



NUMÉRIQUE ET ENVIRONNEMENT



Édito



©Alban Gilbert

Dans un secteur en plein essor comme le numérique, et dans le cadre de notre feuille de route régionale Néo Terra, qui vise à faire de la transition énergétique, agricole et écologique la véritable matrice de nos politiques publiques, AcclimaTerra se devait d'étudier de la manière la plus étayée et précise possible l'évolution de l'impact environnemental, mais également sur l'érosion dramatique de la biodiversité.

C'est sur la base d'un tel diagnostic partagé que nous pourrions poser les bases durables de ce qu'on appelle le « Numérique responsable ». Or, c'est désormais chose faite, et je me réjouis du travail effectué. Et ce, d'autant plus que mesurer l'impact du numérique est tout sauf chose aisée.

Aussi, il s'agit de tordre le cou aux clichés et de comprendre que le numérique peut être très vorace en énergie ; en effet, dématérialisé ne rime pas nécessairement avec économie d'énergie, contrairement aux clichés véhiculés. Ainsi, ce que nous apprend ce cahier thématique est on-ne-peut-plus clair : en numérique, comme ailleurs, s'il faut innover et encourager la recherche, en lien avec le monde économique et industriel, la sobriété est une nécessité.

C'est alors que le numérique sera bénéfique à toutes et tous – et à commencer pour notre environnement.

Alain ROUSSET
Président du Conseil régional
de Nouvelle-Aquitaine

Édito



C'est un grand plaisir de présenter les « cahiers », qui sont proposés par AcclimaTerra à l'issue d'un long travail. Il s'agit d'une série qui s'étoffera au fil du temps : d'autres projets devraient être finalisés en 2022. Ils traduisent la volonté de rester en phase avec un monde, des enjeux, des transitions qui sont plus que jamais en évolution très rapide. Les deux rapports, de 2013, portant sur l'Aquitaine, et de 2018, portant sur la Nouvelle-Aquitaine, gardent une grande pertinence dans beaucoup de domaines : ils continuent et continueront encore à nourrir des réflexions qui sont nécessaires à l'échelle de la région. Mais ils ne suffisent pas à rendre compte de l'évolution de cette région et plusieurs thèmes ont été identifiés pour les compléter et les actualiser. Ils ont été initiés, soit par le bureau d'AcclimaTerra, soit dans un cadre plus large, traduisant des initiatives plus spontanées. Ces deux premiers cahiers abordent des sujets qui peuvent apparaître très différents, mais ils ont un point commun très fort : ils touchent tous à la transition environnementale.

Par ailleurs ils témoignent aussi d'une réalité souvent oubliée : la quête du savoir scientifique est toujours très difficile à collecter et à mettre en œuvre, et plus encore dans le cadre évolutif actuel. Cependant, le travail collectif et l'investissement personnel d'un nombre important de chercheurs de différents organismes se voient reflétés dans cet ouvrage.

Le travail de ce cahier a pour objectif de promouvoir le Numérique Responsable et d'y sensibiliser les différents publics de Nouvelle-Aquitaine, en mettant l'humain au premier rang. Il s'agit là aussi d'un enjeu majeur : le numérique modifie nos comportements de manière très rapide. Il est à la fois porteur de solutions, parce qu'il ouvre des opportunités multiples, et porteur de risques parce que ses émissions de gaz à effet de serre ne sont pas neutres. Le cahier explore avec soin ces enjeux qui vont jouer un rôle important dans la gestion de la région.

Hervé LE TREUT
Président d'AcclimaTerra

Préface

Produire un cahier thématique « numérique et environnement » sur le territoire de la Nouvelle-Aquitaine est un vrai défi.

En effet, le numérique est global, systémique et évolue très rapidement. Les chiffres sont particulièrement difficiles à obtenir à l'échelle d'une région, sont très incertains voire contradictoires et il n'y a aucune visibilité sur leur durée de validité.

Cependant, nous avons tenté d'aborder le plus de domaines possibles liés à la thématique « numérique et environnement », et ce de façon la plus objective possible, en espérant faire de ce document, un outil d'aide au pilotage des politiques publiques.

Coordination : Vincent Courboulay

Rédaction et contribution : Quentin Bellet, Kassandra Bigot, Guillaume Bourgeois, Aurélie Bugeau, Yohana Cabaret, Adrian Ciocan, Ludovic Degand, Benoît Deguillebon, Gael Guennebaud, Olivier Le Goaër, Lisa Harel, Sarah Maisonneuve, Alexis Mons, Maud Pierre, Arnaud Pinier, Arnaud Revel, Romuald Ribault.

Relecture : Benjamin Duthil, Guillaume Jean Loup ainsi que des membres du Conseil d'Administration d'AcclimaTerra : Nathalie Caill-Milly, Daniel Compagnon, Didier Swingedouw et Mohamed Taabni.

Sommaire

Préface	08
 1 • Introduction.....	12
1.1 Comprendre.....	14
1.2 Mesurer	14
ENCART Le numérique en chiffres	15
 2 • La séquence ERC : Éviter, Réduire et Compenser.....	16
2.1 Refuser	18
2.2 Réduire	18
2.3 Réparer	18
2.4 Réutiliser	19
2.5 Recycler.....	19
 3 • Impacts systémiques	20
3.1 Effets rebond.....	21
3.2 Analyse du cycle de vie (ACV).....	21
3.3 Épuisement des ressources.....	23
 4 • Matériel et consommation énergétique : état des lieux.....	24
4.1 Équipement utilisateurs	25
4.2 Centre de données ou datacenter.....	25
4.3 Réseaux.....	26
4.4 DEEE (Déchets d'équipements électriques et électroniques).....	27
1 - Filière DEEE : état des lieux.....	27
2 - Recyclage	28
3 - Faire durer, seconde main	29
 5 • Usages.....	30
5.1 Du côté des professionnels du numérique.....	31
5.2 Télétravail	32
5.3 Aménagement du territoire	33
5.3.1 Smartgrid.....	33
5.3.2 Smartcity	34
5.4 Intelligence artificielle	34
1 - Définitions.....	34
2 - Développement de l'IA.....	35
3 - L'IA en Nouvelle-Aquitaine.....	36
4 - L'IA n'est pas verte.....	36
5 - Maîtriser les impacts et les usages de l'IA.....	37
 6 • Des solutions sur tous les plans	38
6.1 Établissement d'une politique régionale sur le numérique et l'environnement	39
6.2 Formation et sensibilisation	40
6.3 Conception responsable des technologies	40
1 - Les travaux initiés en écoconception	40
2 - Une offre de formation qui va évoluer	41
3 - Et le libre dans tout cela ?.....	41
 7 • Préconisations.....	42
Conclusions.....	44
Bibliographie.....	46
Contributeurs.....	50

DÉMARCHE FONDAMENTALE

COMPRENDRE

XX^e
siècle



Remettre le numérique au service du Vivant
Comprendre les enjeux, mesurer les impacts
Décider en toute responsabilité

MESURER LES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DU NUMÉRIQUE EN NOUVELLE-AQUITAINE

Indicateurs primaires



170 TWh*
CONSOMMATION ÉNERGÉTIQUE
57 % ÉNERGIE FOSSILE

*valeur estimée



1 KWH D'ÉLECTRICITÉ =
59,9 g D'ÉMISSIONS
DE GAZ À EFFET DE SERRE



PEUVENT AIDER
À LA COMPRÉHENSION
DU NUMÉRIQUE

SÉQUENCE ERC : ÉVITER ET RÉDUIRE ET COMPENSER



REFUSER
refus d'achat



RÉDUIRE
réduction de
nos besoins



RÉPARER



RÉUTILISER
du matériel
déjà fabriqué

RÉUTILISER
Développer cette filière
sur notre territoire
pourrait créer
des centaines d'emplois
non délocalisables

USAGES

PROFESSIONNELS DU NUMÉRIQUE



La Nouvelle-Aquitaine =
2^e meilleure progression
du nombre d'entreprises
dans le secteur

TÉLÉTRAVAIL



Réduction trajets
domicile-travail

AMÉNAGEMENT DU TERRITOIRE



Smartgrid
réseau intelligent
Smartcity
villes intelligentes

INTELLIGENCE ARTIFICIELLE



programmes permettant
de traiter l'information
automatiquement

SOLUTIONS CONCRÈTES



POLITIQUES

Politique régionale
sur le numérique
et l'environnement



PÉDAGOGIQUES

Formation
et sensibilisation



TECHNOLOGIQUES

Conception
responsable



Introduction

La Nouvelle-Aquitaine est une région dans laquelle l'économie numérique est encore modérément développée, avec une part des entreprises numériques d'emploi de 2,6 %, contre 3,2 % en moyenne de France en n'intégrant pas l'Île de France. Malgré ces chiffres en dessous de la moyenne, le secteur est en plein essor, avec une augmentation des effectifs de 33 % entre 2014 et 2019, en particulier dans le conseil informatique (un tiers des effectifs régionaux, et +45 % d'augmentation) et la programmation informatique (14 % des effectifs, et +131 % d'augmentation) [1].

Cette économie numérique se concentre pour 43 % autour de la région métropolitaine de Bordeaux (INSEE), à Bayonne, et à Niort ; cette dernière étant portée par le secteur des assurances. Dans le même temps, à la suite des interrogations et inquiétudes citoyennes autour, par exemple, du déploiement de la 5G, la question d'un numérique plus responsable s'est invitée dans le débat.

Dans ce contexte et pour se démarquer des autres régions, la Région Nouvelle-Aquitaine a annoncé vouloir mettre l'humain au cœur de l'économie numérique. Elle veut mettre le digital au service des citoyens et des entreprises et qu'il soit un facteur de souveraineté et de résilience.

En cohérence avec la feuille de route Néo Terra, la feuille de route sur le numérique responsable (NR) fut adoptée par le Conseil Régional le 5 octobre 2020 et se décline en 4 objectifs avec un plan d'actions qui se déploie entre le second semestre 2020 jusqu'à fin 2022.

- **Objectif 1** : Promouvoir le Numérique Responsable et sensibiliser les différents publics de Nouvelle-Aquitaine au Numérique Responsable ;
- **Objectif 2** : Développer une filière Numérique Responsable et ouverte ;
- **Objectif 3** : Fédérer les initiatives régionales et développer des écosystèmes innovants pour une filière régionale Numérique Responsable ;
- **Objectif 4** : Faire de la Nouvelle-Aquitaine une créatrice de valeurs en devenant un Territoire Numérique Responsable et en structurant une administration numérique exemplaire.

Dès les premières lignes de sa feuille de route, la région annonce : «Véritable levier de résilience des organisations publiques et privées pendant la crise sanitaire récente, il est temps d'agir pour un numérique responsable et durable qui participera à la résilience des sociétés face au changement climatique, d'une part, en réduisant son empreinte environnementale et d'autre part, en s'appuyant sur les opportunités du numérique et de la data pour lutter au mieux contre le réchauffement climatique.»

Pourquoi une telle démarche dans un sujet qui paraît si éloigné des problématiques environnementales ? Le numérique serait-il un problème ? Une solution ? Un peu des deux ? Le numérique mondialisé doit-il ou peut-il se conjuguer au niveau local ? C'est ce que ce cahier thématique va s'attacher à éclaircir, en présentant d'abord quelques éléments de contexte généraux sur le numérique et ses impacts et en essayant de les estimer sur notre territoire, puis des éléments plus précis sur ses usages pour enfin présenter des pistes de solutions pour répondre aux enjeux de la feuille de route.

Mais tout d'abord, nous présentons ce qui pour nous est la démarche fondamentale à adopter pour faire converger la transition numérique avec les urgences climatiques. Nous pensons qu'il faut d'abord **comprendre** les impacts puis les **mesurer** afin de **décider** de façon éclairée, pour enfin entrer dans une démarche d'**évitement** et de **réduction**. Dans la suite de ce paragraphe, nous présentons quelques éléments relatifs à ces étapes.

1.1

COMPRENDRE

Deux transitions sont venues percuter ce début de XXI^e siècle. La première, écologique, est souhaitée mais loin d'être réalisée, et répond au besoin de réduire l'empreinte de l'Homme sur le Vivant et les ressources non renouvelables pour éviter la «sixième extinction» et réduire l'ampleur du changement climatique déjà en cours. La seconde, numérique, nous a conduit à repenser radicalement notre relation à l'information, au savoir et aux autres, en faisant émerger la notion de village global. De plus, cette dernière consomme des ressources non renouvelables à un rythme vertigineux à grands coups de déforestation, épuisement des stocks d'eau potable et pollution des écosystèmes. Le numérique représente aujourd'hui environ 4 % des émissions mondiales de gaz à effet de serre avec une hausse de 9 % par an [2] et contribue à la misère ou l'exploitation de centaines de milliers de travailleurs au profit de quelques-uns [3], une injustice dont notre territoire bénéficie largement.

Ces deux transitions en cours, au rythme différent, dessinent pour l'heure des visions opposées et des mondes peu compatibles. Nous ne pouvons continuer à vivre cette dissonance cognitive et ne pouvons reporter plus longtemps la construction d'une société plus résiliente faisant converger transition numérique et urgence climatique et sociale. Il faut, dès lors, et c'est une urgence [4], remettre le numérique au service des équilibres écologiques, et non détruire ceux-ci. Pour ce faire nous devons comprendre les enjeux, mesurer les impacts et décider en toute responsabilité.

Comprendre, c'est avant tout avoir une connaissance exhaustive des impacts du numérique afin de les éviter et de les réduire, d'en informer le grand public, des jeunes aux décideurs, avec pour chacun des arguments non culpabilisants, et incitant à l'action. Il paraît urgent de ne pas dissocier les enseignements du développement durable et ceux sur le numérique. Quelques ressources en ligne et gratuites permettent de comprendre les enjeux dont le MOOC (massive online open course) présenté sur le site academie-nr.org ou les communications du GDS CNRS EcoInfo [5].

1.2

MESURER

«On ne pilote que ce que l'on mesure». Aphorisme connu qui demeure largement pertinent. Bien que la mesure ne soit qu'une condition nécessaire (et non suffisante) au pilotage, il n'est d'autre moyen d'évaluer un quelconque progrès que celui d'appliquer régulièrement son mètre étalon ; mais encore faut-il mesurer les bonnes grandeurs. Comment mesurer précisément les impacts environnementaux du numérique ? Il existe déjà deux types d'indicateurs :

INDICATEURS PRIMAIRES

en relation directe avec la fabrication et l'usage du numérique.

• **kWh** : Le kilowatt-heure ou kilowattheure (kWh) est une unité d'énergie. Si de l'énergie est produite ou consommée à puissance constante sur une période donnée, l'énergie totale en kilowatts-heures est égale à la puissance en kilowatts multipliée par le temps en heures.



>> *Exemple* : Une ampoule de 100 W allumée pendant 24 heures consomme 2 400 Wh (100 × 24) soit 2,4 kWh. Si on considère un coût moyen du kilowatt-heure de 0,13 €, la consommation électrique de cette ampoule coûte 0,312 € par jour soit 9,36 € par mois.

>> En Nouvelle-Aquitaine la consommation énergétique se monte environ à **170TWh** (TéraWatt-heure) [6] issue à 57 % d'énergie fossile (pétrole, gaz, charbon). On prend en compte ici à la fois l'énergie primaire¹ et la consommation électrique dans la consommation d'énergie totale.

BON À SAVOIR

La confusion entre watt et watt-heure (et leur multiple kilo, méga, giga, téra ...) est fréquente. Il est vrai que les unités associées à ces grandeurs ne simplifient pas la compréhension, et l'unité de puissance (watt ou W) est souvent utilisée à tort pour désigner une consommation ou une production (qu'on exprime en watt-heure ou Wh). Par analogie, confondre puissance et énergie revient à confondre vitesse instantanée et distance parcourue.

La puissance (en watt, symbole W) d'un moyen de production mesure sa capacité à délivrer une quantité d'énergie par unité de temps.

Le watt-heure (Wh) est justement utilisé pour quantifier cette quantité d'énergie délivrée. Un kWh correspond à l'énergie consommée par un appareil d'une puissance de 1 kW pendant une durée d'une heure. On ne consomme pas des kW mais des kWh.

Un outil de calcul d'impact est proposé par le GDS EcoInfo sur le site : <https://ecoinfo.cnrs.fr/eco-diag-calcul/>

¹ L'énergie primaire est l'ensemble des produits énergétiques non transformés, exploités directement ou importés. Ce sont principalement le pétrole brut, le gaz naturel, la biomasse, le rayonnement solaire, l'énergie hydraulique, l'énergie du vent, la géothermie et l'énergie tirée de la fission de l'uranium.

• **Émissions de gaz à effet de serre** : Les émissions de Gaz à Effet de Serre (GES) sont la cause du changement climatique. Les calculer pour un service ou un objet revient à considérer l'ensemble du cycle de vie des produits et des services proposés par un acteur privé ou public. Cette méthode se base également sur les postes d'émissions suivants l'énergie, pour laquelle on répertorie les consommations directes de l'activité (les kilowatts, par exemple), les intrants qui représentent les quantités achetées (le montant en euros, le volume, etc.), le fret où il s'agira de relever le poids, les distances ainsi que les modes de transport des marchandises, les déplacements, qu'il s'agisse des personnes, du mode de transport ou encore des distances parcourues et l'énergie nécessaire à l'utilisation d'un produit ou d'un service. Toutes ces données seront ensuite traduites sous forme d'émissions grâce à un facteur d'émission. Ce dernier est un coefficient qui assurera aux acteurs publics et privés de convertir leurs données en kilos ou tonnes équivalent CO₂.

BON À SAVOIR

En France, comme en Nouvelle-Aquitaine, l'utilisation d'un kWh d'électricité produit en moyenne 59,9 grammes d'émissions de gaz à effet de serre [7]. En Allemagne, cette valeur atteint 461 g, 522 g aux USA et 766 g en Chine, alors qu'en Islande on tombe à moins d'un gramme.

• **Épuisement des ressources abiotiques** : Les ressources abiotiques sont des ressources non vivantes qui se trouvent naturellement dans l'environnement et ne sont pas créées ou produites par l'homme ou l'activité humaine. L'épuisement des ressources abiotiques par l'homme, telles que l'eau, le sol et les minéraux, est une source de préoccupation pour les humains, car ces ressources ne sont pas facilement reconstituées et sont utilisées au-dessus de la vitesse à laquelle elles peuvent être naturellement remplacées. Le numérique est un gros consommateur de ressources abiotiques.

• **Eau** : On peut aussi inclure spécifiquement l'eau dans les indicateurs primaires. Elle est en effet nécessaire à la fabrication d'un produit ou service ainsi qu'à l'énergie utilisée pour son fonctionnement.

INDICATEURS SECONDAIRES

Sans être une source directe d'informations sur les impacts du numérique, ils peuvent aider à sa compréhension. Nous listons ci-dessous des indicateurs dont certains sont proposés par le cluster NAOS (Nouvelle-Aquitaine Open Source, qui est un pôle de compétences régional en logiciels et technologies libres et open source).

• **Déchets numériques générés** (inclus dans la notion de Déchets d'Équipements Électriques et Électroniques (DEEE))

• **Nombres d'équipements** (global, par utilisateur)

• **Pourcentage d'électricité consommé** par les data centers (en France et dans le monde)



LE NUMÉRIQUE EN CHIFFRES

Au niveau national, l'étude «iNum» publiée en 2020 vise à quantifier les impacts environnementaux du numérique en France. Cette étude s'appuie sur une méthodologie d'Analyse du Cycle de Vie (ACV) (voir chapitre ACV).

En 2020, la consommation électrique du numérique français est de l'ordre de 40 TWh d'électricité, soit environ 8,3 % de la consommation électrique totale de la France la même année (473 TWh selon RTE).

On note également dans cette étude :

- Consommation d'énergie primaire : 180 TWh d'énergie primaire ;
- Émission de gaz à effet de serre : 24 millions de tonnes équivalent CO₂ ;
- Tension sur l'eau douce : 559 millions de m³ d'eau douce.

Si l'on applique des ordre de grandeur à l'échelle de Nouvelle-Aquitaine, on trouve les résultats suivants :

La consommation électrique du numérique néo-aquitain est de l'ordre de 3,6 TWh d'électricité. En considérant l'étude iNum précédente, et en estimant que la région Nouvelle-Aquitaine représente environ 9 % de ces impacts (Pourcentage moyen de la population et des emplois néo-aquitains par rapport au pays) [8], on peut estimer également que la consommation du numérique sur la Nouvelle-Aquitaine est approximativement de :

- **Consommation d'énergie primaire : 16,2 TWh d'énergie primaire ;**
- **Émission de gaz à effet de serre : 2,16 millions de tonnes équivalent CO₂ ;**
- **Tension sur l'eau douce : 50,3 millions de m³ d'eau douce.**

La séquence ERC Éviter, Réduire et Compenser

Nous venons de voir que pour avancer sur le chemin d'un numérique responsable, nous devons comprendre et mesurer ses impacts environnementaux (d'autres impacts, notamment d'ordre social et économique ne font pas l'objet de ce cahier). Dans un deuxième temps, notre démarche intègre l'approche « Éviter, réduire, compenser » (ERC). Celle-ci a pour objectif d'éviter les atteintes à l'environnement, de réduire celles qui n'ont pu être suffisamment évitées et, si possible, de compenser les effets notables qui n'ont pu être ni évités, ni suffisamment réduits. L'évitement est à prioriser comme étant la seule option qui garantisse l'absence d'atteinte à l'environnement. La compensation ne doit intervenir qu'en dernier recours, quand les impacts n'ont pu être ni évités, ni réduits suffisamment.

Cette séquence ERC figure dans le code de l'environnement au sein du chapitre II dédié à l'évaluation environnementale et apparaît au cœur du processus de l'évaluation environnementale des projets (L.122-3 du code de l'environnement) et des documents de planification territoriale (L.122-6 du code de l'environnement).

Entrer dans une logique ERC avant toute autre mesure parfois complexe à mettre en place, permet de commencer à agir concrètement dans l'optimum environnemental. Par exemple, éviter l'achat d'un nouvel appareil permet à coup sûr d'avoir un impact minime sur l'environnement.

Outre les solutions législatives comme la prolongation des garanties, le développement de l'économie de la fonctionnalité ou la lutte contre l'obsolescence programmée, la confrontation des chiffres précédemment cités à la séquence ERC, nous incite à promouvoir la démarche 5R. La règle des 5R revient à adopter un mode de vie plus écologique, visant à minimiser l'impact de nos déchets. Elle peut être adaptée au numérique assez facilement. Voici donc des solutions simples et efficaces pour réduire les impacts de la fabrication et de l'usage du numérique.



2.1

REFUSER

Si le premier impact provient de la fabrication des terminaux numériques, il « suffit » d'éviter de les fabriquer. Et pour éviter qu'ils soient fabriqués, il faut tout simplement éviter de les acheter. L'achat le moins impactant est celui que l'on ne fait pas.

Le refus d'achat est donc le premier « R », sûrement le plus facile à comprendre, mais pas le plus simple à mettre en place face aux injonctions sociales et à la société de consommation dans laquelle nous évoluons tous. Aujourd'hui, 88 % des français changent leur téléphone portable alors qu'il fonctionne encore [9]. La question à se poser est simplement « Ai-je besoin de cet achat ? » en remplacement du traditionnel « Ai-je envie de cet achat ? »

Ce premier « R » est probablement le plus efficace dans les solutions présentées ici.

2.2

RÉDUIRE

Le deuxième « R » s'intéresse à la réduction de nos besoins. Après avoir interrogé le réflexe de renouveler nos appareils, nous pouvons nous demander si nous avons besoin d'un équipement aussi performant, un écran aussi large, une batterie aussi puissante, etc. La réduction vise à **adapter nos choix technologiques à nos besoins réels**. Si l'on regarde les impacts du numérique, la réduction concerne également l'utilisation des centres de données (data centers) et des réseaux et donc du stockage et du transfert des données. Ces deux premiers « R » sont la base de ce qui pourrait être appelé la sobriété numérique.

2.3

RÉPARER

Le troisième « R » est actuellement le moins facile à mettre en place, mais un des plus prometteurs. En effet, même s'il est très difficile de réparer ces équipements, principalement par la faute de certains constructeurs qui proposent délibérément des batteries soudées, voire des écrans monobloc difficilement démontables, l'État s'est attaqué à cette problématique. La loi sur la lutte contre le gaspillage et l'économie circulaire instaure la mise en place d'un indice de réparabilité

début 2021, ainsi que celle de son successeur déjà prévu pour 2024, l'indice de durabilité. Le texte prévoit que les fabricants ou importateurs « communiquent (...) aux vendeurs de leurs produits leur indice de réparabilité ainsi que les paramètres ayant permis de l'établir ». Ensuite, les vendeurs « informent le consommateur par voie de marquage, d'étiquetage, d'affichage ou par tout autre procédé approprié ».

Toujours à l'initiative de l'État, le fonds réparation, prévu par la loi anti-gaspillage pour une économie circulaire de 2020, entre en vigueur au 1^{er} janvier 2022. Cette enveloppe financière permettra de diminuer le coût de la réparation de certains produits pour les consommateurs dont les équipements électriques et électroniques. Ce fonds ne sera pas abondé par l'État, mais par les industriels qui contribueront au coût de la réparation des produits qu'ils mettent sur le marché, dès lors qu'ils seront réparés au sein d'un réseau de réparateurs et réparatrices labellisés. En s'adressant à ce réseau labellisé, les particuliers bénéficieront ainsi d'un tarif moindre sur la réparation de leurs produits.

BON À SAVOIR

L'association HOP [10] milite pour une société sans obsolescence programmée. Elle sensibilise et milite concrètement, allant jusqu'à des actions en justice pour faire bouger les lignes. Les premières lignes de son manifeste définissent cette notion.

Qu'elle soit esthétique, technologique, technique ou logicielle, l'obsolescence programmée regroupe l'ensemble des techniques visant à réduire délibérément la durée de vie ou d'utilisation d'un produit afin d'en augmenter le taux de remplacement. Elle est devenue l'outil de plus en plus répandu d'une société de consommation insoutenable. En plus de déposséder les individus de leurs droits à un usage durable des biens, ce système de production et de consommation s'appuie sur une extraction de matières premières, sur l'exploitation de terres et de ressources qui arrivent à ses limites.



REFUSER



RÉDUIRE



RÉPARER



RÉUTILISER

2.4

RÉEMPLOYER ET RÉUTILISER

Le « R » du réemploi et de la réutilisation est celui qui a pris le plus d'ampleur depuis quelques années. Les acteurs incontournables comme Les Ateliers du Bocage basés en Deux Sèvres ont permis à toute une génération d'adopter le principe de l'achat numérique d'occasion.

Réutiliser du matériel déjà fabriqué permet de diminuer son empreinte de façon spectaculaire [11].

2.5

RECYCLER

Les déchets électroniques (DEEE) contiennent de l'or, important en valeur économique et en empreinte CO₂. Pour faire la comparaison et en prenant un exemple, la concentration des mines d'or est d'environ de 1 g/t, pour les cartes électroniques on est entre 10 et 300 g/t. Pour le palladium, le rapport est de 5 g/t contre 70 g/t. En moyenne, l'extraction à partir de cartes électroniques génère 5 à 10 fois moins de CO₂ que l'extraction à partir de mines. Développer cette filière sur notre territoire pourrait créer des centaines d'emplois non-délocalisables. Il serait donc particulièrement pertinent de développer la filière pour recycler les matières présentes dans nos déchets, pour certaines en quantité infinitésimale, en massifiant leur récolte afin de s'en servir de gisements viables.

En conclusion de cette partie, il apparaît légitime de se demander si la solution idéale serait finalement de se passer du numérique, suivant ainsi à la lettre les deux premiers R. Nous ne le pensons pas, car cette solution serait trop simpliste et ne prendrait pas en compte tous les avantages de cet outil formidable mais, rappelons-le, dual. Dans la suite de ce cahier nous allons aborder deux concepts clés pour mieux comprendre les enjeux inhérents au déploiement responsable du numérique sur notre territoire.



EXTRAIT DU RAPPORT

Évaluations environnementales et économiques de l'allongement de la durée d'usage de produits de consommation et de bien d'équipements



L'ADEME a été plus loin en analysant les potentiels impacts environnementaux et économiques de l'allongement de la durée d'usage de 11 équipements électriques et électroniques présents dans la maison (multimédia, électroménager) :

Si chaque foyer français allonge d'un an la durée d'usage totale de chacun des 11 produits étudiés, au lieu de les remplacer, sur une période de 10 ans, chacun des foyers pourrait économiser 963 € soit 96 € par an et contribuer à éviter l'émission d'environ 219 Kg de gaz à effet de serre (GES) sur une période de 10 ans, soit 22 Kg de GES par an.

Si l'ensemble des foyers français faisaient de même, ils pourraient :

- Économiser environ **27 milliards d'euros pour un allongement de 1 an** sur la période de 10 ans, soit 2,7 milliards d'€ par an ;
- Éviter l'émission d'environ **6 millions de tonnes de GES pour un allongement de 1 an** sur une période de 10 ans, soit 0,6 millions de tonnes de GES par an.

3

Effets systémiques

3.1

EFFET REBOND

D'une manière très générale, « l'effet rebond correspond au fait que l'accroissement des consommations de matières et d'énergie induit par l'utilisation généralisée des TIC (technologies de l'information et de la communication) efface largement les réductions de l'empreinte écologique obtenues par unité de produit » [12]. Il en découle le corollaire suivant : les économies d'énergie ou de ressources initialement prévues par l'optimisation d'un processus ou l'utilisation d'une nouvelle technologie sont partiellement ou complètement compensées suite à une adaptation du comportement de la société.

Il existe différents types d'effet rebond. Nous parlons d'effet rebond direct lorsque les gains espérés par l'optimisation d'un service, au sens le plus large du terme, sont annulés par l'augmentation de l'usage de ce dernier, augmentation elle-même permise par cette optimisation. C'est le cas des équipements informatiques en général : alors que les impacts environnementaux liés à un volume de calcul fixé ou bien au stockage ou transfert d'un giga octet de données décroissent de manière très rapide depuis plusieurs décennies, les impacts globaux de ces équipements, en valeur absolue, ne cessent de croître par l'augmentation encore plus rapide des usages. Un autre exemple célèbre d'effet rebond direct concerne la démocratisation du covoiturage permise par le digital. Alors que l'on pourrait s'attendre à une réduction nette des trajets en voiture, une étude de l'ADEME (Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie) fait le constat inverse pour les trajets longs, car un certain nombre de trajets n'auraient pas été effectué, ou bien auraient été effectué avec un autre moyen bas-carbone, sans le service de facilitation du covoiturage.

Lorsque l'accroissement des usages, et donc des impacts, porte sur un autre service que celui visé par l'amélioration considérée, nous parlons alors d'effet rebond indirect. Par exemple, alors que le télétravail, grandement facilité par les TIC, permet effectivement de faire baisser le nombre de déplacements professionnels, des études en France [13] et au Danemark [14] montrent un phénomène de report sur davantage de trajets privés mais aussi un éloignement des lieux de résidence conduisant à des trajets plus longs. De même, le télétravail conduit à un suréquipement de matériel informatique, et donc à un transfert d'impacts du secteur du transport vers le numérique. Mais ces effets indirects peuvent aussi se produire sans lien de cause à effet, par exemple lorsqu'une ressource est produite plus efficacement et que son prix diminue, les consommateurs vont ainsi faire des économies qu'ils pourront affecter à d'autres produits polluants.

Finalement, ces effets peuvent impacter l'ensemble de notre société et de son économie : nous parlons alors d'effet rebond structurel ou systémique. C'est bien entendu le cas des TIC en général, mais aussi plus particulièrement des smartphones qui impactent grandement notre façon de communiquer, de consommer, de nous déplacer, etc., tout en ouvrant la porte à de très nombreux nouveaux usages, sources potentielles d'autant d'effets rebond.

Ces effets rebond, négatifs pour l'environnement, doivent être mis en regard des potentiels bénéfiques indirects appelés « externalités positives ». Quantifier ces différents

impacts est particulièrement difficile et nécessite une vision globale et pluridisciplinaire. Quoi qu'il en soit, les exemples sont multiples et il apparaît que, d'une manière générale, toute stratégie visant l'efficacité (e.g. énergétique) est vouée à une augmentation nette des impacts si elle n'est pas accompagnée de mesures de régulation des usages.

3.2

ANALYSE DU CYCLE DE VIE (ACV)

L'analyse du cycle de vie (ACV) est, selon l'ADEME, l'outil le plus abouti en matière d'évaluation globale et multicritères des impacts environnementaux. Cette méthode normalisée permet de mesurer les effets quantifiables de produits ou de services, numériques par exemple, sur l'environnement.

Analysons d'un peu plus près cette méthode. Tout d'abord l'évaluation est globale. L'ACV recense et quantifie, tout au long de la vie du produit concerné, les flux physiques de matière et d'énergie associés aux activités humaines, du « berceau à la tombe ». Cela inclut l'inventaire des matières premières énergétiques et non énergétiques nécessaires à la fabrication du produit, soit la distribution, l'utilisation, la collecte et l'élimination vers les filières de fin de vie, ainsi que toutes les phases de transport.

L'évaluation est aussi multicritère, car le produit a de nombreux impacts sur notre planète ; tels que le changement climatique, l'acidification des océans et des sols, les atteintes sur les ressources biotiques et abiotiques et l'utilisation des terres, etc. (Figure 1). La Figure 2 montre le résultat de l'évaluation des incidences sur l'environnement d'un ordinateur personnel.

Bien que l'ACV ait été qualifiée d'expérimentale, sa normalisation au niveau international en fait aujourd'hui un outil performant et reconnu. D'après la norme ISO 14040, l'ACV est une « compilation et évaluation des intrants, des extrants et des impacts environnementaux potentiels d'un système de produits au cours de son cycle de vie ». Un des indicateurs les plus difficiles à définir étant l'épuisement des ressources.

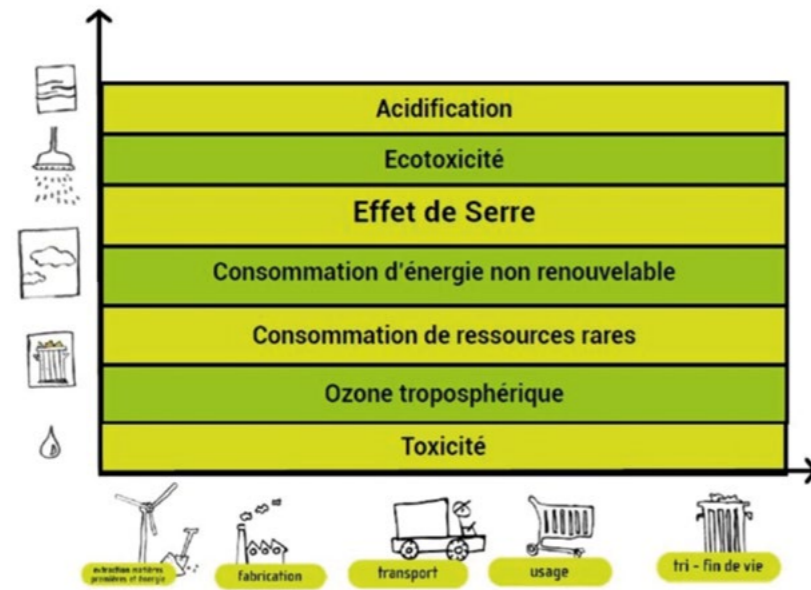


Figure 1 : Illustration simplifiée de l'ACV (15)

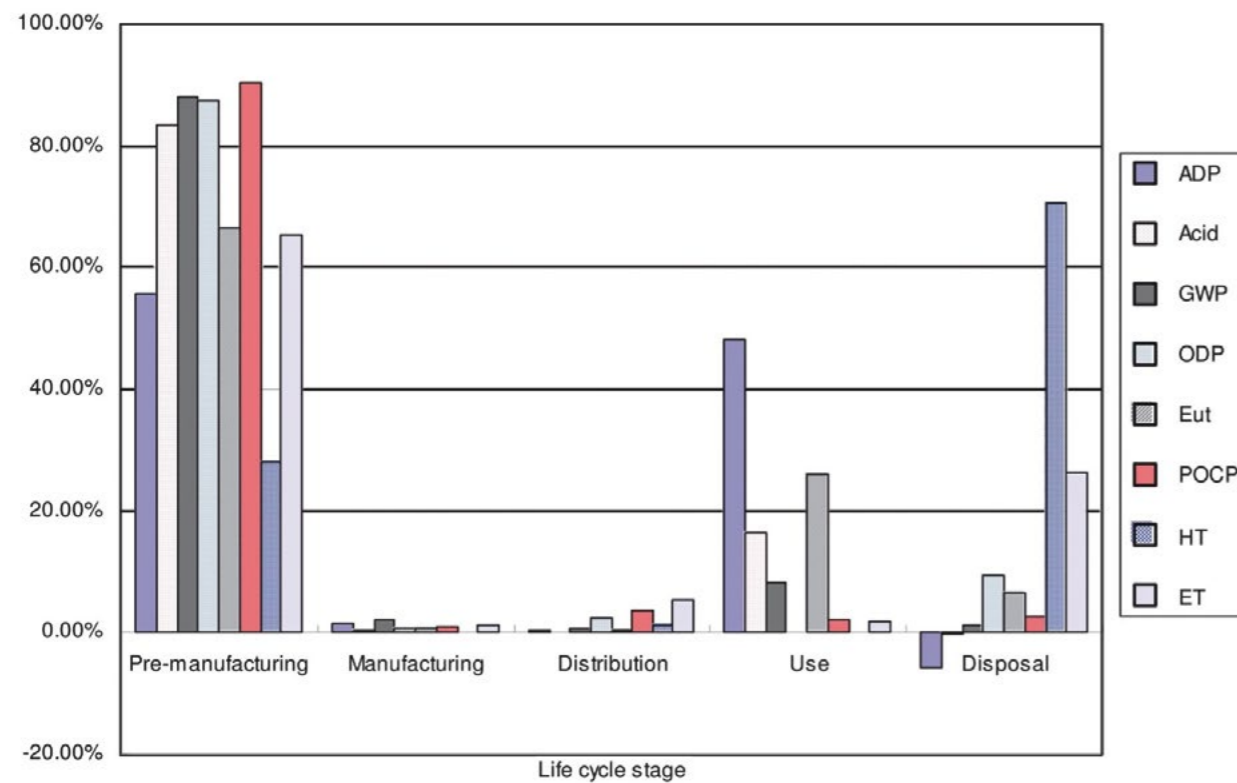


Figure 2 : Résultat de l'évaluation des incidences sur l'environnement d'un ordinateur personnel. Reproduit avec la permission de Springer Nature (16)

Références

- ADP = épuisement de ressources abiotiques
- Acid = acidification (eau, sol)
- GP = changement climatique
- ODP = appauvrissement couche ozone
- Eut = eutrophisation
- POCP = oxydation photochimique
- HT = toxicité humaine
- ET = éco-toxicité

3.3 ÉPUISEMENT DES RESSOURCES

Le développement du digital passe par l'utilisation industrielle de « nouveaux métaux » ou « petits métaux », des métaux souvent moins abondants que les grands métaux (fer, cuivre, aluminium, silicium...). En l'espace de 40 ans, nous avons ainsi plus que triplé le nombre de métaux différents que nous utilisons dans les applications industrielles.

Or les pays occidentaux, qui sont les principaux développeurs et utilisateurs de ces nouvelles technologies, n'ont pas, en général, de ressources minières pour ces « petits métaux » sur leurs territoires. Ils sont donc dépendants soit de pays instables politiquement et dans lesquels ces ressources contribuent fortement à l'instabilité, soit de pays qui souhaitent développer eux-mêmes les nouvelles technologies en s'appuyant sur leurs ressources. De plus, dans certains cas, les ressources connues au niveau mondial sont clairement limitées.

Ces « petits métaux » les plus emblématiques sont le platine et le palladium, l'or et l'argent, le gallium et l'indium (utilisés quasi-exclusivement dans les nouvelles technologies), le tantale (2/3 de la consommation mondiale pour les nouvelles technologies) et les terres rares.

La Figure 3 : « Quel Futur pour les Métaux ? » illustre pour ces métaux la dépendance des TIC à la production mondiale et le niveau de dépendance des TIC à ces métaux.

On voit ainsi apparaître les contradictions de notre mode de développement. Nous avons besoin de nouvelles technologies nous permettant de mieux communiquer. Cela nous a conduit à créer une autre dépendance (les métaux rares) dont les problématiques, « finitude des ressources » et « maîtrise géopolitique des ressources », sont tout à fait analogues à celles des énergies fossiles.

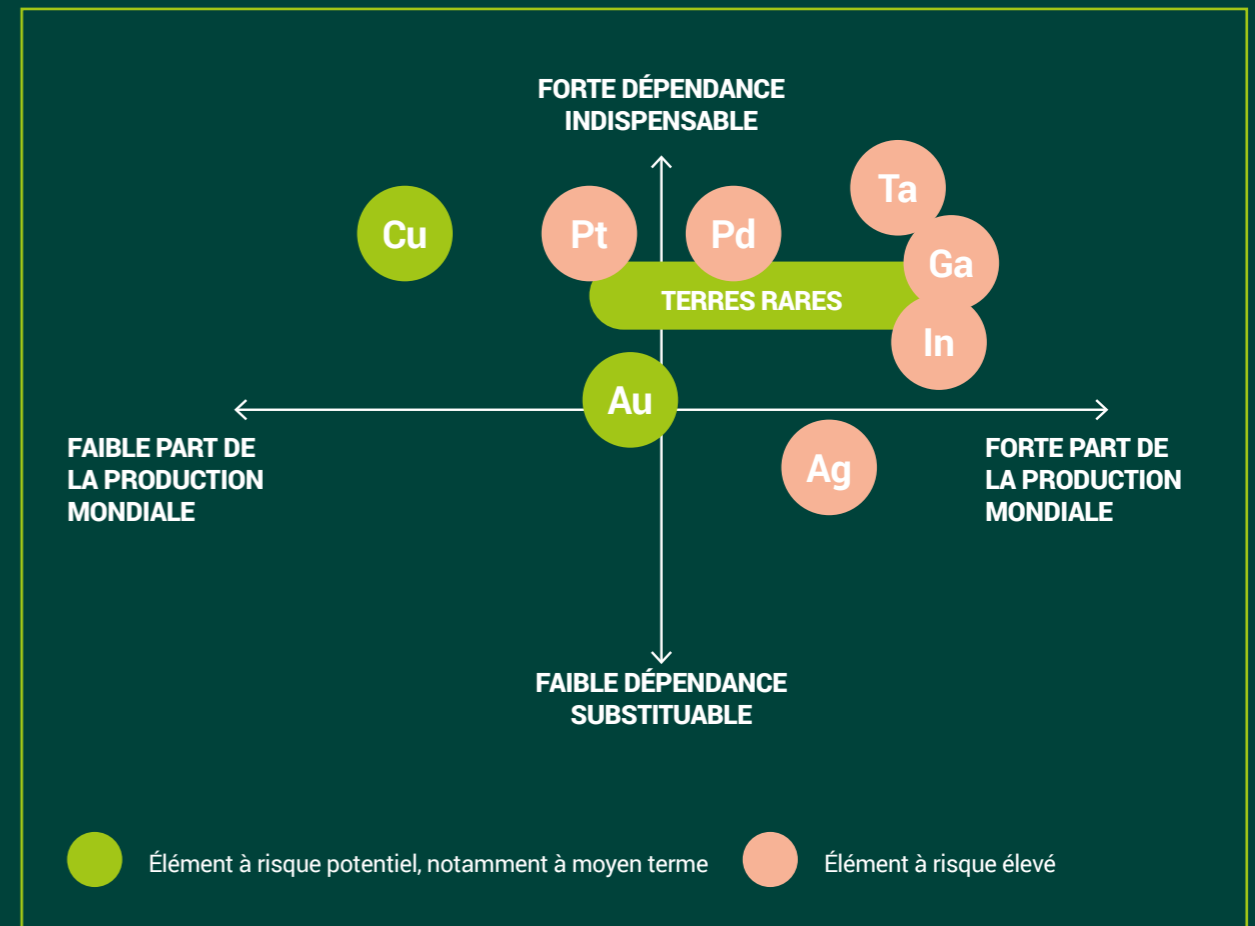


Figure 3 : Quel Futur pour les Métaux ? (17)

4

Matériel et consommation énergétique : état des lieux

4.1

ÉQUIPEMENTS DE L'UTILISATEUR

L'inventaire des équipements numériques est particulièrement difficile à faire sur le périmètre de la région Nouvelle-Aquitaine. Ici encore, nous allons procéder à une extrapolation des données nationales. Nous reprendrons pour ce faire le fait que la Nouvelle-Aquitaine représente 9 % des habitants de notre pays.

L'ADEME nous informe que près de 1,2 milliard d'équipements électriques et électroniques (EEE) ont été mis sur le marché en 2019, soit un total de 2,1 millions de tonnes [18].

À l'échelle de notre région, cela représente un total estimé de 108 millions de EEE.

L'étude *iNum* [19], précédemment citée, estime quant à elle que l'univers numérique français compte environ 631 millions d'équipements. En posant l'hypothèse d'une durée de vie moyenne de 4 ans pour ces équipements numériques, cela nous conduit à dire qu'environ 160 millions d'équipements numériques sont mis sur le marché chaque année. Soit pour notre région un total d'environ 15 millions d'équipements numériques.

Ces chiffres nous conduisent à estimer à 2,5 achats numériques par an et par habitant.

L'inventaire national nous incite à considérer que les appareils les plus utilisés par les néo-aquitains sont :

- Les ordinateurs (portables et de bureau) et les écrans associés (10,5 millions au total en comptant les écrans) ;

- Les smartphones et les téléphones mobiles (8,8 millions au total).

Ces équipements sont utilisés aussi bien par les entreprises que par les particuliers. Une seconde catégorie d'équipements est constituée par les appareils principalement utilisés par le grand public :

- Télévisions (7,3 millions) ;
- Tablettes (2 millions) ;
- Consoles de jeu vidéo (1,3 millions) ;
- Imprimantes (1,3 millions).

Enfin, on peut considérer que les objets connectés sont également de plus en plus présents, à la fois dans les ménages (montres et enceintes connectées, assistants vocaux, domotique, voiture connectée, etc.) et dans les entreprises (nombreux capteurs et intelligence embarquée). *INum* ne comptabilise pour l'instant que les 180 millions d'objets connectés grand public, soit de l'ordre de 16,2 millions en Nouvelle-Aquitaine.

Bien évidemment, ces équipements isolément ne serviraient pas à grand-chose dans un contexte d'hyper-connexion. Il sera nécessaire de relier ces équipements entre eux et donc de fournir des services et des données via des centres de données.

4.2

CENTRES DE DONNÉES OU DATA CENTER [20]

Au cœur de l'activité numérique, les centres de données, ou *data centers*, structurent et assurent le stockage, l'organisation et le traitement de données échangées entre les différents terminaux.

Gourmands en énergie, 205 térawattheures (TWh) d'électricité ont été utilisées par les centres de données dans le monde en 2018 [21] [22], soit environ 1 % de toute l'électricité consommée à même échelle, contribuant ainsi à 0,3 % des émissions carbone totales.

Avec un impact environnemental souvent réduit à la simple consommation énergétique, pour l'alimentation des infrastructures et leur refroidissement, il convient de prendre en compte l'analyse de l'impact sur l'ensemble du cycle de vie des équipements et l'infrastructure en elle-même : fabrication, distribution, utilisation, fin de vie, valorisation, recyclage.

Comme pour l'ensemble des équipements numériques, les *data centers* enregistrent la majorité de l'empreinte environnementale lors de la production et de la fabrication : notamment avec l'extraction de métaux rares ou précieux et de terres rares.

Côté fabrication, l'empreinte environnementale des centres de données se traduit par de la pollution des sols, de l'air, des eaux, et par l'épuisement des ressources non renouvelables utilisées. Côté utilisation, l'empreinte environnementale se traduit par des émissions de gaz à effet de serre.

Outre l'impact environnemental lié à la fabrication des équipements numériques mêmes, il faut prendre en compte l'impact du foncier : des ressources sont également nécessaires

pour la construction des bâtiments, des équipements qui y sont liés, comme les groupes froids, les groupes électrogènes entre autres, et les autres équipements informatiques qu'ils contiennent (groupes réseaux et câbles).

Ces constructions peuvent porter atteinte à la biodiversité et l'écosystème environnant les sites de *data centers* existants ou futurs : il existe des risques potentiels de rejets dans l'environnement de produits chimiques utilisés pour les systèmes de refroidissement, sans compter les batteries utilisées en cas de défaillance de l'alimentation électrique.

1. DATA CENTER EN NOUVELLE-AQUITAINE : QUELS ACTEURS ?

La localisation des centres de données existants en Nouvelle-Aquitaine est partagée entre les villes suivantes, selon la cartographie faite en 2020 par Global Security Mag : Biarritz (1), Poitiers (1), Bordeaux (4).

5 autres projets sont à l'étude pour les localisations suivantes : Léon, Mouzeuil Saint Martin, Puy du Lac, Saint Hilaire du Bois, Saugnac et Muret.

La gestion de ces centres se partagent entre différents acteurs : Covage présent sur les 5 projets en construction, Cogent, TDF et SFR.

D'autres projets existent ou sont en cours d'élaboration, et ne sont pas répertoriés sur ladite cartographie : Chasse-neuil du Poitou, Data Campus CASSIN 1, La Souterraine, Sostradata, Bordeaux, Data Center Equinix IBX (International Business Exchange), Bordeaux, TDF Bordeaux Bouliac,

Bordeaux, CHEOPS Technology, DataCenters Aquitaine, ou le projet de Saucats porté par le groupe ENGIE.

Les projets de centres de données semblent s'agglomérer autour de la ville portuaire qu'est Bordeaux, qui est un point d'arrivée stratégique de câbles sous-marins (câbles AMI-TIE). Cependant, des projets futurs se développent sur des localités plus excentrées des grandes villes, et privilégient les villes situées en zones rurales.

2. QUELLES SOLUTIONS ?

L'urgence climatique interroge un tel développement des data centers, comme pour le numérique dans l'ensemble ; d'autant plus qu'il faut s'attendre à une croissance de l'utilisation des outils et services numériques, avec le développement des smart cities, des objets connectés, du big data par exemple [23]. Ce défi de l'empreinte carbone des centres de données pousse à la formulation de nouvelles solutions.

Les standards PUE (power usage effectiveness ou indicateur d'efficacité énergétique) montrent déjà le chemin vers les critères nécessaires pour le choix des équipements numériquement responsables. S'il y a quelques années le PUE moyen environnait 2,5, on arrive aujourd'hui à une moyenne de l'industrie proche de 1,2, des scores qui soulignent les efforts effectués par les hébergeurs sur ce point. Ces gains ont été fait en partie sur les différents systèmes de refroidissement mis en place :

- Injection d'air frais provenant de puits canadiens ;
- Baies de confinement « couloir chaud » ;
- Régulation de la température respectant les normes ASHRAE ;
- Système de climatisation redondante ;
- Groupe de production d'eau glacée ;
- Groupe froid avec module free cooling.

On notera les solutions qui ont pour ambition de s'inscrire dans une démarche à impact positif : comme c'est le cas avec la solution Stratosfair [24] (Morbihan), qui allie performance numérique et alimentation électrique par des énergies renouvelables, tout en s'inscrivant dans une démarche d'économie circulaire et solidaire ; il en est de même pour DataCampus [25], localisé dans la Vienne, à Chasseuil-du-Poitou (*Data center* du Futuroscope CASSIN 1).

La liaison entre ces centres de données et les équipements utilisateurs nous conduit à également parler des réseaux, de leur couverture et leurs impacts.

4.3 RÉSEAUX

En France, la source la plus fiable pour qualifier et quantifier l'impact des réseaux est l'Autorité de régulation des communications électroniques, des postes et de la distribution de la presse (ARCEP). L'ARCEP est une autorité administrative indépendante qui publie chaque année un observatoire des marchés des communications électroniques ainsi qu'un certain nombre d'autres rapports dont, fin 2020, un rapport d'étape et de synthèse pour conjuguer développement des usages et réduction de l'empreinte environnementale du numérique. Elle a également publié en 2019 un rapport sur l'empreinte carbone de ce dernier [26], selon lequel une grande partie du coût énergétique des échanges réseaux est attribuable au réseau d'accès, c'est-à-dire au lien entre le cœur de réseau de l'opérateur et le domicile de l'utilisateur. Diverses technologies sont employées pour créer ce lien final : le cuivre (pour ADSL et VDSL), le câble, la fibre optique ou le réseau cellulaire. Sans que cela ait nécessairement constitué un objectif ayant motivé les innovations réalisées dans les technologies de réseaux de télécommunication, ces évolutions ont contribué à accroître l'efficacité énergétique du réseau d'accès fixe.

On peut lire dans le rapport de l'ARCEP que, concernant les réseaux fixes, la fibre consomme en moyenne un peu plus de 0,5 Watt par ligne, soit trois fois moins que l'ADSL (1,8 W) et quatre fois moins que le RTC (2,1 W) sur le réseau d'accès. Les consommations énergétiques de ces technologies filaires dépendent assez peu des usages qui en sont faits, ces évolutions se traduisent donc par des gains en valeur absolue. La consommation des réseaux téléphoniques cellulaires est quant à elle, davantage dépendante des usages, la consommation se mesure donc en kWh par Go de données transmises (en moyenne 0,6 kWh/Go d'après un des acteurs auditionnés).

En moyenne sur une année, en se fondant sur ces estimations et des hypothèses de consommation de données mobiles, un utilisateur de réseau 4G consommerait de l'ordre de 50 kWh d'électricité, contre 19 kWh pour une ligne RTC, 16 kWh pour de l'ADSL et 5 kWh pour une ligne fibre optique.

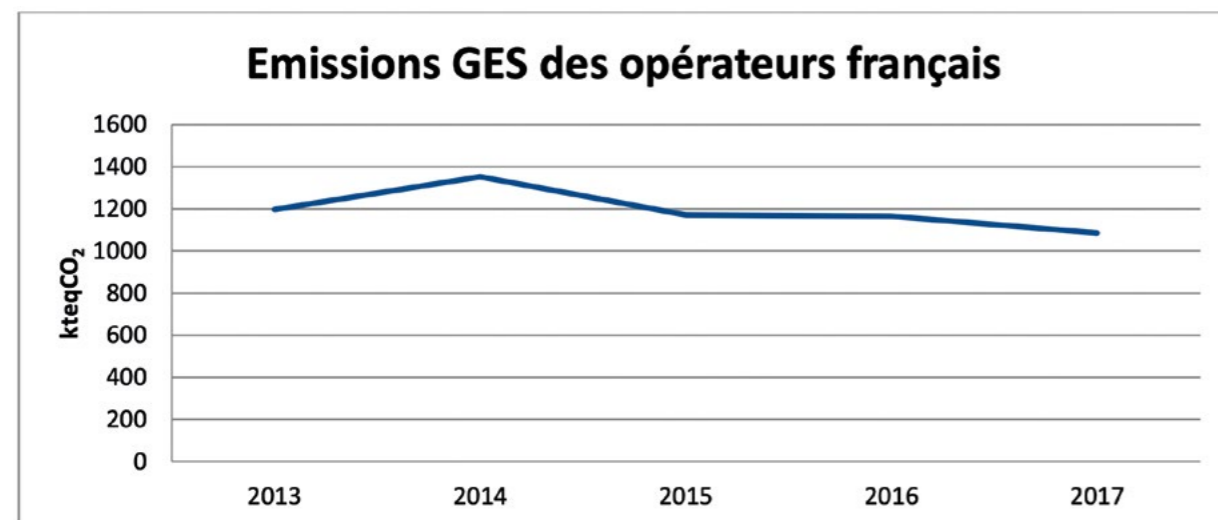


Figure 4 : Les émissions de carbone des opérateurs de télécommunications français ont diminué peu à peu, après le pic de 2014 (26)

Ainsi considérant que le nombre d'abonnés 4G en Nouvelle-Aquitaine est de 7,1 millions (9 % du total français de 78,9 millions [27]), leur consommation donc est estimée à 355 millions de kWh soit 21 300 tonnes de gaz à effet de serre (rappel : en France 1 kWh d'électricité consommé produit environ 60 g de gaz à effet de serre).

Sachant que nous avons 3 millions de lignes téléphoniques reliées à l'ADSL en Nouvelle-Aquitaine [28], le total de la

consommation est estimé à 48 millions de kWh pour les lignes ADSL, soit 2 900 tonnes de gaz à effet de serre.

Finalement, si on utilise l'estimation de l'ARCEP (Figure 4) d'un impact d'environ 1 100 kilo tonnes équivalent CO₂ au niveau national des opérateurs, au niveau régional cet impact tournerait autour de 100 kilo-tonnes de gaz à effet de serre.



BON À SAVOIR EFFET REBOND ET CLOUD GAMING

Le secteur du jeu vidéo est très important en Nouvelle-Aquitaine. Une partie de son avenir réside dans le cloud gaming (jeu en ligne) mais l'ARCEP nous alerte.

En effet, le *cloud gaming* permet une mutualisation des ressources informatiques dédiées aux jeux vidéo et allonge donc la durée de vie des terminaux (consoles et ordinateurs), en réduisant ainsi le coût de fabrication et de recyclage. Le *cloud gaming*, à niveau d'usage constant, permettrait de réduire l'empreinte énergétique des activités vidéo-ludiques grâce à une réduction du nombre de terminaux produits. Néanmoins, pour évaluer l'effet total sur la consommation énergétique, il est nécessaire de prendre en compte plus largement tous les effets de ce type de service. Par exemple, des entreprises comme Blade (Shadow), Google (Stadia) et Microsoft (xCloud) proposent des offres de jeux dans le cloud promettant des performances similaires à celles obtenues sur des consoles et ordinateurs haut de gamme à moindre coût, rendant ainsi le service abordable auprès d'un plus grand nombre d'utilisateurs, et leur permettant une utilisation plus intensive avec un accès abordable à un plus grand nombre de jeux. En particulier, les modèles économiques qui s'appuient principalement sur la publicité et l'exploitation de données peuvent proposer des services présentés comme « gratuits » et pourraient entraîner une stimulation plus importante du niveau de la demande. Dans ce contexte, le passage au cloud gaming pourrait conduire à une augmentation d'usage susceptible de contrebalancer les éventuels gains énergétiques qu'il aurait permis d'exploiter.

4.4 DEEE (DÉCHETS D'ÉQUIPEMENTS ÉLECTRIQUES ET ÉLECTRONIQUES) [18]

1. FILIÈRE DEEE : ÉTATS DES LIEUX

Devenus indispensables à nos modes de vie, les équipements électriques et électroniques, particulièrement les équipements numériques, sont au centre des attentions s'agissant de leurs impacts environnementaux lors de leur production, durant leurs cycles d'usage et en fin de vie.

La filière de traitement DEEE pour la France et la Nouvelle-Aquitaine

En France, une filière de prévention et de traitement des Déchets d'Équipements Électriques et Électroniques (DEEE) s'est mise en place au début des années 2000 après la publication de la directive européenne 2002/96/CE, laquelle a imposé aux États membres des objectifs quantitatifs et qualitatifs en matière de collecte et de traitement.

Derrière l'appellation DEEE se cache l'ensemble des déchets issus des équipements qui fonctionnent à l'électricité, qu'ils soient alimentés par un câble, des piles ou une batterie. On y retrouve aussi bien des appareils électroménagers - petits ou gros, que des équipements informatiques et bureautiques, des équipements audio et vidéo, des jouets, des équipements de sports, des distributeurs, des climatiseurs... Tous ces équipements sont marqués par un pictogramme représentant une poubelle barrée qui indique qu'il ne faut jamais les jeter à la poubelle avec les ordures ménagères et qu'ils doivent faire l'objet d'une collecte séparée des autres flux de déchets dans les divers points de collecte spécialisés. En effet, la directive DEEE a été rédigée avec l'ambition d'éviter les pollutions liées à la propagation de certaines substances dans l'environnement et d'éviter le gaspillage des matières contenues dans les DEEE en les recyclant : métaux ferreux et non-ferreux, matières minérales, plastiques ...

La responsabilité et le financement de la filière DEEE s'appuient sur les contributions des producteurs (fabricants, metteurs sur le marché national...) conformément au principe de la Responsabilité Élargie des Producteurs (REP).

In fine, ces contributions financières (plusieurs centaines de millions d'euros par an) des producteurs sont incluses dans le prix de revient des produits et donc dans le prix de vente. La part des contributions par produit est même visible sur l'étiquette et la facture d'achat des équipements ménagers, sous l'appellation d'éco-contribution ou éco-participation.

Pour se conformer à la réglementation, les producteurs ont la possibilité en France de mutualiser leurs obligations à travers des éco-organismes qui, sous réserve de l'obtention d'un agrément délivré par l'État, ont la responsabilité de prendre en charge, de développer et de contrôler une filière industrielle de collecte et de recyclage sur l'ensemble du territoire national. La filière a connu un démarrage très rapide en s'appuyant notamment sur le réseau des déchèteries gérés par les collectivités territoriales. Ce réseau constitue encore à ce jour le canal de collecte le plus efficace avec près de 60 % des tonnages collectés. Par la suite, la performance de collecte a cru par paliers successifs pour atteindre 850 000 tonnes de DEEE collectés en 2020, soit un taux de retour par rapport aux tonnages mis sur le marché de 52 %.

Avec ce taux, la filière se situe en deçà de l'objectif fixé par l'Union européenne à 65 % des tonnages mis sur le marché national, mais malgré tout, la France figure parmi les bons élèves parmi les États de l'Union. Des efforts considérables en matière de densification du réseau de collecte et de sensibilisation des citoyens et des entreprises ont été menés et ont porté leur fruit : alors qu'en 2006, il n'existait ni réseau de collecte et d'apport, ni centre de traitement capable de dépolluer et valoriser les DEEE, il existe à présent 22 000 points de collecte, dont 5 000 déchèteries et une centaine de site de traitement recensés partout en France métropolitaine et dans les DOM-COM.

En 2020 et en 2021, la filière DEEE a réalisé une grande étude d'évaluation du gisement de DEEE généré en France. Cette étude montre qu'une part non-négligeable du gisement français est orientée vers des filières illégales de traitement ou part à l'export pour réemploi et par conséquent, échappe à la filière de recyclage. Enfin, une dernière partie finit encore dans les ordures ménagères ou avec le tout-venant, dans les encombrants notamment. Cette étude constate ainsi la difficulté à mesurer le taux de collecte effectif (kg collectés / kg mis sur le marché), du fait des sorties non tracées du territoire, et donc la capacité à atteindre l'objectif national de 65 % de DEEE collectés. Ce constat doit permettre de dégager des pistes d'action pour maximiser la performance de collecte.

Depuis peu, avec la publication de la loi AGEC, les missions de l'éco-organisme intègrent des objectifs liés à la prévention (éco-conception, éco-modulation, Infotri) et à l'allongement de la durée de vie des produits (réparation et réemploi). De ce fait, la filière intègre de nouveaux réseaux d'acteurs locaux et nationaux travaillant à un abaissement de la pression de notre production et de notre consommation sur l'environnement et les ressources naturelles. Les décideurs de Nouvelle-Aquitaine devraient eux aussi s'intéresser à cette filière et la soutenir car elle est d'avenir et pourvoyeuse d'emplois non délocalisables.

2. RECYCLAGE

Les métaux possèdent un potentiel de durabilité unique et sont théoriquement recyclables à l'infini, sans perdre leurs caractéristiques. Le recyclage fait partie intégrante des procédés de production quasiment depuis la découverte des métaux et est un levier fort pour lutter contre la raréfaction des métaux, en particulier pour les « petits métaux » dont les filières sont mal organisées. Il existe cependant de nombreuses limites physiques, technologiques, économiques et sociétales au recyclage « infini » et à la pure « économie circulaire ».

Tout d'abord, le second principe de la thermodynamique nous rappelle l'irréversibilité de certaines transformations. Les métaux initialement concentrés dans les mines, auront tendance, avec le temps, à se disperser inutilement. Le recyclage à 100 % est donc en pratique impossible, mais il est possible théoriquement de dépasser les 90 % pour tous les métaux.

La deuxième limite, bien plus gênante à court terme, est liée à l'usage même que nous faisons des métaux. Nous faisons une utilisation toujours plus importante d'alliages et concevons des produits de plus en plus complexes. Ainsi il y a plus de 30 métaux différents dans un ordinateur portable. Cette complexité nous empêche de récupérer facilement ces ressources : capacité limitée à repérer les métaux dans les alliages, capacité technologique (ou limite de consommation d'énergie) pour les séparer. Les filières de recyclage consistent donc souvent à récupérer des matières premières ayant servi pour des usages « nobles » ou « primaires » pour les réinjecter dans des usages « dégradés » ou « secondaires ».

La troisième limite est liée à l'usage dispersif que nous faisons de certains métaux, ce qui rend le recyclage très compliqué : c'est le cas par exemple de l'étain pour les soudures (un tiers de la consommation mondiale).

En complément de ces limites physiques et technologiques, on peut rencontrer également des limites économiques (prix de revient relatif entre filières de première fonte et recyclage).

Restent enfin les limites sociétales, pour tous les produits qui passent par un consommateur final. La complexité des produits, la difficulté à comprendre l'organisation de la gestion des déchets, le manque de formation ou de volonté des consommateurs, contribuent à rendre difficile le recyclage.

Toutes ces limites conduisent au fait que pour la majorité des « petits métaux » si essentiels aux TIC, le taux de recyclage est largement inférieur à 50 % en moyenne et pouvant être inférieur à 10 % pour certains petits métaux [17].

Cependant, la France fait partie des meilleurs élèves en Europe, elle est citée de nombreuses fois pour ses bonnes pratiques dans le rapport de l'OCDE WEEE Compliance [29]. Ainsi, les DEEE confiés à la filière agréée sont valorisés à hauteur de 78 % en matières [15].

Mais avant d'être un déchet, un DEEE peut-il continuer sa vie de EEE ?

3. FAIRE DURER, SECONDE MAIN

Aujourd'hui, on change un smartphone en moyenne tous les 2 ans. Les raisons d'abandonner son téléphone sont nombreuses : écran cassé ou rayé, panne d'une fonctionnalité, envie de changement. Trop souvent, le téléphone est encore fonctionnel et peut être réparé/reconditionné et continuer à servir à un nouvel utilisateur. Comme nous l'avons vu, en France, et à fortiori en Nouvelle-Aquitaine, les impacts environnementaux et sociétaux des équipements informatiques et de téléphonie proviennent majoritairement de leur fabrication, distribution et fin de vie. Réduire ces impacts, c'est donc avant tout prolonger leur durée de vie. Investir dans du matériel conçu pour durer, lutter contre l'obsolescence logiciel et réparer sont des leviers importants pour faire durer ce matériel par son propriétaire. A défaut, le réemploi est un levier complémentaire pour permettre de donner une seconde vie avant les filières de recyclage. Développer un circuit de réemploi qui soit efficace repose sur trois piliers essentiels que sont la collecte, la réparation, et la revente du matériel reconditionné.

D'un point de vue collecte, le *sourcing* principal des matériels à reconditionner vient des entreprises. En effet, celles-ci renouvellent leurs flottes en moyenne tous les 3 ans. Aujourd'hui, la loi oblige les entreprises à envoyer leurs matériels réformés dans une filière de recyclage, mais n'oblige pas au réemploi. Depuis peu, le réemploi est malgré tout encouragé par la loi AGEC [30] (anti-gaspillage pour une économie circulaire) avec entre autres : interdiction de la destruction des invendus, indice de réparabilité, 20 % de réemploi ou de matière recyclé pour les acheteurs des structures publiques, et aussi la création de fonds dédiés au financement du réemploi alimenté par les fabricants à hauteur de 5 % de leur éco-contribution.

Avec l'absence d'une filière de collecte et de réemploi claire et structurée, il est encore aujourd'hui difficile d'estimer précisément la quantité de matériel déjà en seconde main et la quantité qui pourrait bénéficier d'un réemploi. Les circuits de réemploi actuels sont en effet très diffus avec de nombreux échanges de particuliers à particuliers, alors que le matériel reconditionné revendu par les enseignes classiques ou via des plateformes spécialisées proviennent souvent d'importations. Néanmoins, au travers d'une étude d'impact sur le réemploi [31], le club-greenIT estime que développer cette filière pour les TIC permettrait des bénéfices environnementaux colossaux avec des centaines voire des milliers d'emplois à la clef à l'échelle d'une région comme la Nouvelle-Aquitaine.

Sur le territoire de Nouvelle-Aquitaine, de nombreux acteurs commerciaux ou associatifs se sont emparés de ce sujet. Citons par exemple Love2Recycle (usine de reconditionnement de smartphone, Corrèze), et les Ateliers du Bocage, structure d'insertion d'Emmaüs spécialisée dans la collecte et le réemploi des équipements électroniques et bureautiques (Deux-Sèvres). On peut évoquer également BackMarket, la start-up bordelaise, qui se développe de manière fulgurante en revendant des téléphones reconditionnés sur le net. Une filière de collecte claire et unifiée avec les filières de collecte pour le recyclage reste néanmoins à développer en Nouvelle-Aquitaine.

Finalement, notons aussi que le réemploi est lui aussi sujet à des effets rebonds [32] avec la possibilité de renouveler plus fréquemment un parc du côté des premières mains, et un suréquipement du côté des secondes mains, provoquant ainsi un appel d'air pour l'achat de matériel neuf. C'est pour cela qu'il est préférable de faire durer au maximum l'usage en première main.

TÉMOIGNAGE DE SARAH MAISONNEUVE, Directrice-adjointe des ATELIERS DU BOCAGE

En quelques mots, pouvez-vous nous présenter les ATELIERS DU BOCAGE ?

LES ATELIERS DU BOCAGE sont une coopérative d'utilité sociale et environnementale, membre du mouvement Emmaüs. Basés dans le nord des Deux-Sèvres, nous employons plus de 170 salariés. Notre raison d'être : Employer - Réemployer. Employer des personnes précaires et les accompagner à revenir dans le marché de l'emploi. Réemployer et donner une seconde vie à des matériels numériques, des palettes en bois, des livres...

Vous êtes reconditionneurs de matériels numériques. Quels sont les impacts positifs de cette activité ?

Depuis près de 20 ans nous nous employons à donner une seconde vie à divers déchets numériques. Rappelons que 80 % de l'impact environnemental et social d'un équipement électrique est lié à sa fabrication. Prolonger sa durée de vie est le meilleur moyen de réduire cet impact. Chaque année nous collectons 600 t de matériels informatiques, 300 000 téléphones mobiles, 1 300 000 cartouches d'impression, divers objets connectés... Et grâce à cela nous créons des emplois : 15 000 téléphones ou 1 000 ordinateurs collectés, c'est un emploi créé.

Que deviennent les matériels IT collectés ?

Notre objectif : reconditionner, réparer et revendre un maximum de ces matériels. Nous les distribuons sur notre site web <https://la-bootique.com/> ou sur la place de marché solidaire <https://www.label-emmaus.co/fr/>. Nous avons également 4 boutiques en Nouvelle-Aquitaine (à Niort, Poitiers, Bressuire et Le Pin).

Les équipements trop vieux ou non réparables partiront dans des filières de recyclage agréées, pour en extraire les matières : aluminium, cuivre, lithium, nickel, étain, zinc, plomb... et même de l'argent et de l'or. Ces matières pourront être réutilisées, évitant ainsi de nouvelles extractions.

5.1

DU CÔTÉ DES PROFESSIONNELS DU NUMÉRIQUE



En 2016, l'INSEE recensait 48 975 emplois dans les TCSI (technologie, contenus et supports de l'information) dans la région Nouvelle-Aquitaine, soit 5 % des emplois sur le territoire national, pour 11 456 établissements du secteur d'activité [33], sur une totalité de 960 790 emplois et 197 898 établissements en France.

La région enregistre la deuxième meilleure progression (+86 %, contre +89 % pour la région Île de France) du nombre d'entreprises dans le secteur en question depuis 2009, et se positionne quatrième du classement de création d'établissements (une diminution du nombre d'entreprises du secteur est toutefois à noter de 2009 à 2016).

Le secteur des TCSI se compose des activités :

- De programmation, conseil et autres activités informatiques (TIC) ;
- De télécommunication ;
- De commerce de gros équipements de l'information et de la communication ;

- D'édition ;
- De fabrication de produits informatiques, électroniques et optiques ;
- De production de films cinéma vidéo et programme TV ; enregistrement sonore et édition musicale ;
- De service d'information.

Au niveau régional, les TIC (surtout activités de conseil et de programmation informatique) constituent le type d'activité le plus largement représenté, avec 48 % des entreprises localisées sur le territoire et 63 % de l'ensemble des salariés. Des observations qui se confirment au travers de la typologie moyenne des entreprises adhérentes aux clusters du numérique (ALIPTIC, Digital Aquitaine, Pays Basque Digital, SPN et SYRPIN). On notera ainsi que les activités les plus largement représentées sont :

- les activités de programmation informatique / développement logiciels et applications et conseil (TIC) ;
- les activités de communication.

Usages

RÉPARTITION DES ENTREPRISES EN 2015

Domaines	Aquitaine	Poitou-Charentes	Limousin
TIC	48%	47%	50%
Contenus et supports	13%	15%	15%
Publicité Communication	38%	38%	34%
Activités industrielles connexes	1%	0%	1%
Total	100%	100%	100%

Source : INSEE

NOMBRE D'ENTREPRISES EN 2015

Domaines	Aquitaine	Poitou-Charentes	Limousin
TIC	5801	2165	815
Contenus et supports	1618	688	252
Publicité Communication	4637	1772	563
Activités industrielles connexes	71	16	11
Total	12127	4641	1641

Source : INSEE

D'après l'Observatoire du Numérique Nouvelle-Aquitaine 2017, on retrouve une certaine homogénéité globale dans le secteur du numérique en région (entre l'Aquitaine, le Limousin et le Poitou-Charentes) :

- Une homogénéité des domaines d'activités représentés dans les anciennes régions composant la Nouvelle-Aqui-

RÉPARTITION DES SALARIÉS EN 2015

Domaines	Aquitaine	Poitou-Charentes	Limousin
TIC	66%	55%	63%
Contenus et supports	13%	15%	18%
Publicité Communication	13%	20%	17%
Activités industrielles connexes	9%	9%	2%
Total	100%	100%	100%

Source : ACOSS

NOMBRE DE SALARIÉS EN 2015

Domaines	Aquitaine	Poitou-Charentes	Limousin
TIC	22438	5791	2642
Contenus et supports	4410	1552	735
Publicité Communication	4381	2019	730
Activités industrielles connexes	2998	955	66
Total	34227	10317	4173

Source : ACOSS

taine : principalement les entreprises des TIC et de la communication ;

- Une homogénéité dans la dynamique de création d'entreprises.

DYNAMIQUE DE CRÉATION D'ENTREPRISES NUMÉRIQUES EN 2015

Domaines	Aquitaine	Poitou-Charentes	Limousin
TIC	44,7%	44,3%	44,7%
Contenus et supports	9,4%	9,2%	10,5%
Publicité Communication	45,7%	46,4%	44,7%
Activités industrielles connexes	0,2%	0%	0%

Source : INSEE

L'écosystème numérique de la Nouvelle-Aquitaine s'articule et renforce son dynamisme et sa position autour et grâce de structures dédiées :

- Associations et réseaux de professionnels thématiques : Bordeaux Games, Clusir, Cluster EdTech ;
- Clusters et réseaux de professionnels du numérique : ALIPTIC, Digital Aquitaine, SPN, Aquinum, Digital Bay, Inoo, Niort Numérique, Pays Basque Digital... ;
- Pôle de compétences : Aquinetic ;
- Et de structures d'accompagnement et de lieux d'accueils autour du numérique ;
- Lieux incarnant la dynamique numérique : Cité Numérique, Cobalt, ESTER ;
- Technopoles : Atlantec, ESTER, Futuroscope, Hélioparc, Izarbel Unitec... ;
- Incubateurs ;
- Pépinières d'entreprises et accélérateurs [34].

Des structures qui viennent favoriser le développement de compétences numériques et la croissance du secteur (accompagnement technique, financier, collaborations, mise en relation...) et contribuer à d'autres secteurs, créant des inter filières enclines à la transformation numérique et des opportunités de croissance à la fois pour la filière numérique et pour les secteurs industriels concernés :

- La santé ;
- Le commerce connecté ;
- Le transport et la mobilité ;
- La EdTech (l'éducation et la formation).

LA TRANSFORMATION NUMÉRIQUE POUR LES ENTREPRISES D'AUTRES SECTEURS

Le point de vue sur le numérique diffère selon la typologie des entreprises interrogées : s'il peut être considéré en majorité comme une opportunité de développement, un moteur de croissance, un levier pour les ventes physiques dans certaines structures ; l'accès au numérique reste freiné pour diverses raisons : manque de formation et de compétences en interne, coût important, complexité de mise en œuvre et manque d'accompagnement [35].

La transformation numérique enregistre de « fortes disparités régionales » à l'échelle nationale : selon le baromètre Croissance et Digital, édition 2020 par ACSEL, 57 % des entreprises interrogées en Aquitaine et Limousin, ne disposent pas des compétences en interne pour des projets

numériques, quand pour 21 % des entreprises concernées, la crise sanitaire a renforcé l'adoption des outils numériques.

De nombreux dispositifs d'accompagnement sur le territoire sont mis en place pour pallier aux freins recensés précédemment :

- Dispositif d'audit / de diagnostic ;
- Dispositif d'aides financières ;
- Dispositif d'accompagnement et de formation.

Les nouvelles technologies et innovations ou l'adoption progressive des outils numériques par les filières d'activités, mènent à l'utilisation croissante du numérique, d'autant plus accélérée par la crise sanitaire du COVID-19, notamment avec l'adoption de nouvelles habitudes de travail (télétravail) que nous développons dans la partie suivante.

5.2

TÉLÉTRAVAIL



Le télétravail, tel que nous le connaissons aujourd'hui, est rendu possible grâce à une panoplie d'outils informatiques toujours plus performants (ex. les VPNs, la visioconférence, etc.) et des infrastructures réseaux adaptées. En outre, en réduisant les trajets domicile-travail, le télétravail est souvent présenté comme un levier important pour réduire certains impacts environnementaux comme les émissions de GES et les pollutions aux particules fines [36]. En revanche, le télétravail est aussi source de très nombreux effets rebond, de nature très diverse, pouvant être parfois bénéfiques, parfois néfastes, voire les deux en même temps en fonction des impacts environnementaux considérés. Comme le montre la méta-analyse de O'Brien *et al.* [37] ou encore la récente étude de l'ADEME [13], les interconnexions entre les différents effets rebond sont extrêmement complexes et très différentes d'une situation à une autre. Dès lors il est pour le moins très difficile d'aboutir à des estimations quantitatives fiables et complètes.

Du point de vue des transports, ces études révèlent de nouvelles mobilités du quotidien, des trajets domicile-travail moins fréquents mais plus longs et une décongestion du trafic, le tout favorisant in fine l'étalement urbain. Dans de rares cas, une flexibilisation du lieu de travail peut aussi conduire à de nouvelles mobilités longues. Le télétravail induit aussi des effets à l'échelle des logements comme une surconsommation énergétique, l'installation de la climatisation, et la recherche de logements plus spacieux. Ces effets peuvent être contrebalancés par l'optimisation de l'utilisation des bureaux d'entreprises, par exemple via la mise en place d'un fonctionnement de type « flex-office » et une adaptation de la superficie ou de l'utilisation des locaux aux besoins. Les tiers-lieux comme les espaces de coworking, quant à eux, favorisent le télétravail, mais leur bilan environnemental est mitigé notamment, à cause des déplacements résiduels induits et de la multiplication des surfaces construites, parfois au prix de l'artificialisation de sols agricoles.

Du point de vue des TIC, le télétravail présente plusieurs effets rebond majeurs. Bien que la duplication du poste de travail informatique complet reste rare, le télétravail régulier s'accompagne souvent d'achats d'équipements informatiques supplémentaires comme un écran et téléphone portable. Par exemple, sur le seul critère du réchauffement climatique, le simple achat d'un écran 24" pour 5 années, correspond à environ 9 km en voiture par semaine. On observe également un accroissement du matériel de

visioconférence (caméra robotisée, écran de télévision grand format, etc.) voire de salle de téléprésence au sein des entreprises. Le recours massif à la visioconférence induit aussi une surconsommation énergétique, mais surtout une pression supplémentaire sur les capacités des infrastructures réseaux et des serveurs des fournisseurs de solutions de visioconférence. À notre connaissance, il n'existe aucune étude permettant de quantifier cet effet, pourtant bien réel. Cette pression sur les infrastructures réseaux est par ailleurs source d'inégalités au niveau du territoire de la Nouvelle-Aquitaine comme le montre le rapport sur le télétravail du Ceser Nouvelle-Aquitaine [38]. Un récent rapport de l'Agence nationale pour l'amélioration des conditions de travail [39] souligne, suite à la crise du COVID-19, que le télétravail est amené à se développer en Nouvelle-Aquitaine notamment au sein des entreprises ayant pratiqué le télétravail lors de la crise sanitaire, lorsque les managers et les employés sont très largement favorables à la mise en place d'un télétravail régulier.

Comme nous le devinons, ces nouveaux usages et bien d'autres dessinent un nouveau territoire tant dans son organisation humaine et sociale que dans son infrastructure. Bienvenue dans l'ère « smart ».

5.3

AMÉNAGEMENT DU TERRITOIRE



5.3.1 - SMART GRID

Le réseau intelligent est un réseau qui contient divers paramètres énergétiques et de fonctionnement (Figure 5), notamment des compteurs intelligents, des appareils intelligents, des énergies renouvelables et des ressources économes en énergie. La régulation électronique de l'énergie et le contrôle de la production et de la distribution d'électricité sont des aspects importants du réseau intelligent. La politique *Smart Grid* est organisée en Europe sous le nom de « European Smart Grid Technology Platform ». La mise en œuvre de la technologie des ré-

seaux intelligents implique également des réformes fondamentales dans le secteur de l'électricité, bien que l'utilisation typique du terme se concentre sur l'infrastructure technique.

Des Pyrénées à l'ex-Poitou-Charentes, la Nouvelle-Aquitaine est parvenue à être la région la plus vaste et la plus diversifiée de France. Cette caractéristique lui fait jouer un rôle de premier plan dans la dynamique de transformation énergétique et écologique. La région dispose de ressources abondantes, notamment le développement des énergies renouvelables. Le fort ensoleillement a favorisé le développement de l'industrie photovoltaïque. Son immense façade maritime appelle à l'utilisation de l'énergie des océans (vent, marées, vagues). Ses forêts et son agriculture sont des sources de biomasse pour la digestion anaérobie. Enfin, son fonds d'investissement Terra Énergies a permis à la région d'accélérer le lancement de projets d'énergies renouvelables. Cette volonté d'agir sur le climat se traduit également par une politique de performance énergétique ambitieuse. Il existe déjà 12 territoires énergétiques actifs (TEPOS - Territoire à énergie POSitive) dans la région, dans lesquels l'économie circulaire et les réseaux intelligents ont fait leurs preuves. Le Bureau régional d'ingénierie de la conservation de l'énergie (ARTEE) stimule également le développement de bâtiments écologiques dans l'industrie de la construction et fait de la Nouvelle-Aquitaine la cinquième région française d'innovation industrielle en matière de transformation énergétique et écologique.

En 2017, le Conseil Régional et l'ADEME ont accéléré la transition énergétique de la Nouvelle-Aquitaine en mettant en place des pôles dédiés à l'énergie et au stockage. Parmi les acteurs locaux impliqués dans l'adaptation au changement climatique, le Réseau de transport électrique (RTE) a participé à cette dynamique pour établir des connexions entre les start-up des secteurs de l'énergie et de l'innovation.

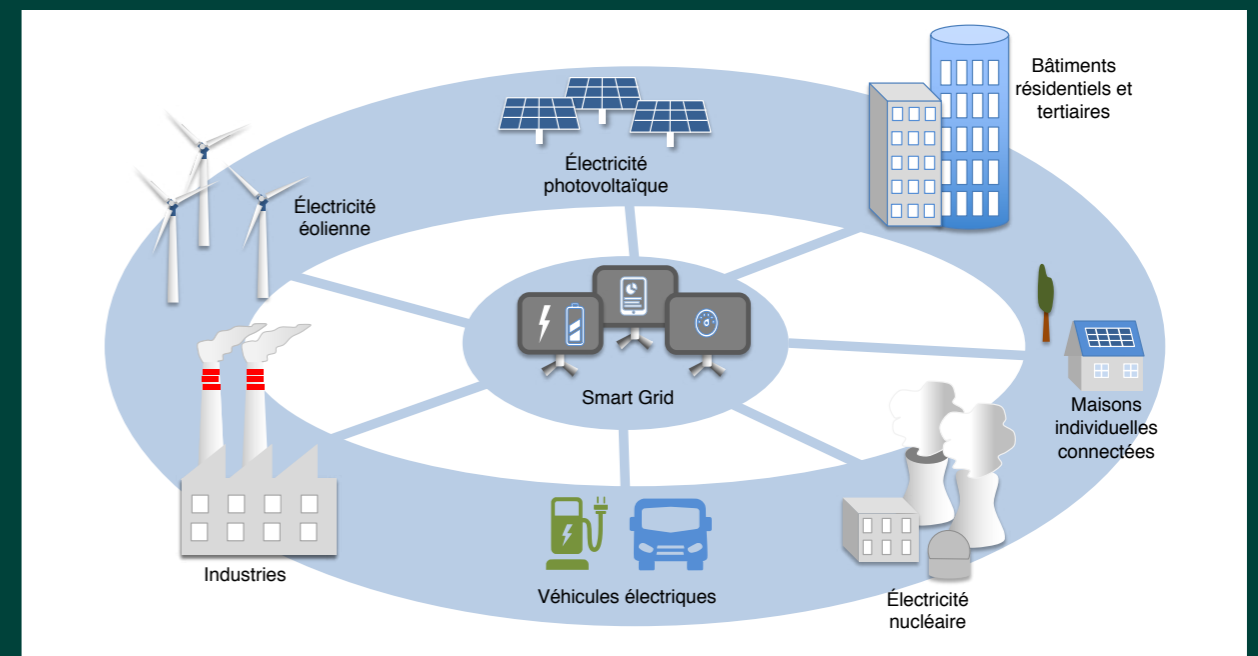


Figure 5 : Représentation d'un Smart grid (40)

5.3.2 - SMARTCITY

Les « villes intelligentes » sont des zones urbaines qui utilisent différents types de méthodes électroniques et de capteurs pour collecter des données. Les connaissances acquises grâce à ces données sont utilisées pour gérer efficacement les biens, les ressources et les services municipaux. À leur tour, ces données seront utilisées pour améliorer les opérations dans toute la ville. Cela comprend les données collectées auprès des citoyens, des équipements, des bâtiments et des actifs, puis traitées et analysées pour surveiller et gérer les systèmes de circulation et de transport, les centrales électriques, les services publics et les réseaux électriques et d'adduction d'eau, les ordures, les enquêtes criminelles, les systèmes d'information, les écoles, les bibliothèques, les hôpitaux et autres services communautaires.

Le concept de ville intelligente intègre les technologies de l'information et de la communication (TIC) et divers appareils physiques connectés au réseau IoT (*the Internet of Things*) pour optimiser l'efficacité des opérations et des services de la ville et se connecter aux citoyens. La technologie des villes intelligentes permet aux autorités municipales d'interagir directement avec les communautés et les infrastructures urbaines, et de surveiller ce qui se passe dans la ville et son évolution. Les technologies de l'information et de la communication sont utilisées pour améliorer la qualité, la performance et l'interaction des services urbains, réduire les coûts et les ressources et renforcer les liens entre les citoyens et le gouvernement. Des plans de ville intelligente sont en cours d'élaboration pour gérer le trafic urbain et permettre une réponse en temps réel. Aux vues des enjeux inhérents à l'intelligence artificielle qui cristallisent de nombreux impacts, nous avons décidé de lui accorder une section spéciale.

UN EXEMPLE DE SMART TERRITOIRE



La Rochelle Territoire Zéro Carbone

La Rochelle Territoire Zéro Carbone, un projet ambitieux et fédérateur qui s'appuie sur le numérique pour son pilotage autant que dans ses actions. Le projet compte cinq partenaires principaux : la communauté d'agglomération et la ville de La Rochelle, La Rochelle Université, le Port Atlantique de La Rochelle et Atlantech Low Carbon Park. Il rassemble également une trentaine d'organisations publiques et privées dédiées au développement durable. La Rochelle s'engage pour la protection de l'environnement et la maîtrise de la consommation d'énergie. Ce sont autant de mesures propices aux véhicules électriques et au développement du vélo. Des progrès significatifs ont été réalisés dans l'éclairage urbain et l'isolation thermique des bâtiments publics. Les marais sont protégés, de sorte qu'ils peuvent pleinement fonctionner comme des capteurs de dioxyde de carbone. La communauté urbaine et La Rochelle Université ont créé un nouveau quartier appelé «Atlantech». Situé à Lagord – cependant sur d'anciennes terres agricoles ainsi artificialisées - c'est le centre d'innovation de la transition énergétique. L'université elle-même a un plan d'action interne pour devenir un campus intelligent et durable. Les grandes entreprises portuaires travaillent ensemble pour transformer les déchets d'une personne en ressources pour une autre [41].

source : <https://www.larochelle-zero-carbone.fr/>

5.4

INTELLIGENCE ARTIFICIELLE



1. DÉFINITIONS

L'intelligence artificielle (IA) est un domaine qui regroupe les disciplines de l'informatique dont le but est d'écrire des programmes permettant de traiter l'information automatiquement, mais de façon similaire à ce que font les humains. L'intelligence artificielle est un vaste domaine regroupant à la fois des travaux théoriques et appliqués.

En 1950, le mathématicien Alan Turing se posait une question : « Les machines peuvent-elles penser ? ». Cette simple interrogation allait radicalement changer le monde. L'intelligence artificielle est une technologie si vaste et révolutionnaire qu'il est difficile d'en donner une définition précise. On peut la considérer comme une branche du domaine informatique, ayant pour but la création de machines capables d'effectuer des tâches nécessitant auparavant une intelligence humaine.

Lors de la *Japan AI Experience* en 2017, le CEO de DataRobot, Jeremy Achin, donnait sa propre définition moderne de l'IA accompagnée d'une touche personnelle d'humour : « L'intelligence artificielle est un système informatique capable d'effectuer des tâches nécessitant d'ordinaire une intelligence humaine... Beaucoup de ces systèmes IA reposent sur le *Machine Learning*, certains sur le *Deep Learning* et certains sur des choses très ennuyeuses telles que des règles. » L'IA est toutefois une science interdisciplinaire aux approches multiples et aujourd'hui, le *Machine Learning* et le *Deep Learning* sont deux techniques utilisées dans les entreprises de toutes les industries.

Même si l'intelligence artificielle a un passé ancien (le terme lui-même remonte à 1956), ce n'est qu'à partir de 2012 que le concept s'est démocratisé et répandu auprès du grand public (en particulier avec les succès de Google AlphaGo ou des systèmes de reconnaissance de la parole de Microsoft). C'est à cette date qu'ont été introduits les réseaux de neurones à apprentissage profond (*Deep Learning Neural Networks*) qui ont complètement surpassé les performances des autres techniques d'IA, y compris celles construites, elles aussi, sur les principes « d'apprentissage artificiel » (*Machine Learning* ou ML en anglais). Les applications ont d'abord été en vision par ordinateur, puis en traitement automatique de la langue avant de trouver des débouchés dans pratiquement tous les domaines au point de devenir la technique de référence. La **Figure 6** montre de façon simple l'évolution de l'IA.

Les techniques d'apprentissage s'appuient sur deux ressources : les données massives et la puissance de calcul. En effet, il s'agit pour ces méthodes de modéliser les données avec un haut niveau d'abstraction permettant ensuite de les traiter et de les analyser. Cela est obtenu en appliquant, sur les données, de nombreuses transformations caractérisées par un nombre très grand de paramètres. Afin d'être performants il faut que les réseaux *deep learning* soient « entraînés » sur un très grand nombre de données (de l'ordre du million, voire récemment, du milliard [43]) et que les calculs soient itérés jusqu'à atteindre un niveau de performance acceptable (ce qui peut prendre un temps important sachant que dans la grande majorité on ne se contente pas du « suffisant » mais qu'on cherche plutôt l'« optimal » [44]).

L'entraînement de millions de paramètres sur des millions de données exemples nécessite beaucoup de mémoire, plusieurs processeurs et processeurs graphiques. Pour cela, il est en général nécessaire d'avoir recours à des centres de calcul.

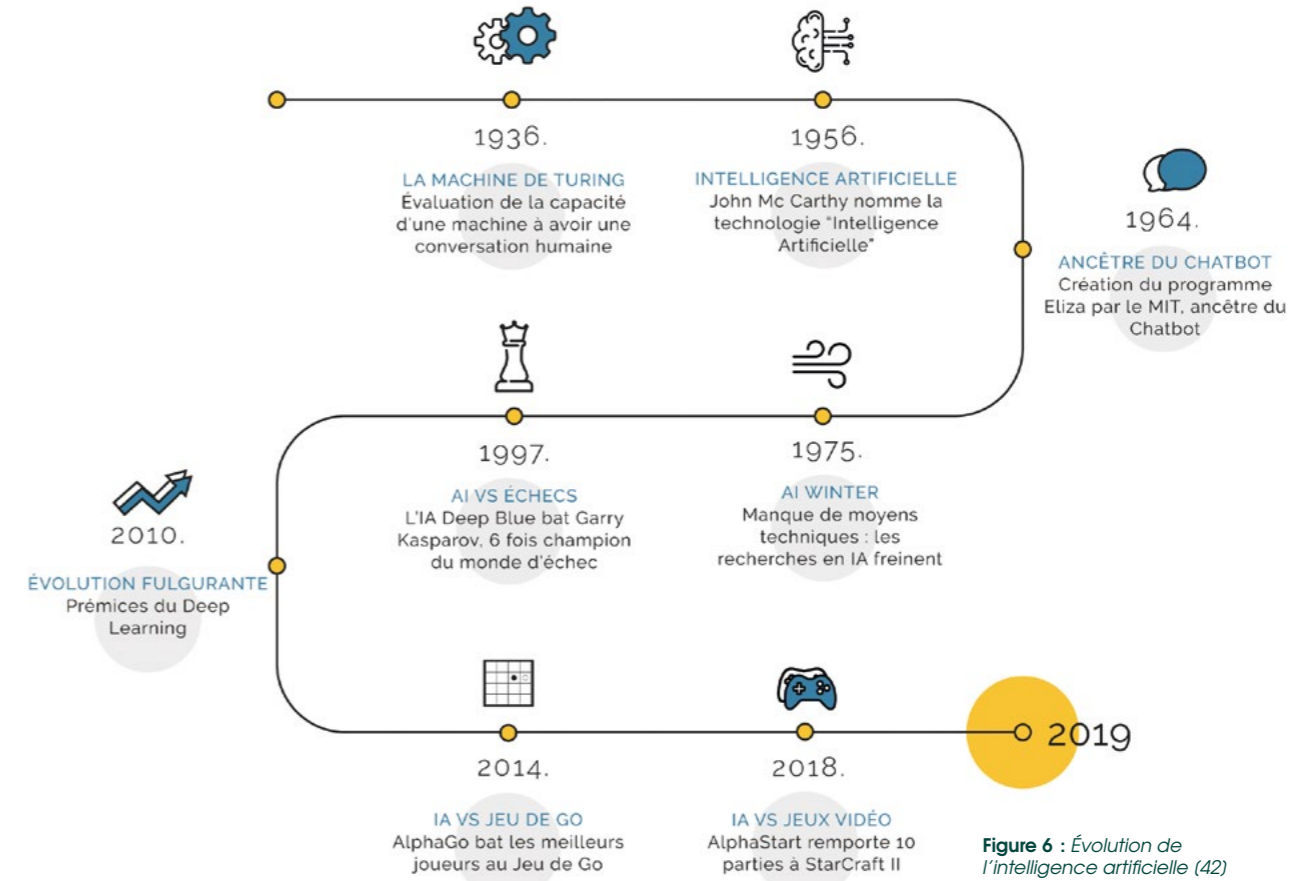


Figure 6 : Évolution de l'intelligence artificielle (42)

2. DÉVELOPPEMENT DE L'IA

Une simple recherche de l'évolution du nombre de publications scientifiques (cf. **Figure 7** : Évolution des publications sur l'IA à partir de la base Scopus) ayant trait à l'intelligence artificielle par an depuis 1990, suffit pour illustrer le rythme effréné de développement de ces technologies.

Si on fait un zoom sur les domaines d'applications, on peut voir qu'à l'origine (ici 2012-2013) ceux-ci étaient cantonnés à l'informatique et aux mathématiques, car de nature très théorique.

A l'inverse, avec un focus plus récent (ici 2020-2021), on peut

voir un déplacement vers les aspects plus appliqués (ingénierie, médecine...), même si le cœur de la production scientifique reste encore bien sûr en informatique. On est d'ailleurs passé d'un peu plus de 3 500 brevets liés à l'IA en 2012 à près de dix fois plus en 2020 !

Les acteurs intéressés par ce domaine se sont développés au niveau national, aussi bien les acteurs académiques qu'industriels [45]. Par ailleurs, de nombreuses petites structures (start-up) se sont lancées dans ce domaine [46] [47].

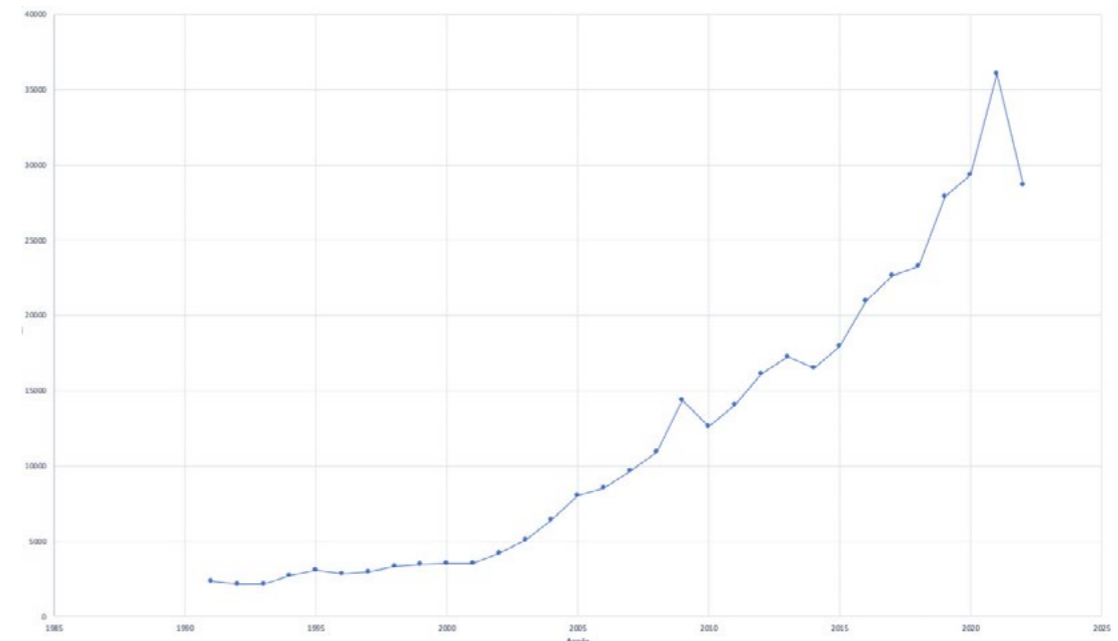
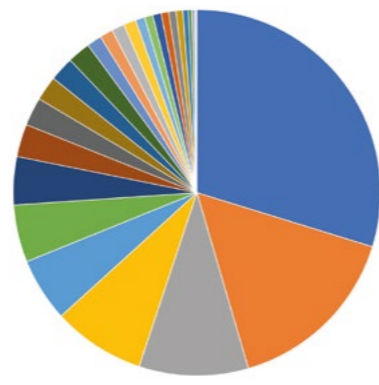
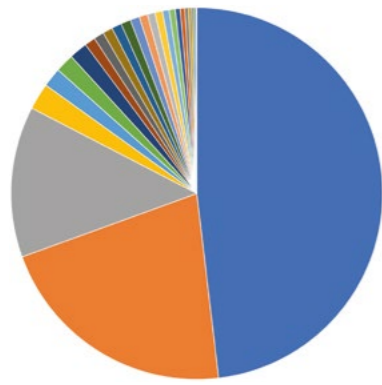


Figure 7 : Évolution des publications sur l'IA à partir de la base Scopus



3. L'IA EN NOUVELLE-AQUITAINE

Dans ce paysage national, la Nouvelle-Aquitaine est un acteur important du développement de l'IA [48] [49] [50]. Un aperçu des recherches effectuées dans la région a d'ailleurs été présenté lors de la conférence PFIA 2021 [51]. L'initiative IA4INDUSTRY [52], coordonnée par les universitaires de la région, a pour objectif d'accompagner les entreprises à la compréhension des enjeux de l'IA et de former leurs cadres et pour amorcer l'utilisation de l'IA au sein de leurs structures.

Par exemple, depuis 2014, le cluster numérique Digital Aquitaine œuvre pour le développement durable de l'économie numérique par l'animation de cinq domaines d'excellence

(DomEx). On y retrouve la e-santé (TIC Santé), la mobilité, transports intelligents et applications satellitaires (TOPOS), le commerce connecté (Club Commerce Connecté) et l'usine du futur à travers la simulation numérique, la réalité augmentée/virtuelle (Smart4D)

Le cinquième de ces domaines, le domaine « IA Data Science » a été reconnu officiellement en juin 2021 et aura pour ambition d'organiser des événements thématiques en Nouvelle-Aquitaine afin d'insuffler la dynamique en région autour des sujets de *machine learning*, des statistiques, du business intelligence, de la recherche opérationnelle et de l'IA.

4. L'IA N'EST PAS VERTE

Comme évoqué ci-dessus, l'IA est consommatrice de ressources et ses impacts sur l'environnement ne doivent pas être négligés étant donné son rythme de développement. Ces impacts sont à la fois directs et indirects [53] [54]. Les impacts indirects sont difficilement quantifiables car liés notamment à des changements économiques et sociétaux. Nous discutons donc dans la suite de cette section des impacts directs.

Parmi les impacts directs discutés dans la littérature [55] [56], le premier est la consommation des équipements sur lesquels sont entraînés les réseaux de neurones profonds utilisés pour l'apprentissage machine. Les principales sources d'émission lors de l'entraînement sont liées à la consommation des microprocesseurs et aux mémoires, mais aussi les consommations statiques des serveurs (carte mère, alimentation, ventilateurs...), et l'infrastructure des salles serveurs (réseaux, écrans, climatisation, baies de stockage...). La consommation de l'infrastructure est en général approximée par l'indice d'efficacité énergétique (*Power Usage Effectiveness* - PUE). Certains facteurs ont aussi une importance cruciale sur la quantité de carbone émise par les calculateurs qui sont utilisés par les réseaux *deep learning* [57]. Ainsi, de la localisation du serveur dépend la manière dont l'énergie qu'il consomme est produite.

Les autres impacts directement reliés à l'utilisation de l'IA sont liés au reste du cycle de vie des équipements, notamment la fabrication et la fin de vie. L'impact de la fin de vie des équipements des centres de données est difficile à estimer. Un aspect à surveiller est l'obsolescence possiblement rapide

des équipements nécessaires à l'entraînement de réseaux de plus en plus complexes. L'étape de fabrication des équipements est là encore très peu discutée dans la littérature. Si on se base sur une autre étude d'EcolInfo [58], la phase de fabrication des serveurs pourrait représenter 40 % des émissions mais ces travaux doivent être généralisés. La prise en compte systématique de la phase de fabrication dans la mesure des impacts nécessiterait que l'ensemble des constructeurs des processeurs utilisés en IA fournissent les données relatives aux étapes de fabrication des équipements (exprimés en CO₂e - équivalent dioxyde de carbone - mais aussi de quantité de métaux et d'eau).

Pour réduire les impacts directs liés aux équipements faisant fonctionner les systèmes d'IA, les aspects purement liés à l'algorithme sous-jacente au fonctionnement de ces systèmes doivent être reconsidérés. En effet, le temps nécessaire à la procédure d'apprentissage, directement lié au critère de performances recherché, a une influence énorme sur la consommation électrique. Pour la phase d'apprentissage encore, une autre problématique peu traitée pour le moment est la collecte et la conservation des données nécessaires à l'entraînement.

En extrapolant la dépendance énergétique actuelle des algorithmes de *machine learning*, on constate que les usages deviennent rapidement non durables sur les plans économique, technique et environnemental. Par conséquent, la poursuite des progrès dans ces applications nécessitera des méthodes de calcul beaucoup plus efficaces, qui devront être le fruit soit de changements vers un apprentissage approfondi, soit d'un passage à d'autres méthodes d'apprentissage machine [59].

5. MAÎTRISER LES IMPACTS ET LES USAGES DE L'IA

Comme précisé en introduction de ce cahier thématique, une phase importante dans la prise de conscience de l'impact environnemental d'un procédé numérique est notre capacité à le mesurer.

MESURER

Très récemment, plusieurs outils [57] [60] [61] ont été développés et mis à disposition pour mesurer les émissions CO₂e, en utilisant les consommations GPU, CPU et DRAM, et le PUE. Une courte description de ces outils a récemment été proposée par EcolInfo [54]. L'utilisation systématique de tels outils et l'affichage des PUE de tout centre de données doit se généraliser. Ainsi, des entreprises comme Google affirment souhaiter prendre en compte cette caractéristique dans leurs futurs développements [8].

RÉDUIRE

Une fois le constat établi de l'impact grandissant des calculs en recherche utilisant le *Deep learning* (x 300 000 entre 2012 et 2018 [62]), certains commencent à évoquer la notion de GreenAI [63] [64]. Un impact souvent négligé est celui du coût financier des calculs qui peut rendre son accès difficile à certains universitaires, étudiants ou chercheurs, tout particulièrement pour ceux dont les économies sont émergentes. L'idée alors est de ne plus seulement rendre prépondérantes les seules performances du modèle, mais de mettre sur un pied d'égalité l'efficacité énergétique en particulier via la notion de coût financier associé au développement, à l'entraînement et à la mise en œuvre des modèles afin de fournir des données de référence pour l'étude de méthodes de plus en plus efficaces. L'objectif est de rendre l'IA à la fois moins impactante, plus verte et plus inclusive, en permettant à tous d'accéder au développement de ces systèmes.

Un aperçu assez large des techniques récentes permettant de rendre plus efficace énergétiquement le traitement des réseaux *Deep* est disponible dans un article d'état de l'art [65]. Il donne un aperçu des différents types de réseaux, examine les plateformes et architectures matérielles qui les prennent en charge et met en évidence les principales tendances en matière de réduction du coût de calcul : soit par des modifications de l'infrastructure matérielle, soit par celle des algorithmes neuronaux.

En Nouvelle-Aquitaine, la chaire de recherche et d'enseignement en intelligence artificielle Green AI (GrAI) a justement pour objectif de lever le verrou technologique de la trop forte consommation énergétique de l'IA. L'idée est de concevoir de manière conjointe de nouveaux composants capables de faire fonctionner des algorithmes, eux-mêmes pensés selon de nouveaux paradigmes de calcul, afin de réduire la consommation énergétique de ces systèmes intelligents en vue de leur implémentation dans les systèmes autonomes.

RÉPARER

Même si l'IA est aujourd'hui principalement utilisée pour des activités autres, elle fait partie des technologies prometteuses pour répondre aux défis liés aux changements climatiques. Le livre Blanc d'OpenStudio [66] offre un panorama intéressant des axes de développement de l'IA *for Green* :

- Pour diminuer la pollution, gérer la propreté, l'énergie et l'aménagement urbain ;
- Pour économiser l'énergie : en accroissant l'efficacité énergétique ;
- Pour lutter contre le gaspillage alimentaire, pour éviter la surconsommation d'eau et de pesticides ;

- Pour s'adapter au changement climatique : limiter son impact sur l'agriculture, protéger les populations, analyser les impacts ;

- Pour lutter contre l'appauvrissement de l'écosystème marin, sauvegarder les espèces ;

- Pour développer la mobilité durable (sur ce volet les Universités de Bordeaux et de La Rochelle participent au projet Eco-Mob soutenu par la région et la communauté d'agglomération rochelaise).

Des acteurs petits [67] ou gros [68] commencent d'ailleurs à se positionner par rapport à cette problématique.

RÉUTILISER

En réponse à la centralisation des calculs nécessaires au *Deep Learning*, des alternatives, telles que l'apprentissage fédéré (FL), ont vu le jour. L'apprentissage fédéré consiste à entraîner un algorithme sur la machine d'un utilisateur, mais de permettre de le partager avec d'autres utilisateurs du réseau fédéré. Cette méthode a aussi l'avantage d'un meilleur respect de la vie privée. Ce type de système commence à être déployé à l'échelle mondiale par des entreprises qui doivent se conformer à de nouvelles exigences légales et politiques émanant des gouvernements et de la société civile pour la protection de la vie privée. Cependant, le FL a lui-même un impact environnemental qui doit être exploré [69]. L'empreinte carbone du FL dépend en réalité de différents facteurs tels que l'emplacement physique des serveurs, des tâches réalisées par les modèles d'apprentissage profond, de l'architecture du modèle, de la stratégie d'agrégation du FL et de l'efficacité du matériel.

Comme on l'a dit en présentant l'IA, en particulier dans son acception *Deep Learning*, après des applications à l'origine en reconnaissance d'images et en traitement automatique du langage, les applications du *Deep Learning* se sont multipliées en France et touchent dorénavant tous les domaines. On peut en particulier citer [70] la reconnaissance de la parole, la vision par ordinateur et la reconnaissance de formes, les assistants virtuels, la santé, les véhicules autonomes, la détection de fraudes, l'agrégation d'informations et la détection d'infox, le divertissement, les interfaces personnalisées...

Sur le territoire régional, outre les acteurs académiques qui ont tous plus ou moins quelques activités de recherche liées au *Deep Learning* ou de l'IA plus généralement (y compris l'école de magistrature), on trouve des acteurs industriels se déclarant utilisateurs d'IA (liste non exhaustive) : 10h11 à Bordeaux (Data Science), 1A31 à Biarritz (documents), FieldBox.ai à Bordeaux (IA pour l'industrie), Frog Labs.ai à Bordeaux (prédiction des données météo-sensibles), Ikomia à La Rochelle (vision et IA), Ivelogiciels à Angoulême (diverses applications), Kereon à Niort (analyse de données), Madintec à La Rochelle (électronique et informatique pour voiliers de course), Natuition à La Rochelle (robotique intelligente), Quantacell à Bordeaux (traitement des données), ST37 à Pau (vidéo-arbitrage intelligent), Synapse Medicine à Bordeaux (aide à la prescription médicale), Betterise à Biarritz (accompagnement des patients à domicile), Nurea à Bordeaux (analyse d'images médicales...).

Il est intéressant de noter que les assureurs niortais se sont tous déclarés utilisateurs de l'intelligence artificielle : MAIF [71], MAAF [72] et MACIF [73].

Dans les sections suivantes, nous abordons quelques pistes qui pour nous se révèlent importantes dans le contrôle et la diminution des impacts du numérique.



6.1

ÉTABLISSEMENT D'UNE POLITIQUE RÉGIONALE SUR LE NUMÉRIQUE ET L'ENVIRONNEMENT

L'urgence climatique rappelée en juillet 2021 par le dernier rapport du GIEC appelle à une réflexion fondamentale sur le « bon » niveau de gouvernance d'une démarche d'aménagement du territoire équilibrée, d'un point de vue économique, social et environnemental. La région demeure le bon échelon pour une transition numérique écologique. Sa position et ses compétences permettent de fixer des objectifs ambitieux en matière de transition climatique et plus spécifiquement de numérique responsable.

La compétence économique des régions constitue un levier d'action et d'impulsion : accélération des projets et atténuation des risques sur des projets innovants à très fort impact. Les modèles incitatifs adossés à des dispositifs d'aides de l'État permettent, par ailleurs, de privilégier le recours à la frugalité, la circularité et l'éco conception. La région constitue un niveau macro-économique cohérent pour répondre à des enjeux majeurs et structurants.

DÉVELOPPEMENT ÉCONOMIQUE ET GRAMMAIRE DE JUSTIFICATION, LA RÈGLE DU RÉGIME PRINCIPAL

Le déploiement d'une stratégie régionale Numérique Responsable implique de profonds changements dans les usages des particuliers, des entreprises et des institutions publiques. Cela implique la création d'un récit collectif autour du triptyque Économique, Social, et Environnemental. Il doit être en mesure d'apporter de « bonnes raisons [74] » aux acteurs sociaux et économiques de s'engager pleinement dans cette transition. Pour cela, de nouvelles grammaires de justification [75] doivent venir soutenir l'émergence de nouveaux usages, de nouvelles configurations qui permettent d'envisager un numérique responsable. Il s'agit de constituer les conditions historiques et politiques pour créer collectivement un nouveau mode de régulation économique et environnemental (au sens où l'entend l'école de la Régulation [76]). L'adhérence forte entre les prérogatives d'une région et les enjeux associés à une politique numérique responsable efficiente nécessite d'investiguer de nouveaux régimes productifs historiques. La valeur générée, grâce au numérique, doit être repensée à l'aune d'usages responsables, soutenables et durables.

LA TRANSFORMATION DES COLLECTIVITÉS, DES ENTREPRISES ET DES USAGERS

La région Nouvelle-Aquitaine a inscrit sa politique numérique responsable au cœur de son Schéma régional de développement économique, d'innovation et d'internationalisation (SRDEII). Dans la suite des efforts initiés de longue date en faveur de la transformation numérique des acteurs publics et privés, la Région poursuit un processus économique structurant : la création d'un « marché » de la transformation numérique responsable, point d'appui d'un changement d'usages et de modèles économiques.

La région a la capacité d'engager financièrement des actions structurantes à l'échelle de son territoire en lien avec ses partenaires (État et Europe). La diversité des projets soutenus, l'intensité du soutien, les modalités d'intervention, les mesures incitatives sont des leviers sans commune mesure en faveur d'une transition globale.

LES RÉGIONS, COMMUNAUTÉS DE PRATIQUES, ESPACES DE CONCEPTION ET D'EXPÉRIMENTATION

Les transformations structurantes de la société nécessitent une intervention publique. Proposer des modèles économiques innovants et des propositions de valeurs disruptives vient bousculer les schémas d'entrepreneuriat classique. La prise de risque inhérente à de telles initiatives et la temporalité spécifique qu'elles induisent (souvent en adhérence avec le temps de la décision publique) peuvent se révéler contradictoires avec la temporalité d'un outil économique.

Or une proposition de valeur radicalement alternative peut être de nature à réellement initier une transition des modèles de consommation et de production. L'effet de levier et de réduction des risques des aides publiques sont de nature à considérablement fiabiliser et accélérer ce type d'innovation à fort impact. Une politique en faveur d'un numérique responsable doit nécessairement s'inscrire à l'échelle d'un territoire régional, afin de soutenir les initiatives innovantes et impactantes qui émergent sur le territoire, sans disposer nécessairement de modèle économique viable à court terme.

Ce positionnement territorial permet à la fois de travailler « à façon » sur les acheteurs de solutions et services numériques pour faire changer les usages, mais également d'accompagner les offreurs de solutions numériques dans l'ajustement et le développement de propositions de valeurs, en phase avec les enjeux du numérique responsable.

Il permet enfin de redéfinir des enjeux concrets pour penser les modèles de conception et les régimes économiques. A l'image des circuits courts de traitement des DEEE qui se déploient souvent sur le territoire, entre des entreprises, des acteurs du reconditionnement et des acteurs de l'inclusion numérique qui redistribuent le matériel reconditionné.

L'approfondissement de pistes de recherche sur des usages, beaucoup plus collaboratifs et partagés, des services et matériels informatiques et numériques pourraient être exploré pour réduire des usages.

Les régions jouent également un rôle structurant sur les volets sociaux de nos vies quotidiennes : transports, lycées, enseignement supérieur, culture, vie associative, sports, etc. La crise sanitaire COVID-19 a mis en exergue l'importance de la ressource numérique dans nos sociétés et nos économies, mais également son extrême fragilité et la tension naissante qui pèse sur les terminaux, malgré une inflation logicielle et des usages réseaux galopants. Le déploiement d'ambitieuses politiques territoriales numériques responsables constitue un enjeu majeur de résilience et d'agilité de nos organisations et de nos institutions régionales.

Des solutions
sur tous les plans

6.2

FORMATION ET SENSIBILISATION

Jusqu'à récemment, l'impact du numérique sur l'environnement n'était pas pleinement pris en compte dans la formation. L'enseignement aux étudiants en informatique et en sciences de l'information et de la communication concerne principalement la consommation électrique et la complexité algorithmique des serveurs/réseaux/terminaux. Bien sûr, ces aspects sont essentiels pour les développeurs, afin d'accroître l'efficacité du programme, mais ils ne permettent pas d'avoir une compréhension complète de l'impact.

Les formations et sensibilisations à la matérialité et aux impacts du numérique doivent s'adapter au public et les compétences visées seront différentes. La Fondation UVED (l'Université Virtuelle Environnement et Développement durable) a réalisé une veille sur le thème « Numérique & Environnement » et propose [77] une sélection (non exhaustive) de ressources.

En Nouvelle-Aquitaine, des séminaires/débats d'une ou deux heures ont déjà été proposés [78]. De telles interventions s'adressent au grand public et ont pour objectifs de dresser un panorama des impacts directs et indirects du numérique sur l'environnement, ainsi que de donner des pistes d'actions et de bonnes pratiques, principalement au niveau individuel.

D'autres outils existent pour la sensibilisation du grand public comme par exemple la fresque du numérique [79] qui vient en complément de la fresque du climat [80]. La fresque du climat est un « serious game » qui a pour objectif de comprendre rapidement les causes et conséquences du changement

climatique et son aspect systémique. Elle se déroule en trois phases : réflexion, créativité et discussion. La fresque du numérique se déroule sur le même format et sensibilise les participants aux enjeux environnementaux du numérique et propose quelques pistes d'actions.

Pour un public plus spécialiste, étudiants ou acteurs des TIC ou de services RSE (Responsabilité Sociétale des Entreprises), des formations plus longues existent. Une liste non exhaustive en Nouvelle-Aquitaine inclut le MOOC « Numérique Responsable » [81], une UE de licence informatique à l'université de Bordeaux, une introduction à Bordeaux INP, une formation proposée aux doctorants de l'université de Bordeaux, une formation continue numérique responsable à La Rochelle Université. Notons que de telles formations sont en développement à de nombreux endroits au niveau national. Une liste des formations abordant les enjeux environnementaux des activités numériques est maintenue sur le site du GDS EcoInfo [82]. Un référentiel de connaissances pour un numérique éco-responsable a également été proposé par le GDS EcoInfo pour faciliter la création d'enseignement dans les filières informatiques [83].



BON À SAVOIR

Il faut mentionner que l'écriture de ce cahier a déjà incité de nombreux acteurs à agir dans leur université. Par exemple, La Rochelle Université a décidé de créer une mineure en licence informatique qui s'intitule « citoyen et numérique responsable » qui a pour ambition de former aux impacts du numérique dès la première année de licence. On peut également citer l'Université de Pau et des Pays de l'Adour qui souhaite former elle aussi à l'écoconception.



6.3

CONCEPTION RESPONSABLE DES SERVICES NUMÉRIQUES

La conception responsable (ou écoconception) consiste à concevoir des applications et des services numériques en ayant en tête l'impact écologique dès le départ. Cela peut vouloir dire renoncer à certaines fonctionnalités, ou bien appliquer un ensemble de bonnes pratiques pour le développement logiciel afin de réduire la consommation d'énergie en phase d'usage. C'est une petite révolution dans le domaine de l'ingénierie logicielle, où cette préoccupation vient très souvent loin derrière l'expérience utilisateur, la fiabilité ou encore la sécurité. En effet, l'effet rebond a toujours été prégnant dans l'univers du développement informatique car à mesure que la puissance, le stockage et le débit disponible augmentaient exponentiellement, les développeurs ne s'imposaient plus aucunes limites.

Une des illustrations de ce phénomène *no-limit* concerne les logiciels obèses (néologisme « obésiciels ») qui sont néfastes à double titre : (1) ces logiciels ont accumulé des fonctionnalités inutiles (du gras logiciel) au fil des années et sont en règle générale plus gourmands en énergie, et (2) leurs surpoids poussent les utilisateurs à disposer

d'une configuration matérielle et logicielle (exemple : matériel haut de gamme et système d'exploitation le plus récent) survitaminée pour pouvoir fonctionner. Or on sait que faire durer son matériel le plus longtemps possible est la clé (voir chapitres précédents).

Mais la tendance est en train de s'inverser et la notion de limite revient en force. Les développeurs sont invités à se demander si ce qu'ils conçoivent reste dans les limites du raisonnable, écologiquement mais aussi socialement. Seulement, tout reste à faire ou presque dans ce domaine et cela représente une formidable opportunité d'innovation pour le territoire.

1. LES TRAVAUX INITIÉS EN ÉCOCONCEPTION

Récemment, les efforts d'écoconception se sont concentrés principalement vers les sites web, car les chiffres sont impressionnants. Les besoins d'écoconception pour les applications mobiles reçoivent également une attention croissante. Pour donner une idée de l'ampleur de la

tâche, en 2021 dans le monde, on comptabilise 1,84 milliards de sites web et 5,7 millions d'applications disponibles (3,48 pour Android, et 2,2 pour iOS). Enfin, le calcul scientifique est un domaine qui s'est très vite penché sur la question car même si la base d'utilisateurs est faible, la nature même de ces activités repose sur des applications et services très gourmands en ressources. Ci-dessous, nous listons des initiatives notables, par catégorie :

SITES WEB

- GR491, Le Guide de Référence de Conception Responsable de Services Numériques par l'Institut du Numérique Responsable <https://gr491.isit-europe.org/>
- Checklist opquast <https://checklists.opquast.com/> (Opquast est situé entre autres à Cenon et Bordeaux).

APPS MOBILE

ecoCode : un outil d'analyse automatique de code source pour l'écoconception d'apps Android (Partenariat entre Pau et Bordeaux) [84].

CALCUL SCIENTIFIQUE

- Je code : les bonnes pratiques en éco-conception de service numérique à destination des développeurs de logiciels [85].
- Réduire l'impact environnemental du calcul scientifique par l'optimisation des codes et la formation [86].



BON À SAVOIR

L'Institut du Numérique Responsable (INR), est un think and do tank créé en 2018. Association loi 1901 créée en 2018, elle a son siège social à La Rochelle Université. L'INR a pour objet d'être un lieu de réflexion sur les trois enjeux clés du numérique responsable : la réduction de l'empreinte (économique, sociale et environnementale) du numérique, la capacité du numérique à réduire l'empreinte (économique, sociale et environnementale) de l'humanité, et la création de valeur durable / innovation responsable via le numérique pour réussir l'inclusion de tous. L'INR souhaite devenir un acteur de référence rassemblant entreprises et organisations autour de l'expérimentation et la promotion de bonnes pratiques pour un numérique plus régénérateur*, inclusif et éthique.

De nombreux membres de l'INR sont des organisations néo-aquitaines.

<https://institutnr.org/>

2. UNE OFFRE DE FORMATION QUI VA ÉVOLUER

Avec le projet de loi visant à réduire l'empreinte environnementale du numérique en France, le premier alinéa de l'article L. 642-3 du code de l'éducation est complété par une phrase ainsi rédigée : « Elle vérifie que les formations d'ingénieurs en informatique comportent un module relatif à l'écoconception des services numériques ».

Cette modification n'est évidemment pas passée inaperçue et le milieu de l'enseignement supérieur est en pleine effervescence pour identifier les ressources pédagogiques disponibles et se préparer à faire évoluer l'offre de formation au niveau Bac+5. Certaines formations ont déjà pris les devants, comme la filière « Ingénieurs du Numérique » de Télécom SudParis qui s'est dotée d'une chaire d'enseignement « Ingénierie Numérique et Transition Environnementale » en 2020. Pour beaucoup de cursus ingénieurs et Masters informatique, les modalités restent toutefois à définir : est-ce que l'écoconception est une unité d'enseignement (UE) en soi ou plutôt un complément d'heures à chaque UE classique ? Est-ce que cela donnera naissance à la nouvelle spécialité d'« écoingénieur » informatique ?

En Nouvelle-Aquitaine, l'université de Bordeaux et les écoles d'ingénieurs vont être scrutées de près car l'attente des entreprises du numérique sur le sujet est très forte dans la région. L'Université de Pau et des Pays de l'Adour, à travers son projet phare E2S (*Energy Environment Solutions*), a organisé la première école d'été sur le numérique responsable en juillet dernier pour préparer l'évolution des Masters mention informatique en ce sens.

3. ET LE LIBRE DANS TOUT CELA ?

Le monde du logiciel libre et de l'open source incarne un aspect du numérique responsable, parfois même à son insu. En effet, les utilisateurs sont censés avoir la liberté d'exécuter, copier, distribuer, étudier, modifier et améliorer le logiciel. À l'inverse, les logiciels propriétaires et dont le code source est opaque, cadennassent les développeurs et les utilisateurs finaux. Par exemple, le fait de construire un logiciel en s'appuyant sur une brique qui n'est pas ouverte condamne à suivre de force les évolutions de ladite brique, alors que son ancienne version pouvait encore convenir. C'est ainsi que les propriétaires de tout ou partie de logiciels entraînent, volontairement ou non, des renouvellements prématurés des matériels et logiciels. L'analogie serait celle de l'automobile : si vous ne pouvez pas ouvrir et réparer votre voiture, vous êtes condamnés à suivre les évolutions du marché à pas forcés. Si en revanche, vous pouvez la réparer, rien ne vous empêche de garder votre vieille guimbarde des années 80.



7

Préconisations

Afin que la Nouvelle-Aquitaine s'oriente vers un numérique résilient, les élèves, étudiants, les acteurs des TIC et les politiques doivent être formés à l'impact environnemental du numérique, à ses effets directs et indirects. Plusieurs formations de différentes durées voient progressivement le jour et doivent être déployées plus largement. Un indicateur sur le nombre d'habitants ou d'acteurs du monde économique formés à cette thématique pourrait être mis en place. Ces formations peuvent être accompagnées d'un guide d'éco-gestes permettant de réduire son impact individuel comme notamment limiter le visionnage et le partage de vidéos en ligne ou a minima réduire la résolution vidéo, et faire durer les ordinateurs et smartphones.

De plus, la diffusion de ces connaissances doit s'accompagner d'un état des lieux plus précis de l'impact de la région. Cela implique de collecter des données auprès des entreprises et collectivités, mais également qu'elles respectent la réglementation comme par exemple l'obligation de tenir un registre des déchets, selon le baromètre de l'AGIT [87] seules 15 % des entreprises en France en ont un, une formalité pourtant obligatoire.

Les bilans aujourd'hui demandés aux organisations (notamment GES) ne sont pas complets car ils n'intègrent pas l'ensemble des étapes du cycle de vie et en particulier la construction et la fin de vie des matériels et les possibles effets rebonds. Se limiter principalement à la consommation électrique lors de la phase d'usage n'est donc pas suffisant. Cela encourage le recours à des technologies plus efficaces sur le plan énergétique. Or cette efficacité s'accompagne généralement d'un accroissement de l'utilisation de ces technologies et donc un accroissement global de la consommation.

Ainsi, lors du déploiement de nouvelles technologies, comme par exemple de nouveaux réseaux de télécommunications ou de nouveaux centres de données, l'ensemble des coûts environnementaux associés doit être pris en compte. Cela inclut par exemple la possible fin de vie des anciens réseaux ainsi que les augmentations des usages générés par ces nouvelles infrastructures.

Au niveau régional, une meilleure gestion des déchets nécessite que les organisations communiquent sur leurs achats liés au numérique et sur la fin de vie des appareils. Une meilleure gestion des DEEE est nécessaire pour maximiser le reconditionnement et le recyclage. Là encore, une collecte des données est primordiale. Par ailleurs, la gestion de la fin de vie par des entreprises labellisées doit être imposée à toutes les organisations du territoire. Des initiatives permettant le ré-emploi, la réparation individuelle ou la mutualisation doivent être soutenues.

Pour les entreprises des technologies de l'information et de la communication, il est nécessaire d'intégrer les effets indirects dans la réalisation des bilans GES. Cela pourrait permettre de garantir que la stratégie de l'entreprise est soutenable.

Une des difficultés concerne les mesures des effets indirects. Une solution serait, lors de la conception d'un nouveau produit ou service, d'assurer systématiquement que les usages directs indirects du produit/service proposé et des impacts environnementaux associés soient systématiquement pris en compte.

Comme nous l'avons vu dans ce cahier thématique, réaliser un état des lieux intégrant tous les aspects précédemment cités est compliqué. Énoncer des chiffres précis sur l'impact des TIC est même aujourd'hui impossible au niveau national et encore plus au niveau régional. La mise en place d'indicateurs et de méthodes de mesure d'impact doit donc devenir une priorité.

La prise de conscience des impacts et leurs mesures doivent accompagner le développement d'outils numériques indispensables à la résilience du territoire : outils de mesure et d'anticipation des changements environnementaux, économie d'énergie (effets rebond inclus), recherches médicales, meilleurs réseaux de transport, éducation, etc. Le développement de nouveaux outils et services numériques devrait exclusivement servir cette résilience, la sobriété devant être privilégiée. Pour mettre en place une sobriété numérique [88], il est nécessaire de questionner les usages et les achats, de favoriser la mutualisation des ressources, d'éco-concevoir les projets de développement numérique [85].



Conclusions



La technologie ne permet pas d'évacuer les choix politiques.

Nous devons collectivement créer une autre vision du numérique et ne pas accepter celle que nous donnent en pâture les grandes entreprises ultra-libérales qui collectent les données personnelles et monétisent la vie privée des usagers.

Ce projet doit permettre de répondre à des besoins et non plus à des envies, des besoins universels comme apprendre, comprendre, échanger, se cultiver, se soigner. Il doit également être accessible à tous. Définir ce projet de numérique résilient sera un des meilleurs moyens de préparer le monde de demain.

De nombreux chercheurs, faiseurs, élus ou simples citoyens façonnent déjà un monde digital plus utile et plus responsable dans la préservation de la vie sur notre planète.

Bibliographie

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Grande école du numérique [Consulté entre janvier et août 2021], <https://www.grandecolenumérique.fr/ressources/observatoires-le-numérique-en-region-la-region-nouvelle-aquitaine>.
- [2] Ferreboeuf, H., 2018. *Pour une Sobriété Numérique*, rapport du Shift Project, 2018, 88 p.
- [3] Courboulay, V., 2021. *Vers un numérique responsable. Repensons notre dépendance aux technologies digitales*, Actes Sud, 224 p.
- [4] Spratt D., Dunlop I., 2019. *Existential climate-related security risk: A scenario approach*, Breakthrough - National Centre for Climate Restoration Melbourne, Australia, 10 p. Disponible à l'adresse : https://docs.wixstatic.com/ugd/148cb0_90dc2a2637f348e-dae45943a88da04d4.pdf.
- [5] ÉcoInfo – Pour une informatique Éco-responsable CNRS. [Consulté entre janvier et août 2021] <https://ecoinfo.cnrs.fr/ressources-2/communications/>.
- [6] AREC – Agence régionale d'évaluation environnement et climat. Les chiffres clés énergie et gaz à effet de serre en Nouvelle-Aquitaine – données 2018. [Consulté entre janvier et août 2021] <https://www.arec-nouvelleaquitaine.com/documents/les-chiffres-clés-énergie-et-gaz-a-effet-de-serre-en-nouvelle-aquitaine-données-2018/>.
- [7] ADEME – Bilan GES [Consulté entre janvier et août 2021] - https://www.bilans-ges.ademe.fr/fr/accueil/documentation-gene/index/page/Electricite_reglementaire.
- [8] Insee, [Consulté entre janvier et août 2021]. <https://www.insee.fr/fr/statistiques/4482442>.
- [9] ADEME – ACHATS - les impacts du smartphone. Un téléphone pas si « smart » pour l'environnement, 2017. [Consulté entre janvier et août 2021]. <https://presse.ademe.fr/wp-content/uploads/2017/09/guide-pratique-impacts-smartphone.pdf>.
- [10] HOP - Halte à l'Obsolescence Programmée. [Consulté entre janvier et août 2021]. <https://www.halteobsolescence.org/>.
- [11] ADEME PRESSE - Allonger la durée d'usage des objets : Un gain pour la planète et pour le porte-monnaie. [Consulté entre janvier et août 2021]. <https://presse.ademe.fr/2020/06/allonger-la-duree-dusage-des-objets-un-gain-pour-la-planete-et-pour-le-porte-monnaie.html>.
- [12] Flipo F., Gossart C., 2009. Infrastructure numérique et environnement, Terminal, 103-104, mis en ligne le 01 juin 2018 [consulté le 29 octobre 2021]. <http://journals.openedition.org/terminal/3093>.
- [13] ADEME, 2020. Étude sur la caractérisation des effets rebonds induits par le télétravail – Rapport final, 47 p.
- [14] Falch, M., 2012. *Environmental Impact of ICT on the Transport Sector*. Telecommunication Economics. A. Hadjiantonis et B. Stiller (Eds.), Springer Berlin Heidelberg. 7216, pp. 126-137.
- [15] Pôle éco-conception, analyse du cycle de vie. <https://www.eco-conception.fr/static/analyse-du-cycle-de-vie-acv.html>.
- [16] Choi B.-C., Shin H.-S., Lee S.-Y., Hur T., 2006. Life Cycle Assessment of a Personal Computer and its Effective Recycling Rate, *International Journal of Life*, 11, pp. 122-128.
- [17] Bihouix P., de Guillebon B., 2010. *Quel futur pour les métaux ?*, EDP Sciences, 300 p.
- [18] ADEME, 2021. Équipements électriques et électroniques : données 2019. Rapport annuel de la filière. <https://librairie.ademe.fr/dechets-economie-circulaire/4183-equipements-electriques-et-electroniques-donnees-2019.html>.
- [19] Greenit.fr. iNUM : impacts environnementaux du numérique en France. [Consulté entre janvier et août 2021]. <https://www.greenit.fr/impacts-environnementaux-du-numerique-en-france/>.
- [20] Livre blanc - les indicateurs de performance énergétique et environnementale des data centers. [Consulté entre janvier et août 2021]. <https://www.apl-datacenter.com/wp-content/uploads/2017/07/livre-blanc-indicateurs-performance-énergétique-environnementale-des-data-centers.pdf>.
- [21] Jonas N., 2018. How to stop data centres from gobbling up the world's electricity. *Nature*, 561, pp. 163-166.
- [22] Masanet E., Shehabi A., Lei N., Smith S., Koomey J., 2000. Recalibrating global data center energy-use estimates, *Science*, 367, 6481, pp. 984-986. <https://doi.org/10.1126/science.aba3758>.
- [23] Siècle Digital, 2021. Quel impact environnemental pour le Cloud ? [Consulté en août 2021]. <https://siecle-digital.fr/2021/08/19/quel-impact-environnemental-pour-le-cloud/>.
- [24] Stratosfair, Votre datacenter à impact positif [Consulté entre janvier et août 2021]. <https://stratosfair.com>.
- [25] Data campus, hébergement durable. [Consulté entre janvier et août 2021]. <https://datacampus.fr>.
- [26] Arcep, 2019. *Réseaux du futur. Note N° 5 : L'empreinte carbone du numérique*. 15 p. Disponible sur : https://www.arcep.fr/uploads/tx_gspublication/reseaux-du-futur-empreinte-carbone-numerique-juillet2019.pdf.
- [27] Arcep, 2021. *Observatoire des marchés de communications électroniques. Services Mobiles*. 18 p. Disponible sur : https://www.arcep.fr/fileadmin/cru-1627977896/user_upload/obs-mobile-T2-2021_050821.pdf.
- [28] Ariase. [Consulté entre janvier et août 2021]. <https://www.ariase.com/couverture/nouvelle-aquitaine>.
- [29] European commission, 2017. *WEEE compliance promotion exercise*. Final report. 364 p.
- [30] Ministère de la transition écologique, 2021. La loi anti-gaspillage pour une économie circulaire. <https://www.ecologie.gouv.fr/loi-anti-gaspillage-economie-circulaire-1>.
- [31] Chaussat J.-C., Bordage F., 216. *Réemploi. Étude d'impacts*. Le Club green IT. 12 p.

- [32] Makov T., Font Vivanco D., 2018. Does the circular economy grow the pie? The case of rebound effects from smartphone reuse. *Frontiers in Energy Research*, 6, 39.
- [33] Insee, 2019. Démographie des entreprises des TCSI. <https://www.insee.fr/fr/statistiques/4238513?sommaire=4238635>.
- [34] Région Nouvelle-Aquitaine. *Feuille de route. Soutien à l'économie numérique 2018 – 2021*. 36 p.
- [35] ACSEL, 2020. Baromètre Croissance et Digital. <https://www.acsel.eu/croissance-et-digital/>.
- [36] ADEME, 2015. Évaluation de l'impact du télétravail et des tiers-lieux sur la réduction des consommations d'énergie et des émissions de gaz à effet de serre et sur l'organisation des entreprises.
- [37] O'Brien, W., Aliabadi, F.Y., 2020. Does telecommuting save energy? A critical review of quantitative studies and their research methods. *Energy and Buildings*, 225, 110298.
- [38] Ceser Nouvelle-Aquitaine, 2020. *Nouvelle-Aquitaine : Quel télétravail pour quelle société ?*, 152 p.
- [39] Anact Aract, 2021. *Consultation : Télétravail de crise en 2021 : quelles évolutions ? Quels impacts ?*, 48 p.
- [40] Observ'ER - le Journal de l'Éolien, [Consulté entre janvier et août 2021]. <https://www.journal-eolien.org>.
- [41] La Rochelle université, Smat campus. <https://www.univ-larochelle.fr/luniversite/grands-projets/smart-campus/>.
- [42] Robank Hood, L'histoire de l'Intelligence Artificielle, [Consulté entre janvier et août 2021]. <https://robankhood.com/histoire-intelligence-artificielle/>.
- [43] J. Devlin, M.-W. Chang, K. Lee, K. Toutanova, 2019. BERT: Pre-training of Deep Bidirectional Transformers for Language Understanding, *Conference of the North American Chapter of the Association for Computational Linguistics: Human Language Technologies*, pp. 4171-4186.
- [44] The conversation. La recherche en IA est très énergivore. [Consulté entre janvier et août 2021]. <https://theconversation.com/la-recherche-en-ia-est-tres-energivore-voici-pourquoi-152128>.
- [45] ScanR - [Consulté entre janvier et août 2021]. <https://scanr.enseignementsup-recherche.gouv.fr/recherche/all?query=intelligence%20artificielle>.
- [46] Alliancy, 2020. France Digitale dévoile sa cartographie des start-up de l'IA en France. [Consulté entre janvier et août 2021]. <https://www.alliancy.fr/france-digitale-cartographie-startups-ia-france>.
- [47] Les Échos. Les start-up de l'intelligence artificielle portées par les services. [Consulté entre janvier et août 2021]. <https://www.lesechos.fr/tech-medias/intelligence-artificielle/les-start-up-de-lintelligence-artificielle-portees-par-les-services-1265811>.
- [48] La Tribune, Bordeaux. Intelligence artificielle : la Nouvelle-Aquitaine confirme qu'elle est à l'avant-garde. [Consulté entre janvier et août 2021]. <https://objectif-aquitaine.latribune.fr/innovation/2020-03-03/intelligence-artificielle-la-nouvelle-aquitaine-confirme-quelle-est-a-lavant-garde-841073.html>.
- [49] Université de Bordeaux. Intelligence artificielle. [Consulté entre janvier et août 2021]. <https://www.u-bordeaux.fr/Universite/Strategie/Initiatives-transverses/Intelligence-artificielle>.
- [50] NAIA – Nouvelle-Aquitaine Intelligence Artificielle. [Consulté entre janvier et août 2021]. <https://www.adi-na.fr/events/naia-nouvelle-aquitaine-intelligence-artificielle>.
- [51] Plate-Forme Intelligence Artificielle, Bordeaux, France, 28 Juin - 2 Juillet 2021. [Consulté entre janvier et août 2021]. <https://pfia2021.fr>.
- [52] Ai4 Industry. [Consulté entre janvier et août 2021]. <https://www.ai4industry.fr>.
- [53] Hilty L.M., Hercheu M.D., 2010. ICT and sustainable development. In: *What kind of information society?*, Governance, virtuality, surveillance, sustainability, resilience, pp 227-235.
- [54] Ligozat A.L., 2021. Impact environnemental de l'IA, EcoInfo, [Consulté en juin 2021] <https://ecoinfo.cnrs.fr/2019/10/01/impact-environnemental-de-lia/>.
- [55] Strubell E., Ganesh A., McCallum A., 2019. Energy and policy considerations for deep learning in NLP. arXiv:1906.02243v1.
- [56] Patterson D., Gonzalez J., Le Q., Liang C., Munguia L.-M., Rothchild D., So D., Texier M., Dean J., 2021. Carbon emissions and large neural network training, arXiv:2104.10350v3.
- [57] Lacoste A., Luccioni A., Schmidt V., Dandres T., 2019. Quantifying the Carbon Emissions of Machine Learning, arXiv:1910.09700v2.
- [58] Berthoud, F., 2020. Calculer l'empreinte carbone d'1 heure de calcul sur un cœur !, EcoInfo, [Consulté entre janvier et août 2021]. <https://ecoinfo.cnrs.fr/2020/04/24/calculer-lempreinte-carbone-d1-heure-de-calcul-sur-un-coeur/>.
- [59] Thompson N.C., Greenewald K., Lee K., Manso G.F., 2020. The Computational Limits of Deep Learning, arXiv:2007.05558v1.
- [60] [59] Lasse F. Wolff A., Kanding B., Selvan R., 2020. Carbontracker: Tracking and Predicting the Carbon Footprint of Training Deep Learning Models, arXiv:2007.03051v1.
- [61] Henderson P., Hu J., Romoff J., Brunskill E., Jurafsky D., Pineau J., 2020. Towards the Systematic Reporting of the Energy and Carbon Footprints of Machine Learning. arXiv:2002.05651v1.
- [62] OpenAI Codex, AI and Compute, [Consulté entre janvier et août 2021]. <https://openai.com/blog/ai-and-compute/>.
- [63] Schwartz R., Dodge J., Smith N.A., Etzioni O., 2019. Green IA. arXiv:1907.10597v3.

- [64] Green and sustainable artificial intelligence, [Consulté entre janvier et août 2021]. <https://greenai.inria.fr>.
- [65] Sze V., Chen Y.-H., Yang T.-J., Emer J., 2017. Efficient Processing of Deep Neural Networks: A Tutorial and Survey. arXiv:1703.09039v2.
- [66] Livre Blanc : IA et protection de l'environnement. Open studio, 140 p. <https://www.openstudio.fr/publications/intelligence-artificielle-et-protection-de-lenvironnement-livre-blanc/>.
- [67] ActualA, Retour sur les 6 start-ups accélérées par l'AI Factory for Green Energy de Schneider Electric et Microsoft, [Consulté entre janvier et août 2021]. <https://www.actuia.com/actualite/retour-sur-les-6-start-ups-accelerees-par-lai-factory-for-green-energy-de-schneider-electric-et-microsoft/>.
- [68] News Centre Microsoft France. Microsoft et Schneider Electric lancent AI for Green Energy : un programme start-up pour accélérer la transformation du secteur de l'Énergie en Europe avec l'Intelligence Artificielle, [Consulté entre janvier et août 2021]. <https://news.microsoft.com/fr-fr/2019/07/04/ai-for-green-energy/>.
- [69] Qiu X., Parcollet T., Fernandez-Marques J., Porto Buarque de Gusmao P., Beutel D.J., Topal T., Mathur A., Lane N.D., 2021. A first look into the carbon footprint of federated learning. arXiv:2102.07627v3.
- [70] Dhawale C., Dhawale K., Dubey R., 2020. A Review on Deep Learning Applications, In: *Deep Learning Techniques and Optimization Strategies in Big Data Analytics*, 21-31, 2020. <https://doi.org/10.4018/978-1-7998-1192-3.ch002>.
- [71] MAIF, Que va changer l'intelligence artificielle. [Consulté entre janvier et août 2021]. <https://entreprise.maif.fr/actualites/conference-intelligence-artificielle>.
- [72] La revue du digital. L'IA aide à évaluer les sinistres auto chez Maaf, MMA et GMF, [Consulté entre janvier et août 2021]. <https://www.larevuedudigital.com/lia-aide-a-evaluer-les-sinistres-auto-chez-maaf-mma-et-gmf/>.
- [73] Alliancy, Les assureurs Maaf et Macif testent l'IA pour le service client, [Consulté entre janvier et août 2021]. <https://www.alliancy.fr/assureurs-maaf-macif-testent-ia-pour-service-client>.
- [74] Boudon, R., 2003. *Raison, bonnes raisons. Philosophe en sciences sociales*, PUF, 192 p.
- [75] Boltanski L., Chiapello E., 1999. *Le nouvel esprit du capitalisme*, Paris Gallimard, 848 p.
- [76] Boyer R., 2004. *Théorie de la régulation*, Tome 1, Les fondamentaux, Paris La Découverte, 124 p.
- [77] UVED, Les Focus de l'UVED, Focus Spécial « Numérique & Environnement » Janvier 2021, 9 p. https://www.ued.fr/fileadmin/user_upload/Documents/pdf/Focus/2021-01_Focus_UVED_Special_Numerique.pdf.
- [78] Université de Bordeaux, Conférence-débat : Écologie et numérique : comprendre et agir, [Consulté entre janvier et août 2021]. <https://www.u-bordeaux.fr/Evenements/De-la-vie-de-campus/Conference-debat-Ecologie-et-numerique-comprendre-et-agir>.
- [79] La Fresque du Numérique, [Consulté entre janvier et août 2021]. <https://www.fresquedunumerique.org/>.
- [80] La fresque du climat, [Consulté entre janvier et août 2021]. <https://fresqueduclimat.org/>.
- [81] Institut du Numérique Responsable, Académie NR, [Consulté entre janvier et août 2021]. <https://www.academie-nr.org/>.
- [82] EcoInfo, Formations abordant les aspects environnementaux du numérique, [Consulté entre janvier et août 2021]. <https://ecoinfo.cnrs.fr/ressources-2/formations/formations-abordant-les-aspects-environnementaux-du-numerique/>.
- [83] Boulet P., Bouveret S., Bugeau A., Frenoux E., Lefevre J., Ligozat A.-L., Marquet K., Marquet Ph., Michel O., Ridoux O., 2020. Référentiel de connaissances pour un numérique éco-responsable. [Travaux universitaires] EcoInfo, 20 p., [Consulté entre janvier et août 2021]. <https://ecoinfo.cnrs.fr/2020/09/30/referentiel-de-connaissances-pour-un-numerique-eco-responsable/>.
- [84] ecoCode: How green is your app ? [Consulté en Novembre 2021] <https://www.ecocode.io/>.
- [85] Bonamy C., Boudinet C., Bourguès L., Dassas K., Lefèvre L., Vivat F., 2020. Je code : les bonnes pratiques en éco-conception de service numérique à destination des développeurs de logiciels, hal-03009741v2.
- [86] Augier, P., 2021. Réduire l'impact environnemental du calcul scientifique par l'optimisation des codes et la formation. <https://www.insis.cnrs.fr/fr/cnrsinfo/reduire-limpact-environnemental-du-calcul-scientifique-par-loptimisation-des-codes-et-la>.
- [87] AGIT, Alliance green IT, 2020. *Baromètre des pratiques green IT des entreprises en France*, 82 p.
- [88] Mallarino D., 2021 Agir vers la sobriété numérique, EcoInfo, [Consulté entre janvier et août 2021]. <https://ecoinfo.cnrs.fr/2021/03/01/agir-vers-la-sobriete-numerique/>.

Contributeurs et relecteurs



Bellet Quentin
EcoLogic



Cabaret Yohana
AcclimaTerra



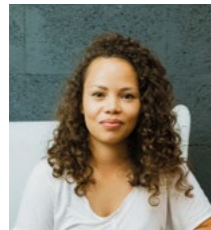
De Guillebon Benoît
APESA, CHEDD



Le Goaër Olivier
UPPA, LIUPPA



Pinier Arnaud
Délégation numérique -
Région Nouvelle-Aquitaine



Bigot Cassandra
Doctorante - Chargée de
mission Numérique
Responsable - SPN.



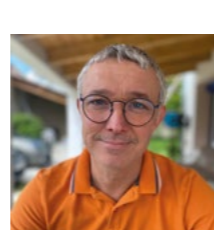
Ciocan Adrian
MAIF



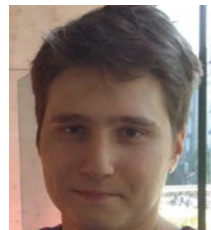
Duthil Benjamin
EIGSI La Rochelle



Maisonneuve Sarah
Les ateliers du bocage



Revel Arnaud
La Rochelle Université,
laboratoire L3I



Bourgeois Guillaume
Doctorant - La Rochelle
Université



Courboulay Vincent
La Rochelle Université



Guennebaud Gael
Inria, Université de
Bordeaux



Mons Alexis
Aliptic



Ribault Romuald
AGIT (Alliance Green IT)



Bugeau Aurélie
Université de Bordeaux,
LaBRI, CNRS



Degand Ludovic
EcoLogic



Guillaume Jean-Loup
La Rochelle Université



Pierre Maud
INRAe

NUMÉRIQUE ET ENVIRONNEMENT

Cahier thématique Acclimaterra n°2

Citation : AcclimaTerra, Courboulay V. (coord).
Numérique et environnement – Cahier N° 2.
Éditions AcclimaTerra, 2021, 52 p.

ISBN : 978-2-9574665-2-8

Format : 21 x 29,7 cm

Illustrations : adobe stock, freepik, pexel

Design et mise en page :

Iti Communication
www.iti-communication.com / 05 55 04 20 19

Impression :

Imprimerie Laplante
www.laplante.fr / 05 56 97 15 05

Imprimé sur du papier recyclé fabriqué en Dordogne



RÉGION
**Nouvelle-
Aquitaine**

Agissons aujourd'hui, **réinventons** demain

