tech Review 25 Apr 2020)
www.technologyreview.com/2020/04/25/1000563/covid-19-has-killed-the-myth-of-silicon-valley-innovation/

Meta en ouvrant le code source de son IA générative *Llama 2* afin de « diluer » le marché de l'IA générative face à ses deux principaux concurrents¹²⁴.

De nouveaux modèles économiques pourraient aussi voir le jour avec la montée en puissance des systèmes d'intelligence artificielle décentralisés. En termes d'empreinte carbone, cette évolution pourrait avoir pour conséquence la diminution de recours aux grandes plateformes de cloud. Des travaux de recherche devront être menés pour mesurer l'impact énergétique que ces évolutions pourront avoir dans les prochaines années. Il conviendrait d'établir dans le même temps un audit indépendant du fonctionnement, des algorithmes d'IA, des principales plates-formes ainsi que des technologies les plus consommatrices d'énergie en vue d'analyser l'évolution de leur impact sur l'empreinte carbone directe et indirecte et des technologies numériques ainsi que sur l'utilisation des ressources et matériaux stratégiques pour les technologies numériques.

2. CRYPTOMONNAIES : VERS UNE INDISPENSABLE OPTIMISATION ÉNERGETIQUE

Certaines des technologies logicielles qui ont été développées lorsque les inquiétudes liées au réchauffement climatique n'étaient pas aussi présentes dans le débat public, sont désormais considérées comme des « anomalies environnementales ». En particulier s'il existe des solutions alternatives plus économes en énergie. C'est le cas pour les technologies de la *blockchain* (chaîne de blocs en français) qui est au cœur des systèmes des cryptomonnaies. La blockchain a été officiellement diffusée en 2008 mais ses principes ont été conçus dans les années quatre-vingt-dix où l'on considérait que la *loi de Moore* pourrait « indéfiniment » continuer à faire doubler la puissance des processeurs

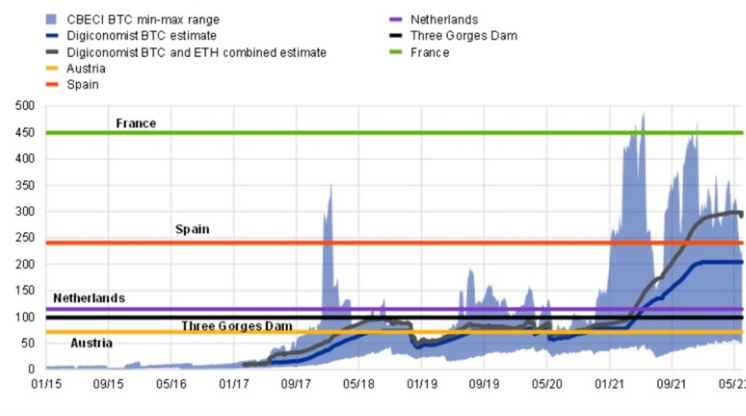
¹²⁴ *Llama 2: why is Meta releasing open-source AI model and are there any risks?* (The Guardian 20 Jul 2023) www.theguardian.com/technology/2023/jul/19/why-is-meta-releasing-llama-2-open-source-ai-model-mark-zuckerberg

tous les deux ans. Le prix de l'énergie et surtout les conséquences climatiques liées à la consommation de cette énergie n'entraient pas encore dans l'équation industrielle des technologies. Ainsi, les mécanismes de création des cryptomonnaies comme le *Bitcoin* (qui reste la cryptomonnaie la plus populaire) nécessitaient d'importantes puissances de calcul et donc une consommation énergétique considérable sans même évoquer l'empreinte carbone de l'ensemble des ressources matérielles utilisées pour « *miner* » les cryptomonnaies : cartes graphiques, processeurs de haut niveau ou encore construction et fonctionnement des data centers qui hébergeaient ces immenses puissances de calcul.

La *Banque centrale européenne* a ainsi évalué que durant la pandémie de Covid, la consommation énergétique issue de la création de cryptomonnaies comme le *Bitcoin* ou *l'Ether* dépassait, à elle seule, celle d'un pays comme l'Espagne et s'approchait de celle de la France.¹²⁵

Estimated annualised electricity consumption of global bitcoin (BTC) and ether (ETH) compared with that of selected countries

(1 Jan. 2015-31 May 2022; terawatt hours)



Sources: Cambridge Bitcoin Electricity Consumption Index (CBECI), Digiconomist, Cambridge Centre for Alternative Finance, International Energy Agency, Morgan Stanley and ECB calculations.

Évolution de la consommation électrique des principales cryptomonnaies (Banque Centrale Européenne 2023)

¹²⁵ *Mining the environment – is climate risk priced into crypto-assets?* (European Central Bank 2023) www.ecb.europa.eu/pub/financial-stability/macprudential-bulletin/html/ecb.mpbu202207_3~d9614ea8e6.en.html

En 6 ans, entre 2015 et 2021, le nombre des data centers dans le monde a plus que doublé ce qui correspondait à une augmentation de 10 à 60 % de leur consommation énergétique. Dans le même temps, les infrastructures de transmission des données

“ *En 6 ans, la consommation liée au « minage » des cryptomonnaies a connu une croissance de 2300 % et représente désormais la moitié de la consommation électrique mondiale des data centers...*

auront connu une croissance équivalente (20-60 %).

Mais à elle seule, la consommation liée au « minage » des cryptomonnaies a connu une croissance de 2 300 % et représente désormais la moitié de la consommation électrique mondiale des data centers.

Global trends in digital and energy indicators, 2015-2022

	2015	2022	Change
Internet users	3 billion	5.3 billion	+78%
Internet traffic	0.6 ZB	4.4 ZB	+600%
Data centre workloads	180 million	800 million	+340%
Data centre energy use (excluding crypto)	200 TWh	240-340 TWh	+20-70%
Crypto mining energy use	4 TWh	100-150 TWh	+2300-3500%
Data transmission network energy use	220 TWh	260-360 TWh	+18-64%

Sources: Internet users [ITU (2023)]; internet traffic [IEA analysis based on Cisco (2015); TeleGeography (2022); Telegeography (2023); Cisco (2019), Cisco Visual Networking Index]; data centre workloads [Cisco (2018), Cisco Global Cloud Index]; data centre energy use [IEA analysis based on Malmodin & Lundén (2018); ITU (2020); Masanet et al. (2020); Malmodin (2020); Hintemann & Hinterholzer (2022); Malmodin et al. (2023)]; cryptocurrency mining energy use [IEA analysis based on Cambridge Centre for Alternative Finance (2023); Gällersdörfer, Klaußen and Stoll (2020); McDonald (2022)]; data transmission network energy use [Malmodin & Lundén (2018); Malmodin (2020); ITU (2020); Coroama (2021); GSMA (2022); GSMA (2023); Malmodin et al. (2023)].

Évolutions des consommations énergétiques par secteur d'activité entre 2015 et 2022 (IEA)¹²⁶

¹²⁶ *Data Centres and Data Transmission Networks* (IEA Tracking report - Sep 2023)

www.iea.org/energy-system/buildings/data-centres-and-data-transmission-networks

Les gouvernements commencent en effet à se préoccuper de la consommation d'énergie liée aux cryptomonnaies. Celle-ci apparaît en effet comme disproportionnée au vu des autres catégories d'utilisations liées aux technologies. Et ce d'autant plus que le « minage » des cryptomonnaies est le plus souvent effectué dans des pays comme les États-Unis, la Chine ou le Kazakhstan où l'électricité est encore majoritairement produite via l'usage d'énergies fossiles¹²⁷.

Ainsi, dans le rapport réalisé à la demande de la présidence des États-Unis en 2022, les conséquences énergétiques des cryptomonnaies étaient décrites en ces termes : « *Les estimations actuelles des émissions de dioxyde de carbone (CO2) provenant de l'exploitation des crypto-actifs en 2022 sont de 110 à 170 (ou 140 ± 30) millions de tonnes au niveau mondial et de 25 à 50 millions de tonnes aux États-Unis. Cela représente respectivement 0,2 % à 0,3 % des émissions mondiales et 0,4 % à 0,8 % des émissions américaines.* »¹²⁸

Il est à noter que certains architectes des cryptomonnaies commencent à prendre en compte les critiques sur le caractère écologiquement « non durable » des technologies liées à la Blockchain. Ainsi, la deuxième cryptomonnaie en termes de capitalisation, l'*Ether*, a connu un changement radical de ses technologies en septembre 2022. Cette évolution aussi appelée "*The Merge*" avait pour but de réduire la consommation d'énergie liée à son fonctionnement. La plateforme *Ethereum 2.0* est ainsi passée d'une validation par le principe de la « *preuve de travail* » basée sur des calculs intensifs (*proof of work*) à une validation par la « *preuve d'enjeu* » (*proof of stake*) beaucoup plus économe en énergie. Ce changement a engendré une baisse de plus de 99 % de la consommation énergétique de

¹²⁷ *Cambridge Bitcoin Electricity Index* (Jan 2022)
ccaf.io/cbnsi/cbeci/mining_map

¹²⁸ *Energy Implications of Crypto-Assets in the United States* (White House Sep 2022)
www.whitehouse.gov/wp-content/uploads/2022/09/09-2022-Crypto-Assets-and-Climate-Report.pdf

l'*Ether*¹²⁹. Cette diminution correspondait à l'effacement de l'équivalent de la consommation électrique d'un pays comme l'Irlande ou l'Autriche¹³⁰.

Du fait de son caractère décentralisé, la technologie du *bitcoin* nécessite pour évoluer un consensus simultané de l'ensemble des personnes qui l'utilisent pour la faire évoluer. Ce qui rend très incertaines des mesures qui auraient pour objectif de contraindre les acteurs des cryptomonnaies à imiter l'exemple de l'*Ether* pour réduire considérablement la consommation énergétique de ces technologies. En effet, la décision prise par les architectes de la plateforme *Ethereum* ne nécessitait pas d'obtenir l'aval de ses utilisateurs et constituait une action centralisée qui semblait contraire aux tenants de « l'orthodoxie » d'une vision entièrement décentralisée¹³¹. Dans le cas du bitcoin, plusieurs hypothèses de régulations apparaissent désormais comme possibles : une tentative d'imposer une migration vers le principe de la « *preuve d'enjeu* » de l'ensemble des cryptomonnaies avec comme corollaire l'interdiction pour les principales plateformes d'échanges d'utiliser des cryptomonnaies qui ne répondraient pas à ce critère (dont le bitcoin). À défaut d'obtenir l'accord de l'ensemble des utilisateurs pour rendre plus « frugales » les cryptomonnaies traditionnelles, il serait possible de contraindre les acteurs majeurs de l'écosystème bitcoin (et en particulier les plateformes de services financiers) à utiliser massivement des énergies renouvelables pour alimenter les machines consacrées au minage des bitcoins. Cela permettrait *a minima* de limiter les effets environnementaux des cryptomonnaies comme le bitcoin¹³².

¹²⁹ Ethereum's 99% cut in energy use will curb crypto's climate footprint (S&P Global 16 Sep 2022)
www.spglobal.com/marketintelligence/en/news-insights/latest-news-headlines/ethereum-s-99-cut-in-energy-use-will-curb-crypto-s-climate-footprint-72145342

¹³⁰ Ethereum change cut cryptocurrency power demand (BBC News 6 Dec 2022)
www.bbc.com/news/technology-63872983

¹³¹ *Cryptocurrencies: why bitcoin should move to proof-of-stake* (Financial Times 12 Apr 2023)
www.ft.com/content/6cb33337-5e39-4573-a46f-7b0f3aa244b7

¹³² *Bitcoin is terrible for the environment – can it ever go green?* (The Guardian 26 Apr 2023)
www.theguardian.com/technology/2023/apr/26/bitcoin-mining-climate-crisis-environmental-impact

3. LA REPONSE DES ÉTATS FACE AUX CRYPTOMONNAIES

Pour les États, les instruments fondamentaux de la souveraineté sont devenus indiscernables des outils de la puissance technologique en particulier dans le domaine monétaire. Ainsi, face à la montée en puissance des cryptomonnaies, les États ont souhaité développer leurs propres instruments monétaires dématérialisés. Ces *monnaies numériques de banque centrale* (MNBC¹³³) sont également appelées « *monnaies fiduciaires numériques* » (en anglais CBDC pour *Central Bank Digital Currency*). Il s'agit en effet pour les États de « faire pièce » au *Bitcoin* ainsi qu'aux milliers de monnaies issues des *ICO* (*Initial Coin Offering*) et autre *stablecoins* dont la valeur est théoriquement « stable » parce qu'adossées à des monnaies traditionnelles. Les monnaies numériques sont désormais envisagées par les principales banques centrales comme *l'euro numérique*, le *eYuan* (ou *renminbi numérique*) ou encore le *dollar numérique*. En plus des questions de souveraineté monétaire et de sécurité des États face au blanchiment et aux transactions criminelles, ces monnaies numériques de banque centrale pourraient constituer l'une des réponses aux cryptomonnaies et à leur impact sur la consommation d'énergie. L'émission de ces monnaies souveraines par les banques centrales, du fait de leur caractère centralisé, ne nécessitera pas autant de calculs (hautement consommateurs d'énergie) que les cryptomonnaies comme le *Bitcoin*. Leurs émissions carbone seraient alors comparables aux systèmes de création de cartes de crédit actuelles dont on mesure exactement l'empreinte carbone¹³⁴.

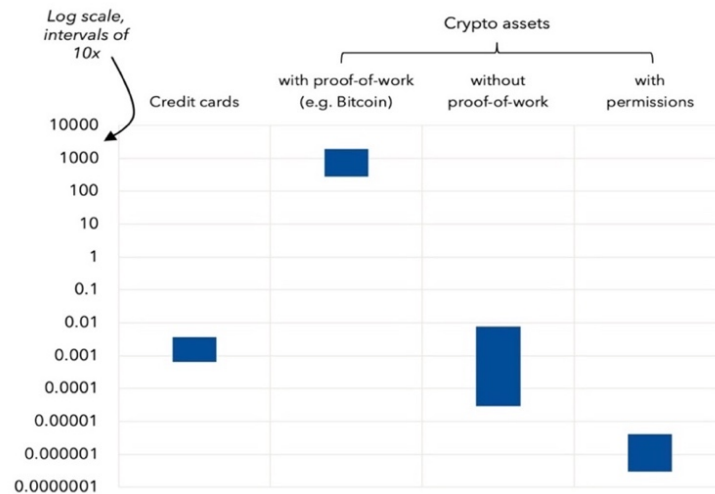
¹³³ *Monnaie numérique de banque centrale* (ABC de l'économie Banque de France juin 2023)
abc-economie.banque-france.fr/sites/default/files/medias/documents/mot_actu_mnbc.pdf

¹³⁴ *How Crypto and CBDCs Can Use Less Energy Than Existing Payment Systems* (International Monetary Fund, 17 Jun 2022)
www.imf.org/en/Blogs/Articles/2022/06/16/how-crypto-and-cbdcs-can-use-less-energy-than-existing-payment-systems

Power hungry

Some payment systems are energy intensive, but some specific design choices can be much more efficient alternatives.

(range of estimates for kilowatt hours used per transaction, logarithmic scale)



Source: IMF staff calculations based on academic and private-sector publications.

IMF

Énergie consommée par les cryptomonnaies et les monnaies numériques de banque centrale
(Fonds Monétaire International, 17 juin 2022)

Lorsque les États ont perçu des menaces sur leurs prérogatives régaliennes traditionnelles (par la remise en cause sur leur monopole d'émission de la monnaie), ils ont fait preuve d'une réactivité incomparable à celle qu'ils déploient dans le domaine de la régulation de la concurrence et en particulier pour les lois antitrust. Ainsi, lorsque *Facebook* a annoncé en 2019 son projet de cryptomonnaie *Libra*, les autorités européennes et américaines ont immédiatement fait part de leur volonté de réguler voire d'interdire cette initiative¹³⁵. En plus de constituer un nouveau canal de collecte des données personnelles, cette monnaie aurait pu à terme concurrencer les monnaies souveraines, mais aussi faciliter les démarches de blanchiment ou rendre intraçable le financement d'activités criminelles. Ainsi, en l'espace de quelques semaines, les principaux partenaires du projet (*Visa*, *MasterCard*, *eBay PayPal*...) ont renoncé à coopérer avec *Facebook* de crainte de s'aliéner leurs interlocuteurs gouvernementaux.

Si les préoccupations environnementales n'étaient pas à l'origine de la volonté des banques centrales de développer des projets de monnaies numériques souveraines, les

¹³⁵ *Facebook Unveils Cryptocurrency Libra in Bid to Reshape Finance* (Wall Street Journal 18 juin 2019)
www.wsj.com/articles/facebook-unveils-crypto-wallet-based-on-currency-libra-11560850141

inquiétudes légitimes sur l'impact environnemental des cryptomonnaies constituent un terreau politique favorable pour les utilisateurs potentiels de ces monnaies souveraines. Ainsi, les promoteurs de l'euro numérique évoquent désormais le souhait que cette technologie permette une réduction de l'empreinte carbone des systèmes de paiement. Dans son rapport sur l'euro numérique, la *Banque Centrale Européenne* évoque les mécanismes d'incitation à la réduction de la consommation énergétique qui pourraient être mis en place lors du lancement de l'euro numérique en ces termes :

La production d'instruments et d'infrastructures de paiement n'est pas toujours économe en énergie. Un euro numérique bien conçu peut donc contribuer à réduire les coûts globaux et l'empreinte écologique des systèmes de paiement de la zone euro. Dans ce contexte, l'Eurosystème jouerait un rôle de catalyseur et montrerait l'exemple en créant des incitations et en faisant pression sur les prestataires de services de paiement pour qu'ils réduisent leurs coûts et leur empreinte écologique. Pour ce faire, l'Eurosystème mettrait en évidence le coût et l'efficacité énergétique de l'euro numérique par rapport à d'autres solutions de paiement, lorsqu'il en encourage l'utilisation.¹³⁶

4. METAVERS : OPTIMISATION OU GOUFFRE ÉNERGETIQUE ?

Les technologies immersives dont le *métavers* est l'une des expressions technologiques récentes sont annoncées par certains comme la prochaine étape du développement de l'internet. Il s'agit de créer un univers virtuel immersif et partagé de plus en plus proche de la réalité. Le *métavers* pourrait ainsi avoir des applications dans la quasi-totalité des activités économiques, mais aussi éducatives et culturelles. Là encore, des questions se posent sur l'impact environnemental que pourraient avoir ces technologies en termes de consommation énergétique ou encore de diminution des déplacements des personnes. Il est à noter que sa mise au point nécessite encore des progrès technologiques et des investissements considérables.

¹³⁶ *Report on a digital euro* (European Central Bank 2020)

www.ecb.europa.eu/pub/pdf/other/Report_on_a_digital_euro~4d7268b458.en.pdf

De plus, de nombreuses interrogations économiques, techniques et éthiques entourent ce qui reste à l'heure actuelle un projet industriel dont le succès n'est en rien garanti. Cependant, la France et l'Europe ne peuvent se permettre d'être spectatrices de ces évolutions industrielles. En ce sens, l'annonce récente d'Apple de son casque de réalité mixte « *Vision Pro* » constitue une stratégie radicalement différente de celles promues par Mark Zuckerberg et les autres acteurs industriels qui présentent le *métavers* comme une extension de l'Internet... et des réseaux sociaux¹³⁷. À ce propos, Mark Zuckerberg, le P.-D.G. de Meta évoque face à la vision d'Apple le risque d'une évolution des technologies menant à un isolement encore plus accentué des individus : « *Cela pourrait bien être une vision de l'avenir de l'informatique, mais ce n'est pas celle que je souhaite...* »¹³⁸. En effet, dans les présentations faites par Apple de son casque de réalité « mixte » il est essentiellement question de consommation de contenus audiovisuels de manière individuelle et en très haute définition soit l'équivalent d'un écran UHD (*ultra haute définition*) pour chaque œil. Il est à noter que ces formats vidéo, s'ils sont massivement adoptés, nécessiteraient un accroissement important de la bande passante vers les utilisateurs avec des conséquences là encore difficiles à chiffrer sur la consommation globale d'énergie des infrastructures de stockage et de transport de ces flux. Les évolutions possibles d'autres technologies comme la projection holographique pourraient nécessiter des débits encore plus importants. Ainsi les experts de la société chinoise Huawei envisagent des débits entre 25 Mégabits/seconde et 5 Gigabits/seconde pour la réalité augmentée et la réalité virtuelle alors que pour faire fonctionner des systèmes de projection holographique en temps réel, il pourrait être nécessaire d'obtenir des débits compris entre 2 et 10 Téraoctets/seconde ¹³⁹.

De nombreuses questions se posent aujourd'hui quant à la soutenabilité des projets liés aux technologies immersives et en particulier le *métavers* : en effet, pour être en mesure

¹³⁷ *Création du Metaverse Standards Forum, un consortium pour faire émerger un « métavers ouvert »* (Usine Digitale, 22 juin 2022)

www.usine-digitale.fr/article/creation-du-metaverse-standards-forum-un-consortium-pour-faire-emerger-un-metavers-ouvert.N2017982

¹³⁸ *Here's what Mark Zuckerberg thinks about Apple's Vision Pro* (The Verge 8 Jun 2023)

www.theverge.com/2023/6/8/23754239/mark-zuckerberg-meta-apple-vision-pro-headset

¹³⁹ *New IP Networking for Network 2030* (Sheng Jiang – Huawei 2020)

www.itu.int/en/ITU-T/Workshops-and-Seminars/2019101416/Documents/Sheng_Jiang_Presentation.pdf

de fonctionner, ils réclament non seulement des matériaux coûteux (3 500 dollars pour le seul casque *Apple Vision Pro*), mais aussi des améliorations de l'Internet lui-même, (tant en termes de vitesse que d'amélioration des temps de latence mais aussi en termes de qualité de service¹⁴⁰). Ces évolutions pourraient avoir des conséquences encore difficiles à évaluer en termes d'empreinte carbone des infrastructures nécessaires au fonctionnement à grande échelle de ces nouveaux services de réalité virtuelle.

5. VERS UN INTERNET PLUS ECONOMIQUE EN ENERGIE ?

L'évolution des technologies immersives pourrait ainsi représenter l'opportunité pour certains acteurs industriels mais aussi pour certains États de repenser l'architecture de l'Internet. Ainsi, pour les autorités chinoises, l'architecture actuelle de l'Internet basée sur *TCP/IP* est « inadaptée » aux évolutions prévisibles des technologies. Comme souvent par le passé, lorsque des gouvernements ou des entreprises ont souhaité promouvoir des technologies alternatives à l'Internet, les arguments utilisés s'appuyaient sur la nécessité d'améliorer la qualité de service du réseau. Les exemples mis en avant par les autorités chinoises correspondent à l'essor d'applications très exigeantes en bande passante (comme la projection holographique) ou encore des applications immersives en temps réel nécessitant à la fois de très hauts débits et une très faible latence comme c'est le cas pour la téléchirurgie ou le *métavers*¹⁴¹. Il est à noter que pour les applications professionnelles il est possible d'obtenir des niveaux de qualité de service élevés en utilisant des liaisons dédiées (qui utilisent les technologies *TCP/IP*) auprès d'opérateurs sans avoir recours à l'Internet ouvert. En ce sens, l'argument de la nécessité de faire évoluer l'architecture de l'Internet afin de « rationaliser » les flux pour des applications professionnelles mais aussi pour diminuer les consommations énergétiques de ses infrastructures ne semble plus aussi pertinent.

¹⁴⁰ *When Will Wi-Fi Really Support the Metaverse?* (Light Reading 3/28/2022)

www.lightreading.com/when-will-wi-fi-really-support-metaverse-/a/d-id/776348

¹⁴¹ *China's controversial mission to reinvent the internet* (Financial Times 27 Mar 2020)

www.ft.com/content/ba94c2bc-6e27-11ea-9bca-bf503995cd6f

D'autres propositions tendent à revenir sur les protocoles fondamentaux de l'Internet (TCP/IP) afin de « rationaliser » à la fois le fonctionnement du réseau et sa consommation d'énergie. Le plus récent exemple est le protocole envisagé par les industriels chinois comme Huawei. Ce protocole est baptisé « *New IP* »¹⁴² et il vise à « recentraliser » le contrôle du réseau en partant du constat que l'architecture décentralisée de l'Internet serait à l'origine de ses lacunes supposées¹⁴³. Cette proposition, si elle devait être adoptée, posséderait en effet un double avantage pour ses concepteurs : elle placerait les acteurs technologiques chinois en position d'arbitre des normes et standards de l'Internet des objets et elle leur permettrait d'intégrer nativement des fonctions de contrôle et de censure¹⁴⁴ pour faciliter le contrôle politique de la population chinoise et pourrait devenir une norme internationale. L'objectif des autorités chinoises étant à terme d'exporter cette technologie de contrôle au-delà de leurs frontières. En effet, comme le note le *Financial Times* : « *Le gouvernement chinois considère la conception de l'infrastructure et des normes de l'Internet comme un élément central de sa politique étrangère numérique, et ses outils de censure comme une démonstration de faisabilité pour un Internet plus efficace, qu'il sera en mesure d'exporter* »¹⁴⁵.

De nombreux travaux ont déjà lieu pour étudier les évolutions possibles l'architecture de l'Internet afin de permettre une meilleure utilisation des ressources énergétiques nécessaires au fonctionnement. Depuis plusieurs années, certains auteurs envisagent un retour au principe de terminaux « légers » (ou *Thin Clients*) qui à l'échelle des entreprises consommeraient moins d'énergie que des ordinateurs traditionnels mais disposeraient

¹⁴² *Inside China's controversial mission to reinvent the internet* (Financial Times 27 Mar 2020)
www.ft.com/content/ba94c2bc-6e27-11ea-9bca-bf503995cd6f

¹⁴³ *Architecture et Gouvernance de l'Internet* (Bernard Benhamou revue Esprit mai 2006)
www.netgouvernance.org/ArchitectureEsprit.pdf

¹⁴⁴ *China's "New IP" proposal to replace TCP/IP has a built in "shut up command" for censorship* (Privacy News Online, 3 Apr 2020)
www.privateinternetaccess.com/blog/chinas-new-ip-proposal-to-replace-tcp-ip-has-a-built-in-shut-up-command-for-censorship

¹⁴⁵ *Inside China's controversial mission to reinvent the internet* (Financial Times, 27 Mar 2020)
www.ft.com/content/ba94c2bc-6e27-11ea-9bca-bf503995cd6f

de capacités de traitement local limitées¹⁴⁶. Cela aurait aussi pour conséquence de revenir sur l'architecture distribuée de l'Internet actuel que l'on nomme architecture « end-to-end » (ou architecture de « *bout en bout* »). Selon ce principe, l'« intelligence » du réseau est située à l'extrémité des mailles et non centralisée dans le réseau lui-même, les fonctions « nobles » de traitement de l'information étant alors réservées aux ordinateurs (et donc aux usagers) situés aux extrémités du réseau. C'est ce principe qui permet à l'ensemble des utilisateurs de l'Internet de bénéficier des mêmes « droits et devoirs » sur le réseau. L'usage en lieu et place des ordinateurs individuels de terminaux « *stupides* » reviendrait à priver les utilisateurs de nombreuses opportunités d'innovations (en tant que bénéficiaires mais aussi en tant que contributeurs comme c'est le cas lors du développement des logiciels libres). Revenir sur l'architecture du réseau pourrait ainsi avoir de nombreux effets de bord en particulier en termes de contrôle politique sur les individus.

En effet, l'architecture actuelle du réseau correspond à un mode de fonctionnement où l'ensemble des ressources de transmission et de stockage sont en permanence opérationnelles et donc consomment de l'énergie qu'elles soient fortement utilisées ou au contraire très peu sollicitées. À la différence des terminaux comme les smartphones ou les ordinateurs portables, il n'existe pas de système de veille pour les ordinateurs et les systèmes de transmissions du réseau.

À l'échelle des infrastructures de l'Internet, certains auteurs envisagent aussi la modification des protocoles fondamentaux du réseau pour mieux prendre en compte les économies d'énergie. Cela pourrait par exemple conduire à définir de nouveaux protocoles qui permettraient de « mettre en veille » certains des nœuds d'interconnexion en période de faible trafic sur le réseau pour leur éviter de consommer inutilement de l'énergie. Là encore, ce type de protocole correspondrait à une centralisation des fonctions du réseau. Ces recherches tendent à évaluer la quantité de ressources redondantes (nœuds et liens du réseau) qui peuvent être mises hors tension afin de réduire la consommation d'énergie. L'objectif étant d'estimer la fraction de dispositifs

¹⁴⁶ *Managed Workplaces 2015, An ecological and economic analysis of software thin clients* (Fraunhofer, Mar 2015)
www.igel.com/wp-content/uploads/2019/09/Fraunhofer_Managed_Workplaces_2015_EN.pdf

qui peuvent être retirés de la topologie sans compromettre le fonctionnement du réseau¹⁴⁷.

Du fait de la montée en puissance des tensions géopolitiques, existent aussi des risques de fragmentation ou balkanisation de l'Internet¹⁴⁸ (ce que l'on nomme parfois *splinternet*). Parallèlement à ces tensions, existe désormais le risque que les évolutions des politiques environnementales ne puissent constituer l'opportunité de revenir sur l'architecture décentralisée de l'Internet au profit d'architectures entièrement centralisées. Ces architectures présenteraient des avantages en termes de maîtrise de la consommation énergétique des réseaux mais constitueraient aussi une rupture profonde avec les principes qui ont été à l'origine de l'Internet.

Là encore, l'analyse des effets collatéraux de ces changements (en particulier en termes de risque de contrôle centralisé et de censure des informations) devra être effectuée en amont par les concepteurs et les architectes de ces technologies. En effet, l'évolution de l'Internet vers une architecture centralisée, en plus de rendre le réseau plus vulnérable aux attaques, ferait reposer l'effort de création de nouveaux services et de nouvelles technologies sur un nombre limité d'acteurs. Cette évolution pourrait donc avoir des conséquences politiques sur le contrôle de l'expression sur Internet mais elle pourrait aussi avoir des conséquences technologiques et économiques par le ralentissement des innovations. Et ce au moment où il sera nécessaire de développer progressivement les innovations qui seront nécessaires à la transition écologique des technologies et de l'ensemble des industries. Les arbitrages sur les évolutions des technologies fondamentales de l'Internet devront donc prendre en compte l'ensemble des dimensions politiques et stratégiques et pas seulement technologiques. En effet, ces arbitrages de haut niveau ne pourront

¹⁴⁷ *How Much Can The Internet Be Greened?* (Chiaraviglio I.; Ciullo D.; Leonardi E; Mellia M. - (2009), pp. 1-6. (2nd International Workshop on Green Communications, Dec 2009).

core.ac.uk/download/pdf/234875373.pdf

¹⁴⁸ *Architecture et Gouvernance de l'Internet* (Bernard Benhamou, Revue Esprit mai 2006)

www.diplomatie.gouv.fr/IMG/pdf/OrganiserlarchitecturedelinternetBernardBenhamou-2.pdf

pas reposer sur une vision à court terme liée à leurs apports environnementaux supposés.

V. RUPTURES TECHNOLOGIQUES ET IMPACT CLIMATIQUE

Plusieurs grandes catégories d'innovations technologiques promettent d'engendrer des évolutions profondes dans les usages du numérique ainsi que sur son empreinte carbone. Certaines d'entre elles comme l'intelligence artificielle sont devenues des réalités industrielles et commerciales. D'autres innovations, comme les technologies immersives du métavers commencent à apparaître. Enfin, certaines technologies comme les ordinateurs quantiques ou les supraconducteurs à température ambiante, semblent encore lointaines. Sans même évoquer les technologies qui devraient permettre la création d'énergie par la fusion nucléaire... En plus des technologies qui pourraient réduire les émissions carbone du numérique et des différents secteurs industriels, des technologies commencent à être développées pour « capturer » ou enfouir les émissions déjà présentes dans l'atmosphère et donc tenter d'agir sur les causes du dérèglement climatique. D'autres technologies enfin comme la géo-ingénierie sont parfois envisagées comme des technologies d'ultime recours pour agir sur les conséquences des émissions et donc sur le climat lui-même.

1. PERSPECTIVES DES ORDINATEURS QUANTIQUES

Le principe des ordinateurs quantique a été envisagé depuis les années quatre-vingt et ils ont été envisagés pour effectuer des calculs complexes qui restent inaccessibles même par les supercalculateurs actuels. Parmi ces calculs figurent ceux qui sont liés à l'optimisation des réseaux d'énergie ou encore à la modélisation chimique et moléculaire en particulier pour la conception de nouvelles générations de batteries avec l'espoir

d'augmenter leurs capacités¹⁴⁹ et aussi d'éviter d'avoir recours aux métaux critiques comme c'est le cas actuellement.

Pour les promoteurs des technologies d'ordinateurs quantiques, en plus de leur puissance ces technologies pourraient représenter un enjeu crucial pour le développement durable. Ainsi, dans l'argumentaire du cabinet McKinsey, les ordinateurs quantiques pourraient même « *sauver la planète* » (*sic*) :

L'informatique quantique est une technologie révolutionnaire qui pourrait permettre de réaliser des simulations précises au niveau moléculaire et de mieux comprendre les lois fondamentales de la nature. Son développement au cours des prochaines années pourrait contribuer à résoudre des problèmes scientifiques que l'on croyait jusqu'à présent insolubles. L'élimination de ces obstacles pourrait faire la différence entre un avenir durable et une catastrophe climatique. Faire de l'informatique quantique une réalité nécessitera une mobilisation exceptionnelle de ressources, d'expertise et de fonds. Seule une coopération étroite entre les gouvernements, les scientifiques, les universitaires et les investisseurs pour développer cette technologie peut permettre d'atteindre l'objectif de limitation des émissions qui permettra de maintenir le réchauffement climatique à 1,5 °C et de sauver la planète...¹⁵⁰

Mais, au-delà des discours commerciaux tenus sur les ordinateurs quantiques, ces machines restent pour l'instant encore au stade de prototypes évolués. Leurs prix les maintiennent hors de portée de l'immense majorité des utilisateurs et elles ne sont utilisées que par de grandes voire très grandes entreprises¹⁵¹. Il est à noter que ces prototypes d'ordinateurs quantiques nécessitent encore (pour une partie d'entre eux qui utilisent des supraconducteurs) des systèmes de refroidissement très coûteux en énergie¹⁵². Afin d'abaisser les coûts d'accès à ces ordinateurs quantiques, les grandes

¹⁴⁹ *How Quantum Computers Can Make Batteries Better : Hyundai partners with IonQ to optimize lithium-air batteries* (IEEE Spectrum, 20 Jan 2022)

spectrum.ieee.org/lithium-air-battery-quantum-computing

¹⁵⁰ *Quantum computing just might save the planet* (McKinsey, 24 Apr 2023)

www.mckinsey.com/capabilities/mckinsey-digital/our-insights/quantum-computing-just-might-save-the-planet

¹⁵¹ *Quantum computers: what are they good for?* (Nature, 24 May 2023)

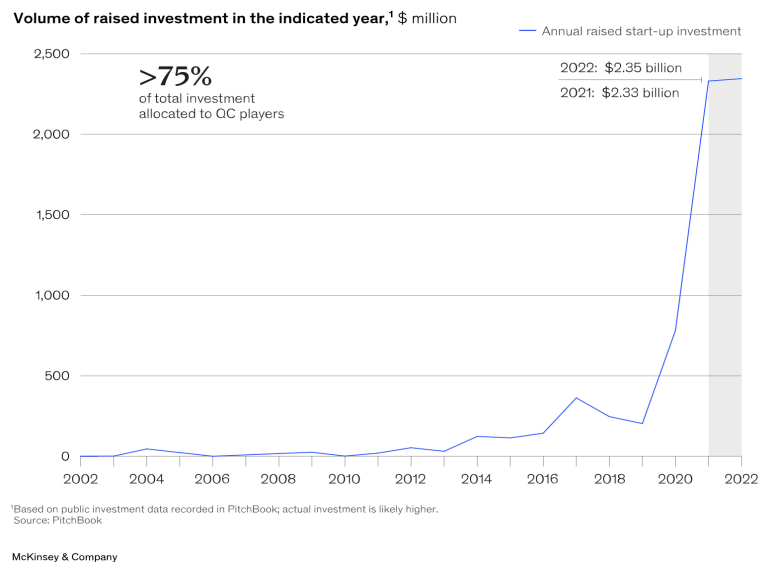
www.nature.com/articles/d41586-023-01692-9

¹⁵² *What Is The Price Of A Quantum Computer In 2023?* (The Quantum Insider 10 Apr 2023)

thequantuminsider.com/2023/04/10/price-of-a-quantum-computer

plateformes comme *Amazon*, *Google* et *Microsoft* proposent à leurs utilisateurs industriels des accès à leurs propres technologies quantiques via leurs clouds *AWS*, *Google Cloud* ou *Azure*.

Investments in quantum technology reached their highest annual level.



Évolutions des investissements dans les technologies quantiques (McKinsey 2023)¹⁵³

Cependant, malgré d’importants investissements effectués dans les technologies quantiques par les acteurs industriels et par les gouvernements ces 5 dernières années¹⁵⁴, le développement d’un marché pour les ordinateurs quantiques « généralistes » semble encore une perspective lointaine¹⁵⁵. Ainsi Alain Aspect, prix Nobel de physique 2022 et spécialiste mondial de l’intrication quantique, n’exclut pas que puissent exister des obstacles fondamentaux qui interdiraient la mise en œuvre des véritables ordinateurs quantiques :

¹⁵³ *Quantum technology sees record investments, progress on talent gap* (McKinsey Digital, Apr 24, 2023)
www.mckinsey.com/capabilities/mckinsey-digital/our-insights/quantum-technology-sees-record-investments-progress-on-talent-gap

¹⁵⁴ *UK to invest £2.5bn in quantum computing drive* (13 Mar 2023)
www.ft.com/content/900ba4ee-6c60-4406-963a-810771c2ad7c

¹⁵⁵ *Customer spend on quantum computing services has fallen but will grow, says IDC* (Electronics Weekl, 22 Aug 2023)
www.electronicweekly.com/uncategorised/customer-spend-on-quantum-computing-has-fallen-but-will-grow-says-idc-2023-08/

« L'ordinateur quantique « idéal », qui est celui dont on entend parler, n'existe pas encore. Personnellement, je pense que c'est tellement difficile à réaliser que je doute de le voir de mon vivant. Je ne suis pas pessimiste pour autant, je crois dur comme fer que lorsque quelque chose est très difficile techniquement, mais pas impossible à cause d'une loi fondamentale de la physique, cela finit toujours par être réalisé. Car si jamais on butait sur une limite fondamentale, on aurait répondu à cette question essentielle du « seuil » entre le monde classique et le monde quantique. Pour le moment, nous n'en avons pas la moindre idée. Alors de deux choses l'une : soit on arrive à construire l'ordinateur quantique et ce sera merveilleux, soit on bute sur une limite, et tous les gens qui ont mis beaucoup d'argent dans ces recherches seront très déçus... »¹⁵⁶

Les ordinateurs quantiques s'ils devaient à terme être amenés à se généraliser au-delà d'applications scientifiques spécifiques, pourraient aussi constituer un effet d'aubaine pour les acteurs technologiques. En effet la mise à disposition de cette puissance de calcul auprès d'un plus grand nombre d'utilisateurs pourrait rapidement être absorbée par de nouveaux services (en particulier dans le domaine de l'intelligence artificielle) et ne conduirait pas nécessairement à diminuer les émissions carbone des technologies numériques.

2. VERS LE STOCKAGE DES DONNEES DE TRES LONGUE DUREE

Les choix des technologies de stockage des données, en particulier pour l'archivage de longue durée pourraient avoir un rôle déterminant sur l'empreinte carbone du numérique dans les années à venir. Ainsi, au-delà des technologies actuelles des disques durs, des bandes magnétiques ou même des supports optiques, des supports à la fois plus stables dans le temps et plus sobres sur le plan énergétique devront être développés. Là encore, l'estimation de la durabilité des technologies de stockage devra prendre en compte l'ensemble des processus de fabrication et pas seulement la consommation d'énergie durant l'utilisation. Il est à noter que l'empreinte carbone totale des nouvelles générations de stockage comme les *SSD (solid-state drive)* apparaissent plus économes en énergie que les disques durs traditionnels durant leur fonctionnement mais sont nettement plus consommatrices d'énergie pour leur fabrication.

¹⁵⁶ Alain Aspect, Prix Nobel de physique dans *Le Nouvel Esprit Public* (25 juin 2023)
www.lenouvelespritpublic.fr/podcasts/446

Les chercheurs S. Tannu et P. Nair ont ainsi calculé que la fabrication d'un SSD d'un téraoctet émet l'équivalent de 320 kg de dioxyde de carbone. À titre de comparaison, un disque dur similaire n'émet que 40 kg. L'empreinte d'un disque SSD d'un téraoctet sur toute sa durée de vie est donc de 369,2 kg d'équivalent dioxyde de carbone, contre 199 kg pour un disque dur.¹⁵⁷

Ainsi, l'un des nouveaux axes de recherche dans le domaine du stockage des données de longue durée porte sur une utilisation « biomimétique » des capacités de stockage de l'ADN. La convergence entre technologies numériques et biotechnologies a déjà de nombreuses applications médicales. Ainsi, la conception et les évolutions des thérapeutiques sont de plus en plus étroitement liées aux technologies numériques. En un sens, les vaccins à *ARN messenger* utilisés pendant la crise Covid ouvrent la voie aux thérapeutiques « hybrides » entre biologie et technologies numériques¹⁵⁸. À l'inverse, les technologies de la génomique pourraient bientôt avoir des applications dans les technologies numériques avec le stockage des données sur ADN. En effet, le stockage sur la molécule d'ADN représente de nombreux avantages en termes de durabilité. La stabilité des segments d'ADN permet aux données d'être stockées pendant plusieurs centaines voire plusieurs milliers d'années. De surcroît, l'utilisation de l'ADN pour le stockage des données offre des densités allant jusqu'à 10^{18} octets par millimètre cube, soit environ des densités un million de fois plus importantes que les supports les plus performants disponibles aujourd'hui.¹⁵⁹

Ainsi, les solutions de stockage envisagées sur ADN devraient aussi être plus économes en énergie que les autres moyens de stockage. Une fois encodées dans l'ADN, les données pourraient être conservées dans des volumes infiniment moindres et à température ambiante sans dépense énergétique supplémentaire. Ces technologies dont les premiers travaux de recherches ont commencé il y a une dizaine d'années n'en sont

¹⁵⁷ *The Dirty Secret of SSDs: Embodied Carbon* (Swamit Tannu, Prashant J. Nair 8 Jul 2022)

arxiv.org/pdf/2207.10793.pdf

Tannu and Nair calculate that manufacturing a 1 terabyte SSD emits the equivalent of 320 kg of carbon dioxide. By comparison, a similar HDD emits just 40 kg. So the lifetime footprint for a 1 terabyte SSD is 369.2 kg of carbon dioxide equivalent versus 199 kg for an HDD.

¹⁵⁸ *Towards 'smart' vaccine development and manufacturing* (European Pharmaceutical Review, 24 Aug 2022)

www.europeanpharmaceuticalreview.com/article/173742/towards-smart-vaccine-development-and-manufacturing/

¹⁵⁹ *Molecular digital data storage using DNA* (Ceze L, Nivala J, Strauss K. Nature reviews Genetics 2019 Aug 20.)

www.cl.cam.ac.uk/teaching/2223/Bioinfo/papers/DNA_storage.pdf

encore qu'au stade précommercial. Les vitesses de lecture et d'écriture données ainsi que le coût d'encodage de ces solutions devront en effet être améliorés pour que ces technologies de stockage de longue durée sur ADN deviennent des alternatives aux systèmes de stockages numériques actuels. L'Union européenne qui dispose de talents reconnus dans le domaine de l'ingénierie de l'ADN¹⁶⁰ pourrait ainsi aider à concevoir les prochaines générations de stockage durable en particulier pour les données culturelles et patrimoniales.

Les États européens se doivent d'investir dans la recherche sur les solutions de stockage de l'information sur la longue voire la très longue durée. En effet, en plus des besoins spécifiques des administrations en matière d'archivage, ces technologies pourraient constituer une étape supplémentaire dans l'allongement de la durée de vie des technologies numériques utilisées en entreprises et mêmes à terme auprès des particuliers. L'industrie du stockage des informations au sens large (technologies de stockage et services sur le cloud) constitue en effet l'un des premiers vecteurs d'émissions carbone du secteur des technologies.

3. SUPRACONDUCTEURS : PROMESSES ET REALITES

Le principe de la supraconductivité de certains matériaux a été découvert il y a plus d'un siècle et il décrit les conditions dans lesquelles certains matériaux sont capables de conduire un courant électrique sans aucune résistance et donc sans perte d'énergie. Cependant, les conditions extrêmes de température et de pression nécessaires à l'apparition de la supraconductivité rendent actuellement leur utilisation coûteuse en énergie et délicate à généraliser à l'échelle industrielle.

¹⁶⁰ *Petabyte for the masses: DNA storage could come as cartridges by 2030* (TechRadar, 17 Dec 2022)
www.techradar.com/features/petabyte-for-the-masses-dna-storage-could-come-as-cartridges-by-2030

Depuis la fin des années quatre-vingt, des espoirs existent quant à la réalisation de supraconducteurs à température ambiante¹⁶¹. Si les supraconducteurs à température (et pression) ambiante devenaient une réalité industrielle, ils rendraient possible le développement des systèmes de stockage d'énergie de grande capacité pendant de longues périodes afin de libérer cette énergie uniquement lorsque celle-ci est nécessaire. Cela devrait permettre d'aider à résoudre les difficultés liées au caractère intermittent des sources d'énergie renouvelable comme le solaire ou l'éolien. Ces matériaux pourraient aussi révolutionner les transports et aussi l'informatique elle-même. En effet les supraconducteurs devraient permettre de rendre les ordinateurs à la fois plus efficaces et moins gourmands en énergie. De plus, la mise au point de supraconducteurs à température et pression ambiante lèverait l'un des freins essentiels à la réalisation d'ordinateurs quantiques dont les prototypes nécessitent actuellement d'importantes ressources énergétiques pour le refroidissement. Les supraconducteurs à température ambiante permettraient aussi de développer de systèmes informatiques dotés d'une extrêmement faible consommation en énergie et qui dissiperaient peu de chaleur. Si elle devait exister, cette catégorie de technologies devrait permettre de réduire considérablement l'empreinte carbone des technologies numériques mais plus largement aussi de l'ensemble des secteurs de production.

De récentes publications de travaux de recherche ont relancé les espoirs de la communauté des technologies quant à la réalisation de supraconducteurs à température¹⁶² et à pression ambiante¹⁶³. Cependant, comme pour les ordinateurs quantiques, même si elles devaient être découvertes ces nouvelles générations de supraconducteurs pourraient nécessiter encore plusieurs années (voire décennies) avant d'avoir un impact significatif sur la consommation électrique de nos sociétés. Leur

¹⁶¹ *High-temperature superconductors and CO2 emissions by A.B. Cambel, F.A. Koomanoff* (Energy, Volume 14, Issue 6, Pages 309-322, June 1989)

www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0360544289900121

¹⁶² *New Study Bolsters Room-Temperature Superconductor Claim* (New York Times, 23 Jun 2023)

www.nytimes.com/2023/06/23/science/room-temperature-superconductor.html

¹⁶³ *Inside the DIY Race to Replicate LK-99* (Wired, 2 Aug 2023)

www.wired.com/story/inside-the-diy-race-to-replicate-lk-99

impact ne serait donc pas assez rapide pour affecter la trajectoire de réduction des émissions carbone de nos sociétés à court terme.

4. GEO-INGENIERIE : LES TECHNOLOGIES DE L'APOCALYPSE

Au-delà de l'élimination du CO₂ atmosphérique par enfouissement ou par filtrage dans l'air CSC (*Capture et Stockage du Carbone*) en anglais *carbon dioxide removal (CDR)*, d'autres solutions sont parfois envisagées pour s'attaquer directement aux effets (et non plus aux causes) de la crise climatique. Ainsi, l'approche la plus radicale, et la plus controversée, des technologies de lutte contre le réchauffement climatique correspond aux technologies de *géo-ingénierie solaire*. Ces technologies portent différentes appellations : *géo-ingénierie, ingénierie climatique, modification du rayonnement solaire (MRS)*. Elles ont en commun d'avoir pour objectif de diminuer la quantité de rayonnements reçus par la Terre (ou d'augmenter les rayonnements réfléchis par les nuages)¹⁶⁴. De nombreuses modalités différentes ont ainsi été proposées pour atteindre cet objectif : disposer des miroirs dans l'espace pour refléter les rayons de Soleil, pulvériser des particules de dioxyde de soufre dans la haute atmosphère ou encore modifier artificiellement la structure des nuages par l'injection de particules pour qu'ils bloquent les rayonnements ou permettent à la chaleur de s'échapper de la Terre...¹⁶⁵

Le consensus scientifique sur l'opportunité d'avoir recours à ces technologies est loin d'être atteint. Cependant, comme le précise le rapport du *Programme des Nations unies pour l'environnement* consacré à l'ingénierie climatique¹⁶⁶, à défaut d'avoir recours aux solutions

¹⁶⁴ *Reversing Climate Change with Geoengineering* (Science in the News, Harvard Jan 3, 2022)
sitn.hms.harvard.edu/flash/2022/reversing-climate-change-with-geoengineering

¹⁶⁵ *How technology is fighting to prevent a climate-change apocalypse* (Washington Post, 1 Apr 2014)
www.washingtonpost.com/news/innovations/wp/2014/04/01/how-technology-is-fighting-to-prevent-a-climate-change-apocalypse

¹⁶⁶ *One Atmosphere: An independent expert review on Solar Radiation Modification research and deployment* (United Nations Environment Programme, Feb 2023)
wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/41903/one_atmosphere.pdf

de réduction du carbone présent dans l'atmosphère, le ralentissement des émissions de CO₂ à lui seul ne permettra pas d'obtenir une diminution des températures dans une échelle de temps proche. Et comme le précisent les experts du GIEC qui ont participé à la rédaction du rapport en 2021, l'usage des technologies de captage du carbone devra s'accompagner dans le même temps d'une réduction des émissions carbone : *"Nous ne pouvons pas continuer à émettre autant de CO₂ et simplement essayer d'éliminer tout l'excès de CO₂ de l'atmosphère, il faudrait une planète supplémentaire pour mettre tout le CO₂..."¹⁶⁷* :

La longue durée de vie du CO₂ dans l'atmosphère signifie que même l'arrêt des émissions de CO₂ (zéro émission) ne conduirait qu'à limiter le réchauffement supplémentaire, il n'entraînerait pas de refroidissement significatif au cours de ce siècle. Si l'objectif était d'inverser considérablement la tendance au réchauffement (sans avoir recours au MRS), cela pourrait potentiellement être atteint grâce à des émissions négatives nettes de gaz à effet de serre (GES) impliquant l'absorption des GES à grande échelle sur plusieurs décennies, afin de réduire les concentrations de ces GES¹⁶⁸.

Les technologies d'ingénierie climatique ont été évoquées par les scientifiques depuis plusieurs décennies et elles ont longtemps été considérées comme une attitude scientifiquement irresponsable face à la crise climatique. Cependant, ces dernières années elles commencent à obtenir un écho plus favorable auprès des chercheurs et des experts du climat. Ainsi dans son rapport de 2021, le *Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC)* mentionnait la possibilité d'avoir recours de manière contrôlée aux technologies de captage du carbone et évoquait les technologies de *modification du rayonnement solaire (MRS)*¹⁶⁹.

L'ensemble des organisations internationales insistent sur la nécessité d'effectuer ces interventions sur le climat de manière scientifiquement éprouvée et dans le cadre d'une gouvernance mondiale transparente. De même, la Commission européenne a annoncé

¹⁶⁷ *Geoengineering marks scientific gains in U.N. report on dire climate future* (Reuters 10 Aug 2021)
www.reuters.com/article/uk-climate-change-ipcc-geoengineering-idUKKBN2FB0MQ

¹⁶⁸ *"One Atmosphere": An independent expert review on Solar Radiation Modification research and deployment* (United Nations Environment Programme, Feb 2023)
wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/41903/one_atmosphere.pdf

¹⁶⁹ *Climat : l'implacable état des lieux du Giec* (CNRS 23 mai 2023)
lejournel.cnrs.fr/articles/climat-implacable-etat-des-lieux-du-giec

par la voix de son vice-président Frans Timmermans, qu'elle « *soutiendra les efforts internationaux pour évaluer de manière exhaustive les risques et les incertitudes sur la modification du rayonnement solaire (MRS) et encouragera les discussions potentielles pour sa gouvernance* ». En mentionnant l'ONU comme le lieu potentiel pour ces discussions « *cela devrait être discuté dans le forum approprié, au plus haut niveau international* ¹⁷⁰ ».

“ La tentation de la toute-puissance technologique devra être soigneusement maîtrisée auprès des scientifiques et des décideurs publics. En effet, s'il est théoriquement possible d'effectuer des simulations en créant un “jumeau numérique” de la Terre nous ne disposons pas pour autant d'une planète B... ”

Cependant, ces technologies nécessitent encore d'importants travaux de recherche pour atteindre une maturité suffisante avant de pouvoir être déployées. Et, si elles devaient être approuvées à l'échelle internationale, les technologies numériques pourraient jouer un rôle crucial dans la réalisation de ces initiatives. Qu'il s'agisse des supercalculateurs et des technologies d'intelligence artificielle nécessaires "en amont" pour réaliser des simulations ou des instruments de recueil des données climatiques à l'échelle planétaire "en aval". Des réseaux de capteurs climatiques pourraient ainsi être mis en place à l'échelle planétaire pour recueillir

les données spécifiques nécessaires au pilotage dans la durée de ces initiatives. Le recueil et le traitement des données atmosphériques, terrestres et océaniques constitueraient en effet des volets cruciaux de ces projets.

Si elle devait être prise, la décision de recourir aux technologies de géo-ingénierie correspondrait à l'arbitrage politique le plus complexe, et potentiellement le plus grave,

¹⁷⁰ « *Que l'on soit pour ou contre, la géo-ingénierie solaire doit être encadrée par des règles de gouvernance* » (Le Monde, 21 juillet 2023)

www.lemonde.fr/idees/article/2023/07/21/que-l-on-soit-pour-ou-contre-la-geo-ingenierie-solaire-doit-etre-encadree-par-des-regles-de-gouvernance_6182951_3232.html

jamais effectué par des responsables politiques. En plus des conséquences climatiques, ils devraient en effet prendre en compte à la fois les effets sociaux, économiques et géopolitiques du réchauffement climatique et les mettre en regard des possibles conflits qui naîtraient des modifications climatiques créées par ces technologies. En effet, ces modifications si elles sont induites à l'échelle globale auront des effets différenciés suivant les régions du monde. Elles pourraient ainsi avoir conséquences imprévisibles sur les précipitations et donc sur les activités agricoles. Ce qui pourrait là encore être à l'origine de nouveaux conflits ou de même de guerres qui auraient pour origine l'accès aux ressources hydriques ou encore la capacité de production des denrées alimentaires. À cela s'ajoutent, les possibles effets rebonds en cas d'arrêt brutal de ces modifications du rayonnement solaire. En effet, si cet arrêt n'était pas effectué de manière progressive, il pourrait avoir comme conséquence un réchauffement rapide du climat avec des conséquences écologiques sans précédent en particulier une importante réduction de la biodiversité.

Là encore, la tentation de céder à une forme d'hubris de toute-puissance technologique devra être soigneusement maîtrisée auprès des scientifiques et des décideurs publics. En effet, s'il est théoriquement possible d'effectuer des simulations en créant un "jumeau numérique" de la Terre nous ne disposons pas pour autant d'une planète B...

VI. GÉOPOLITIQUE DES TECHNOLOGIES DURABLES

1. GUERRE EN UKRAINE : DE NOUVELLES FRACTURES TECHNOLOGIQUES

L'une des conséquences de la guerre en Ukraine aura été la remise en cause des liens économiques avec les pays pour lesquels existent de nouveaux risques géopolitiques. Cette nouvelle réalité géopolitique correspondrait à de profondes modifications des

règles qui prévalaient depuis l'effondrement du bloc soviétique. Cela pourrait remettre profondément en cause le mouvement de globalisation économique qui existait depuis l'après-guerre avec la création de *l'Accord général sur les tarifs douaniers et le commerce (GATT)* en 1947 qui est devenu en 1995 *l'Organisation mondiale du commerce (OMC)*. Cette reconfiguration du commerce mondial que la secrétaire américaine au Trésor Janet Yellen nomme désormais le *"friend-shoring"* en opposition à *"l'off shoring"* (ou délocalisation) et qu'elle résume ainsi : « *Le "friend-shoring" signifie que l'activité économique se construira au sein d'un groupe de pays qui adhèrent fortement à un ensemble de normes et de valeurs liées à leur façon d'interagir avec l'économie mondiale et nous devons approfondir nos liens avec ces partenaires et travailler ensemble pour veiller à ce que nous puissions répondre à nos besoins en matériaux critiques...* »¹⁷¹

“ *Le “friend-shoring” signifie que l’activité économique se construira entre pays qui adhèrent à un ensemble de normes et de valeurs. Nous devons travailler ensemble pour répondre à nos besoins en matériaux critiques...* ”

Janet Yellen
Secrétaire au Trésor des États-Unis

Cette évolution vers la reconstitution de deux blocs économiques antagonistes suscite les craintes des économistes aux yeux desquels cela pourrait conduire à reconstituer un nouveau « rideau de fer ». Cela au point que certains hauts responsables chinois mettent désormais en garde les États-Unis face aux risques liés à l'établissement d'un « rideau de silicone...¹⁷² ». Ainsi comme le rappelle Solveig Godeluck dans *Les Échos* : « *La division du monde commercial en deux blocs, les amis et les non-amis, aurait un coût économique non négligeable. Le commerce international serait pénalisé* » dans la mesure où les pays en

¹⁷¹ *US Treasury Secretary Janet Yellen on the next steps for Russia sanctions and 'friend-shoring' supply chains* (Atlantic Council, 13 Apr 2022)

www.atlanticcouncil.org/news/transcripts/transcript-us-treasury-secretary-janet-yellen-on-the-next-steps-for-russia-sanctions-and-friend-shoring-supply-chains

¹⁷² *China warns of retaliation to US curbs on investment and chips* (Financial Times, 19 Jul 2023)

www.ft.com/content/ad1350b9-0e4b-40a4-bb70-4c236e513e7a

développement non-alignés seront exclus de l'orbite du friend-shoring », souligne le Center for Strategic and International Studies (CSIS). L'Organisation mondiale du commerce (OMC) a d'ailleurs estimé que le commerce entre blocs réduirait d'environ 5 % le PIB mondial à long terme. »¹⁷³

La fragmentation à laquelle nous pourrions assister entre deux (ou plusieurs) blocs antagonistes pourrait avoir pour conséquence économiques durables. Ainsi, ces tensions pourraient aboutir au renchérissement des technologies liées aux énergies renouvelables. En effet, ces technologies sont actuellement dépendantes des importations de terres rares et de métaux critiques. Cette nouvelle confrontation économique et géopolitique pourrait ainsi aboutir à un ralentissement de l'évolution vers la décarbonation des technologies numériques et plus largement de l'ensemble des filières industrielles.

2. GEOPOLITIQUE DES TERRES RARES ET DES MÉTAUX CRITIQUES

Les terres rares, les métaux stratégiques et les matières premières critiques pour les technologies numériques comme le lithium, sont utilisées pour la fabrication de nombreuses technologies utilisées quotidiennement : écrans, batteries et puces de téléphones portables, mais aussi pour les technologies militaires comme les missiles¹⁷⁴. Ces métaux sont aussi utilisés dans les technologies liées aux énergies renouvelables, les

¹⁷³ *Washington promeut un nouvel ordre commercial mondial avec le « friend-shoring »* (Les Echos, 7 février 2023) www.lesechos.fr/monde/etats-unis/washington-promeut-un-nouvel-ordre-commercial-mondial-avec-le-friend-shoring-1904348

¹⁷⁴ *Terres rares et enjeux économiques mondiaux* (Ambassade de France au Royaume-Uni, 21 mars 2011) uk.ambafrance.org/Terres-rares-et-enjeux-economiques

Les terres rares ou REE (pour l'anglais rare-earth element) constituent un groupe d'éléments ayant des propriétés chimiques voisines, et comprenant les quinze lanthanides, le scandium et l'yttrium. Largement utilisées dans les produits de haute technologie et dans l'industrie bas carbone, les terres rares représentent un enjeu économique d'autant plus considérable que la production mondiale actuelle est en grande partie contrôlée par la Chine. La Chine possède en effet 37% des réserves globales connues, contrôle 60% des ressources mondiales en terres rares et répond à plus de 96% de la demande mondiale en termes de production.

aimants pour les rotors d'éoliennes, le gallium et le germanium sont quant à eux utilisés pour la fabrication des panneaux solaires ou encore du matériel d'imagerie médicale. L'empreinte carbone des terres rares et des matériaux critiques est d'autant plus importante, que leur traitement, nécessite de considérables ressources énergétiques mais aussi d'importantes quantités d'eau et de produits chimiques pour les extraire et les isoler.

Notre analyse montre que les émissions mondiales de gaz à effet de serre dues à l'extraction des terres rares ont augmenté de 94 % en une décennie passant de 79,01 kt CO₂ eq en 2010 à 152,97 kt CO₂ eq en 2020 et pourraient atteindre 169,49 kt CO₂ eq en 2030. Cette constatation met en évidence la nécessité de concevoir et mettre en œuvre diverses mesures destinées à accroître la réutilisation et le recyclage des terres rares (actuellement inférieurs à 1 %), à augmenter la substitution ainsi qu'à développer de nouvelles technologies d'élimination. De telles mesures seraient nécessaires au développement de stratégies appropriées pour la décarbonation et le développement écologiquement durable des technologies des énergies renouvelables et des énergies bas carbone¹⁷⁵.

En effet, les « terres rares » constituent l'un des paradoxes environnementaux du fait de la nécessité de les utiliser pour concevoir les dispositifs de production des énergies renouvelables. De plus leur intitulé de « terres rares » est trompeur :

« Cette dénomination s'explique car les terres rares sont présentes partout sur Terre mais sont disséminées en très faible quantité, à l'inverse de certains métaux pour lesquels on retrouve des gisements massifs, avec une forte concentration de métal. Une des solutions pourrait être de limiter la quantité extraite en se concentrant sur leur recyclage. Aujourd'hui, seul 1 % des terres rares est recyclé. Cela est dû au fait qu'elles sont souvent présentes en petite quantité et qu'il est difficile de séparer les terres rares des autres métaux pour les recycler. Pour pousser les industriels à recycler les terres rares, il faudrait que ce processus devienne rentable...¹⁷⁶ »

¹⁷⁵ *Global environmental cost of using rare earth elements in green energy technologies* (Saeed Rahimpour Golroudbary, Iryna Makarava, Andrzej Kraslawski, Eveliina Repo in Science of The Total Environment Volume 832, 1 August 2022)

www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969722021155

¹⁷⁶ *Les terres rares : le paradoxe environnemental* (CNRS actualité 22 avril 2022)

www.insu.cnrs.fr/fr/cnrsinfo/les-terres-rares-le-paradoxe-environnemental

En l'état actuel, les ressources mondiales en terres rares sont limitées et ne peuvent pas, malgré les marges de progressions des technologies de recyclage, constituer le cœur des technologies durables :

Au rythme de production actuel (280 000 tonnes) et au vu de ces réserves, le monde dispose d'au moins 430 ans de consommation de terres rares devant lui. Ces données évoluent au fur et à mesure de l'exploration. L'Arctique aurait le second potentiel du monde de terres rares après la Chine, mais ses réserves ne sont pas encore prouvées. On parlerait alors de 1 000 ans d'exploitation assurée.¹⁷⁷

Ces éléments critiques sont aussi devenus un enjeu géopolitique dans le cadre de la confrontation entre les États-Unis et la Chine sur les technologies. La recherche de solutions alternatives à l'utilisation de ces éléments par les industriels des technologies répond, là encore, à un double impératif. Un impératif de souveraineté tout d'abord pour réduire la dépendance aux pays producteurs comme la Chine, la Russie ou encore le Brésil. Mais ces recherches correspondent aussi un impératif de développement durable pour limiter l'impact environnemental lié à leur extraction et leur traitement.

3. PERSPECTIVES EUROPEENNES POUR LES MATIERES PREMIERES INDISPENSABLES AU NUMERIQUE

La Commission européenne a ainsi présenté le 16 mars 2023 un projet de législation sur les matières premières critiques¹⁷⁸. Ce texte doit permettre à l'Union de sécuriser son approvisionnement de 18 métaux considérés comme essentiels. En effet les incertitudes quant à l'approvisionnement de l'Union européenne en terres rares constituent un

¹⁷⁷ *Terres rares : quels enjeux pour la France et l'Europe ?* (Vie-publique.fr 19 mai 2023)

www.vie-publique.fr/parole-dexpert/289457-terres-rares-quels-enjeux-pour-la-france-et-leurope

¹⁷⁸ *Critical Raw Materials: ensuring secure and sustainable supply chains for EU's green and digital future* (European Commission, 16 Mar 2023)

ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_23_1661

risque réel et plus théorique comme l'ont montré les récentes mesures prises par la Chine à l'encontre des États-Unis.

La Chine dispose d'un « outil géopolitique » avec « son quasi-monopole sur les terres rares », a rappelé Thierry Breton. Dans ce contexte, la Commission propose que, d'ici à 2030, les Vingt-Sept soient en mesure d'extraire de leurs sols 10 % de leur consommation contre 3 % aujourd'hui. Elle fixe également à l'Union des objectifs en matière de raffinage et de réutilisation de ces matières premières.¹⁷⁹

Dans un premier temps, les États de l'Union européenne devront essayer de trouver des sources d'approvisionnement alternatives qui les rendront moins dépendants vis-à-vis de pays avec lesquels les relations sont désormais incertaines. Ainsi, la découverte récente en Suède d'un important gisement de terres rares et de métaux stratégiques pourrait constituer un préalable à la remise en cause de l'usage de ces métaux par les industriels des technologies. « Il s'agit du plus grand gisement connu de terres rares dans notre partie du monde, et il pourrait devenir un élément important pour la production des matières premières essentielles qui sont absolument cruciales pour permettre la transition écologique », a déclaré dans un communiqué Jan Mostrom, le P.-D.G. de LKAB »¹⁸⁰.

4. LES CONSEQUENCES DES TENSIONS SINO-AMERICAINES SUR LES TECHNOLOGIES

L'embargo mis en place par les États-Unis en octobre 2022 vis-à-vis de la Chine sur les technologies critiques (microprocesseurs de haut niveau, supercalculateurs et systèmes d'intelligence artificielle) rendait prévisible la survenue de mesures de rétorsion de la

¹⁷⁹ *Face à la Chine et aux États-Unis, l'Europe se dote d'une politique industrielle inédite* (Le Monde 17 mars 2023) www.lemonde.fr/international/article/2023/03/17/l-europe-se-dote-d-une-politique-industrielle-inedite-pour-faire-face-au-plan-d-investissement-de-joe-biden_6165813_3210.html

¹⁸⁰ *Swedish mining company discovers Europe's largest deposit of rare earth elements* (Euronews, 13 Jan 2023) www.euronews.com/green/2023/01/13/swedish-mining-company-discovers-europes-largest-deposit-of-rare-earth-elements

part de la Chine. Ces mesures ont alors pris la forme de limitation à l'exportation par la Chine de certains métaux critiques pour la fabrication des technologies¹⁸¹ :

Les mesures prises par la Chine interviennent alors que Washington envisage de nouvelles restrictions sur l'envoi de microprocesseurs de haut niveau à la Chine, après une série de mesures restrictives ces dernières années. Les États-Unis et les Pays Bas devraient également restreindre davantage les ventes d'équipements de fabrication de puces à la Chine, dans le cadre des efforts visant à empêcher l'utilisation de leur technologie à des fins militaires. La dernière mesure de rétorsion prise par Pékin remonte au mois de mai, lorsqu'elle a interdit à certains secteurs nationaux d'acheter des produits du fabricant américain de puces Micron. Les analystes de Jefferies ont déclaré qu'ils considéraient les contrôles à l'exportation comme la deuxième contre-mesure, la plus importante, de la Chine après l'interdiction de Micron. "Le risque d'une escalade rapide des tensions entre les États-Unis et la Chine n'est pas négligeable", ont-ils déclaré. « Si cette action ne modifie pas la dynamique entre les États-Unis et la Chine, il faut s'attendre à d'autres contrôles des exportations de terres rares... »¹⁸²

L'embargo américain sur les puces de haut niveau constitue en effet un défi stratégique pour le développement des industries technologiques chinoises. Ainsi, les efforts des États-Unis pour empêcher la Chine de se procurer les puces les plus avancées sont perçus comme intolérables par les autorités chinoises. Face aux risques de « décrochage » économique de la Chine dans le cadre de la compétition mondiale sur les technologies, l'ambassadeur de Chine aux États-Unis, Xie Feng, décrivait la situation en ces termes : « C'est comme si dans une compétition de natation, on obligeait l'adversaire à porter un maillot de bain dépassé alors que l'on porte soi-même un Speedo... »¹⁸³.

¹⁸¹ *US hits China with sweeping tech export controls* (Financial Times, 7 Oct 2022)

www.ft.com/content/6825bee4-52a7-4c86-b1aa-31c100708c3e

¹⁸² *Companies race to secure supplies after China restricts gallium, germanium exports* (EURACTIV, 5 Jul 2023)

www.euractiv.com/section/china/news/companies-race-to-secure-supplies-after-china-restricts-gallium-germanium-exports

¹⁸³ *China warns of retaliation to US curbs on investment and chips* (Financial Times, 19 Jul 2023)

www.ft.com/content/ad1350b9-0e4b-40a4-bb70-4c236e513e7a

“ C'est comme si dans une compétition de natation, on obligeait son adversaire à porter un maillot de bain dépassé alors que l'on porte soi-même un Speedo...

Xie Feng, ambassadeur de Chine aux États-Unis, à propos de l'embargo américain sur les technologies

International Studies (CSIS) décrivait en ces termes à l'issue de la première vague de sanctions technologiques américaine contre la Chine en octobre 2022 : « L'administration Biden dit essentiellement à la Chine : « Si votre politique est la fusion entre [technologies] militaires et civiles, le seul moyen réaliste de mettre en œuvre notre politique de non-utilisation finale pour des ressources militaires est de mettre fin à toutes ventes à la Chine, et nous sommes désormais prêts à franchir ce pas...¹⁸⁴ »

De plus, les technologies d'IA qui sont au cœur de l'affrontement technologique entre les États-Unis et la Chine, constituent aussi un élément important dans la trajectoire “bas carbone” des autres filières industrielles. En effet les technologies d'IA pourraient jouer un rôle clé dans la capacité à détecter plus efficacement les gisements de matières premières critiques. Et, comme le précise Jef Caers professeur en sciences de la Terre à l'université Stanford, l'IA pourrait aussi occuper une place essentielle dans

¹⁸⁴ *Biden bans range of US high tech investments in China citing national security risk* (Guardian 9 Aug 2023)

www.theguardian.com/world/2023/aug/09/biden-executive-order-us-investment-chinese-technology

¹⁸⁵ *Choking off China's Access to the Future of AI* (Center for Strategic and International Studies, 11 Oct 2022)

www.csis.org/analysis/choking-chinas-access-future-ai

l'optimisation énergétique des processus de traitement de ces métaux¹⁸⁶. Il est à noter que ce sont des technologies d'IA développées dans le domaine militaire qui ont par la suite donné naissance à des technologies dérivées à usage civil qui permettent de détecter les gisements de métaux rares¹⁸⁷.

La dépendance aux matières premières critiques des technologies des énergies renouvelables est telle que le Secrétaire général de l'OCDE, Mathias Cormann émettait un avertissement sur les conséquences écologiques des mesures de restriction des exportations en ces termes :

« Relever le défi de la neutralité des émissions de CO2 nécessitera une nette montée en puissance de la production et des échanges internationaux de matières premières critiques. Les responsables de l'action publique doivent examiner de près la façon dont la concentration de la production et des échanges ainsi que le recours accru aux restrictions à l'exportation influent sur les marchés internationaux des matières premières critiques. Nous devons veiller à ce qu'aucune pénurie de matières ne nous empêche de tenir nos engagements climatiques. »¹⁸⁸

Parallèlement à la recherche de sources alternatives de matériaux critiques au sein de l'Union européenne, des mesures devront être prises pour limiter les impacts environnementaux de ces métaux et terres rares. Ainsi, l'intensification des recherches sur l'amélioration de l'efficacité du recyclage des métaux critiques pour les technologies numériques (et en particulier des terres rares) est désormais un impératif pour les États de l'Union européenne. Dans le même temps les pistes de R&D sur les alternatives à l'utilisation de ces ressources dans les technologies numériques devront aussi être soutenues afin de réduire la

¹⁸⁶ Can AI Help Us Go Green? Jef Caers, founder of MineralX initiative and the Professor of Earth and Planetary Sciences at Stanford University (Techsequences July 19, 2023)

www.techsequences.org/podcasts/2023/07/can-ai-help-us-go-green

¹⁸⁷ Un outil antiterroriste permet de détecter des gisements de minerais (AFP via Géo, 1 août 2017)

www.geo.fr/environnement/un-outil-antiterroriste-permet-de-detecter-des-gisements-de-minerais-177315

¹⁸⁸ Approvisionnements en matières premières critiques : les risques pour la transition verte (OCDE, 11 avril 2023)

www.oecd.org/fr/presse/approvisionnement-en-matieres-premieres-critiques-les-risques-pour-la-transition-verte.htm

dépendance de l'Union européenne vis-à-vis des pays producteurs comme la Chine ou la Russie.

VII. QUELLE RÉGULATION POUR UN NUMÉRIQUE DURABLE ?

1. PUISSANCE PUBLIQUE ET NUMÉRIQUE DURABLE

Les questions liées à la souveraineté numérique européenne et les politiques liées à la réduction de l'empreinte carbone du numérique semblaient, jusqu'à il y a peu, être des sujets distincts. Cependant, comme le fait remarquer le chercheur Tamian Derivry dans son étude au titre évocateur « *Verdir la souveraineté numérique* », les liens sont de plus en plus étroits entre les politiques industrielles de souveraineté numérique et celles qui seront liées à la mise en œuvre du *Pacte vert pour l'Europe (European Green Deal)* :

« Le processus de relocalisation et de soutien à l'industrie européenne est peut-être le lien le plus direct entre la souveraineté numérique et la réduction de la pollution numérique. Tout d'abord, il pourrait réduire l'impact du transport des produits, qui, par exemple, représente 8 % de l'empreinte carbone d'Apple en 2021, selon le rapport de progrès environnemental de l'entreprise. [...] Ensuite et surtout, la relocalisation et « l'europanisation » du secteur numérique sont les processus les plus efficaces par lesquels les gouvernements européens pourront s'assurer qu'ils sont en mesure de faire appliquer leurs politiques. »¹⁸⁹

Un contre-exemple du renforcement nécessaire entre objectifs environnementaux et objectifs de souveraineté a été donné dans le domaine des énergies renouvelables. Ainsi, les politiques publiques d'aide à l'installation des panneaux solaires ont dans un premier temps créé un effet d'aubaine pour les industriels extra-européens (et dans ce cas les constructeurs chinois) qui, comme le rappelle *l'Académie des Technologies* ont été en

¹⁸⁹ Greening Digital Sovereignty: uncovering the links between green and digital policies in the EU 24 (Tamian Derivry pour la Chaire *Digital, Gouvernance et Souveraineté* - Sciences-Po Jan 2023)
www.sciencespo.fr/public/chaire-numerique/en/2023/01/24/greening-digital-sovereignty-uncovering-the-links-between-green-and-digital-policies-in-the-eu

mesure d'éliminer progressivement la concurrence des fabricants européens. Le recours au solaire photovoltaïque était entre autres prôné comme un moyen de renforcer l'indépendance énergétique, cependant les mesures prises ont des effets paradoxaux sur les émissions carbone. La "taxe carbone" aux frontières constitue l'un des mécanismes qui permettrait de corriger les effets de bord de certains mécanismes d'aide aux énergies renouvelables.

" La production des composants sur la totalité de la chaîne de valeur est très largement dominée par la Chine (80 %) et, dans une moindre mesure, par l'Asie du sud-est (18 %). Et les panneaux photovoltaïques sont fabriqués en Chine avec une électricité très carbonée (en moyenne 600 gCO₂/kWh) [soit près de 10 fois plus que l'électricité produite en France]¹⁹⁰. Dans cette optique, une taxe CO₂ aux frontières européennes pourrait avoir un impact sur la compétitivité de certaines importations."¹⁹¹

Ainsi, des objectifs écologiquement vertueux ont parfois mené à une plus forte dépendance aux industriels chinois ainsi qu'à de plus hauts niveaux d'émissions carbone qui pour partie ont été transposées dans d'autres pays. Des mécanismes de même nature pourraient aussi exister dans le domaine du numérique. Ainsi, des mesures portant sur la diminution de l'empreinte carbone des technologies numériques, si elles ne s'accompagnent pas de mesures d'aides spécifiques aux acteurs européens des technologies pourraient là encore constituer une opportunité pour les acteurs américains et asiatiques de renforcer un leadership sur les nouvelles générations de technologies « bas carbone ». Comme c'est le cas pour les substances essentielles aux industries technologiques (métaux critiques, terres rares...), la dépendance ainsi créée vis-à-vis des technologies « bas carbone » extra-européennes constituerait un risque à la fois économique et politique. En effet, cette situation de dépendance pourrait rendre plus difficile voire impossible d'établir des règles contraignantes face à des acteurs extra-européens devenus essentiels à nos sociétés.

¹⁹⁰ *Carbon intensity of the power sector in the European Union in 2022, by country* (Statista 2023)

www.statista.com/statistics/1291750/carbon-intensity-power-sector-eu-country

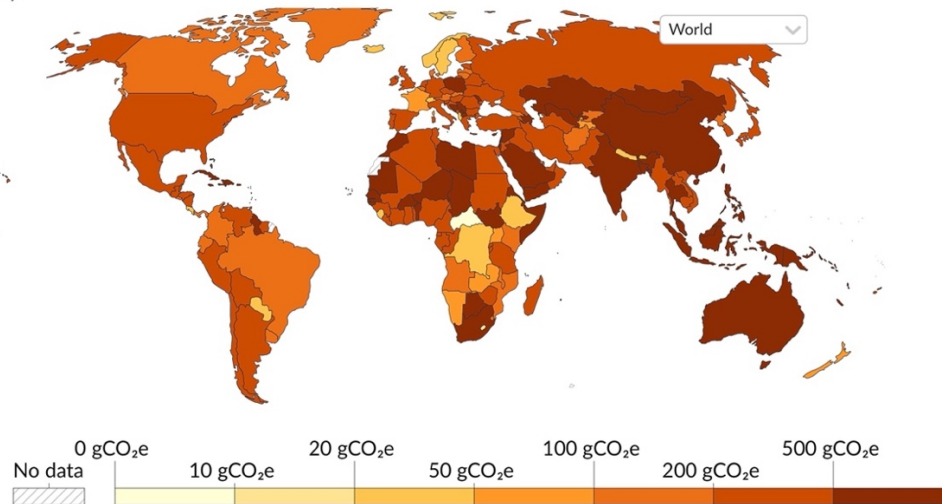
¹⁹¹ *Pour le développement de productions industrielles de panneaux photovoltaïques en France et en Europe* (Contribution France 2030 : Académie des Technologies, janvier 2023)

www.connaissancedesenergies.org/sites/default/files/pdf-actualites/Avis-Acatech-Pour-la-production-de-panneaux-photovoltaïques-en-France-et-en-Europe.pdf

Carbon intensity of electricity, 2022

Carbon intensity is measured in grams of carbon dioxide-equivalents emitted per kilowatt-hour of electricity.

Our World
in Data



Source: Ember's Yearly Electricity Data; Ember's European Electricity Review; Energy Institute Statistical Review of World Energy
OurWorldInData.org/energy • CC BY

Intensité carbone de l'électricité produite dans le monde en grammes d'équivalent CO₂ par kilowattheure

(Our World in Data 2022)¹⁹²

Il est à noter qu'en cas de dépendance aux technologies extra-européennes, d'autres risques de nature politique et stratégique pourraient exister. Ainsi, au-delà des enjeux liés à la concurrence industrielle sino-américaine, la sécurité des infrastructures de l'Internet est devenue un enjeu de sécurité nationale pour chaque pays de l'Union. En effet, si les technologies de réduction de l'empreinte carbone issues devaient provenir de Chine elles pourraient inclure des processus de contrôle centralisé des individus éloignés de nos principes sans même évoquer les risques de « portes dérobées » qui pourraient être introduites dans ces technologies. Cela a été le cas pour les infrastructures 5G de la société Huawei qui ont été progressivement interdites pour les opérateurs télécoms par crainte d'espionnage voire d'une prise de contrôle en cas de crise géopolitique. En France, c'est l'*Agence nationale de la sécurité des systèmes d'information*

¹⁹² *Carbon intensity of electricity* (Our World in Data 2022)
ourworldindata.org/grapher/carbon-intensity-electricity

(ANSSI) qui a imposé, pour les opérateurs télécoms qui en étaient déjà équipés, un délai de 3 à 8 ans pour cesser d'utiliser des équipements de la société Huawei¹⁹³.

2. VERS UNE POLITIQUE INDUSTRIELLE EUROPÉENNE DU NUMÉRIQUE DURABLE

Il est aussi à noter que les choix effectués par l'Union européenne en matière de normes environnementales et de standards pour le numérique durable pourraient avoir des conséquences bien au-delà des frontières de l'Union. Il existe un effet de levier reconnu des normes européennes sur les lois élaborées sur le numérique dans le reste du monde. Ces textes européens apparaissent désormais comme les plus protecteurs des libertés. Cela a été le cas pour les textes européens sur la protection des données personnelles comme le *règlement général sur la protection des données (RGPD)*, dont les principes ont été repris dans plus de 17 pays et territoires dans le monde : depuis la Californie jusqu'au Brésil et l'Inde et même à la Chine. Il est à noter que la récente loi chinoise sur les données personnelles *PIPL (Personal Information Protection Law)* s'applique aux individus et aux entreprises et même aux administrations de l'État chinois. Cependant des exceptions existent si ces contraintes liées au traitement des données personnelles des citoyens chinois « *venaient à empêcher les administrations d'exercer leurs missions statutaires...*¹⁹⁴ » (*sic*).

Les nouveaux textes européens sur la régulation des plateformes et des technologies (*DMA, DSA, DGA et AIA*) devraient bientôt inspirer d'autres législations dans le monde dans les années à venir. En plus des textes européens à visée extraterritoriale comme la "*taxe carbone*" qui s'appliquera aux importations en Europe de produits industriels, un principe d'exemplarité des règles écologiques européennes commence

¹⁹³ 5G : L'Anssi affirme qu'il n'y aura pas de "bannissement total" de Huawei (L'Usine Digitale, 6 juillet 2020) www.usine-digitale.fr/article/5g-l-anssi-affirme-qu-il-n-y-aura-pas-de-bannissement-total-de-huawei.N982976

¹⁹⁴ How will China's privacy law apply to the Chinese state? (New America, 26 Jan 2021) www.newamerica.org/cybersecurity-initiative/digichina/blog/how-will-chinas-privacy-law-apply-to-the-chinese-state

aussi être décrit. De plus certaines des règles environnementales qui s'imposeront aux produits européens pourraient aussi avoir des conséquences internationales en matière de développement durable. C'est par exemple le cas des règles écologiques qui s'appliqueront aux technologies présentes sur les avions civils qui auront *de facto* via *Airbus* un impact sur la moitié de la flotte d'avions civils dans le monde.

L'impact des politiques publiques numériques devra être analysé à la fois sous l'angle de la réduction de l'empreinte carbone mais aussi sous l'angle d'une plus grande maîtrise de notre destinée numérique. Cette maîtrise de l'évolution des technologies numériques et de leurs conséquences sur nos sociétés constitue une autre définition du terme « souveraineté numérique ». En effet, des politiques environnementales aussi ambitieuses soient-elles, si elles ne sont pas accompagnées de mesures de politiques industrielles, pourraient se révéler contre-productives tant sur le plan environnemental que sur le plan économique et social.

L'évolution des technologies numériques afin de réduire leur empreinte carbone correspond à l'un des plus importants chantiers industriels jamais entrepris. Cet effort doit en effet porter sur la quasi-totalité des champs de recherche : évolutions des modes de production des terminaux et des objets connectés, modifications des infrastructures de stockage et de gestion de l'énergie, optimisation des technologies de traitement et de transport des informations, amélioration des technologies de traitement et de recyclage des matériaux utilisés.

Pour être en mesure d'accompagner le développement des technologies durables en Europe, les acteurs publics devront mobiliser l'ensemble des leviers de politique industrielle. La transition écologique pour le numérique doit aller de pair avec une politique industrielle à la fois plus ambitieuse et plus innovante. En effet, les mesures prises par l'Union européenne lors des deux dernières décennies pour stimuler l'écosystème des entreprises technologiques, n'ont pas permis de développer de nouveaux acteurs technologiques européens de taille internationale. Désormais, les tensions liées à la crise *Covid* et plus récemment à la guerre en Ukraine ont conduit les principaux partenaires commerciaux de l'Union européenne à mettre en place des

mesures protectionnistes. C'est en particulier le cas aux États-Unis avec l'*IRA (Inflation Reduction Act)* ou le *CHIPS Act (Creating Helpful Incentives to Produce Semiconductors)* destinés à favoriser les investissements étrangers aux États-Unis¹⁹⁵. La Chine a quant à elle depuis longtemps et régulièrement mis en place des lois protectionnistes dans le domaine des technologies. En effet, comme le précisait Ferracane et Lee-Makiyama de l'*European Centre for International Political Economy* : "Dans un monde [comme la Chine] où tout est vu à travers du prisme de la sécurité nationale, les restrictions sur les marchés publics, la vie privée ou les normes deviennent non négociables"¹⁹⁶.

Les mesures prises en réponse par l'Union européenne en termes de régulation des émissions carbone du numérique doivent aussi permettre de favoriser les innovations technologiques européennes en particulier celles qui seront issues des *PME*. Ainsi, qu'il s'agisse de la réduction de l'empreinte carbone du numérique ou de l'utilisation du numérique à des fins de réduction de l'empreinte carbone des autres filières industrielles, des mesures d'accompagnement de ces évolutions technologiques devront être envisagées. Ces mesures de politique industrielle seront en effet nécessaires pour accélérer la mise sur le marché de ces technologies « bas carbone ». En synergie avec les mesures d'encadrement du secteur des technologies, elles pourraient aussi aider à rendre économiquement attractif le marché des technologies durables. C'est le cas du "mécanisme d'ajustement carbone aux frontières" (*MACF*) plus communément appelé "taxe carbone" qui s'inscrit dans le cadre du *Pacte vert pour l'Europe*. Les premiers secteurs industriels visés par cette "taxe" seront le fer et l'acier, l'aluminium, le ciment, l'engrais, l'électricité et l'hydrogène¹⁹⁷.

¹⁹⁵ Can the EU keep up with the US on green subsidies? (Financial Times, 1 Feb 2023)
www.ft.com/content/85b55126-e1e6-4b2c-8bb2-753d3cafcb5

¹⁹⁶ China's technology protectionism and its non-negotiable rationales (Martina F. Ferracane and Hosuk Lee-Makiyama European Centre for International Political Economy (ECIPE Aug 2017)
ecipe.org/wp-content/uploads/2017/06/DTE_China_TWP_REVIEWED.pdf

¹⁹⁷ Climat : qu'est-ce que le mécanisme d'ajustement carbone aux frontières, ou "taxe carbone européenne" ? (Touteurope.eu, 25 avril 2023)
www.touteurope.eu/environnement/changement-climatique-qu-est-ce-que-le-mecanisme-d-ajustement-carbone-aux-frontieres-ou-taxe-carbone-europeenne

Ce dispositif qui commencera à s'appliquer à partir du 1er octobre 2023 devrait évoluer en 2026 pour s'étendre à d'autres secteurs industriels. Lors de cette seconde phase de la mise en œuvre de la "taxe carbone", il conviendra d'y inclure les secteurs industriels liés aux technologies afin de favoriser l'évolution de l'ensemble des pays partenaires vers les technologies numériques « bas carbone ».

Les deux crises successives de la pandémie puis de la guerre en Ukraine ont déjà révélé au grand public l'impérieuse nécessité d'une politique industrielle pour le numérique et plus généralement pour les ressources industrielles et sanitaires critiques. Le terme de

“ S'assurer que notre terre reste habitable exige la même ambition, la même organisation, la même planification, la même expérimentation construite à partir du terrain, le même partage des risques entre secteurs public et privé et le même sens de l'objectif et de l'urgence que le projet Apollo...”

Mariana Mazzucato

politique industrielle avait en effet été longtemps considéré comme un héritage désuet issu d'un passé où la planification industrielle était imposée par les gouvernements. Le renchérissement du prix de l'énergie lié directement au conflit ukrainien a aussi lui contraint les citoyens européens à revoir leurs habitudes de consommation énergétique et il a incité l'Union à réviser les pratiques qui prévalaient jusqu'ici en termes de politique énergétique.

Désormais le terme de politique industrielle est en passe d'être réhabilité tant par les autorités françaises qu'européennes et ce d'autant plus que cette politique s'inscrit dans un moment

crucial pour le développement des stratégies de réduction des émissions carbone. Ainsi, Roland Lescure ministre délégué chargé de l'Industrie, déclarait à ce propos : « *La France a besoin de soutenir par tous les moyens ses startups et entreprises innovantes pour répondre aux enjeux*

de la souveraineté et de la transition écologique et énergétique, et pour se réindustrialiser de façon durable »¹⁹⁸.

L'économiste italo-américaine Mariana Mazzucato incite aussi à revoir les stratégies qui prévalaient en termes de financement de l'innovation technologique. Elle rappelle le rôle essentiel qu'a pu jouer la puissance publique, en particulier la recherche militaire, dans le développement des technologies essentielles pour le numérique. Elle préconise ainsi de concevoir de nouvelles formes de financement de « défis industriels » en particulier autour des thématiques liées au développement durable :

« Pour relever les grands défis sociétaux et technologiques de nos sociétés - comme le changement climatique ou la protection sociale, des discussions plus approfondies seront nécessaires sur la manière d'utiliser l'innovation orientée vers une mission. Tout comme la révolution des technologies de l'information a été voulue et dirigée, nous pouvons orienter l'innovation vers l'écologie et la protection sociale comme nouvelles voies d'innovation. Cela ne signifie pas qu'il faille dicter d'en haut ce qui doit être produit, quels acteurs sont « productifs » et comment chacun doit se comporter. Cela nécessite plutôt de nouveaux types de contrats entre acteurs publics et privés (ainsi que la société civile) afin de favoriser des relations symbiotiques, en partageant les investissements nécessaires pour réorienter les économies en les éloignant de la production de riches en matériaux et d'une énergie basée sur les combustibles fossiles. Il y a des leçons à tirer des investissements orientés sur des missions telles que l'expédition lunaire. S'assurer que notre terre reste habitable exige la même ambition, la même organisation, la même planification, la même expérimentation construite à partir du terrain, le même partage des risques entre les secteurs public et privé et le même sens de l'objectif et de l'urgence que le projet Apollo. Mais il est également vrai qu'en raison du caractère transformationnel de ces investissements, il conviendrait de débattre davantage des raisons pour lesquelles certaines technologies sont poursuivies et ce que nous en faisons. Il est curieux, par exemple, qu'il y ait eu si peu de débats sur la fracturation hydraulique - qui, jusqu'à son arrivée - a été financée par le gouvernement. »¹⁹⁹

¹⁹⁸ Initiative Tibi – Signature d'un engagement avec 28 investisseurs institutionnels pour financer le développement des entreprises technologiques à hauteur de 7 milliards d'euros d'ici 2026 (Communiqué de presse du ministère de l'Économie, des Finances et de la Souveraineté industrielle et numérique, 26 juin 2023)
presse.economie.gouv.fr/26062023-initiative-tibi-le-ministere-de-leconomie-des-finances-et-de-la-souverainete-industrielle-et-numerique-signe-un-engagement-avec-28-investisseurs-institutionnels-pour-financer-le-developpemen/

¹⁹⁹ Mazzucato, Mariana. The Value of Everything (p. 228) (Ed. Penguin Books 2018)

Parallèlement aux dispositifs de financement des technologies existants (ou de subventions accordées dans le cadre d'appels à projets technologiques), des dispositifs innovants de financement des innovations technologiques ont progressivement été mis en place. Ces nouveaux dispositifs avaient pour but d'aider au développement de technologies d'intérêt général dans des secteurs non couverts par les financements existants ou en raison des difficultés à les réaliser dans des délais courts.

Des plateformes de financement de défis technologiques spécifiques ont ainsi été conçues pour aider à développer des technologies liées au développement durable. Certaines de ces plateformes sont d'origine publique, c'est le cas de la plateforme *Challenge.gov* créée aux États-Unis en 2010 par l'administration Obama. À la différence du principe des appels à projets thématiques (comme ceux du programme *Horizon Europe*), cette plateforme a pour objectif de financer des technologies répondants à des critères d'intérêt général sur la base de cahiers des charges précis établis par des collèges d'experts²⁰⁰.

Des initiatives privées ont aussi été conçues pour développer le principe du financement de « *missions technologiques* ». C'est le cas de la *Fondation XPRIZE* organisation à but non lucratif fondée en 1995 qui a récemment été utilisée pour lancer le défi « *Carbon Removal* » financé par la fondation d'Elon Musk²⁰¹. Ce défi a pour objectif d'aider à concevoir des technologies de capture à grande échelle du CO₂. Il est à noter que les technologies de capture du carbone viennent de connaître une accélération avec la décision du gouvernement américain de subventionner massivement deux usines de capture de carbone au Texas et en Louisiane²⁰².

²⁰⁰ *Challenge.gov: Two Years and 200 Prizes Later* (Obama White House Archive 5 Sep 2012)

obamawhitehouse.archives.gov/blog/2012/09/05/challengegov-two-years-and-200-prizes-later

²⁰¹ *XPRIZE Carbon Removal* (XPRIZE & Musk Foundation 2022)

www.xprize.org/prizes/carbonremoval

²⁰² *Les États-Unis subventionnent massivement deux usines de capture de carbone* (Le Monde, 12 août 2023)

www.lemonde.fr/economie/article/2023/08/12/les-etats-unis-subventionnent-massivement-deux-usines-de-capture-de-carbone_6185223_3234.html

Pour être en mesure de développer les technologies nécessaires à la réduction de l'empreinte carbone du numérique, il conviendra de stimuler dans le même temps l'ensemble de l'écosystème européen des technologies. Des dispositifs de financement innovants devront ainsi être conçus en Europe pour développer les technologies et services qui permettront de réduire l'empreinte carbone du numérique, mais plus largement ces instruments devront aussi aider à développer des technologies qui auront pour but de réduire l'empreinte carbone de l'ensemble des filières industrielles.

L'intérêt pour la création d'un *Buy European Act* est apparu dans les discussions européennes en réponse aux récentes mesures prises par l'administration américaine pour favoriser les industries décarbonées aux États-Unis. Ce dispositif préférentiellement orienté vers les entreprises européennes devrait être spécifiquement conçu part pour stimuler des technologies européennes plus sobres et mais aussi pour développer des technologies plus efficaces pour limiter l'empreinte carbone de l'ensemble des secteurs économiques. Cette initiative désormais envisagée par les pays de l'Union²⁰³ pourrait ainsi répondre à *l'Inflation Reduction Act* qui constitue pour les États-Unis une relance de leur politique écologique tout en créant une distorsion de concurrence en favorisant les investissements étrangers auprès des industries américaines.

3. EUROPE : LE ROLE CLE DE LA COMMANDE PUBLIQUE

Cependant, un autre élément essentiel en matière de politique industrielle sera lié au levier de la commande publique pour les *PME* innovantes dans le domaine du développement durable. En effet, le levier de la commande publique est l'un des instruments les plus puissants pour aider les entreprises à orienter leurs activités en

²⁰³ *Industrie : Emmanuel Macron reçoit les entreprises européennes pour les convaincre de ne pas délocaliser* (Le Monde, 21 nov 2022)

www.lemonde.fr/economie/article/2022/11/21/industrie-emmanuel-macron-recoit-les-entreprises-europeennes-pour-les-convaincre-de-ne-pas-delocaliser_6150930_3234.html

www.reuters.com/markets/europe/macron-hosts-european-ceos-counter-us-move-temptation-2022-11-21/

fonction d'une demande solvable et ainsi faire évoluer leurs offres et leur permettre d'étendre leurs activités.

« La commande publique [en incluant les marchés publics, les délégations de service public et les contrats de partenariats public-privé], ne représente pas moins de 300 milliards d'euros par an soit l'équivalent de 15 % du PIB : elle joue donc un rôle majeur de structuration des offres économiques et des services offerts sur les territoires pour les acteurs de terrain, entreprises, fournisseurs, usagers. Ce levier important peut, et doit, dans le contexte des plans de relance avec injection massive de fonds dans l'économie locale, être orienté vers de nouvelles pratiques environnementales et sociales. »²⁰⁴

Comme le fait remarquer le député Philippe Latombe dans son rapport sur la souveraineté numérique, l'apport de la commande publique pourrait être déterminant dans l'essor de l'écosystème français et européen des technologies²⁰⁵ : *« Aujourd'hui, le gros problème, c'est qu'on n'a pas un État qui soit client. Entre 1 euro de subvention et 1 euro de chiffre d'affaires, l'effet pour les entreprises est quasiment de 7 à 8. Quand l'État est un client, c'est une commande, c'est de l'emploi, c'est de la valeur ajoutée, de la recherche et du développement. C'est tout un système intéressant et valorisant qui donne de la crédibilité aux entreprises pour aller chercher des marchés extérieurs. »²⁰⁶*

Cette croissance des PME innovantes devra aussi passer par la mise en place d'un *Small Business Act* en France et en Europe pour réserver à des PME européennes innovantes une part significative de l'ensemble des commandes publiques issues des administrations de l'État et des collectivités territoriales. Ce dispositif existe en effet aux

²⁰⁴ Tech it Green, Transformation numérique et transition écologique : construire la double révolution du 21e siècle (Isabelle Albert pour le G9+, 2020)

²⁰⁵ Rapport d'information : « Bâtir et promouvoir une souveraineté numérique nationale et européenne » M. Jean-Luc WARSMANN, Président, et M. Philippe LATOMBE, Rapporteur, 29 juin 2021

www.assemblee-nationale.fr/dyn/15/rapports/souvnum/115b4299-t1_rapport-information

²⁰⁶ Philippe Latombe : « la souveraineté numérique française, c'est la capacité à choisir nos dépendances » (Euractiv, 14 juillet 2021)

www.euractiv.fr/section/economie/interview/philippe-latombe-la-souverainete-numerique-francaise-cest-la-capacite-a-choisir-nos-dependances/

États-Unis depuis 1953. Actuellement, 26 % des commandes publiques fédérales sont attribuées chaque année à des *PME* américaines²⁰⁷.

Une politique industrielle européenne dans le domaine des technologies pourrait consister à privilégier des secteurs clés pour l'Europe. Notamment la transition énergétique ou encore la mobilité bas carbone pour lesquels l'Europe est légitime et pour laquelle elle pourrait aider à créer des acteurs qui s'attacheront aussi à respecter les données personnelles.

Un autre aspect crucial des politiques industrielles technologiques correspond à l'articulation entre les recherches liées à la défense et leurs développements dans les technologies civiles. Le budget de la défense a en effet connu une forte croissance avec la loi de programmation militaire 2024-2030 adoptée le 1^{er} août 2023 et prévoit un budget de 413 milliards d'euros. En effet, beaucoup des technologies fondamentales de l'Internet mais aussi les technologies cruciales pour son évolution (y compris pour le *métavers*) ont d'abord été développées dans le domaine militaire. Qu'il s'agisse de réalité augmentée, de réalité virtuelle, d'interface tête haute ou encore d'interface tactile etc. Comme le rappelle l'économiste Mariana Mazzucato « *Il n'y en a pas une seule technologie de l'iPhone qui n'ait pas été financée par l'État fédéral américain [en particulier par la recherche militaire]. Cela inclut les technologies des réseaux sans fil, l'Internet, le GPS, l'écran tactile, et plus récemment l'assistant personnel à commande vocale Siri...* »²⁰⁸. En effet, comme le fait remarquer l'économiste, les États-Unis ont permis aux entreprises du secteur des technologies de faire reposer leur développement sur l'utilisation des recherches technologiques massivement financées par le secteur public. Une meilleure répartition de financement entre les travaux de recherche fondamentale publique et les recherches appliquées par les industriels européens des technologies sera là encore indispensable pour faire émerger les nouvelles générations de technologies durables.

²⁰⁷ Federal Government Awards Record-Breaking \$145.7 Billion in Contracting to Small Businesses (U.S. Small Business Administration, July 28, 2021)
www.sba.gov/article/2021/jul/28/federal-government-awards-record-breaking-1457-billion-contracting-small-businesses

²⁰⁸ Mariana Mazzucato citée par la MIT TechReview (Tech's Enduring Great-Man Myth 4 août 2015)
www.technologyreview.com/2015/08/04/166593/techs-enduring-great-man-myth/

Une meilleure articulation entre les projets de R&D militaire et les projets civils de technologies devra aussi être recherchée en France mais aussi en Europe à titre d'exemple dans le domaine des nouvelles générations d'interfaces haptiques basées sur les technologies radar et l'analyse des mouvements par l'intelligence artificielle, dans l'optimisation énergétique des réseaux de communications ou encore que dans les capteurs auto-alimentés de l'Internet des objets.

4. UN NUMÉRIQUE DURABLE A VISAGE EUROPEEN

L'Europe devrait être en mesure de développer les prochaines générations de technologies qui seront à la fois plus protectrices des individus et plus soucieuses de l'environnement. En ce sens, le fait que les Européens aient été à l'origine de la prise en compte des questions écologiques et environnementales rend leur démarche d'écoconception plus légitime que celles de leurs homologues chinois ou américains. Ainsi, mettre en adéquation les préoccupations environnementales et les démarches d'innovations constitue un élément important de la motivation des développeurs de ces technologies. En effet, de nombreux ingénieurs éprouvent désormais une inadéquation (on évoque aussi le terme de « dissonance cognitive ») entre leurs convictions écologiques et les réalisations auxquelles ils participent au sein de leurs entreprises respectives²⁰⁹. Cette prise de conscience des risques environnementaux et des risques liés à l'évolution possible du numérique dans nos sociétés que l'universitaire Shoshana Zuboff résume en ces termes :

« De même que la civilisation industrielle s'est développée aux dépens de la nature et menace aujourd'hui la Terre elle-même, une civilisation de l'information façonnée par le capitalisme de surveillance et son nouveau « pouvoir instrumental » se développera aux dépens de notre nature humaine et pourrait menacer de nous coûter notre humanité. L'héritage industriel du chaos

²⁰⁹ « Je ne sais pas combien sont ces ingénieurs qui doutent, mais mon expérience me laisse penser qu'ils sont de plus en plus nombreux » (Le Monde, 19 juin 2023)

www.lemonde.fr/campus/article/2023/06/19/je-ne-sais-pas-combien-sont-ces-ingenieurs-qui-doutent-mais-mon-experience-me-laisse-penser-qu-ils-sont-de-plus-en-plus-nombreux_6178318_4401467.html

climatique nous remplit de tristesse, de remords et de peur. Alors que le capitalisme de surveillance devient la forme dominante du capitalisme de l'information à notre époque, quel héritage de pertes et de regrets les futures générations déploreront-elles ? »²¹⁰

De même, face à une économie de l'information qui a été tout entière orientée vers la consommation et le renouvellement rapide de nos outils technologiques, une autre « dissonance cognitive » commence à exister (en particulier auprès des publics jeunes) entre la sollicitation à consommer toujours plus de technologies et l'injonction de plus en plus pressante à prendre en compte les conséquences environnementales du développement incontrôlé de ces technologies.

Au vu de l'importance des enjeux à la fois environnementaux, mais aussi économiques et stratégiques, le développement des technologies bas carbone en Europe doit devenir une priorité pour les pays de l'Union. En effet, une stratégie européenne qui ne serait que « défensive » et fondée uniquement sur le droit ne suffirait pas à enrayer la dynamique actuelle de dépendance vis-à-vis des industriels extra-européens. Ces mesures juridiques ont montré que jusqu'ici elles n'étaient pas à elles seules en mesure de réduire les risques de dépendance politique, sociale et économique que ces technologies pourraient entraîner dans les années à venir. Seul le soutien aux entreprises capables de développer un écosystème industriel indépendant des filières américaines et chinoises permettra d'éviter d'être soumis aux dérives auxquelles nous assistons de la part de ces entreprises. Le rachat, ou la prise de participation majoritaire, de ces entreprises par des entités extra-européennes devra faire l'objet d'un examen préalable afin de déterminer si les risques liés à la sécurité énergétique des pays de l'Union européenne peuvent être de nature à remettre en cause ces rachats.

²¹⁰ The Age of Surveillance Capitalism (pp. 11-12) Shoshana Zuboff (Profile Books, 31 Jan 2019)

VIII. CONCLUSIONS & RECOMMANDATIONS

LES 3 AXES DE LA DECARBONATION DU NUMERIQUE

- **Mesures technologiques** : développement de technologies « *bas carbone* » sur l'ensemble des filières et développement des technologies liées aux énergies renouvelables auprès de l'ensemble des acteurs du numérique, développement de normes et standards européens sur le numérique durable.
- **Sensibilisation** des concepteurs des technologies à l'écoconception et **éducation** des citoyens aux meilleures pratiques numériques durables. Mesures de formation et de dispositifs d'information sur les technologies numériques pour favoriser les technologies frugales et l'économie circulaire,
- **Conception et mises en œuvre de politiques industrielles** pour le développement des innovations numériques durables (aides aux entreprises innovantes). Mesures d'encadrement pour inciter les entreprises à adopter des engagements sur la réduction des émissions et aider au développement de l'économie circulaire.

Il conviendra de veiller à ce que les technologies utilisées par la France (et plus largement par les États européens) soient maîtrisées et qu'elles concourent bien à l'intérêt général en matière de développement durable. Il conviendrait de créer à cet effet une fonction de coordinateur des technologies durables de l'État *Chief Sustainability Officer* à l'instar du « *Chief Technology Officer* » (CTO) de l'administration fédérale mise en place aux États-Unis. Idéalement, ces deux fonctions pourraient être réunies. Ce

coordinateur national aurait en particulier pour fonction de veiller à ce que l'ensemble des technologies mises en place par l'État soient à la fois maîtrisées par les agents de l'État, qu'elles soient durables et qu'elles ne peuvent pas donner lieu à des utilisations contraires à l'intérêt des citoyens. Afin que ce coordinateur des technologies durables de l'État puisse exercer pleinement sa mission interministérielle, il serait souhaitable que cette fonction soit directement rattachée au Premier ministre et qu'il dispose en propre d'une équipe d'experts afin de pouvoir analyser les dossiers qu'il aura à traiter à la fois sous l'angle technologique, économique, industriel et social. L'une des fonctions de ce coordinateur des technologies durables de l'État sera d'aider les collectivités locales à développer de meilleures pratiques en matière de technologies durables. Ainsi, à l'instar de la désignation d'un *délégué à la protection des données (DPO)* rendue obligatoire par la CNIL auprès des collectivités locales, des *coordinateurs des technologies durables* devront être nommés à l'échelle des régions en particulier pour accompagner et former les acheteurs publics et les orienter vers les solutions technologiques durables des collectivités territoriales.

Vers un Label Européen sur le Numérique Durable

Dans le cadre de l'élaboration d'un label européen sur le numérique durable, la présence de ces métaux dans les appareils numériques pourrait aussi être prise en compte (et mentionnée). Ces futurs labels environnementaux européens devront ainsi permettre à la fois de sensibiliser les citoyens européens ainsi que les acheteurs au sein des entreprises, des administrations et des collectivités territoriales et les aider à orienter leurs choix vers des technologies numériques durables. Au-delà d'être un instrument de sensibilisation sur numérique durable, ce label devrait aussi avoir pour vocation d'être un instrument d'information utile pendant l'ensemble de la vie du produit.

Les informations accessibles via ce *Label* devront permettre de faire connaître aux usagers l'ensemble des caractéristiques environnementales d'un produit ou d'un service technologique. Cela afin de faire connaître les conditions dans lesquelles il a été conçu, assemblé, les conditions exactes de sa réparabilité (en y intégrant les lieux les plus proches dans lesquels il sera possible de le réparer) ainsi que les informations relatives

à sa recyclabilité. L'élaboration de ce label devrait ainsi constituer ainsi un guide environnemental évolutif et réactualisé sur l'ensemble du cycle de vie des produits numériques.

RECOMMANDATIONS POUR UN NUMÉRIQUE EUROPÉEN DURABLE

Recommandation 1 : nommer un coordinateur des technologies durables de l'État

Créer en parallèle à l'échelon français et l'échelon européen une fonction de coordinateur des technologies durables de l'État à l'instar du *CTO/CSO (Chief Technology Officer / Chief Sustainability Officer)*. La mission de ce coordinateur des technologies durables de l'État serait de promouvoir et mettre en œuvre les stratégies françaises et européennes en matière de soutenabilité/durabilité des technologies développées ou utilisées par les administrations françaises et européennes. Dans le même temps, il conviendra de nommer des coordinateurs des technologies durables à l'échelle des collectivités territoriales et en particulier des régions pour accompagner les choix technologiques des collectivités et sensibiliser les acheteurs publics à la mise en œuvre des commandes publiques durables dans le domaine des technologies.

Recommandation 2 : créer un *Label Européen sur le Numérique Durable*

Créer un *Label Européen sur le Numérique Durable* qui agrégera l'ensemble des caractéristiques environnementales de chaque produit numérique (réparabilité, recyclabilité, empreinte carbone initiale, consommation énergétique directe et indirecte...). Ces indicateurs (ou ces alertes sur les produits ou services) devront être assez accessibles et ergonomiques pour être utiles à la sensibilisation des citoyens aux enjeux du développement durable. Les indicateurs de ce Label devront aussi permettre aux acheteurs de privilégier les solutions technologiques les plus vertueuses en matière de réduction de l'empreinte carbone. Plutôt qu'une base de données générale sur l'empreinte carbone des terminaux numériques, il s'agira d'offrir aux citoyens accès à

des informations spécifiques et réactualisées en temps réel sur les caractéristiques environnementales de chaque outil technologique qu'ils pourront être amenés à acquérir ou à utiliser.

Recommandation 3 : créer un *Small Business Act* en France et en Europe

Mettre en place d'un *Small Business Act* en France et en Europe pour réserver une part significative de l'ensemble des commandes publiques à des *PME* innovantes dans le domaine du développement durable afin de leur permettre de se développer à partir de commandes solvables. Il conviendra dans le même temps d'être en mesure de bloquer des rachats potentiellement hostiles en particulier dans le domaine des technologies stratégiques pour l'indépendance énergétique des pays de l'Union européenne.

Recommandation 4 : inclure des dispositions sur le numérique durable dans les textes européens de régulation des grandes plateformes

Inclure dans les textes européens de régulation des plateformes ; *Digital Markets Act (DMA)*, *Digital Services Act (DSA)*, *Data Governance Act (DGA)* *AI Act* et *Data Act* des dispositions sur l'analyse de leur impact en termes d'émissions carbone et des engagements relatifs à la réduction de l'empreinte carbone des technologies utilisées et en particulier pour les systèmes d'IA. Des obligations de même nature pourront aussi être mises en place auprès des éditeurs de logiciels.

Recommandation 5 : auditer l'impact écologique des algorithmes, des grandes plateformes

Établir un audit indépendant du fonctionnement, des algorithmes, des principales plates-formes ainsi que des technologies les plus consommatrices d'énergie en vue d'analyser l'évolution de leur impact sur l'empreinte carbone directe et indirecte et des

technologies numériques ainsi que sur l'utilisation des ressources et matériaux stratégiques pour les technologies numériques.

Recommandation 6 : créer un répertoire des clouds européens

Créer un répertoire des solutions logicielles européennes alternatives aux technologies de clouds des grandes plateformes. Ce répertoire, en plus de permettre de connaître les applications disponibles devra aussi indiquer le bilan carbone prévisionnel de ces applications dans les différentes configurations qui pourront être déployées auprès des usagers de ces technologies.

Recommandation 7 : concevoir un baromètre international sur les mesures de soutien aux circuits de réparation et de recyclage des appareils numériques.

Établir un baromètre international permanent sur les expérimentations menées en matière de renforcement des circuits de réparation et de recyclage des appareils numériques. Inclure dans les dispositifs législatifs conçus pour développer l'économie circulaire numérique des « clauses de revoyure » afin que les dispositions de ces textes puissent être réexaminées à intervalle régulier afin de leur permettre de prendre en compte les meilleures pratiques détectées en Europe ou à l'international.

Recommandation 8 : favoriser l'écoconception des technologies numériques

Stimuler la R&D sur les technologies qui permettront d'une part d'améliorer le recyclage des terminaux afin d'augmenter la part des métaux effectivement recyclés et, dans le même temps, favoriser les recherches sur les matériaux alternatifs pour les technologies critiques. Ces recherches sur l'écoconception des technologies numériques pourraient d'une part apporter des bénéfices environnementaux pour l'ensemble des acteurs de l'économie circulaires et permettraient de réduire la dépendance stratégique vis-à-vis de pays producteurs extra-européens dans le domaine des technologies.

Recommandation 9 : concevoir des dispositifs de financement innovants pour les technologies bas carbone

Concevoir en France et en Europe des dispositifs de financement innovants qui associeront les acteurs publics et les industriels européens afin de développer de nouveaux dispositifs liés à la maîtrise de l'énergie et à la réduction de l'empreinte carbone des technologies numériques. Ces dispositifs seront basés sur le principe des « défis technologiques » et devront permettre d'accélérer le développement les technologies qui ne seraient pas disponibles par la seule intervention des acteurs industriels existants. Des défis spécifiques pourront aussi être mis en place pour développer des technologies qui permettront de réduire l'empreinte carbone des principales filières industrielles émettrices de carbone.

Recommandation 10 : financer les technologies de stockage des données de longue durée

Investir en France et en Europe dans la recherche sur les solutions de stockage de l'information sur la longue voire la très longue durée. Ces technologies pourraient être développées dans un premier temps pour les besoins d'archivage des administrations. Ces technologies de stockage de l'information sur la longue durée pourraient aussi constituer une étape supplémentaire dans l'allongement de la durée de vie des technologies numériques utilisées dans un premier temps en entreprises et à terme auprès des particuliers.

Recommandation 11 : développer la R&D sur le recyclage des métaux critiques

Intensifier les recherches portant sur l'amélioration de l'efficacité énergétique du traitement et du recyclage des métaux critiques pour les technologies numériques (et en particulier des terres rares).

Accroître les recherches sur l'augmentation du taux de récupération des métaux critiques utilisés actuellement pour la conception des terminaux numériques. Dans le même temps, les pistes de R&D sur les alternatives à l'utilisation de ces ressources dans les technologies numériques devront aussi être soutenues afin de réduire la dépendance vis-à-vis des pays extra-européens.

Recommandation 12 : stimuler l'économie circulaire via des incitations ciblées

Stimuler l'économie circulaire pour les technologies numérique par des incitations financières ciblées. Ces dispositifs devront être accompagnés de mesures d'encadrement légal des technologies des terminaux ainsi que des objets connectés pour allonger leurs cycles de vie et leur réparabilité. Ces mesures devront aussi permettre de favoriser l'émergence de nouveaux modèles économiques ainsi que des nouvelles professions liées à l'économie circulaire du numérique.

Recommandation 13 : inclure les technologies numériques dans la « taxe carbone » de l'Union européenne

Inclure les technologies numériques dans la révision prévue en 2026 du dispositif de *“mécanisme d'ajustement carbone aux frontières” (MACF)* aussi appelé *“taxe carbone”*. Lors de cette seconde phase de mise en œuvre, il conviendra d'y intégrer les secteurs industriels liés aux technologies afin de favoriser l'évolution de l'ensemble des pays partenaires de l'Union européenne vers les technologies numériques *“bas carbone”*.

À PROPOS DE L'ISN ET DU CITC EURARFID

L'INSTITUT DE LA SOUVERAINETE NUMERIQUE (ISN)

L'*Institut de la Souveraineté Numérique (ISN)* est une association loi 1901 à but non lucratif qui a pour mission de fédérer les acteurs du numérique et, au-delà, les acteurs économiques afin de créer une synergie sur les enjeux liés à la souveraineté numérique européenne. L'*ISN* s'est engagé depuis sa fondation en 2015 à faire la pédagogie et mobiliser les citoyens, et leurs représentants, sur les enjeux de la souveraineté numérique. L'*ISN* considère qu'il est nécessaire de promouvoir la protection de notre cyberspace, au même titre que celle de notre espace terrestre, maritime et aérien. L'*ISN* propose des actions et des mesures technologiques, juridiques et politiques qui permettent de faire valoir la souveraineté numérique sur l'ensemble de nos ressources numériques et en particulier sur nos données. Enfin, l'*ISN* souhaite contribuer à la transformation numérique de l'État afin de permettre de garantir la protection de notre souveraineté et de préserver dans le même temps nos libertés individuelles et collectives.

LE CITC EURARFID

Le *CITC (Centre d'Innovation des Technologies sans Contact)*, Hub d'innovation technologique dans les secteurs de l'Internet des Objets, l'Intelligence Artificielle et la Cybersécurité.

Basé sur le campus *d'Euratechnologies*, le *CITC* est soutenu par la Métropole Européenne de Lille ainsi que la région des Hauts-de-France, il accompagne chaque année plus de 80 adhérents (PME, entreprises en création, associations, pôles de compétitivité, universités, collectivités, etc.) dans leurs projets innovants en développant leurs moyens économiques et technologiques ainsi que leurs savoir-faire. Le *CITC* est labellisé *CRT* (*Centre de Ressources Technologiques*) et organisme de formation. Il coordonne *l'EDIH* (*European Digital Innovation Hub*) *GreenPowerIT*, guichet unique pour mettre à disposition des entreprises (startups, PME et ETI) et des administrations publiques des services (compétences, moyens techniques, humains et financiers) essentiels pour accélérer leur transformation numérique et écologique. Le *CITC* pilote également le *CSIRT* des Hauts-de-France (*centre de réponse aux incidents cyber*).

PRESENTATION ET REMERCIEMENTS

Ce rapport a été réalisé par *l'Institut de la Souveraineté Numérique* en partenariat avec le *CITC EURARFID*. Il a été coordonné par Bernard Benhamou, secrétaire général de l'ISN. Il a bénéficié de l'aide de Chekib Gharbi, directeur général du *CITC EURARFID* ainsi que ses équipes et en particulier Julien Coisne, responsable R&D - secteur public.

Avant de devenir secrétaire général de l'ISN, Bernard Benhamou a exercé les fonctions de délégué interministériel aux usages de l'Internet auprès du ministère de la Recherche et du ministère de l'Économie numérique. Il a coordonné les premières conférences ministérielles européennes sur l'Internet des objets et l'inclusion numérique lors de la présidence française de l'Union européenne en 2008. Il a auparavant été le conseiller de la délégation française au Sommet des Nations unies sur la Société de l'Information. Il enseigne actuellement la gouvernance de l'Internet à l'université Paris I – Panthéon Sorbonne après avoir créé les premiers enseignements sur Internet et administrations à l'Ena et Sciences Po Paris.

L'Institut de la Souveraineté Numérique et le *CITC EURARFID* tiennent à remercier pour leur participation à l'élaboration de ce rapport :

Catherine Morin-Desailly

Sénatrice de la Seine-Maritime, membre de la commission des affaires européennes

Présidente de la commission spéciale sur le projet de loi sur la sécurité et la régulation de l'espace numérique

Didier Carré

Président du groupe G9+ (think tank numérique des Alumni des Grandes Écoles)

Cofondateur de *l'European Champions Alliance*

Michael Nelson

Directeur des technologies et des affaires internationales

Carnegie Endowment for International Peace

Ancien conseiller pour les technologies d'Al Gore, vice-président des États-Unis

Gérald Santucci

Ancien chef de l'unité *"Future Internet Enterprise Systems and Internet of Things"*

Commission européenne (DG CONNECT)

Désirée Milosevic

Co-présidente du *RIPE* (Réseaux IP Européens Network Coordination Centre)
Cooperation Working Group

Former special Advisor to the Chair Advisory Group

United Nations - Internet Governance Forum (IGF)

Loïc Maquinghen

Responsable développement durable, économie circulaire et impact sur le climat

SAP France

Raja Chiky

Alliances & CSR Director

Outscale - Dassault Systèmes

Eric Saund

Chercheur et expert des technologies d'intelligence artificielle

Ancien directeur de recherche au *Xerox Palo Alto Research Center (PARC)*

Amélie Turet

Responsable des projets développement durable à la *Direction générale des Entreprises (DGE)*
Ministère de l'Économie, des Finances et de la Souveraineté industrielle et numérique

Pierre Boulet

Président de l'association des Vice-Présidents Numérique de l'Enseignement supérieur et
de la Recherche

Alain Risbourg

Partenaire fondateur, RSE, transition écologique et réduction de l'impact des produits
Covivance