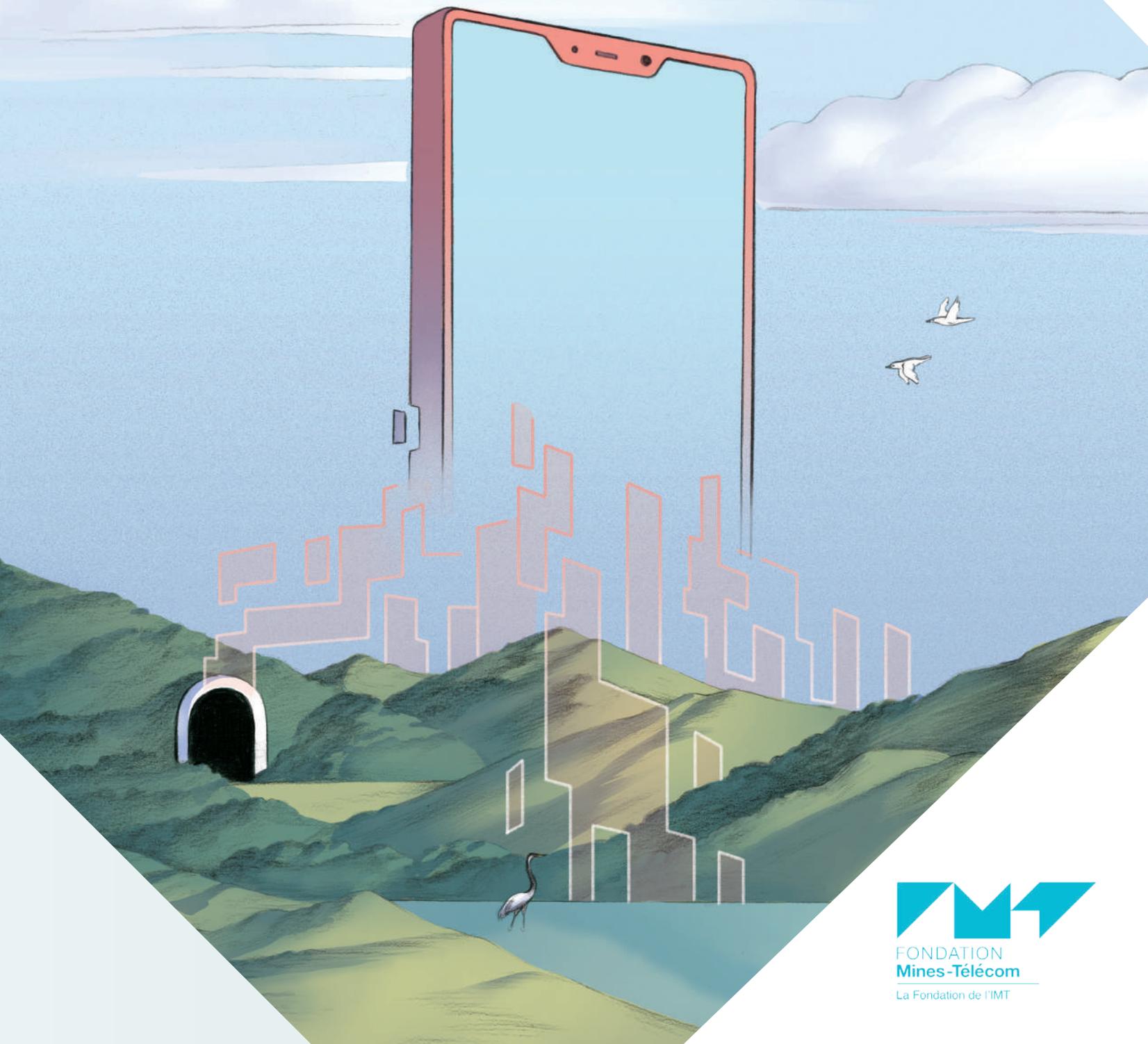
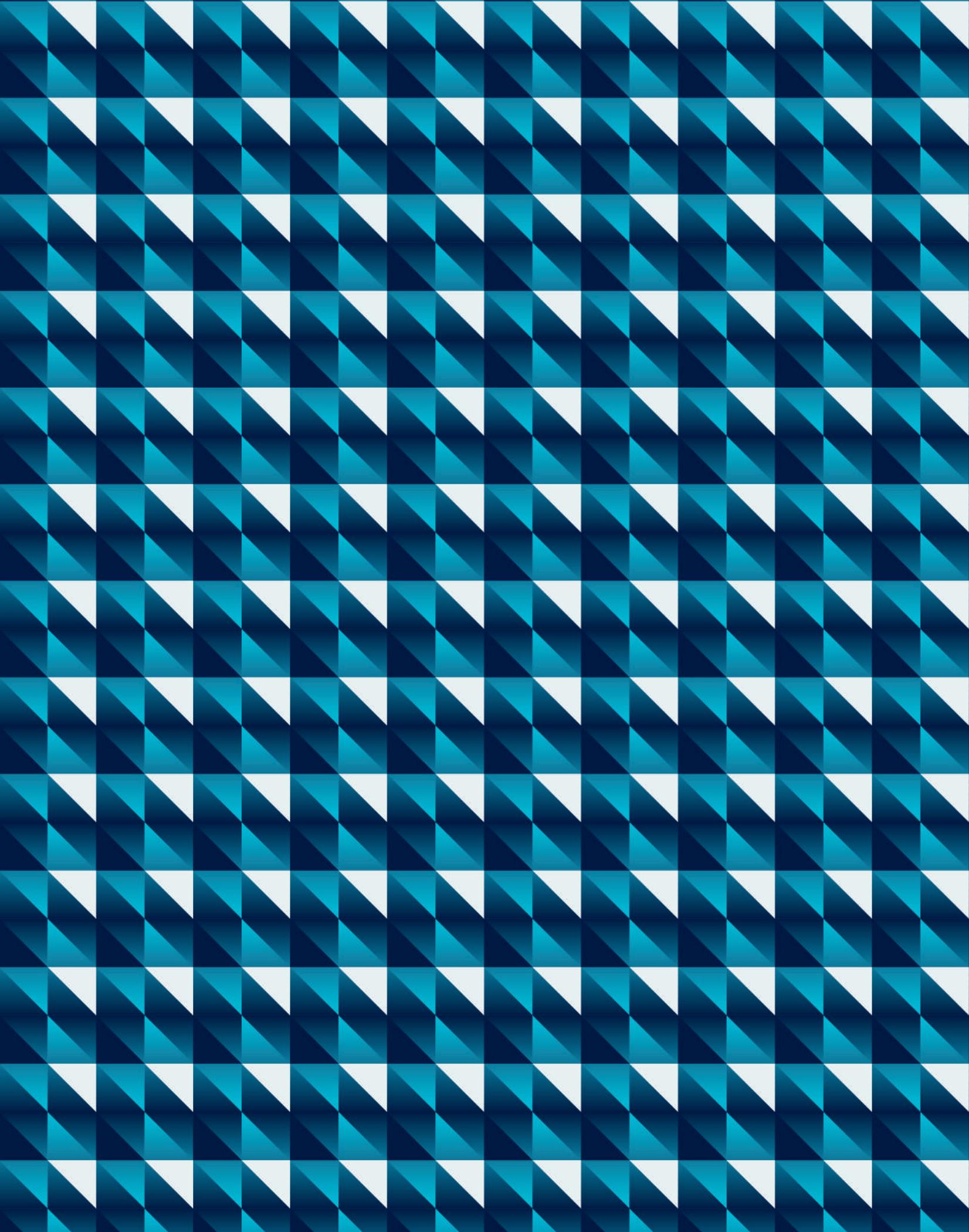
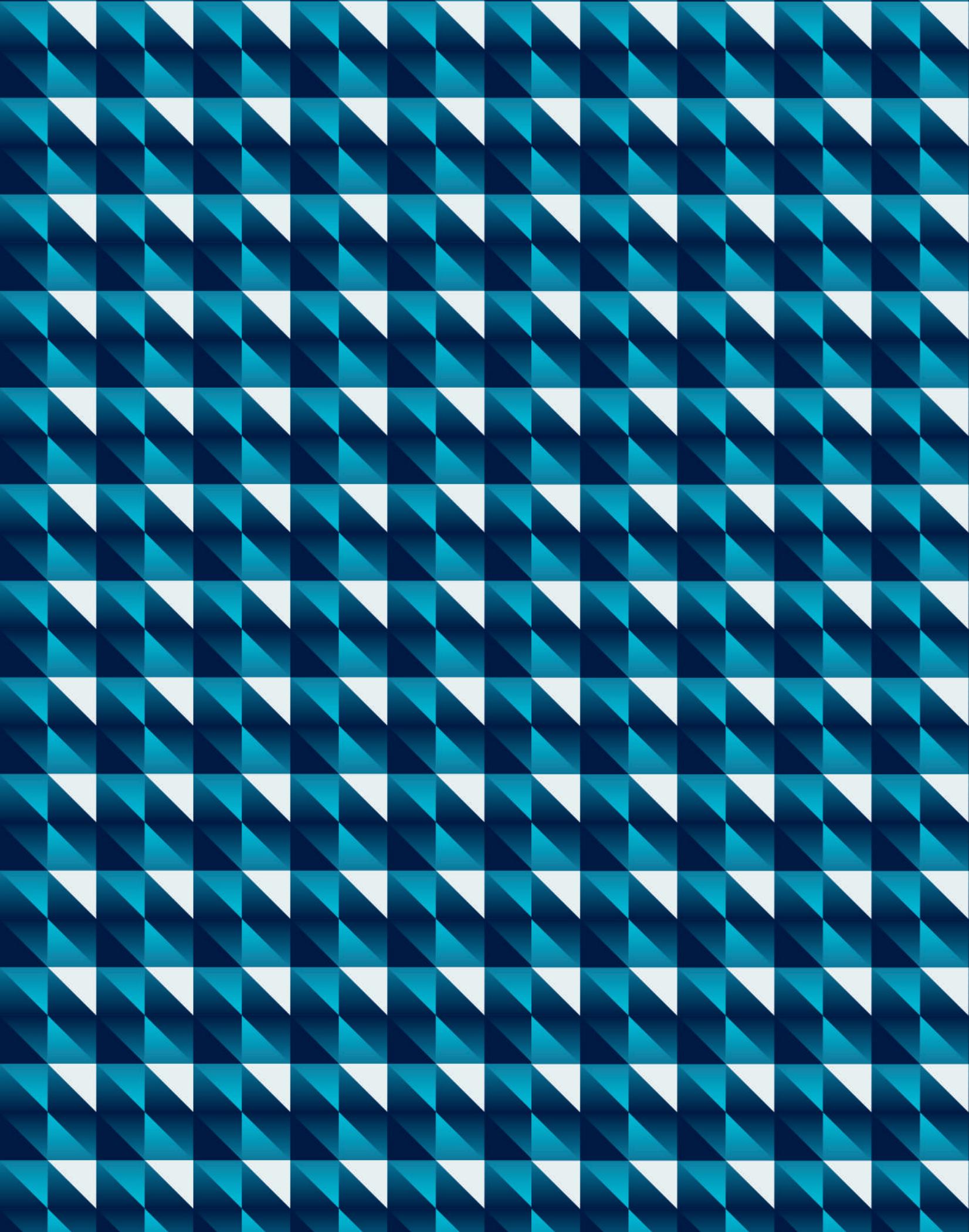
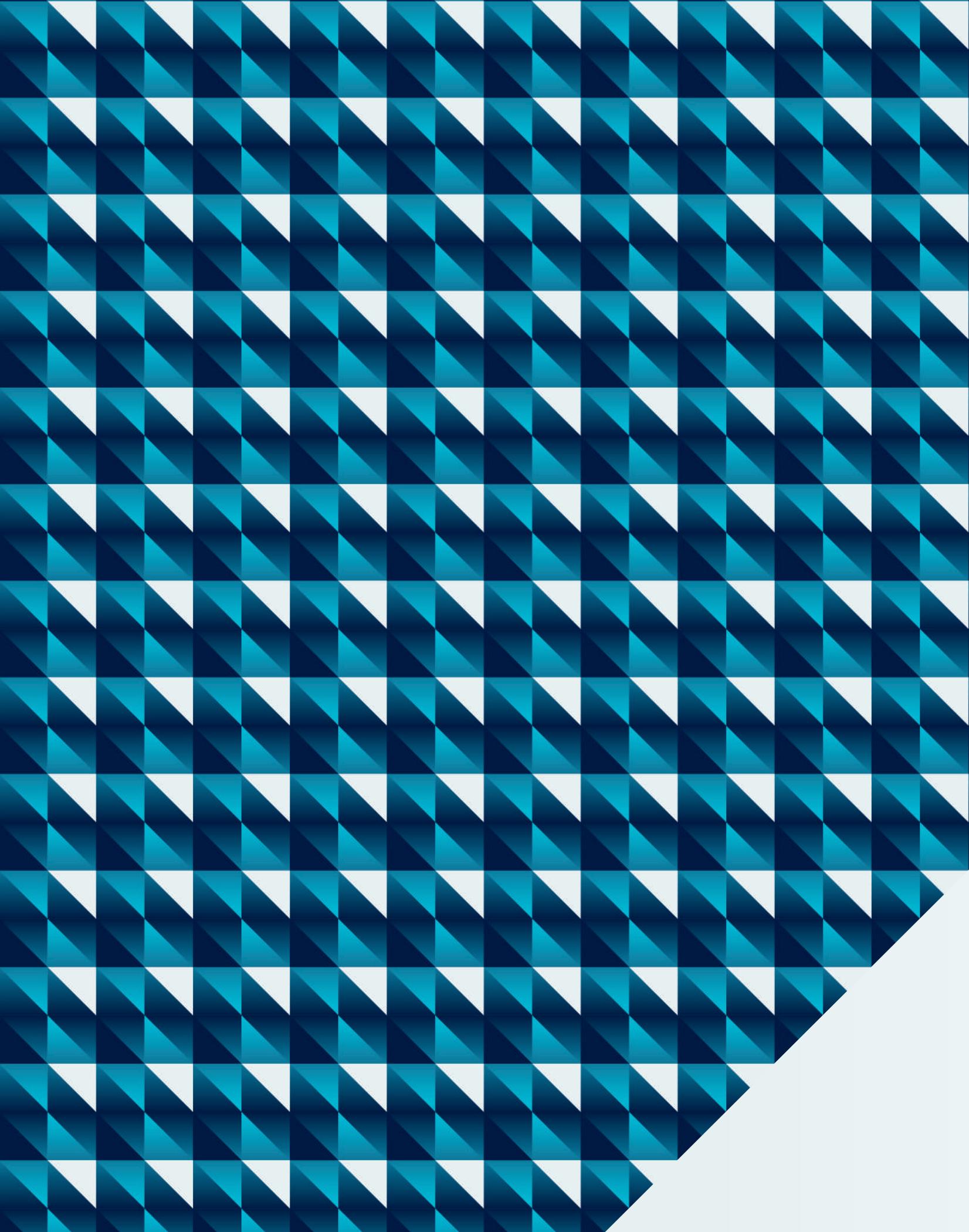


# NUMÉRIQUE : ENJEUX INDUSTRIELS ET IMPÉRATIFS ÉCOLOGIQUES









# ÉDITO

---

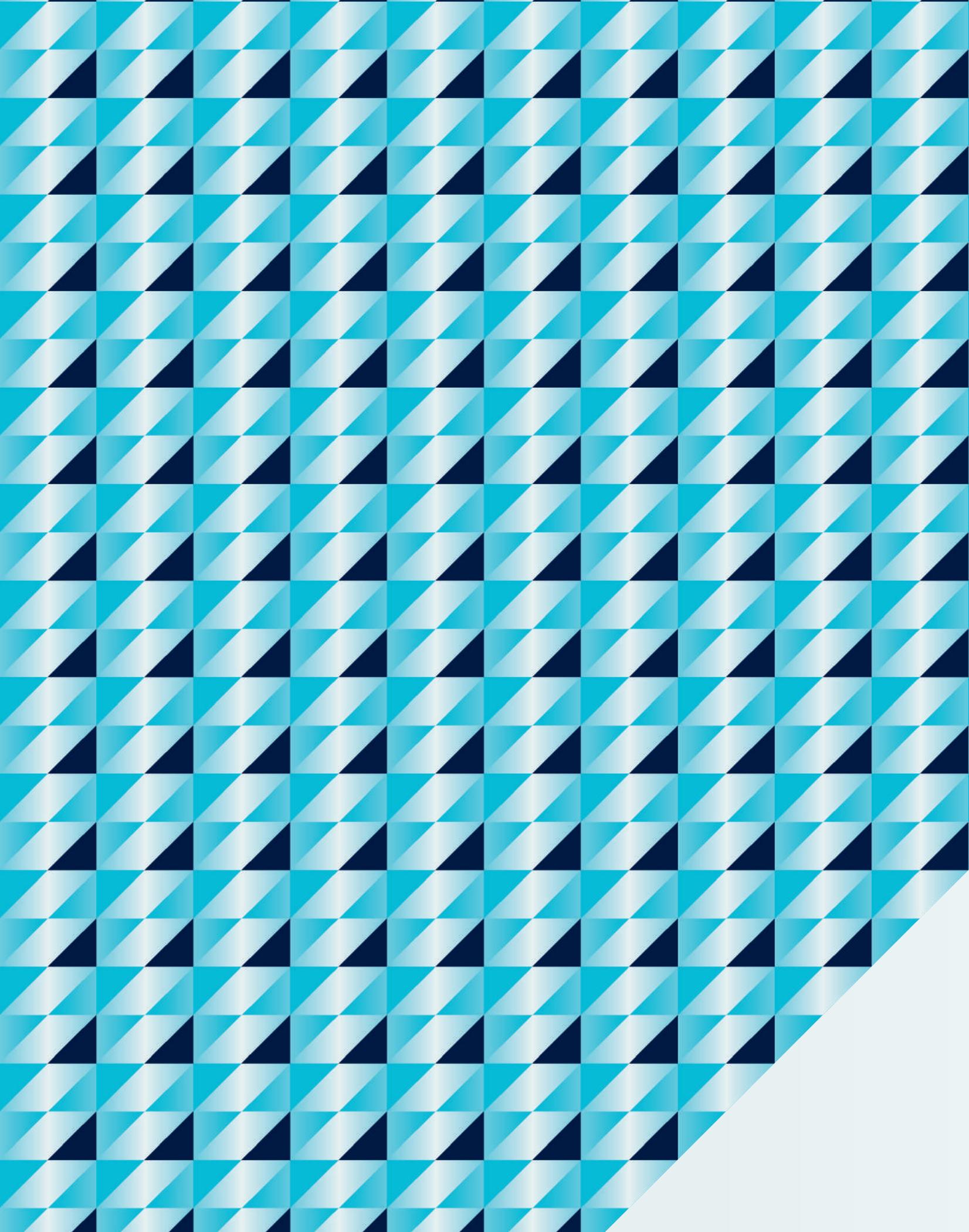
Odile Gauthier,  
directrice générale de l'IMT.

---



Par l'histoire séculaire de ses écoles d'ingénieurs et de management, proches de l'industrie française depuis plus de 200 ans pour certaines, l'Institut Mines-Télécom (IMT) est intimement lié aux grandes évolutions techniques et à leurs implications économiques et sociales. À l'aube de cette nouvelle décennie, l'essor des nouvelles technologies et la place du numérique sont toujours croissants quand, parallèlement, les préoccupations et réflexions écologiques de notre société deviennent centrales. Il nous apparaissait alors naturel d'interroger la compatibilité entre les transitions numérique et environnementale. Entretemps, la crise sanitaire aura accéléré le développement des usages digitaux professionnels et personnels, et mis encore plus en lumière l'importance de relever les défis écologiques posés par un numérique vu comme un des éléments de résilience. Grâce au soutien de la Fondation Mines-Télécom, l'IMT a donc rassemblé un réseau d'experts, issus de ses écoles et de ses partenaires industriels et académiques, afin de produire ce 12e cahier de veille sur l'impact environnemental du numérique.

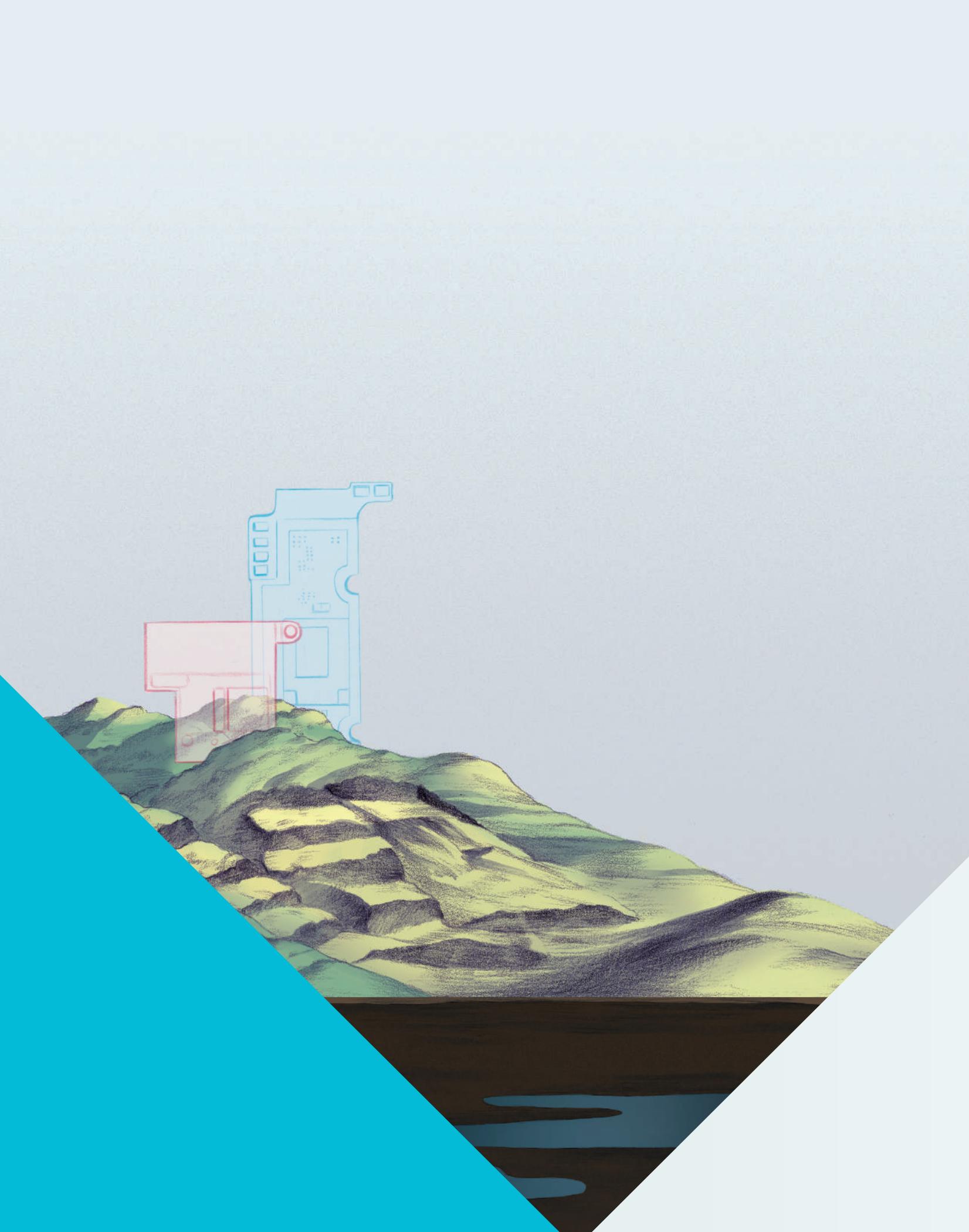
Au fil de ce cahier, nous proposons au lecteur de plonger dans les problématiques posées à l'intersection des impératifs écologiques d'une part, et des contraintes socio-économiques et techniques rencontrées par les entreprises d'autre part. Sous la plume de nos journalistes scientifiques, nos experts accompagnent le lecteur dans la compréhension des maillons de la chaîne de vie des produits numériques en éclairant les enjeux spécifiques des phases d'extraction de matière première, de conception, d'utilisation, et de recyclage. Ils nous aident à comprendre comment adapter le secteur numérique dans un contexte d'urgence climatique, et comment sensibiliser les parties prenantes pour l'avenir. Bien que complexe et nécessitant des efforts importants, la conciliation du développement du numérique et du développement durable semble alors à portée de main.



# SOMMAIRE

---

<b>ÉDITO</b>	<b>3</b>
<b>DU <i>HARDWARE</i> DANS LA TERRE</b>	<b>7</b>
LA MINE, UN OBJET AUX MULTIPLES FACETTES	8
L'EXTRACTION, UN IMPACT HORS LES MURS	15
ALLIER EXTRACTION ET PROTECTION DE L'ENVIRONNEMENT PAR LE DROIT	19
<b>LA RESPONSABILITÉ AU CŒUR DES ENTREPRISES</b>	<b>25</b>
SANS VISIBILITÉ, PAS DE MESURE D'IMPACT	26
L'ÉCOCONCEPTION, INTERSECTION DES INNOVATIONS RESPONSABLE ET SOCIALE	29
SENSIBILISER POUR L'AVENIR	34
<b>L'ÉNERGIE, CARBURANT DE L'INDUSTRIE NUMÉRIQUE</b>	<b>39</b>
<i>DATA CENTERS</i> , CENTRES DE L'ATTENTION	41
RÉSEAUX NOUVELLE GÉNÉRATION, NOUVEAUX DÉFIS ÉNERGÉTIQUES	46
DANS NOS POCHEs, LA CONSOMMATION TERMINALE DU NUMÉRIQUE	51
<i>MACHINE LEARNING</i> : CHANGER D'APPROCHE POUR ÉCONOMISER L'ÉNERGIE	55
<b>L'USAGE, ET APRÈS ?</b>	<b>59</b>
RECYCLER L'IDÉE DU RECYCLAGE ?	61
OFFRIR UNE DEUXIÈME VIE AUX PRODUITS NUMÉRIQUES	64
GÉRER LES DÉCHETS ÉLECTRONIQUES : UN PROBLÈME GLOBAL	68
DU RÉALISME DE LA SOBRIÉTÉ NUMÉRIQUE	72
<b>LEXIQUE</b>	<b>76</b>



# I

## DU HARDWARE DANS LA TERRE

---

La question minière devient de plus en plus importante à mesure que les besoins du numérique en matières premières augmentent. Les projets d'ouverture de mines fleurissent dans des zones qui souhaitent retrouver de la souveraineté sur la production de métaux critiques. Un essor industriel qui se couple avec des préoccupations écologiques grandissantes au sein de la société. Les questions soulevées sur l'empreinte de l'extraction minière deviennent alors terriblement complexes, car elles mêlent intérêts économiques, politiques, et scientifiques.

# 1

LA MINE, UN OBJET  
AUX MULTIPLES  
FACETTES

---

ALLIER EXTRACTION  
ET ENVIRONNEMENT  
PAR LE DROIT

---

# 3

# 2

L'EXTRACTION,  
UN IMPACT  
HORS LES MURS

---

# LA MINE, UN OBJET AUX MULTIPLES FACETTES

---

**Chaque site minier est unique, car il dépend de paramètres propres à son territoire. Le minerai exploité, les moyens économiques déployés, ou encore les politiques appliquées sont autant de variables qui définissent la mine et son impact environnemental.**

2020 : les smartphones ne poussent toujours pas sur des arbres. Pour les fabriquer, il faut encore creuser la terre, et à plusieurs endroits du globe. Exposés quotidiennement aux designs épurés de nos écrans, nous en oublions aisément leur origine résolument minérale. Pourtant, la mine est le premier chaînon du cycle de vie d'un produit électronique. Sans l'extraction de matière première, pas de Netflix, pas de livraison Amazon Prime, pas de chauffeur Uber. **Terres rares**, tantale, gallium, lithium, aluminium, or, cuivre... l'anatomie d'un smartphone ou d'un ordinateur révèle une quarantaine de métaux différents dans ses composants. À l'origine, tous ces éléments sont présents dans de la roche qu'il faut extraire du sol.

Mais à quoi ressemble une mine exactement ? « *Tout dépend de la ressource exploitée, de l'endroit où elle se situe, des investisseurs...*, avertit Jean-Alain Fleurisson, chercheur en géosciences à Mines ParisTech. *La mine recherche un optimum d'efficacité pour un coût donné* », et cet optimum prend en compte de nombreux paramètres. Les aspects réglementaires, la topologie du terrain, ou encore les considérations politiques et économiques à l'échelle d'un territoire font que pour un

même minerai, deux exploitations pourront avoir des impacts environnementaux bien différents. « *Ce qui est certain, c'est qu'aucune mine n'est neutre*, souligne Yann Gunzburger, chercheur en géosciences à Mines Nancy. *Parce que son rôle est d'extraire de la matière, une mine ne peut pas être durable. Tout ce qu'il est possible de faire, c'est de minimiser son impact.* »

### Ciel ouvert ou souterrain ?

Dans les pays à faible réglementation, sans opposition de la population, les mines à ciel ouvert peuvent facilement voir le jour. Dans ces cas-là, l'emprise de la mine sur le territoire est élevée. Le principe est relativement simple : l'exploitation extrait la matière en surface pour atteindre le gisement situé en-dessous. À mesure que la mine descend en profondeur, elle doit s'étendre en largeur pour stabiliser le terrain, augmentant le volume de roche extraite ne contenant pas le minerai — on parle de **stériles miniers**. Cette matière inutile est généralement stockée à proximité de la mine, créant de petits collines artificielles, et augmentant la transformation visuelle du paysage.



Bassins d'évaporation de la mine de lithium pilote dans le salar d'Uyuni, en Bolivie. Situé à 3 700 m d'altitude, il s'agit du désert de sel le plus vaste du monde avec une superficie de plus de 10 000 km<sup>2</sup>. La mine de lithium occupe 17 lignes de 10 bassins, soit une dimension de 1 km de long par 500 m de large. Photo : Cédric Gerbehaye

À l'inverse, dans les pays à forte contrainte réglementaire, impliquant des investisseurs soucieux de leur image — et donc du risque — la minimisation de l'impact peut atteindre un degré de performance élevé. En Europe ou en Amérique du Nord, certaines mines hautement technologiques sont ainsi quasiment invisibles. C'est le cas de la mine de tungstène de Mitterstill, en Autriche. Considérée comme une installation à l'état de l'art, elle est souvent utilisée comme illustration d'une exploitation exemplaire. Mine souterraine, le site d'extraction n'est trahi de l'extérieur que par l'entrée d'un tunnel dans la montagne.

Les avantages ne sont pas que visuels, ils sont aussi productifs. La mine souterraine ne racle pas le sol en surface pour atteindre le gisement, et elle n'a pas besoin de s'étendre en largeur. Le rendement de matière utile en regard de la matière extraite est donc meilleur, et génère ainsi moins de stériles miniers à gérer. « Les mines à ciel ouvert obtiennent en moyenne 350 kilogrammes de minerai pour

1 tonne de roche extraite, détaille Philippe Marion, professeur émérite en géosciences à l'École nationale supérieure de géologie, université de Lorraine. Dans le cas d'une mine souterraine, c'est plutôt 900 kilogrammes de minerai par tonne de roche extraite. La logique est d'exploiter le minimum de roche nécessaire pour en retirer la substance économique. »

**« Aucune mine n'est neutre. Tout ce que nous pouvons faire, c'est minimiser son impact. »**

De plus, « la production souterraine a des impacts moindres que l'extraction en surface, indique Jean-Alain Fleurisson. Les risques concernent la gestion des eaux souterraines, les affaiblissements du terrain et la sismicité résiduelle. » Ces deux derniers paramètres

sont bien gérés dans des installations disposant de moyens technologiques avancés. L'utilisation de lourdes modélisations numériques permet notamment de sélectionner avec précision les zones du terrain les plus

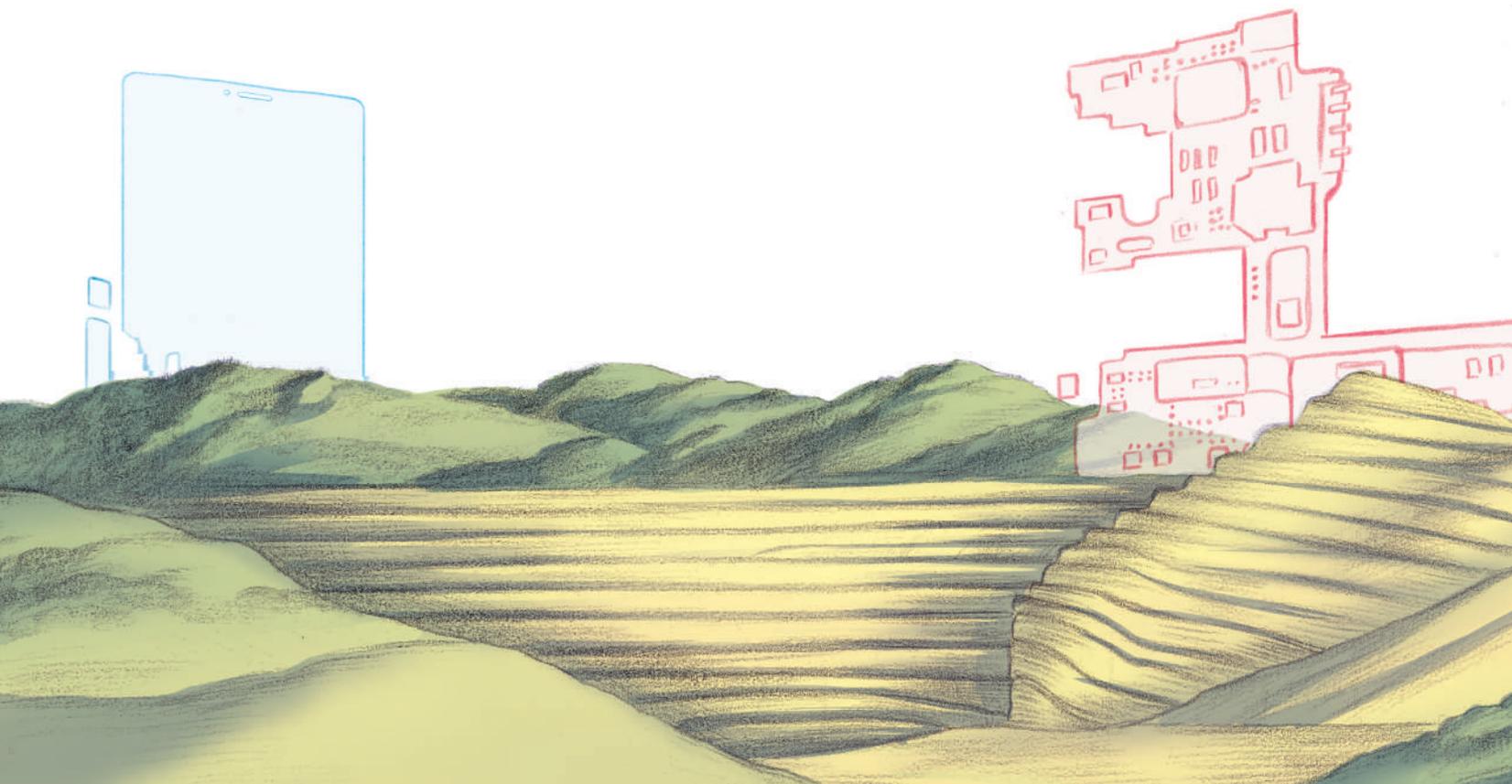
## « La mine du futur est aussi sociétale. »

robustes. La question de l'eau souterraine est quant à elle plus délicate. En mettant le minerai au contact de l'air, la roche s'oxyde et donne plusieurs produits qui peuvent contaminer les eaux. « *C'est le cas de l'acide sulfurique, qui donne lieu à un phénomène appelé le drainage minier acide* », pointe Philippe Marion. Il existe des bonnes pratiques consistant à gérer les eaux de ruissellement en essayant de les séparer des circuits d'eau souterrains, ou à imperméabiliser les quartiers sensibles de la mine. Malgré ces précautions, « *très peu de sites échappent à ces phénomènes, constate le chercheur. Il est quasiment impossible d'imperméabiliser toutes les zones qui en*

*ont besoin : il faut se représenter des volumes souterrains comparables à des milliers d'immeubles.* »

### Le poids du contexte socio-politique

Malgré toutes les mesures technologiques actuelles, il existe donc un impact résiduel sur l'environnement dont il est très difficile de s'affranchir. Pour cette raison, Yann Gunzburger signale que « *la mine du futur n'est pas que technologique ou environnementale ; elle est aussi sociétale* ». Un projet minier responsable n'est pas un projet où l'impact est nul, c'est un projet sur lequel la société — et notamment les acteurs locaux — négocie et accepte le risque incompressible en l'adaptant au territoire. Cette logique est particulièrement efficace dans les zones géographiques où les différents acteurs sociaux disposent d'outils d'intervention dans les politiques territoriales. Le cas des mines de nickel en Nouvelle-Calédonie, et des débats rassemblant communauté autochtone et associations environnementales globalisées autour des questions d'identité du territoire, en est un bon exemple.

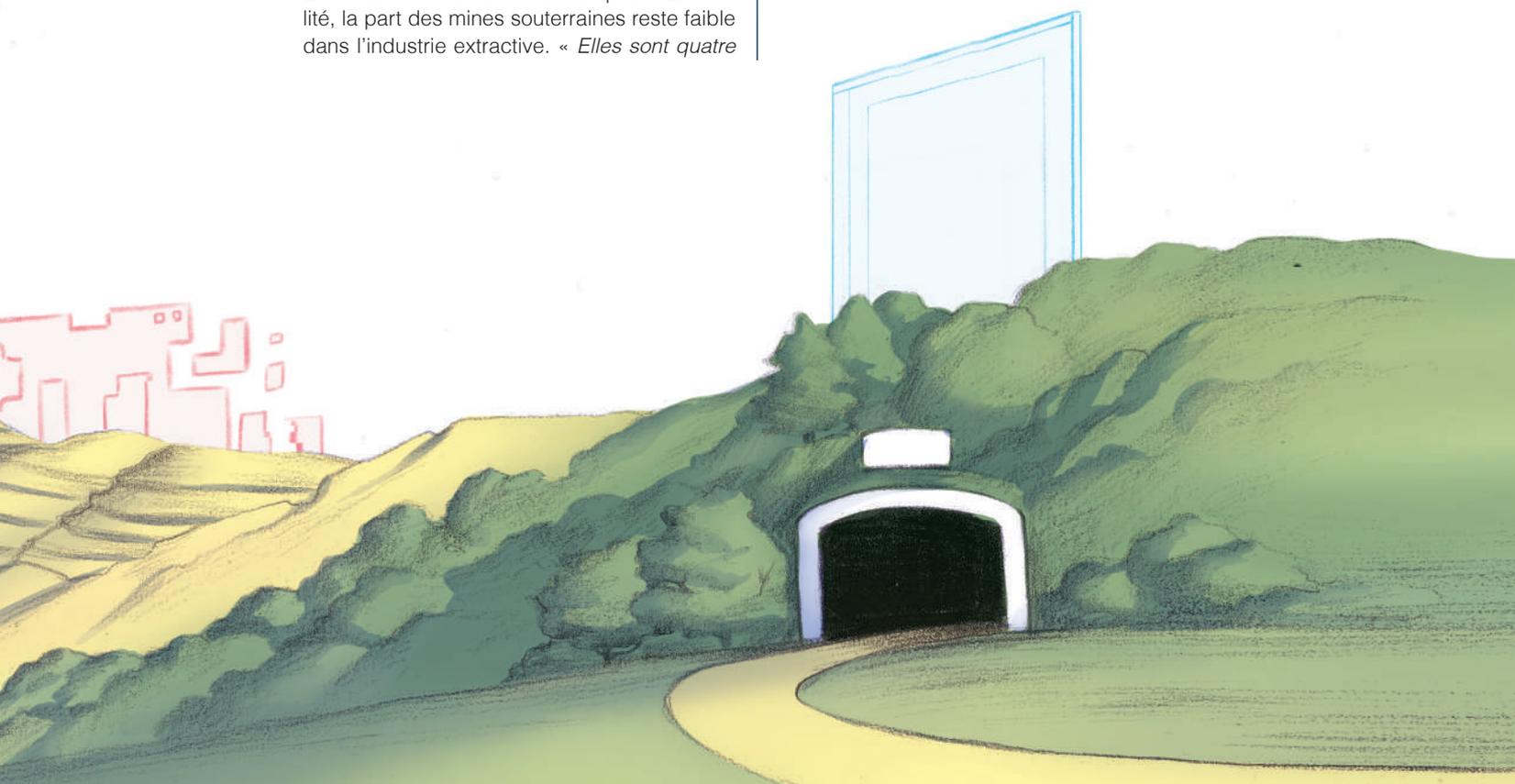


Malheureusement, cette situation n'est pas généralisée. Il existe des cas de figure où les contraintes techniques et l'environnement socio-économique ne permettent pas d'intégrer proprement la considération environnementale. Le lithium, utilisé pour les batteries de tous nos appareils électroniques, est ainsi extrait majoritairement des **salars**. Ces déserts de sels sont issus de grands lacs d'altitude, présents essentiellement en Amérique du Sud. Lorsque l'eau s'évapore, elle laisse derrière elle plusieurs sels qui peuvent être séparés, dont certains contiennent du lithium. Les salars constituent des lieux rares très appréciés des photographes et des touristes, car la couche d'eau résiduelle reflète facilement le ciel. « Dans ces zones, les mines de lithium abiment un paysage exceptionnel, regrette Michel Jébrak, chercheur en génie minier à l'université du Québec à Montréal (UQAM). De plus, ce sont des installations qui demandent énormément d'eau, dans des zones géographiques qui en manquent parfois. » Peu d'alternatives satisfaisantes existent pour remplacer les salars. L'Australie dispose de carrières de pegmatite qui produisent du lithium, mais dans des quantités plus faibles.

Le lithium est loin de faire exception. En réalité, la part des mines souterraines reste faible dans l'industrie extractive. « Elles sont quatre

à cinq fois plus nombreuses sur terre que les mines à ciel ouvert, mais elles ne produisent que 40 % du tonnage mondial de minerais », contextualise Yann Gunzburger. La raison est essentiellement économique. Si la mine souterraine est a priori plus responsable, elle est aussi plus coûteuse. Dans les zones où les projets miniers intègrent la considération environnementale de façon marginale, la mine souterraine a donc du mal à s'imposer. Toutefois, le chercheur de Mines Nancy observe que « pour l'industrie minière, les volumes extraits afin d'alimenter le marché numérique représentent de petites quantités. La tendance pour le souterrain ne serait donc pas idiote, car les facteurs économiques sont plus faibles à mesure que le volume des gisements diminue. La seule exception serait le cobalt, qui est un co-produit du cuivre et implique donc des volumes de production conséquents. »

**« Une mine plus responsable est aussi plus coûteuse. »**

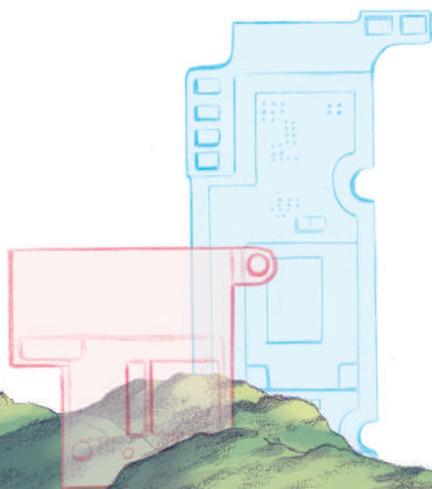


### De la mine artisanale à la mine illégale

Utilisé également dans les batteries, le cobalt est généralement associé au cuivre et au nickel dans les gisements. L'une des grandes zones productrices de cobalt est la copperbelt (ceinture de cuivre), située entre la Zambie et la République démocratique du Congo, et connue pour abriter une des plus grosses productions de cuivre au monde. Dans cette région, le rapport à la mine est bien plus complexe. « *L'extraction de cuivre s'y fait de manière artisanale*, relate Michel Jébrak. *Ce sont souvent des familles qui exploitent, et qui revendent aux industriels miniers sur place.* » La production des mines artisanales est loin d'être marginale. « *On estime qu'il y a au moins 40 millions de mineurs artisanaux dans le monde, contre 8 millions de mineurs industriels* », poursuit le chercheur de l'UQAM. Certes, les tonnages extraits par les mineurs artisanaux ne sont pas proportionnels à leur nombre sur le marché des minerais, mais ils ne doivent pas être négligés pour autant. En octobre 2019, un rapport de l'institut fédéral allemand de géosciences et de ressources naturelles (BGR), estimait que la production

artisanale représente environ 15% de l'ensemble des exportations congolaises de cobalt.

« *Il y a deux types de mines artisanales* », énonce Marc Vinches. Chercheur à IMT Mines Alès en géosciences, il encadre actuellement une thèse sur l'impact environnemental des mines artisanales dans le bassin versant du fleuve Niger. « *Il y a d'abord la mine artisanale légale, où l'exploitant paye une taxe récupérée par l'État, avec le maire ou le chef coutumier qui se porte garant que la taxe sera reversée aux employés. Et puis il y a la mine illégale, non encadrée par l'État, tenue par des mafias locales et où l'armée ne s'aventure pas car c'est trop dangereux.* » Bien que plus petites que les grosses installations industrielles, ces mines artisanales ont la capacité d'avoir des impacts environnementaux désastreux. Sans encadrement, la déforestation du terrain est faite de manière sauvage sur plusieurs hectares pour creuser les puits. « *Les sols ne sont plus tenus, et quand la saison des pluies arrive, de larges surfaces de terres deviennent impropres à l'agriculture* », témoigne Marc Vinches. Parce que les mineurs dépendent de la production agricole locale pour se nourrir, ils se déplacent alors dans une zone avoisinante, et recommencent. « *Mais les conséquences sur les surfaces sont moins importantes que celles sur les eaux*, poursuit le chercheur. *Les rivières deviennent turbides, et la toxicité augmente fortement.* » La raison principale est que les traitements de la roche se font directement à proximité du site d'extraction, avec des moyens techniques limités. « *Sur notre terrain d'étude, nous avons observé des eaux souillées avec une teneur en arsenic 200 à 300 fois supérieure à la teneur légale des eaux en Europe.* »



D'un point de vue global, la complexité politique et économique de l'industrie minière fait qu'il est difficile de proposer des solutions simples pour réduire son impact environnemental. Il faut allier les responsabilités des clients en bout de chaîne, celle des producteurs d'appareils électroniques, celle des pouvoirs publics dans les régions productrices mais aussi dans les grandes zones économiques consommatrices... Cela revient à responsabiliser un marché entier, dont les jeux de pouvoir sont en place depuis des décennies. Le Fairphone, un smartphone produit

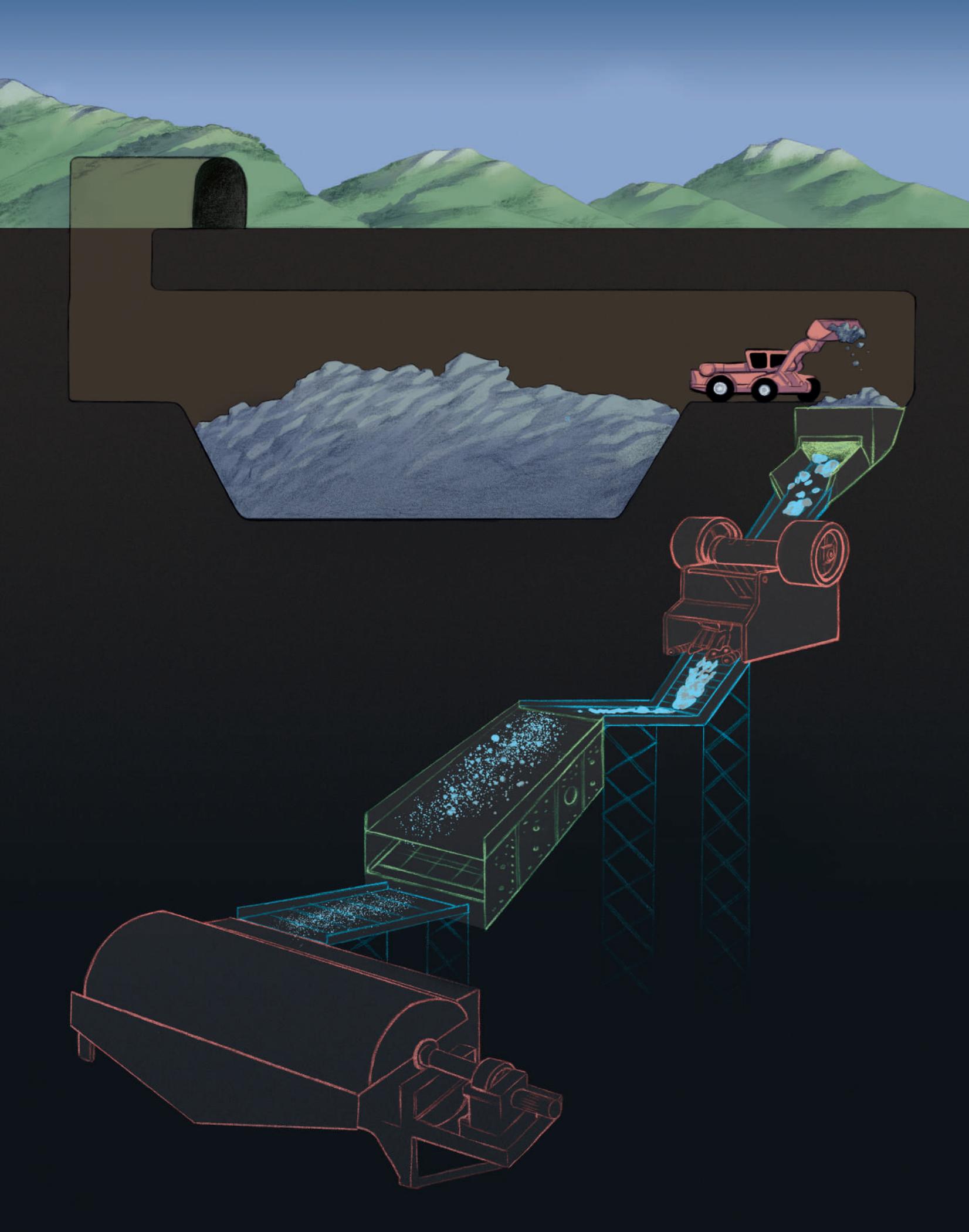
## « Difficile d'imposer un standard de responsabilité. »

par la société éponyme créée en 2013, se porte comme un emblème de ce changement global d'approche. En 2016, peu après le lancement du Fairphone 2, la société a réussi à garantir la traçabilité et l'approvisionnement responsable de quatre métaux composant son téléphone. Pour ce faire, l'entreprise a dû entamer une démarche fastidieuse d'expertise sur le terrain, d'alliance avec des ONG, de mise en place d'une chaîne logistique certifiée à chaque étape... Un travail conséquent sur plusieurs années pour une traçabilité *in fine* de seulement 10 % des types de métaux du

smartphone. Malgré son succès médiatique, le Fairphone reste le seul téléphone du marché à se revendiquer écoresponsable, et ses ventes montrent qu'il séduit difficilement en dehors d'une clientèle très soucieuse de l'environnement. Bien qu'exemplaire, ce smartphone montre à quel point il est difficile d'imposer un nouveau standard de responsabilité sur le marché. Sans pression économique sur les productions de minerais locales, exercée en bout de course par le client final, il sera difficile d'introduire la valeur de responsabilité dans les mines les moins soucieuses de leur impact environnemental. ▲

## LA MINE DU FUTUR : SOUS LES MERS ET DANS LES CIEUX ?

Alors que de plus en plus d'industriels regardent vers les abysses pour exploiter des gisements sous-marins de terres rares, des projets se tournent vers l'espace et les minerais des astéroïdes. Dans les deux cas, ces projets ont en commun de mettre en œuvre des moyens technologiques très avancés pour atteindre les éléments voulus. Face à cet engouement, Michel Jébrak, chercheur en génie minier à l'université du Québec à Montréal, rappelle le principe d'un gisement : « *C'est une ressource exploitable économiquement. Le mot 'économiquement' est primordial, car si ce n'est pas rentable, personne n'ira chercher le minerai.* » Face aux effets d'annonce, il reste donc important de questionner la réalité industrielle des projets sous-jacents. Parvenir à remonter des abysses quelques kilogrammes de minerais, voire même quelques tonnes, ne signifie pas pour autant qu'il est possible d'assurer un passage à l'échelle sur l'extraction de milliers de tonnes de roche par jour, comme c'est le cas pour les mines existantes.



# L'EXTRACTION, UN IMPACT HORS LES MURS

---

La mine n'est qu'une partie discrète de l'empreinte environnementale de l'industrie extractive. Une fois le minerai sorti de terre, son stockage et son traitement constituent des étapes dont les conséquences sur l'environnement sont plus importantes que l'extraction. Ces impacts indirects sont encore mal pris en compte dans les études d'analyse des conséquences écologiques, notamment par manque d'outils adaptés.

« Lorsqu'il s'agit de la qualité des écosystèmes, l'écrasante majorité de l'impact de l'industrie minière est hors de la mine elle-même », note Miguel Lopez-Ferber, chercheur en génie environnemental à IMT Mines Alès. Depuis 2015, son équipe travaille sur l'évaluation de l'empreinte de l'industrie extractive. La difficulté principale de cette tâche est d'intégrer l'ensemble des activités liées à la mine, et pas seulement l'extraction. Une fois sorti de terre, le minerai doit en effet être stocké, puis traité, avant d'être vendu. Ces étapes se font généralement sur d'autres sites que celui de la mine, et impliquent des impacts indirects — par rapport aux impacts directs qui sont ceux du site minier. « Nos recherches ont montré que les impacts indirects sont largement supérieurs aux impacts directs », affirme le chercheur.

En guise d'illustration : les premières phases de broyage et de concentration du minerai peuvent représenter jusqu'à 70 % de la consommation d'eau de la totalité du processus d'extraction et de traitement.

C'est le cas du cuivre. En 2016, un rapport pour la Commission chilienne du cuivre estimait la consommation d'eau douce pour son traitement à 10,6 mètres cubes par seconde. Les prédictions pour le territoire chilien – l'un des plus gros producteurs de cuivre au monde – misent sur une consommation stable de l'eau douce pour les dix années à venir, en dépit de l'augmentation prévue de la production. Pour parvenir à limiter l'utilisation d'eau douce, de nouveaux procédés intègrent l'eau de mer lorsqu'elle est accessible. Au Chili, la consommation d'eau de mer devrait ainsi être multipliée par 4 d'ici 2026, et passer de 2,5 à 10 mètres cubes par seconde.

**« L'écrasante majorité de  
l'impact de l'industrie minière  
est hors de la mine. »**

---

Philippe Marion, professeur émérite en géosciences à l'École nationale supérieure de géologie, université de Lorraine, acquiesce sur les impacts indirects : « *C'est là que de nombreux progrès peuvent être faits, et notamment sur le stockage des résidus de traitement. Entre les stockages sauvages et les stockages peu sûrs, il y a une grande marge d'amélioration.* » Les limites actuelles du stockage sont d'ordre technique, mais aussi économique. Sur le premier plan, il faut parvenir à construire des sites qui assurent une stabilité physique et chimique. Concrètement, les zones de stockage des résidus de traitement issus des opérations de concentration sont généralement des bassins encadrés par des digues. Certains bassins peuvent atteindre des volumes de plusieurs centaines de milliers de mètres cubes, et nécessitent la construction de digues de plus de 100 mètres de haut. Exposés à l'air libre et aux pluies, les bassins de stockage doivent donc être robustes face aux contraintes mécaniques du terrain.

### « Le problème vient des projets où il y a une incertitude sur la viabilité économique. »

Dans les pays où les autorités sanitaires et industrielles disposent de leviers, les structures sont inspectées et les projets font l'objet d'études techniques. « *À l'état de l'art, les industriels savent encapsuler durablement les produits chimiques en créant des sandwichs de terrain composés de plusieurs matériaux,* souligne Philippe Marion. *Le problème vient des projets où il y a une incertitude sur la viabilité économique ou la stabilité politique.* » Dans ces cas-là, le stockage n'est pas nécessairement intégré comme il se doit dès la phase de lancement du projet, ce qui pose des problèmes par la suite. Si la mine devient rentable, et que l'extraction augmente par

rapport à la valeur initialement prévue, « *la mise à jour des installations peut-être moins travaillée que le projet initial* », et une zone de stockage peut devenir sous-dimensionnée, augmentant le risque de rupture de digues ou de fuites vers l'environnement. À l'inverse, si le projet est abandonné rapidement, le risque est un manque de moyens financiers et de volonté des acteurs pour gérer les résidus stockés.

### « Le facteur le plus important est celui de la gouvernance. »

Dans les pires cas, une mauvaise gestion des zones de stockage conduit à des catastrophes naturelles importantes. En Europe, la plus connue d'entre elles est celle de Baia Mare, en Roumanie, survenue en 2000. Plus récemment, en 2015 puis en 2019, deux ruptures de digues dans l'état du Minas Gerais au Brésil pointaient du doigt l'importance d'une bonne gestion de ces sites. Lorsque ces événements surviennent, le déversement des boues sur les terres et dans les cours d'eau avoisinants entraîne des conséquences de long terme sur les écosystèmes. « *Le facteur le plus important pour assurer la sécurité de ces sites est celui de la gouvernance,* insiste Philippe Marion. *Il faut donner un cadre juridique, politique et économique qui permette un suivi régulier de ces sites sur le long terme.* » Un impératif également mis en avant par Yann Gunzburger, chercheur en géosciences à Mines Nancy : « *Il y a des accidents qui surviennent même après la fermeture du site, quand l'exploitant est parti : les enjeux de surveillance sont primordiaux. La responsabilité de la sécurité post-exploitation doit être définie dès le début du projet, qu'elle soit attribuée à l'exploitant ou à l'État.* »

La question de la gestion du stockage est centrale dans l'industrie minière. Les gisements à fleur de sol — plus accessibles — sont les plus

exploités ; ils arrivent à leur capacité maximale de production. Pour subvenir aux besoins, et aller chercher des matériaux de plus en plus rares, nécessaires pour les nouvelles technologies, il faut creuser plus profondément dans des minerais de moins en moins riches en élément recherché. L'industrie minière est donc amenée dans un futur proche à produire et stocker plus de roches stériles, et à traiter plus de minerais pour récupérer la même quantité de métal. Il devient alors nécessaire d'améliorer la sécurité des infrastructures de stockage et leur suivi. En parallèle, il faut trouver de nouveaux moyens de gérer les stériles. « *L'une des solutions de plus en plus en vogue est de les utiliser en remblayage des mines* », note Yann Gunzburger. Mines à ciel ouvert ou souterraines, elles laissent après leur exploitation d'immenses volumes vides. La plupart du temps, ces trous sont comblés avec de l'eau, créant ainsi des lacs artificiels. L'utilisation des stériles comme remblais est une alternative qui permet également de redonner de la stabilité au terrain affaibli par les opérations d'extraction. « *Une autre approche est de donner une valorisation industrielle à ces résidus*, note pour sa part Philippe Marion. *Certaines roches peuvent être utilisées sous forme de granulats routiers. Malheureusement, elles sont riches en sulfure qui ne sont pas les bienvenus dans les bétons, ce qui freine l'essor de cette voie de valorisation.* »

## « Il faut creuser de plus en plus profondément dans des minerais de moins en moins riches. »

### Calculer tous les paramètres

Les étapes de stockage et de traitement apportent ainsi de nombreux paramètres à prendre en compte dans le calcul de l'em-

preinte d'une production de minerai. Modélage du territoire, stress sur les réserves d'eaux locales, mais également consommation énergétique – qui dépend des modes de productions locaux – sont autant de dimensions à intégrer dans l'impact environnemental. Pourtant, les études d'impact en amont desancements de projets miniers intègrent rarement ces informations liées aux impacts indirects. Miguel Lopez-Ferber témoigne ainsi : « *Lorsqu'une étude d'impact est faite, elle s'interroge sur ce qui se passe sur le territoire propre à la mine. Est-ce que l'installation va perturber une rivière qui passe à proximité ? Est-ce qu'elle aura des impacts en aval ? Mais l'étude ne va jamais prendre en compte s'il faut faire une usine du traitement des minerais ailleurs, à plusieurs dizaines ou centaines de kilomètres.* »

## « Les méthodes classiques d'analyse du cycle de vie ne savent pas intégrer autant de paramètres. »

La principale raison de ce manque d'exhaustivité est la masse de données à inclure dans l'évaluation dès lors que les impacts indirects sont ajoutés. Les méthodes classiques d'**analyse du cycle de vie** ne savent pas intégrer autant de paramètres. Sur le site minier lui-même, les choses sont bien connues. Il est généralement facile de savoir d'où viennent l'eau et l'énergie. Mais comment faire dès lors que le cuivre et le cobalt sont séparés, chacun stocké à des endroits différents, parfois sur plusieurs sites, et envoyés dans plusieurs usines de traitement dans le monde ? Pour chaque entité il faut intégrer les modes de production d'énergie locaux, pondérer la part de la consommation utilisée pour le minerai issu de telle mine (et donc en assurer la traçabilité tout au long de la chaîne). « *Et ce n'est*

*que pour le premier cycle de conséquences, insiste le chercheur d'IMT Mines Alès. Si l'on veut intégrer les modes de transports de chaque employé sur tous ces sites, ou les empreintes de machines de chaque usine, on se retrouve très vite à devoir calculer l'empreinte de l'ensemble de l'activité humaine. »*

Or aucun projet minier ne peut se permettre, pour des raisons économiques, une étude d'impact aussi volumineuse.

## « Il faut inventer de nouveaux outils, pour mieux apprécier la globalité de l'empreinte. »

---

Il faut alors penser à inventer de nouveaux outils, permettant de mieux apprécier la globalité de l'empreinte, et prenant en compte les impacts directs et indirects. « Nous avons commencé des travaux de recherche là-dessus », informe Miguel Lopez-Ferber. L'idée est d'intégrer plus facilement l'ensemble de l'étendue géographique, en incluant de nouveaux paramètres environnementaux tels que la dégradation des milieux aquatiques, la fragmentation des écosystèmes, le relargage de métaux dans l'environnement. À terme, ces nouvelles techniques d'étude de l'impact devraient mieux éclairer les décideurs et les communautés locales au début des projets miniers. Pour les chercheurs d'Alès, c'est également un enjeu de fournir une information finale facile à comprendre, avec des grandes catégories d'impacts et des évaluations simples à lire. C'est là une condition sine qua non pour associer le plus grand nombre d'acteurs concernés par les projets miniers, à la fois sur les sites miniers eux-mêmes, et sur les zones touchées par les impacts indirects.



# ALLIER EXTRACTION ET PROTECTION DE L'ENVIRONNEMENT PAR LE DROIT

---

Il y a plusieurs années, la réforme du code minier français a été initiée sans jamais aboutir. L'objectif est d'harmoniser ce code propre à l'industrie extractive avec le code de l'environnement. Les enjeux juridiques sous-jacents questionnent les principes fondamentaux de la gestion des ressources minérales en France. Stéphanie Reiche-de Vigan, chercheuse en droit du développement durable et des nouvelles technologies à Mines ParisTech, analyse cette réforme en cours dans le cadre de ses travaux. Elle présente les différents enjeux cruciaux de l'encadrement de l'activité extractive et de la gestion des ressources naturelles dans une perspective comparée, pour souligner toutes les lacunes actuelles du modèle minier français.

### Quelle réglementation encadre l'extraction minière en France ?

**Stéphanie Reiche-de Vigan** : En France, l'exploration et l'exploitation des ressources minérales sont réglementées par le **Code minier** issu de l'ordonnance n°2011-91 du 20 janvier 2011 portant codification de la partie législative du Code minier. Celle-ci a été codifiée à droit constant, c'est-à-dire qu'aucune modification importante n'a été opérée par rapport au droit existant qui date de 1956. Lui-même tire ses principes fondamentaux de la loi Napoléonienne du 21 avril 1810 concernant les mines, les minières et les carrières.

### Comment fonctionne cette réglementation ?

**SRdV** : Le modèle minier français repose sur une originalité : le concept juridique de «mine». Celui-ci n'a aucun rapport ni avec les techniques industrielles minières ou pétrolières, ni avec la réalité du sous-sol. Toutes les législations étrangères étudiées, au contraire de la France, regroupent sous le terme de «mine» ou de «minier» (mining) ce qui a trait à l'industrie minière seule, excluant de ce fait l'industrie pétrolière ou gazière ou les autres utilisations du sous-sol, telles que le stockage ou la géothermie. Cette exception française avait son utilité par le passé. Elle visait à créer un bien juridique nouveau, la mine, administrée par l'État, par exception au Code civil, et à l'extension de la propriété du sol en profondeur. Elle semble aujourd'hui dépassée, et manquer



## DU HARDWARE DANS LA TERRE ALLIER EXTRACTION ET ENVIRONNEMENT PAR LE DROIT

cruellement d'adéquation aux enjeux actuels environnementaux, économiques et industriels et aux préoccupations des citoyens.

### Dans ce cas, comment remettre à jour l'encadrement des ressources et de l'extraction ?

**SRdV** : Pour une plus grande acceptabilité sociale et intelligibilité du droit français, le Code «minier» français mériterait d'être renommé et de voir son champ d'application élargi, pour devenir non plus un code réglementant le régime de l'exploration et de l'exploitation des ressources minérales et du sous-sol seul, mais un Code de gestion des ressources minérales. De ce code seraient exclues les utilisations du sous-sol qui n'ont pas trait à l'exploration et l'exploitation des ressources, comme le stockage ou la géothermie. Une autre approche serait de le renommer en Code de l'utilisation du sous-sol, dans lequel pourraient être incluses ces autres utilisations. Dans les deux cas, ce nouveau Code intégrerait le régime de la protection et de la conservation des ressources. La France est en effet très en retard dans la prise en considération de l'intérêt général des ressources minérales pour leur valeur autre qu'économique et stratégique. Contrairement à la plupart des autres législations étrangères, le droit français n'envisage l'intérêt général des ressources minérales et du sous-sol qu'en termes de valorisation et d'exploitation. Il est nécessaire d'inclure la protection et la préservation des ressources minérales et des sites souterrains au sein de ce qui pourrait prendre le nom de politique nationale de gestion des ressources minérales et des usages souterrains.

### Pourquoi ce code minier français est-il en révision depuis des années ?

**SRdV** : La réforme du Code minier s'inscrit dans une stratégie nationale et européenne de sécurité des approvisionnements stratégiques, ainsi que dans une stratégie de développement durable. Une réforme du Code minier a été initiée à de multiples reprises

sans aboutir. Le dernier projet en date, la proposition de loi portant adaptation du Code minier au droit de l'environnement déposée le 23 novembre 2016 par M. Bruno Le Roux, et votée en première lecture à l'Assemblée nationale le 25 janvier 2017, n'a pas abouti. L'acceptabilité sociale de l'activité extractive en France sur le territoire métropolitain ou sur les territoires d'outre-mer est très faible. Au regard du contexte national français, social et historique en particulier, l'activité extractive ne pourra se développer en France — et sur le territoire métropolitain en particulier — que si la réforme prend en considération les préoccupations environnementales des citoyens et les revendications des peuples autochtones présents sur le territoire français. Il faudra parvenir à transformer un code à connotation d'exploration et d'exploitation seules, en un code de gestion durable, raisonnée et équilibrée, des ressources minérales et éventuellement des utilisations souterraines, comme le font la plupart des législations étrangères.

## « L'acceptabilité sociale de l'activité extractive en France sur le territoire métropolitain ou sur les territoires d'outre-mer est très faible. »

**Vous prenez la Chine et l'Amérique du Nord en exemple, pourtant ces pays ont une gestion très critiquée de l'extraction minière.**

**SRdV :** En effet, mais les dommages environnementaux induits par l'industrie extractive sont des conséquences inévitables de cette activité et résultent plus d'une volonté politique

que d'une réalité juridique. Tant le droit chinois que le droit fédéral américain, pour ne prendre que ces exemples, sont d'une grande clarté en matière d'utilisation rationnelle du sous-sol et de ses ressources, et prennent acte des conséquences dommageables de l'activité extractive. En droit chinois, la Constitution de 1982 impose à l'État de veiller à «l'utilisation rationnelle des ressources naturelles». En droit fédéral américain, le Federal Land Policy and Management Act de 1976 met en place une politique de gestion des usages multiples des terres fédérales pour répondre aux divers besoins présents et futurs du peuple américain, notamment la production des ressources minérales et la protection de la faune et de la flore. Cette loi pose comme principe la «gestion harmonieuse et coordonnée des différentes ressources qui n'engendre pas une dégradation permanente de la productivité du sol ou de la qualité de l'environnement». Les choses sont différentes sur les terres privées ou sur les terres fédérées mais le droit en la matière est bien plus complexe que ne le laisse entendre certains interprètes français. Vouloir nier le caractère par essence destructeur de l'activité extractive comme le font le Code minier français actuel ainsi que le projet de réforme, ne permettra pas d'accroître l'acceptabilité sociale de l'activité extractive ni de réduire la contestation locale des projets. Il serait plus judicieux de déterminer, en concertation avec le public et les collectivités locales, un plan pluriannuel pour répondre aux besoins nationaux identifiant les zones dédiées à une exploitation éventuelle, et les zones exclues de toute possibilité d'exploitation du fait de leur valeur ou sensibilité écologique. La planification selon le modèle fédéral américain ou le modèle espagnol est un outil essentiel pour répondre aux besoins nationaux mais également pour accroître l'acceptabilité sociale des projets extractifs, et réduire ainsi l'incertitude juridique des opérateurs. Une consultation du public et des collectivités locales ainsi qu'une étude d'impact environnemental pourraient en effet être réalisées dès ce stade.

**Dans une analyse juridique que vous avez réalisée sur le projet de réforme du Code minier, vous recommandez d'inclure un certain nombre de principes, dont le principe de gestion durable et rationnelle des ressources naturelles. De quoi s'agit-il ?**

**SRdV :** Il est nécessaire d'inscrire l'exploration et l'exploitation des ressources minérales dans une perspective plus globale de gestion durable et rationnelle des ressources naturelles, en évitant par ailleurs l'externalisation des impacts dans d'autres pays. Ce principe fondamental doit assurer, en matière de ressources minérales, un équilibre entre l'utilisation à des fins d'extraction, d'injection et de stockage, et la non-utilisation de l'espace souterrain en vue de la protection des ressources naturelles.

**« Il est nécessaire d'inscrire l'exploration et l'exploitation des ressources minérales dans une perspective plus globale de gestion durable et rationnelle des ressources naturelles. »**

---

Ce principe devrait également permettre d'élaborer une politique nationale des ressources minérales et des usages souterrains fondée sur certains principes fondamentaux tels que la planification des usages, l'administration des ressources minérales par l'État, la prise en considération des incidences environnementales, économiques et sociales, la proportionnalité, le respect du contradictoire, la consultation et la

participation du public et des collectivités territoriales, la gestion durable des impacts environnementaux des projets d'exploration et d'exploitation... Une réforme en profondeur devrait simplifier le droit actuel et le rendre plus intelligible en supprimant la notion juridique obsolète de mine, et fonder le droit nouveau sur le principe de gestion durable et rationnelle des ressources minérales, au sens d'économiquement efficace, socialement équitable et écologiquement soutenable. ▲

## Pour aller plus loin :

---

- *Des Mines en France ? Une controverse entre technique et territoire*, l'MTech, 2018, [www.imtechnews.fr](http://www.imtechnews.fr)
- *Nouvelle-Calédonie : la mine qui questionne la démocratie*, l'MTech, 2017, [www.imtechnews.fr](http://www.imtechnews.fr)
- Michel Jébrak, *Quels métaux pour demain ?*, Dunod, coll. UniverSciences, 2015, 256 p



# II

## LA RESPONSABILITÉ AU CŒUR DES ENTREPRISES

---

Pointées du doigt pour leurs bonnes ou mauvaises pratiques, les entreprises sont en première ligne sur la question de la responsabilité environnementale du numérique. Elles doivent alors apprendre à se transformer pour intégrer les considérations de leurs clients, ainsi que celles de leurs salariés. Mais entre la complexité des changements de processus nécessaires, le manque d'outils pour évaluer efficacement les empreintes environnementales, et la pression de la société exercée à l'extérieur et l'intérieur des organisations, la tâche est loin d'être aisée.

# 1

SANS VISIBILITÉ,  
PAS DE MESURE  
D'IMPACT

---

SENSIBILISER  
POUR L'AVENIR

---

# 3

# 2

L'ÉCOCONCEPTION,  
INTERSECTION  
DES INNOVATIONS  
RESPONSABLE  
ET SOCIALE

---

## LA RESPONSABILITÉ AU COEUR DES ENTREPRISES

# SANS VISIBILITÉ, PAS DE MESURE D'IMPACT

---

Au sein des entreprises, managers et collaborateurs tentent de trouver des solutions pour réduire l'impact du numérique. De nouveaux métiers d'experts environnementaux apparaissent dans les organisations, comme les *Green IT managers*. Le but de cette démarche ? Mieux connaître le coût environnemental de l'ensemble de la chaîne de production, afin de savoir quels leviers activer en priorité.

Il ne s'agit plus seulement d'analyser l'empreinte d'un produit. Les entreprises doivent à présent être en mesure d'intégrer à leur bilan environnemental les impacts indirects de leurs services et produits. Il leur faut ainsi prendre en compte l'alimentation des infrastructures utilisées pour le stockage des données et le calcul, car toute entreprise, quel que soit son secteur, utilise aujourd'hui les technologies numériques. Cette approche holistique du calcul de l'empreinte est difficile à adopter. Miguel Lopez-Ferber, chercheur à IMT Mines Alès en génie environnemental, explique ainsi que « *si des indicateurs sont utilisés pour contrôler la consommation des centres de données en France et dans certains pays occidentaux, ce n'est pas généralisé* ».

Perrine Tiret, responsable de la *Green Company* pour les employés de BNP Paribas, s'occupe actuellement du diagnostic de leur empreinte numérique. Ils utilisent des indicateurs **PUE** (*Power Usage Effectiveness*) évaluant le rapport entre le besoin de l'entreprise et la consommation du centre de données pour en mesurer l'efficacité. « *Cela nous permet de suivre de très près la performance de la gestion de nos serveurs, de vérifier si les*

*techniques utilisées pour refroidir les serveurs sont efficaces* », indique Perrine Tiret.

Mais toutes les entreprises ne disposent pas de leurs propres serveurs et beaucoup font appel à des fournisseurs. « *Sous certaines conditions, quelques fournisseurs garantissent la consommation maximale de leur serveur*, annonce Miguel Lopez-Ferber. *Mais encore une fois, cela n'est pas généralisé. L'idée de certificats de consommation des serveurs se développe, mais il faudrait pouvoir normaliser ce processus* », ajoute-t-il.

## « Avec le cloud, comment savoir où sont les serveurs ? »

---

### Suivre les machines virtuelles

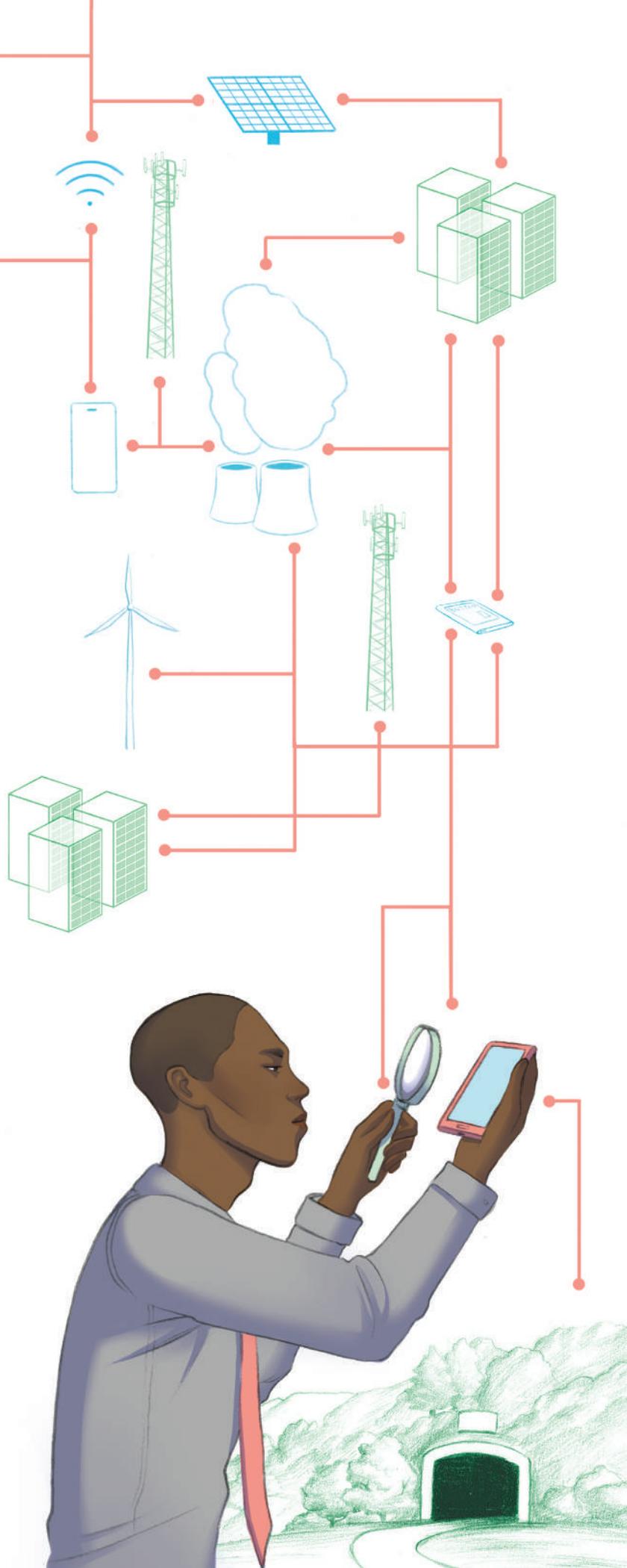
S'impose alors la difficulté principale : celle du *cloud*. « *En France nous sommes fournis par l'énergie nucléaire, donc faiblement carbonée, mais pour la Chine ou l'Allemagne, qui se basent sur des énergies fossiles, le coût environnemental sera plus important pour*

## LA RESPONSABILITÉ AU COEUR DES ENTREPRISES SANS VISIBILITÉ, PAS DE MESURE D'IMPACT

une même consommation d'énergie. Avec le cloud, comment savoir où sont les serveurs ? » questionne Miguel Lopez Ferber. Les serveurs étant virtualisés, l'entreprise perd la visibilité et n'a pas la capacité d'estimer elle-même l'impact du stockage de ses données et des calculs effectués.

Emmanuel Laroche est **Green IT manager** au sein du groupe Airbus, et membre de l'Institut du numérique responsable (INR). Il témoigne de la difficulté d'évaluer l'impact environnemental des activités numériques du fait de la **virtualisation** : « **L'analyse du cycle de vie** repose sur des bases de données qui quantifient les impacts pour différentes familles d'équipements, comme les serveurs, les centres de données et les équipements réseau. Dans le cas du cloud, il est très difficile d'enrichir ces bases de données issues des fournisseurs du cloud. Tout comme il est difficile d'obtenir un reporting des émissions de gaz à effet de serre de leur part. » Il faudrait améliorer la transparence entre les fournisseurs et les entreprises faisant appel à ces services, pour rendre possible l'évaluation environnementale des activités sur le **cloud**. Cela pourrait être, par exemple, d'imposer aux fournisseurs de services virtualisés de réaliser eux-mêmes un suivi de la consommation pour le transmettre aux entreprises.

Emerson Picq est manager développement agile chez EDF et insiste sur cette limite liée à l'utilisation de machines virtualisées : « Il y a le monde du **data center** et le monde des usagers, et c'est dans l'entre deux qu'il va falloir trouver de la cohérence. » Son collègue Olivier Lefebvre, responsable stratégique en développement agile chez EDF, indique que le but est de pouvoir dire : « J'ouvre mon application et je suis capable de valoriser de bout en bout tout ce qui a été consommé, du terminal utilisateur au serveur qui héberge



*l'application, pour agir sur toute la chaîne de service.* » Les deux collègues précisent qu'aujourd'hui, « *aucun outil du marché ne sait répondre à ce besoin* ». Il faut donc développer de la cohérence sur l'ensemble de la chaîne et de la transparence entre les différents acteurs.

### Un besoin de transparence

Ce besoin de transparence s'étend au-delà des fournisseurs du *cloud* sur l'ensemble des collaborateurs des entreprises. Perrine Tiret explique que ce qui risque de poser problème pour déterminer les bons leviers à activer dans la transition écologique « *sera probablement au niveau de la récupération des données nécessaires et pour les mettre en commun* ». Cette transparence n'est pas évidente car les partenaires peuvent se montrer réticents à partager leurs données susceptibles d'avoir une valeur stratégique. Certains préfèrent alors les protéger sous secret professionnel.

« *Pour installer de la transparence il faut avant tout instaurer une confiance avec les industriels sur l'utilisation que nous allons faire de ces données*, annonce Samuli Vaija. *Ils veulent s'assurer qu'elles serviront bien à analyser le coût environnemental et non pas à un calcul de notre part, par exemple pour chercher des économies financières en vérifiant le prix de ce qu'on paye.* » Avec Marc Vautier, ils font partie d'une communauté d'experts au sein du groupe Orange, et sont tous deux chargés des questions liées à l'analyse du cycle de vie des produits. « *Nous ne sommes pas une industrie mais un service d'opérateur. Lorsque l'on commande un produit, il est difficile de savoir quels composants sont utilisés et en quelle quantité, et c'est souvent compliqué avec les industriels qui ne veulent pas forcément partager ces informations* », précise Marc Vautier. Auparavant ces mesures étaient faites en interne, mais leur politique a évolué pour demander directement aux industriels sous-traitants de réaliser ces analyses sur les produits fournis.

Standardiser les pratiques d'analyse de cycle de vie serait un début pour encourager les entreprises sous-traitantes à le faire d'elles-mêmes et à partager ces informations avec le reste de la chaîne. « *Il faut que ce principe d'analyse environnementale percole à travers les industries et que cela devienne une habitude. Essentiellement, il faut plus de partage entre les différentes parties prenantes* », insiste Samuli Vaija. Marc Vautier souligne que « *l'idéal serait que l'industrie qui produit les fils partage avec celle qui s'occupe de monter la puce, et ainsi de suite, pour que toutes ces données se suivent et s'ajoutent sur l'ensemble du cycle de vie* ».

## « Il faut avant tout instaurer une confiance avec les industriels. »

Mais il est aussi nécessaire d'engager les entreprises sur le cycle complet du produit ou service proposé. Cela implique d'instaurer une certaine pression pour qu'elles soient responsables de la fabrication en amont et des consommations en aval. Autrement, certains aspects essentiels pour réduire l'impact environnemental du numérique pourraient être négligés. « *Auparavant, lorsque nous installions un décodeur chez les clients, il consommait 7 jours sur 7 et cela ne regardait pas l'entreprise, car le coût de l'électricité ne concerne que le client. Mais si les opérateurs sont responsables des produits placés chez les clients, alors ils vont favoriser des solutions pour réduire ce coût, comme l'installation d'un mode veille* », concluent Samuli Vaija et Marc Vautier. ▲

# L'ÉCOCONCEPTION, INTERSECTION DES INNOVATIONS RESPONSABLE ET SOCIALE

---

Pour les entreprises de plus en plus soucieuses de leur impact environnemental, l'écoconception devient inévitable. Elle leur permet de penser les produits et services de manière responsable. Loin de se limiter simplement au design, l'écoconception demande de repenser en profondeur l'organisation de l'entreprise et ses relations avec l'ensemble des acteurs socio-économiques.

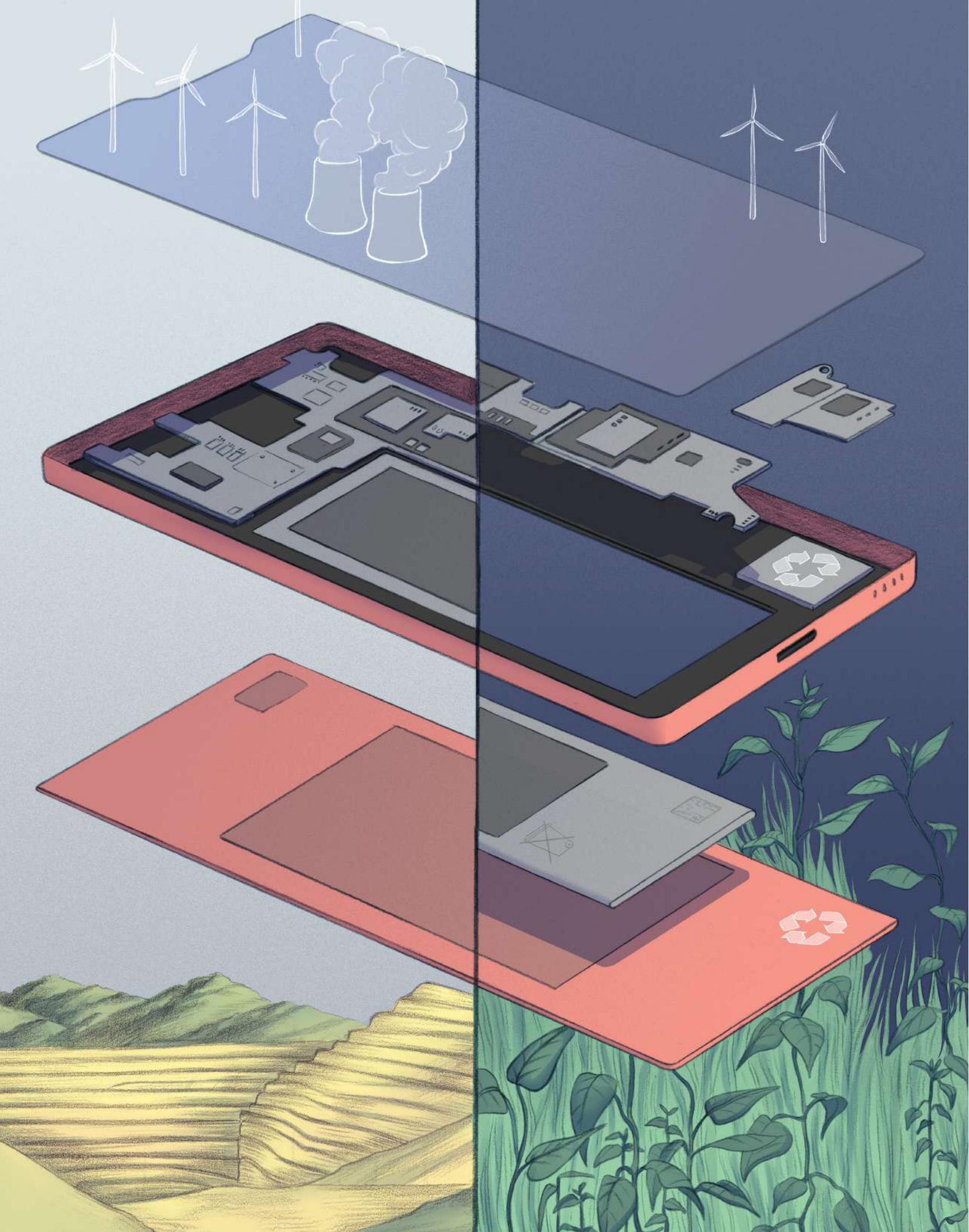
Développer des matériaux écoconçus, pensés pour réduire leur impact environnemental, entraîne souvent une peur pour les entreprises d'augmenter les coûts de production et donc les prix de vente. Samuli Vajja, expert chargé des questions liées à l'analyse du cycle de vie des produits chez Orange, concède « *qu'en changeant de matériaux nous pouvons tout simplement faire face à des produits plus chers. Nous pouvons aussi retrouver des matériaux qui ont la même valeur au kilo, mais étant moins demandés ils seront vendus plus cher à la pièce* ».

Historiquement, certains matériaux ont été favorisés sans que l'on prenne en compte leur impact environnemental. D'autres, équivalents en prix mais plus bénéfiques écologiquement, ne sont alors pas assez développés pour remplacer les anciens. « *Si nous avons*

*besoin de beaucoup de matière pour changer tous les décodeurs Orange et que cette nouvelle chaîne de production n'est pas habituée à une demande aussi importante, nous pouvons aussi nous retrouver face à des aberrations économiques* », ajoute Marc Vautier, également expert chargé des questions liées à l'analyse du cycle de vie des produits chez Orange.

## Une écoconception futée

Le facteur économique est évidemment très important pour les entreprises. Ce qu'il faut, précisent ces experts, « *c'est faire de l'écoconception futée, en améliorant les possibilités de reconditionnement par exemple. C'est une optimisation du cycle de vie énorme qui représente aussi une économie de coût* ». Olivier Lefebvre, responsable stratégique en



développement agile chez EDF, complète ce discours en annonçant qu'il « *risque d'y avoir un investissement nécessaire pour amorcer un changement de référentiel, mais nous y voyons potentiellement des gains derrière, car renouveler moins souvent le matériel, développer des applications et des serveurs moins énergivores, c'est aussi une approche pour dégager des gains* ».

Cela implique néanmoins pour les entreprises de repenser leurs stratégies car elles ne peuvent pas compter sur une course à la nouveauté. « *Il y a une réflexion profonde sur les pratiques de création de valeur, de ce que cela implique pour les salariés et les clients, et c'est surtout par ce biais économique que la question d'écoconception est entrée dans les entreprises* », annonce Sandrine Berger-Douce, chercheuse en management responsable et innovation à Mines Saint-Étienne. Il ne s'agit pas seulement d'optimiser les matériaux et les performances, mais aussi de travailler sur les usages, en proposant des produits pertinents sans « *utilités exotiques* », légers et consommant peu.

## « Il y a une réflexion sur les pratiques de création de valeur, de ce que cela implique pour les salariés et les clients. »

Ces questions remettent en cause les modèles économiques. « *Beaucoup d'entreprises rentrent dans l'économie circulaire, par exemple*, complète Sandrine Berger-Douce. *C'est important pour l'innovation au sens large car il faut imaginer des manières d'innover différemment.* » Cédric Gossart, chercheur sur les innovations sociales à Institut Mines-Télécom Business School, soulève aussi le problème de l'obsolescence systémique, à travers

l'utilisation de composants peu chers mais qui ne tiennent pas dans le temps. « *C'est un effet de mode qui implique une responsabilité des usagers et une responsabilité légale. Une loi pour augmenter le temps des garanties par exemple obligerait les entreprises à concevoir des produits qui vont tenir la route.* »

### Un changement profond de l'entreprise

Instaurer des pratiques d'écoconception dans le cœur de l'entreprise doit s'intégrer très en amont dans ses réflexions en associant tous les acteurs dans la discussion. Optimiser le reconditionnement d'un produit implique en général de repenser tout son design pour en développer un nouveau, en pièces détachées et facile à remettre en état.

Marc Vautier précise que, pour développer un décodeur en plastique recyclé, cela passe par des discussions avec des universitaires pour trouver de bons matériaux, et avec les industriels dès les premières phases de conception, mais aussi avec les différents services de l'entreprise. « *Le service marketing souhaitait un design chic, blanc, mais trop complexe à réaliser avec du plastique recyclé* », illustre-t-il. Sandrine Berger-Douce met l'accent sur les questions sociales et culturelles qui rentrent en jeu entre les acteurs des différentes organisations. « *Tous ne parlent pas le même langage et il faut des passerelles pour faciliter la coopération, réfléchir de manière complémentaire, et ultimement rendre l'écoconception incontournable.* » À cette fin, le groupe Sopra Steria a par exemple rassemblé un groupe de près de 250 collaborateurs sur la base du volontariat pour apprendre à parler le même langage en matière de **RSE (responsabilité sociétale des entreprises)** et de responsabilité environnementale.

Il faut alors cibler les enjeux de développement durable et identifier des stratégies pour y répondre en les intégrant aux stratégies d'innovation. Cela prend en compte des aspects

environnementaux et sociaux, des aspects d'écoconception et des conditions de travail. Il s'agit alors de repérer les bons leviers sur l'ensemble des axes stratégiques d'une entreprise. La transformation doit être conçue à travers les différents volets de l'entreprise, en intégrant un maximum de personnes. Emerson Picq, manager développement agile chez EDF, ajoute qu'il faut aussi penser « en matière de règles d'accessibilité, pour les salariés et les clients, pour les personnes en situation de handicap. La finalité c'est un référentiel de bonnes pratiques qui fait en sorte que tous les utilisateurs soient capables d'y accéder. »

## « L'action publique a donc également son rôle à jouer au niveau des régulations et des normes pour encourager les entreprises dans la bonne direction. »

### Besoin de coopération

« C'est un exercice périlleux, surtout pour les PME, d'associer la performance énergétique, les principes de RSE et de développement durable, avec les composantes économiques », indique Sandrine Berger-Douce. Cela implique effectivement un département et des ressources dédiées, et toutes les entreprises n'ont pas la même maturité. « Nous rentrons dans un monde où il va être incontournable de prendre en compte les questions d'écoconception, complète Emerson Picq, en suggérant que nous pourrions mettre des points de mesure pour quantifier les efforts qui ont été faits et les encourager ».

Il s'agirait dans l'ensemble de soutenir les entreprises en les guidant dans de bonnes

directions, éventuellement en proposant des labels ou des standards pour quantifier les efforts fournis. « Il y a besoin d'initiatives publiques pour soutenir ces projets, ces initiatives écoresponsables, insiste Cédric Gosart. Il faudrait mettre en place quelque chose pour valoriser ces initiatives, peut-être surtaxer ceux qui ne prennent pas en compte ces questions ou allouer un bonus écologique par exemple. »

L'action publique a donc également son rôle à jouer au niveau des régulations et des normes pour encourager les entreprises dans la bonne direction, « et la zone Europe peut aussi renforcer ce côté-là, indique Samuli Vaija. Les régulations ont cet effet boule de neige qui entraîne d'autres organisations et des instances de standardisation à suivre la marche. Les réglementations vont nous permettre de pousser nos standards en interne. Notre but est aussi de prendre un cran d'avance sur ce qui est légal pour développer des projets communs avec les industriels et penser à un horizon 2050 en lien avec l'accord de Paris sur le climat (2015) ».

Cela montre également que certaines entreprises ont plus d'avance sur ces questions que d'autres. Dans ce sens, il est important de pouvoir développer de l'entraide entre les entreprises pour aiguiller dans la prise de décision. Outre sa casquette de **Green IT manager** chez Airbus, Emmanuel Laroche est membre de l'Institut du Numérique Responsable (INR), « qui a pour but de contribuer à construire un monde du numérique plus responsable et plus résilient ». Selon lui, il est essentiel de développer de la coopération entre les différents acteurs pour « partager ces retours d'expérience afin de ne pas tomber sur les mêmes écueils que ceux déjà rencontrés par d'autres, et de prévenir les effets rebonds extrêmement fréquents dans les technologies numériques ».

Il se peut en effet que des projets censés réduire les impacts environnementaux se retrouvent avec un effet inverse, en créant un nouvel impact sur l'environnement ou en

dégageant des gains permettant de financer un autre projet avec des conséquences négatives. Mais au même titre que l'INR, de nombreuses organisations comme *The Shift Project*, des institutions telles que l'ADEME (Agence de la transition écologique) ou bien des associations comme *WWF (World Wide Fund for Nature)* mettent à disposition des outils pour orienter vers les bons leviers à actionner. Les discussions entre organisations, groupes de travail et entreprises sont essentielles pour trouver et mettre en lumière des solutions communes à tous.

## **« Certaines entreprises ont plus d'avance sur ces questions que d'autres. »**

---

*« Nous bénéficions de cet effet qui n'existait pas avant, avec un foisonnement des idées sur lequel on peut miser, le retour sur expérience primordial pour visualiser quelles initiatives ont eu un impact conséquent pour savoir où placer les nouveaux efforts », conclut Olivier Lefebvre. ▲*

## LA RESPONSABILITÉ AU COEUR DES ENTREPRISES

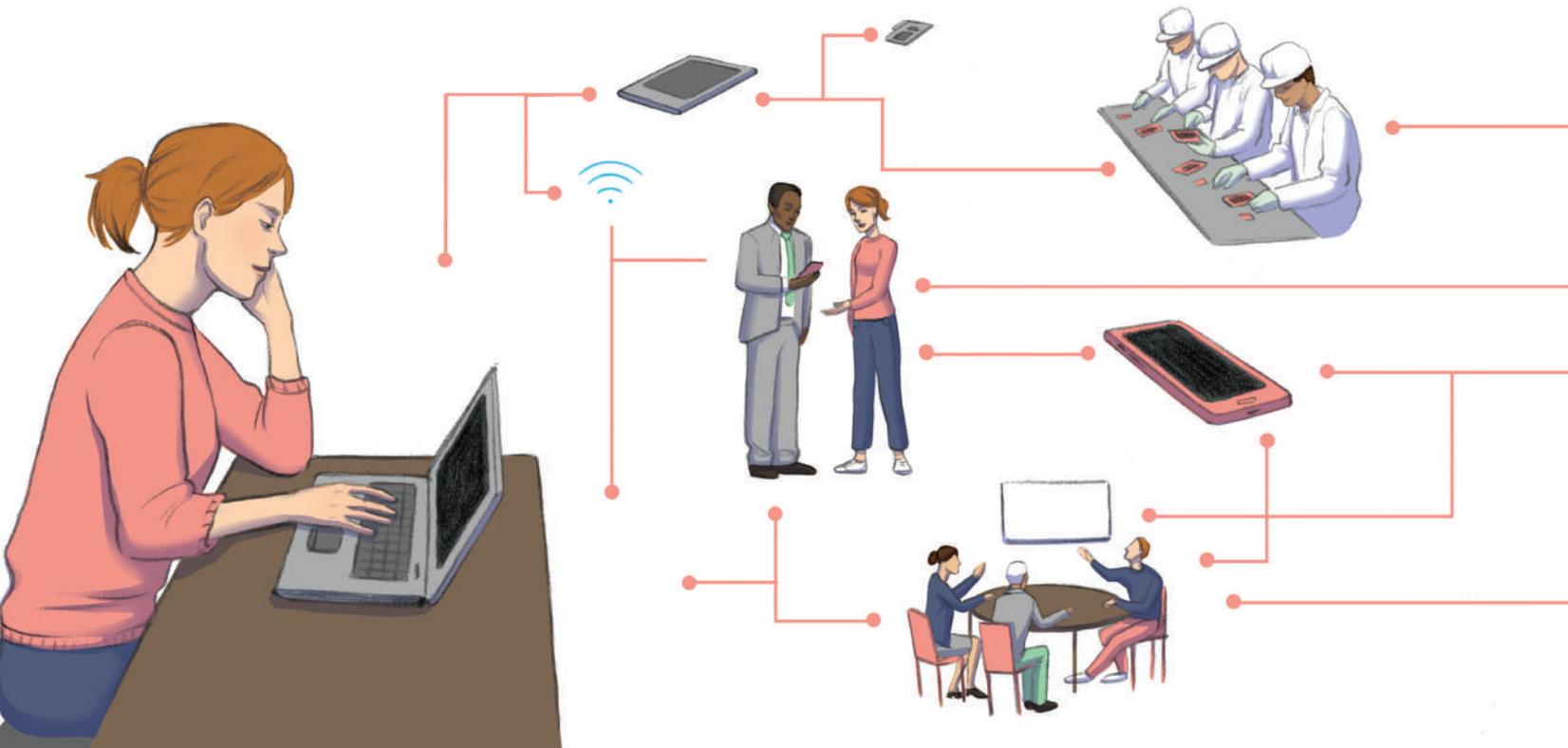
# SENSIBILISER POUR L'AVENIR

Dans la quête de responsabilité et la chasse aux bonnes pratiques, la sensibilisation est une étape nécessaire. Au sein des écoles d'ingénieurs et des entreprises en particulier, il est crucial de proposer des formations et une culture qui permette d'appréhender la complexité des enjeux environnementaux.

« Nous avons tous un rôle à jouer pour changer cette course à la nouveauté : les entreprises, le monde académique, les consommateurs... », assène Sandrine Berger-Douce, chercheuse en management responsable et innovation à Mines Saint-Étienne. Des propos validés par Samuli Vaija, expert chargé des questions liées à l'analyse du cycle de vie des produits chez Orange : « Il faut que les gens soient prêts à s'impliquer, il faut que les ingénieurs soient capables de comprendre les contraintes d'analyse de cycle de vie et savoir où agir ». Son collègue Marc Vautier ajoute que « c'est

aussi aux industries de s'emparer du sujet, de recruter des personnes et de les placer un peu plus haut dans la pyramide des priorités ».

Il est donc essentiel que les futurs ingénieurs soient aussi formés à ces aspects. Emerson Picq, manager développement agile chez EDF, précise que « lorsque nous allons faire appel à des prestations, nous allons chercher des personnes familières avec ces concepts-là, qui connaissent bien le sujet ». Intégrer les problématiques environnementales et sociales actuelles aux formations d'ingénieurs devient alors une étape centrale de cette transition.



### Ingénieurs de demain

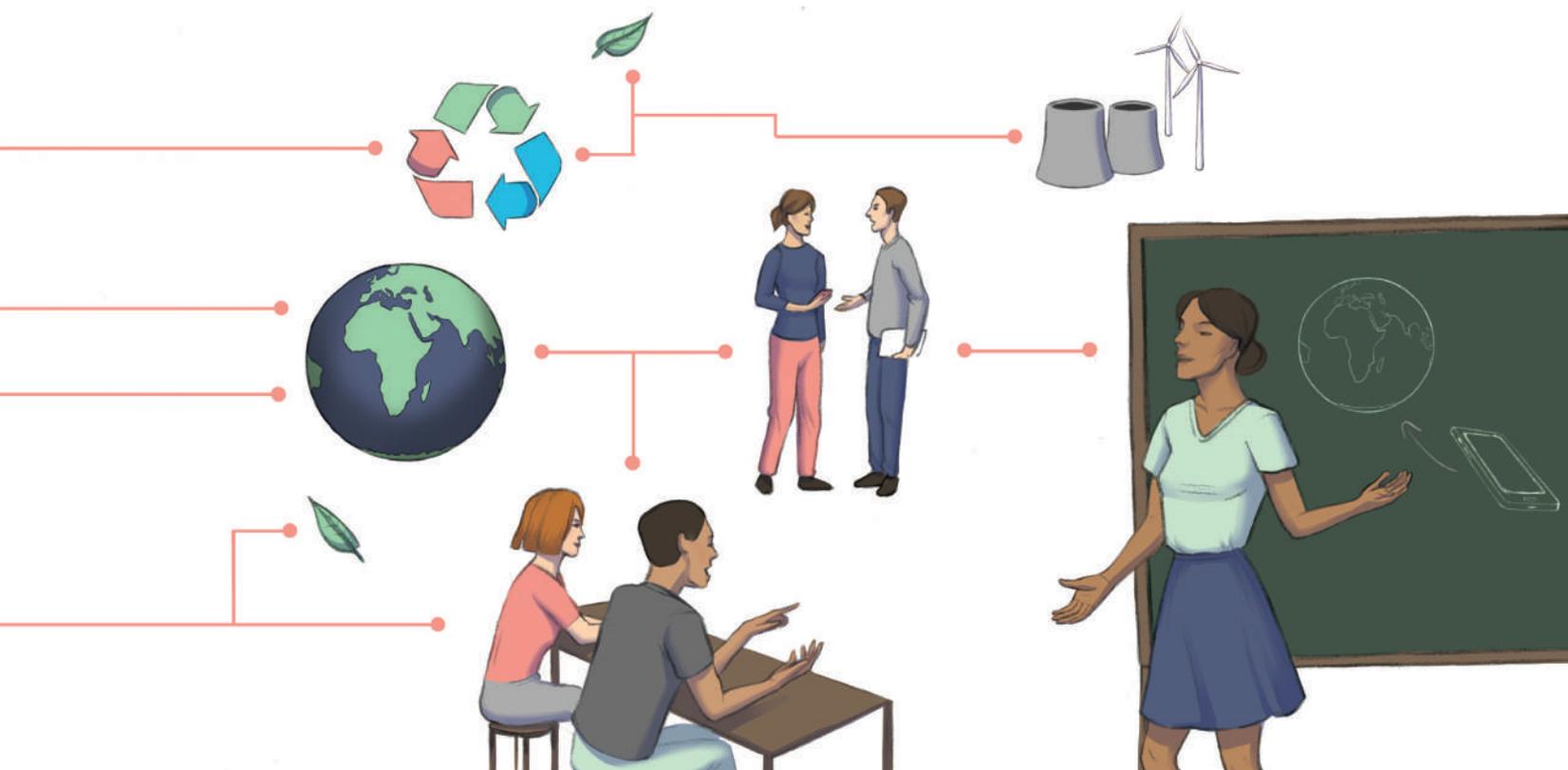
« C'est difficile de trouver un mouton à cinq pattes », annonce Marc Vautier, en soulignant que les profils existants sont des ingénieurs qu'il faut éduquer à l'analyse de cycle de vie, ou des personnes formées à l'analyse de cycle de vie qu'il faut instruire à la culture électronique. « Il peut y avoir un préjugé qu'il faut des personnes sympathiques sur les enjeux environnementaux, mais il faut se rendre compte que cela demande à la fois des compétences en micro-électronique et des compétences environnementales, c'est un savoir-faire complexe et il faut trouver la bonne balance. »

En ce sens, Télécom SudParis lance la chaire d'enseignement « Ingénierie numérique & Transition environnementale », et IMT Atlantique ouvre une nouvelle formation à la rentrée 2020 sur la transformation digitale des systèmes industriels dédiés à l'industrie du futur. « L'intérêt est d'associer des enseignements transverses, en génie industriel, en sciences sociales pour appréhender les effets de la digitalisation sur le travail et les compétences, et en sciences environnementales », précise Sophie Brétésché, chercheuse en sociologie à IMT Atlantique et co-responsable de la formation avec

David Lemoine, chercheur en informatique à IMT Atlantique. Le programme est élaboré avec les industriels pour correspondre à leurs besoins et se déroule en alternance. « Il n'y a rien de mieux que d'aller directement sur le terrain, dans les usines, les laboratoires, et d'apprendre en faisant, pour découvrir les astuces et connaître le procédé industriel », ajoute Samuli Vaija.

## « Il faut éduquer les ingénieurs à l'analyse de cycle de vie. »

Cette formation veut répondre au besoin de former des ingénieurs avec des compétences solides en informatique et en génie industriel mais aussi à travers des savoir-faire transverses. « Les dimensions environnementales, énergétiques et sociales sont des compétences indispensables pour répondre aux questions clés de l'industrie du futur », reprend Sophie Brétésché. Les ingénieurs vont devoir agir dans un monde complexe prenant en compte beaucoup de paramètres différents dont ils doivent avoir conscience. « Il faut que les ingénieurs soient à l'aise avec



la législation environnementale pour mettre en place des éléments pertinents », illustre-t-elle.

L'enseignante-chercheuse insiste alors sur le besoin de décloisonner les disciplines, en favorisant des formations interdisciplinaires mais aussi en ouvrant les portes entre industries et monde académique. « Il faut que les entreprises se rencontrent et traitent leurs réflexions ensemble, et nous, en tant qu'académiques, nous devons montrer l'exemple aux étudiants de cette réflexion collaborative dans des contextes multi-compétences », termine-t-elle.

## « Il y a un fort besoin de sensibilisation en matière d'usages du numérique, pour amener à prendre conscience de son coût environnemental. »

Emmanuel Laroche, **Green IT Manager** chez Airbus et membre de l'Institut du numérique responsable (INR), indique que cela se transmet aussi en ouvrant des thèses sur ces problématiques, comme les architectures cloud. Sensibiliser les équipes actuelles est aussi essentiel. « Nous travaillons à l'INR à la réalisation d'un MOOC destiné à assurer une sensibilisation large de nos équipes et une montée en compétences, pour bien identifier quels sont les impacts environnementaux significatifs des services numériques et quels sont les leviers d'action les plus efficaces à mettre en place », ajoute-t-il.

Et les entreprises ne sont pas toujours bien informées sur les labels, les normes d'éco-conception ou de **RSE (responsabilité sociale des entreprises)**. « Il y a toujours besoin d'informer sur les standards, sur les enjeux

de prise de conscience, d'informer sur ce qu'on peut faire pour s'engager, pour changer les choses et pour contribuer à la transition écologique », complète Sandrine Berger-Douce. Elle signale également qu'il « faut une mobilisation des différents acteurs, économiques, académiques, publics et associatifs pour sensibiliser à ces sujets ».

Il y a également un fort besoin de sensibilisation en matière d'usages du numérique, pour amener à prendre conscience de ce coût environnemental. « Imaginons que j'utilise un appareil pour faire une recherche sur internet, illustre Miguel Lopez-Ferber, chercheur en génie environnemental à IMT Mines Alès. Nous avons facilement conscience du coût en électricité mais nous ne voyons pas l'impact de l'infrastructure. C'est transparent, dématérialisé et ça ne nous coûte rien, nous associons difficilement un impact environnemental à quelque chose que l'on ne voit pas », soutient-il. En ce sens, sensibiliser à ces problématiques est nécessaire pour prendre conscience de ce coût, de ce que nos habitudes numériques impliquent et nécessitent et proposer de bons gestes. ▲

## Pour aller plus loin :

---

- Natacha Gondran, *Comment l'éco-conception s'est imposée dans les entreprises ?*, The Conversation France, 2018, [www.theconversation.com/fr](http://www.theconversation.com/fr)
- *Innovation : être ou ne pas être responsable ?*, l'MTech , 2018, [www.imtechnews.fr](http://www.imtechnews.fr)



# III

## L'ÉNERGIE, CARBURANT DE L'INDUSTRIE NUMÉRIQUE

---

L'énergie est nécessaire d'un bout à l'autre de la chaîne des usages numériques. Qu'il s'agisse du stockage des données, des infrastructures réseaux, ou des terminaux fixes et mobiles des utilisateurs, l'empreinte environnementale ne peut être détachée de l'empreinte énergétique. En dépit de la croissance importante des usages numériques, les nouvelles générations de technologies sur chacun de ces aspects permettent de limiter la pression sur le bien commun qu'est l'énergie.

# 1

*DATA CENTERS,*  
CENTRES  
DE L'ATTENTION

---

DANS NOS POCHE,  
LA CONSOMMATION  
TERMINALE DU  
NUMÉRIQUE

---

# 3

# 2

RÉSEAUX NOUVELLE  
GÉNÉRATION, NOUVEAUX  
DÉFIS ÉNERGÉTIQUES

---

*MACHINE LEARNING :*  
CHANGER  
D'APPROCHE  
POUR ÉCONOMISER  
L'ÉNERGIE

---

# 4



# L'ÉNERGIE, CARBURANT DE L'INDUSTRIE NUMÉRIQUE

## DATA CENTERS, CENTRES DE L'ATTENTION

---

Les *data centers* souffrent d'une image de gouffre énergétique. S'il est indéniable qu'ils occupent une part importante dans la consommation du numérique, les marges de manœuvre pour diminuer leur empreinte existent. Elles consistent à agir principalement sur deux leviers : la demande d'électricité des serveurs, et le besoin de refroidissement des salles.

Sur le plan médiatique, ils sont la représentation de la consommation énergétique du numérique. Les *data centers* sont régulièrement pointés du doigt pour leurs besoins en électricité afin d'alimenter et de refroidir les serveurs. Depuis plusieurs années cependant, des acteurs – chercheurs, entreprises, associations – œuvrent pour mettre au point des solutions visant à limiter leur empreinte environnementale. Précisons d'emblée que la consommation, en valeur absolue, n'est pas le seul indicateur à suivre. L'objectif est également d'améliorer l'efficacité des *data centers*, une qualité traduite par le **PUE** : **Power Usage Effectiveness**, ou indicateur d'efficacité énergétique.

Cette valeur se définit comme le ratio entre l'énergie totale consommée par le centre de données et celle consommée par les serveurs uniquement. Dans un monde idéal, le PUE d'un centre serait de 1 : cela signifierait que toute l'électricité fournie servirait seulement aux équipements informatiques. Mais dans la réalité, d'autres composants nécessitent de l'énergie, en particulier les systèmes de refroidissement.

Avec les récents progrès technologiques, cet indicateur s'est grandement rapproché de son optimum. Il y a une quinzaine d'années, il s'établissait généralement entre 2 et 4 : en d'autres termes, pour 100 W consommés, seuls 25 à 50 l'étaient par les serveurs. Aujourd'hui, la plupart des centres de données voient leur PUE osciller autour de 1,5.

### « Comment améliorer l'efficacité énergétique des data centers ? »

---

#### Une problématique récente

Comment faire en sorte de réduire la consommation des *data centers* et d'améliorer le PUE ? Jean-Marc Menaud, chercheur en efficacité énergétique des systèmes distribués à IMT Atlantique, s'intéresse à ce sujet depuis 2006. « À l'époque, on ne se posait pas la question de la consommation énergétique des ordinateurs, se souvient-il. Cette thématique

scientifique n'a vraiment pris de l'importance qu'à partir de 2010 environ. » Le chercheur avait alors lancé une première thèse, visant à optimiser le fonctionnement des serveurs.

« Le problème vient du fait que les salles sont souvent dimensionnées pour absorber les pics de charge, explique Jean-Marc Menaud. Par conséquent, la plupart du temps, les ordinateurs ne font pas grand-chose. » Ainsi, les premiers travaux de recherche ont consisté à améliorer la conception des *data centers*, en les adaptant plus précisément aux besoins des utilisateurs. Cela permettait alors d'éteindre les ordinateurs non utilisés à un instant t, de sorte à diminuer la consommation énergétique globale de la structure.

## « C'est un peu comme un grand Tetris. »

---

Élémentaire ? « L'idée est simple, mais la mise en place technique est compliquée », souligne le chercheur d'IMT Atlantique. Une telle solution implique en effet une grande complexité. La première thèse reposait sur la « consolidation dynamique » : rassembler un maximum d'applications sur un minimum de serveurs physiques. « C'est un peu comme un grand Tetris, décrit Jean-Marc Menaud. Les applications représentent les pièces, de formes différentes, et on les regroupe, en faisant en sorte qu'elles prennent le moins d'espace possible. » Aujourd'hui, ce type de solution s'est généralisé et représente un levier important de diminution de la consommation des centres de données.

### Contraintes de disponibilité

Cependant, dans certaines entreprises, le surdimensionnement pour absorber les pics découle d'une contrainte interne.

Chez EDF, les deux *data centers* du groupe ont été conçus selon une architecture de niveau « Tier IV », en raison des applications critiques et des données sensibles hébergées dans leurs serveurs. Cette classification des centres informatiques, établie par l'Uptime Institute, comprend quatre échelons. Le plus élevé d'entre eux, Tier IV, implique une grande redondance parmi les équipements, dans le but de minimiser l'indisponibilité des services fournis, en toutes circonstances. Le respect des exigences associées à cette classification permet d'atteindre un taux de disponibilité théorique de 99,995 %, qui correspond à 27 minutes d'indisponibilité par an. Un impératif qui limite nécessairement l'efficacité énergétique des salles informatiques.

## « Réduire la consommation d'énergie n'a pas qu'un intérêt environnemental : c'est aussi un avantage financier. »

---

Cela n'empêche toutefois pas les infrastructures Tier IV de mettre en place des initiatives afin de réduire la consommation d'énergie. Et ce, pour des raisons aussi bien environnementales que financières. Même en tant que producteur d'énergie, EDF voit la facture d'électricité des *data centers* peser lourd dans la balance : 20 à 25 % du budget d'exploitation des centres, avant les démarches de réduction de consommation.

Cécile Boulnois, ingénieure efficacité des *data centers* au sein du groupe, témoigne des mesures mises en place permettant de réduire la consommation, tout en se pliant aux exigences du classement Tier IV. « En premier lieu, ce qu'il faut savoir, c'est que la consommation de nos équipements dédiés à l'informatique de gestion est très stable en fonction



Le refroidissement représente une part si importante de la consommation énergétique des data centers que certaines entreprises décident d'installer leurs infrastructures dans des pays froids. Lorsque c'est impossible, il faut trouver d'autres façons d'optimiser le refroidissement.

du temps », observe-t-elle. Cela signifie que, quelle que soit leur sollicitation, les centres de données consomment toujours à peu près la même énergie. Chez EDF, la priorité ne serait donc pas de limiter l'utilisation des applications hébergées dans les salles informatiques, mais plutôt d'opter, au moment du renouvellement du matériel, pour des machines plus efficaces.

Mais ce n'est pas suffisant, d'après Cécile Boulnois : « *La question essentielle à laquelle il faut répondre est : comment faire pour utiliser le moins d'équipements physiques possible ?* » Une partie de la solution vient de la technique de **virtualisation**, qui consiste à faire fonctionner, sur une même machine physique,

plusieurs systèmes comme s'ils se trouvaient sur des machines physiques distinctes. Fin 2019, le taux de virtualisation des serveurs d'EDF s'élevait à 89 % et celui de ses équipements réseaux à 60 %, ce qui contribuait significativement à l'optimisation de leur utilisation.

### Optimisation du refroidissement

Les équipements informatiques ne sont pas les seuls responsables de la consommation énergétique des *data centers*. Le refroidissement occupe également une part importante, à hauteur de 25 % pour EDF. D'où l'intérêt d'optimiser aussi les systèmes de climatisation présents dans les salles.

Jean-Marc Menaud s'est également penché sur ce sujet. Premier point soulevé par ses équipes : dans un centre de données, le refroidissement n'est pas homogène. Les équipements placés à proximité de la climatisation profitent davantage de ses effets que ceux situés plus loin. Et cette différence est loin d'être anecdotique. « *Au départ, notre objectif était simplement de réduire le nombre de serveurs allumés, où qu'ils soient, détaille-t-il. À présent, l'idée est la suivante : quitte à éteindre des serveurs, autant agir sur ceux bénéficiant de moins du refroidissement.* »

## « Dans un centre de données, le refroidissement n'est pas homogène. »

Du côté d'EDF, les consignes de refroidissement ont pu être adaptées en fonction de la charge des machines. « *Le besoin de froid est directement proportionnel à la consommation d'électricité des serveurs, et donc à leur utilisation,* explique Cécile Boulnois. *Par conséquent, nous suivons cette consommation, de sorte à réguler le nombre d'équipements de climatisation en fonctionnement et à ajuster les consignes de fonctionnement de nos équipements.* »

Et la charge informatique n'est pas le seul élément pris en compte. EDDC (Efficacité Dalkia Data Center), la filiale de Dalkia chargée de la conduite et de la maintenance des équipements d'infrastructure technique des *data centers* d'EDF, a ainsi mis en place une procédure permettant d'adapter, en permanence, le nombre d'armoires de climatisation en fonctionnement à l'utilisation des machines, mais également à la température extérieure. De cette façon, la fraîcheur naturelle est mise à profit pour refroidir les serveurs, selon leurs besoins, de sorte à limiter le recours aux solutions matérielles. Au total, ces mesures

ont conduit à une réduction de 28 % de la consommation énergétique des équipements de refroidissement.

À l'échelle d'une infrastructure, quels résultats sont obtenus par l'ensemble de ces optimisations ? Cécile Boulnois assure que la consommation d'électricité des *data centers* a décliné de près de 15 % de 2015 à 2019, tandis que le nombre de serveurs hébergés a presque doublé et que la puissance de calcul installée sur les supercalculateurs hébergés a plus que doublé. Les *PUE* des deux sites ont également baissé, passant de 1,75 à 1,64 pour l'un, et de 2,28 à 1,94 pour l'autre. Ceux-ci restent donc plus élevés que la moyenne, mais cela résulte notamment du classement Tier IV et des mesures de résilience imposées.

### Environnement de test

Pour aller plus loin, il est primordial de faciliter les expérimentations, et de disposer d'équipements permettant de tester des solutions hors des infrastructures industrielles. C'est pourquoi les équipes d'IMT Atlantique ont travaillé avec Orange, afin de mettre au point une modélisation complète d'une salle de serveurs. Le but : être en mesure de réaliser des simulations et des estimations de la consommation d'énergie, avant même la construction d'un *data center*. Cette aide permettrait de guider les entreprises dans le choix du matériel à acheter, et dans l'architecture générale — système de climatisation inclus. Dans le même ordre d'idées, avec une de ses filiales, EDF a récemment développé un jumeau numérique d'une de ses installations dédiées au refroidissement. « *Cela va nous permettre d'identifier les points de fonctionnement optimaux de nos systèmes de production et de distribution de froid et d'identifier d'éventuelles dérives énergétiques sur des équipements* », prévoit Cécile Boulnois.

Mais cela ne suffit pas. Les modélisations informatiques sont généralement difficiles à mettre en place et consommatrices de

ressources – un comble, étant donné les objectifs poursuivis. Il y a trois ans, IMT Atlantique a donc lancé SeDuCe, un projet de construction d'une salle de serveurs étanche, couverte de capteurs énergétiques et thermiques. Un terrain de jeu idéal pour réaliser des études, sorti de terre à la fin de l'année 2018. SeDuCe est alimentée par des panneaux photovoltaïques, et doit ainsi permettre de prototyper des solutions réelles en minimisant son propre impact environnemental.

### **Data centers et énergie renouvelable sont-ils compatibles ?**

L'alimentation par une électricité issue du renouvelable est aussi envisagée par les *data centers* industriels. Mais l'énergie renouvelable présente un inconvénient majeur : son intermittence. Dans le cas du photovoltaïque, il n'est possible d'alimenter les équipements que durant la journée, et avec des fluctuations de production selon la météo. Adapter le fonctionnement des serveurs à cette énergie intermittente est l'objet d'une nouvelle thèse, conduite au sein d'IMT Atlantique. Ces travaux visent à modifier le comportement des applications, selon les besoins des utilisateurs et en fonction de la production d'énergie.

Mais, bien entendu, un tel système présente des limites : avec le photovoltaïque, la production d'énergie s'interrompt totalement la nuit. On reste donc dépendant du réseau électrique traditionnel. « *Sur la question de l'autonomie des data centers, il reste encore beaucoup de travail à faire* », conclut le chercheur d'IMT Atlantique. ▲

## **« L'énergie renouvelable présente un inconvénient majeur : son intermittence. »**

*« Prenons l'exemple des itinéraires proposés par une application comme Google Maps, expose Jean-Marc Menaud. Aujourd'hui, quand les serveurs de Google sont saturés, l'outil peut ne proposer qu'un seul trajet, au lieu des trois ou quatre habituels. On pourrait imaginer la même chose avec l'énergie renouvelable : quand celle-ci ne serait pas disponible, le service serait simplement réduit. »*

## L'ÉNERGIE, CARBURANT DE L'INDUSTRIE NUMÉRIQUE

# RÉSEAUX NOUVELLE GÉNÉRATION, NOUVEAUX DÉFIS ÉNERGÉTIQUES

L'arrivée de la 5G ravive de nombreuses interrogations sur la consommation des réseaux mobiles. Moins visibles dans l'empreinte énergétique du numérique que les *data centers*, ils sont pourtant de grands consommateurs d'électricité. Si la 5G est synonyme d'un nouveau déploiement de réseaux, elle doit également apporter avec elle un lot d'innovations technologiques permettant de mieux gérer la consommation des réseaux.

Moins visibles que les *data centers*, les réseaux mobiles jouent aussi un rôle dans l'impact environnemental global du numérique. D'après la GSM Association, qui regroupe des centaines d'acteurs du secteur numérique, la consommation d'énergie des réseaux occupe 20 à 40 % des dépenses de maintenance des opérateurs. Aujourd'hui, le fixe occupe une part plus importante que le mobile, mais la tendance devrait s'inverser dans les années à venir. À plus forte raison avec le déploiement des réseaux dans les zones peu couvertes, et l'arrivée de la 5G.

La nouvelle génération de réseaux mobiles pose notamment la question de son impact. Risque-t-elle d'être un gouffre énergétique ? « *Très franchement, il n'y a pas de réponse claire à cette question* », affirme Loutfi Nuaymi, chercheur en télécommunications à IMT Atlantique. Car il faut noter que la notion d'efficacité énergétique a été prise en compte dès la mise au point du standard. Celui-ci inclut de nouvelles

fonctionnalités d'économie d'énergie, et vise à améliorer la consommation énergétique par bit. « *Dès la phase de conception, le standard a imposé des contraintes sur ce point* », souligne Dalia-Georgiana Popescu, ingénieure de recherche chez Nokia. De plus, si la 5G ambitionne de couvrir la plus large part possible du territoire, elle le fera d'abord en s'appuyant sur les infrastructures 4G existantes avant d'implanter de nouvelles antennes.

Toutefois, l'arrivée de cette cinquième génération s'accompagnera de nouveaux usages, avec de multiples objets connectés (capteurs, Industrie 4.0...). Les opérateurs s'attendent ainsi à une hausse de la consommation d'énergie. Pour Orange, cette augmentation serait estimée à 5 à 10 % d'ici 2025 sur l'ensemble de la facture énergétique, suivant le scénario et l'assiette de départ. « *Mais ces chiffres ne sont pas matures et varient très rapidement avec les données des constructeurs et les hypothèses de déploiement des fonctions*

de veille, tempère Azeddine Gati, coordinateur du programme de recherche Green au sein d'Orange Labs. *De plus, il faut prendre en compte que certains usages existent déjà, que nous restions en 4G ou que nous passions à la 5G. Et à usage égal, l'augmentation de consommation serait plus importante si nous restions en 4G.* » Mais cela n'empêche pas pour autant les académiques et les industriels de mettre en œuvre des procédures afin de limiter l'impact de cette nouvelle technologie.

### Optimiser en fonction de la demande

Depuis une dizaine d'années, Loufi Nuaymi se concentre sur la consommation d'énergie des réseaux sans fil, en particulier la 4G et désormais la 5G. Il travaille plus précisément sur le réseau d'accès, composé de dizaines de milliers de stations de base – ou antennes-relais – qui est à l'origine de 70 à 80 % de la totalité de l'électricité utilisée par le réseau.

Parmi les techniques permettant de réduire l'empreinte énergétique des réseaux, certaines font écho à celles utilisées pour les *data centers*. « *Un réseau télécom est dimensionné pour les heures de pointe. Au début, la question de la consommation d'énergie ne constituait pas une priorité. On ne se souciait donc pas vraiment de son optimisation hors des périodes les plus chargées. Mais aujourd'hui, en dehors des heures de pointe, on ne peut plus se permettre de faire tourner le réseau tel quel.* »

Mais comme pour les *data centers*, la mise en œuvre de telles solutions n'a rien de trivial. Car des contraintes viennent compliquer l'équation : continuité de service, possibilité de passer des appels d'urgence, règles imposées par les standards... Aujourd'hui, les réseaux intègrent ainsi des techniques de mise en veille des petites cellules, rendues possibles par les standards 4G et 5G.

Cette problématique d'optimisation des réseaux est prise au sérieux par Nokia, un des principaux constructeurs du marché. « *Par exemple, prenons une zone comportant principalement des bureaux et une autre des logements*, décrit Dalia-Georgiana Popescu. *Le transfert de charge sur le réseau peut être mis à profit pour mieux allouer les ressources où elles sont les plus importantes.* » Il faut toutefois veiller à assurer la continuité du service et à maintenir la réactivité du réseau, d'où la nécessité de faire appel à des algorithmes.

**« Avec la 5G, les opérateurs s'attendent à une hausse de la consommation d'énergie. »**

### La 5G dans tous ses états

L'extinction d'antennes-relais ne constitue pas la seule option, d'autant qu'elle peut induire un temps de latence important, dégradant alors la qualité de service. Les stations de base peuvent également être mises en veille, et selon plusieurs modes distincts. « *Un des défis scientifiques pour les réseaux consiste*



à pouvoir s'endormir, puis se réveiller avant même que l'utilisateur ne demande quoi que ce soit », résume Azeddine Gati. Différents modes de veille ont ainsi été instaurés pour la 2G, la 3G et la 4G, avec, à la clé, des économies d'énergie allant de 10 à 30 %.

## « Le réseau sans fil doit s'adapter et apprendre. »

Problème : les protocoles des précédentes générations de réseaux mobiles imposent l'envoi d'un signal en permanence, uniquement pour maintenir le lien avec un téléphone, et permettre au terminal d'afficher les barres de réception du signal. « Mais ce "bip" ne sert à rien, il ne transporte pas d'information utile », déplore l'ingénieur d'Orange Labs. La 5G a permis de s'affranchir de cette contrainte. Dalia-Georgiana Popescu abonde dans ce sens : « La 5G permet d'ajouter un état particulièrement utile pour les objets connectés ou les capteurs utilisés dans l'industrie ou l'agriculture. Dans cet état intermédiaire, les dispositifs peuvent continuer à envoyer des données de temps en temps, mais en consommant beaucoup moins d'énergie. »

## Énergie renouvelable et IA

Toujours à l'image des pistes explorées au sujet des *data centers*, une autre solution consiste à fournir de l'énergie renouvelable aux stations de base. « Chez Orange, notre objectif est d'être 100 % décarboné d'ici 2040 et d'atteindre les 50 % de renouvelable dans notre *mix énergétique* d'ici 2025 », annonce Azeddine Gati. Et là encore, le souci de l'intermittence : « L'énergie renouvelable n'étant pas disponible en permanence, on a donc besoin de batteries », expose Loufi Nuaymi. Aujourd'hui, les plus utilisées sont celles au lithium, les mieux adaptées à l'activité des antennes-relais. Ces dispositifs présentent toutefois des exigences au niveau des durées d'utilisation, ou encore des cycles de charge et de décharge.

Dans ce contexte, le fonctionnement du réseau cellulaire doit prendre en compte de nouveaux paramètres, qui s'additionnent à d'autres plus classiques : comportement et position des utilisateurs, services utilisés... « Le réseau sans fil doit s'adapter et apprendre, afin de prendre les meilleures décisions : à quel moment et à quelle puissance émettre, quelles stations



de base éteindre, quand solliciter la batterie... », détaille Loutfi Nuaymi. Ses équipes à IMT Atlantique ont donc mis en place des méthodes d'apprentissage automatique, afin de résoudre ce problème complexe. Des travaux qui visent particulièrement à optimiser les performances des **réseaux 5G**, qui ajoutent encore de nouvelles contraintes à prendre en compte, comme avec les objets connectés ou les usages industriels.

Pour adapter ses réseaux aux sollicitations des utilisateurs, Nokia se repose également sur des techniques d'apprentissage automatique, une branche de l'intelligence artificielle. « À long terme, l'intelligence artificielle doit permettre de concevoir des réseaux sur mesure, qui contribueront à la réduction de l'empreinte énergétique, anticipe Dalia-Georgiana Popescu. En utilisant le machine learning, on peut bénéficier d'une plus grande flexibilité dans l'évolution, la modification, et l'amélioration des algorithmes, ce qui diminue la nécessité de changer les composants électroniques dédiés à une seule fonction ».

#### De premiers résultats encourageants

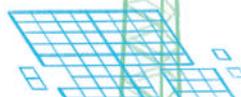
À IMT Atlantique, les algorithmes ont été testés via des simulations. « Pour certains cas favorables, on a observé des économies d'énergie comprises entre 10 et 50 %, le maximum intervenant pendant les heures creuses », présente Loutfi Nuaymi. Ces résultats concernent surtout la 4G. Les chercheurs manquent encore de modèles précis sur la 5G pour pouvoir analyser l'impact des algorithmes sur un tel réseau.

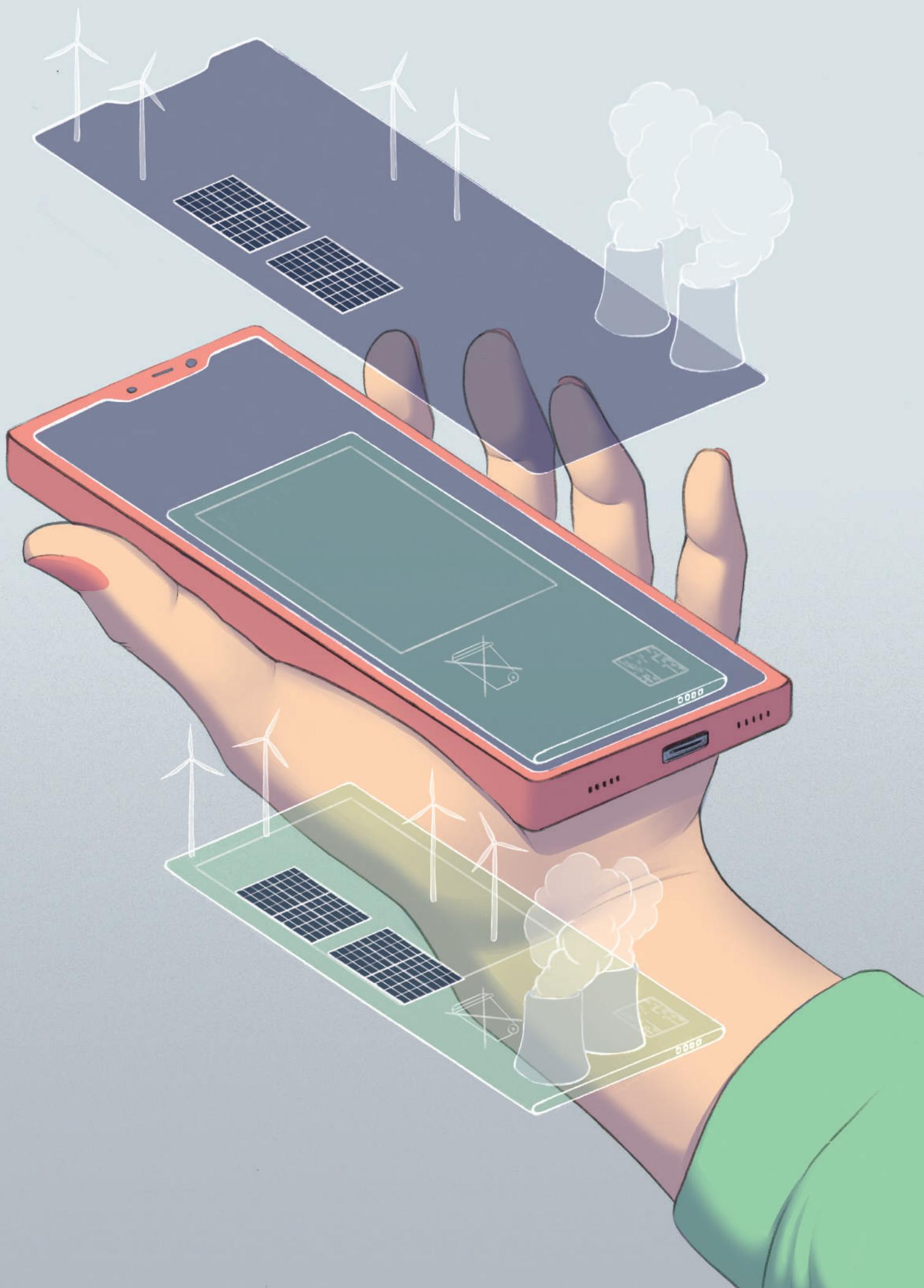
Néanmoins, constater une diminution de la consommation énergétique ne suffit pas. Encore faut-il maintenir une qualité de service suffisante. Pour ce faire, l'équipe d'IMT Atlantique s'intéresse également aux délais moyens. « Si le réseau se coupe régulièrement, cela provoquera un allongement des délais, normalement dus à la latence de transmission,

souligne Loutfi Nuaymi. Ce qui peut perturber certains services, pour lesquels les temps de réponse sont primordiaux. » Par conséquent, les chercheurs s'attachent à trouver le meilleur compromis, assurant des économies d'énergie, tout en préservant les délais.

### « Constater une diminution de la consommation énergétique ne suffit pas. »

Du côté d'Orange, les chiffres communiqués assurent que la consommation énergétique a été réduite de 3 % à l'échelle du groupe sur les deux dernières années. Et ce, grâce aux solutions citées précédemment pour optimiser les réseaux, mais également via d'autres mesures : réduction du nombre de *data centers*, mutualisation des infrastructures entre opérateurs, remplacement d'équipements...





## L'ÉNERGIE, CARBURANT DE L'INDUSTRIE NUMÉRIQUE

# DANS NOS POCHE, LA CONSOMMATION TERMINALE DU NUMÉRIQUE

---

Les terminaux constituent le dernier pan de la consommation d'énergie induite par l'utilisation du numérique, et non des moindres. Les pistes pour réduire leur empreinte sont multiples : de nouvelles générations de batteries à l'optimisation de code. Dans certains cas, les batteries pourraient même être tout simplement supprimées.

Comment optimiser la consommation énergétique des terminaux ? Premier domaine de recherche : les batteries, qui représentent un enjeu environnemental majeur. Pour améliorer leurs caractéristiques, il peut sembler judicieux de jouer sur les matériaux employés. « Mais il me paraît aujourd'hui peu probable de trouver un matériau révolutionnaire, multipliant par dix les performances offertes par le lithium », estime Thierry Djenizian, chercheur en micro-électronique à Mines Saint-Étienne, qui travaille sur des dispositifs de quelques cm<sup>2</sup> seulement. Selon lui, si des améliorations peuvent toujours y être apportées, l'avenir se situe davantage dans les travaux sur le design des batteries.

Cela passe premièrement par une optimisation des interfaces. En effet, une batterie est constituée de trois éléments : deux électrodes – anode et cathode – séparées par un électrolyte. Ses performances dépendent directement des réactions électrochimiques qui ont

lieu à la surface de la cathode et de l'anode. « Il faut donc veiller à disposer du meilleur contact possible entre chaque électrode et l'électrolyte », résume le chercheur.

**« L'avenir des batteries se situe dans les travaux sur leur design. »**

---

Or, au fur et à mesure de l'utilisation d'une batterie, les électrodes peuvent subir le dépôt de couches indésirables, dû à des réactions chimiques parasites et pesant sur la capacité du composant. Afin de lutter contre cette apparition inopportune, une solution consiste à ajouter une couche très fine d'alumine sur les électrodes. « Mais étant donné que nous travaillons avec des matériaux 3D à l'échelle nanométrique, il est très compliqué de recouvrir les structures de manière uniforme,

avec une épaisseur très faible », signale Thierry Djenizian. Cette contrainte a donc poussé les équipes de Mines Saint-Étienne à recourir à des techniques offrant une grande précision, comme le dépôt de couches minces atomiques ou l'électrodéposition. Ces procédés ont alors permis de multiplier par deux la capacité des batteries, sur le long terme.

Cependant, les travaux de Thierry Djenizian concernent un domaine particulier : le stockage d'énergie pour l'électronique transportable, par exemple des patches médicaux, via des batteries micrométriques. Il ne s'agit donc pas ici de composants destinés aux smartphones, ordinateurs ou voitures électriques. D'autres applications pour les résultats obtenus peuvent être envisagées néanmoins, mais elles nécessiteraient alors quelques adaptations. Quoi qu'il en soit, les recherches semblent davantage se concentrer sur l'optimisation de la capacité que sur les économies d'énergie.

## « Les batteries sont-elles indispensables dans les terminaux ? »

### Technologie sans batterie : la RFID

Mais après tout, les batteries sont-elles indispensables dans les terminaux ? Avec les travaux de François Gallée, chercheur en électronique à IMT Atlantique, il devient possible de s'en affranchir... dans certains cas. En l'occurrence, l'objectif d'un de ses projets était de suivre l'évolution de la corrosion au sein de structures de béton, à l'aide de capteurs sans fil, directement intégrés dans le matériau. Les durées des processus physico-chimiques liés à la corrosion pouvant être très longs (plusieurs dizaines d'années) et l'intégration s'effectuant dans des environnements inaccessibles (par exemple, le béton), une solution dépourvue

de batterie semblait alors appropriée, offrant une autonomie illimitée et donc une plus grande durée de vie. Les scientifiques ont donc choisi de s'inspirer de la technologie **RFID** (*Radio Frequency Identification*) pour auto-alimenter le dispositif.

**« La RFID a des avantages intéressants en matière d'autonomie et de durée de vie, mais elle présente une restriction majeure : sa portée. »**

Cette méthode présente l'avantage d'autoriser la transmission d'informations, sans avoir besoin d'une source d'énergie extérieure pour émettre le signal au niveau du capteur. « L'énergie est fournie par le lecteur, l'équipement qui va recueillir les données transmises par le capteur, explique François Gallée. Quand ce lecteur est positionné devant le capteur, ce dernier va récupérer l'énergie émise pour s'auto-alimenter, afin de traiter les données issues du capteur physique de la corrosion et de les transmettre. » À cet effet, il fonctionne par rétrodiffusion : le signal émis par le lecteur est réfléchi et modulé par le capteur, pour transmettre les données. Il s'agissait ici de suivre la réaction d'un alliage métallique, afin de surveiller l'évolution de l'environnement corrosif à l'intérieur de la structure.

Néanmoins, si la RFID s'accompagne d'avantages intéressants en matière d'autonomie et de durée de vie, elle présente une restriction majeure : sa portée, typiquement 5 m. « On pourrait éventuellement gagner quelques mètres, mais difficilement beaucoup plus », juge le chercheur. Ces travaux restent ainsi limités à des besoins spécifiques, tels que

la maintenance préventive ou prédictive, à l'image de la surveillance de la corrosion dans les bâtiments.

Ces activités de recherche ont débuté dans le cadre d'un partenariat local brestois avec l'université de Bretagne occidentale et l'Institut de la corrosion. Aujourd'hui, ces travaux se poursuivent dans le cadre d'un projet européen en collaboration avec l'institut de recherche suédois RISE.

### Optimisation de code

Ces recherches sur les batteries ne s'adressent donc pas en priorité au grand public. D'autres initiatives pourraient toutefois influencer sur l'empreinte énergétique des terminaux numériques, comme l'optimisation de code.

Cette pratique consiste à améliorer l'efficacité d'un programme informatique, notamment dans le but de réduire la consommation d'énergie associée. Marc Vautier, expert chargé des questions liées à l'analyse du cycle de vie des produits chez Orange, a commencé à s'intéresser à ce sujet en 2013. À l'époque, la démarche ne suscitait pas un grand enthousiasme chez les développeurs de l'opérateur, déjà soumis à de nombreuses contraintes et pas toujours conscients de l'impact de leurs logiciels. « *L'un d'entre eux m'a alors dit : "Le software, c'est des 1 et des 0, ça ne consomme pas d'énergie" »*, se souvient le responsable.

Concrètement, comment optimiser un code informatique ? Première étape : le choix du langage. « *À mon sens, c'est un peu une guerre de religion, tempère Marc Vautier. Certains vont privilégier un langage plutôt qu'un autre, mais d'autres dimensions entrent en compte. Si l'un d'entre eux s'avère moins énergivore, est-il également aussi performant ou aussi souple ? »*

D'après lui, il serait plus judicieux de mieux choisir ses « librairies ». Ce terme désigne

des ensembles de fonctions déjà codées et prêtes à être utilisées par les développeurs, qui n'ont donc pas besoin de tout réécrire. L'idée serait de faire preuve de pragmatisme, en sélectionnant celles précisément adaptées au travail en cours. Or, certains ont plutôt tendance à se tourner vers celles qu'ils maîtrisent le mieux, même si elles correspondent à des besoins bien supérieurs aux leurs.

**« Le software, c'est des 1 et des 0, ça ne consomme pas d'énergie. »**

Enfin, d'après l'expert, un aspect primordial de l'optimisation de code réside dans la fourniture d'outils permettant de mesurer la consommation énergétique. Orange a d'ailleurs collaboré avec la *start-up* française Greenspector, qui développe ce type de solutions. Des expérimentations ont ainsi été menées sur une application dédiée à l'Internet des objets, et les équipes de l'entreprise se sont aperçues



**Le coût de la charge d'un smartphone sur une année est de l'ordre de 1 € en France. Les gains apportés par de nouvelles générations de batteries sont donc généralement plus visibles pour des équipements plus volumineux, et plus consommateurs d'électricité.**

qu'en se passant d'une librairie très énergivore, on pouvait réduire la consommation d'énergie du programme de 10 à 15 %.

Aujourd'hui, Marc Vautier déplore toujours de voir l'optimisation de code peiner à faire son chemin dans les entreprises, en partie à cause du manque d'outils. Greenspector constitue l'une des rares solutions du marché. Son adoption a commencé, mais il reste encore du chemin à faire pour qu'elle soit intégrée massivement dans les équipes.

D'après lui, si on souhaite obtenir des résultats probants, il convient de remonter plus en amont, en s'attaquant directement aux fonctionnalités proposées par les logiciels. Il s'agirait alors de développer des applications répondant strictement aux besoins des utilisateurs, quitte à les enrichir par la suite.

## « Lorsqu'on gagne en efficacité énergétique, on a tendance à augmenter l'utilisation. »

### Enseigner la sobriété numérique

Sa position peut donc se résumer en deux mots : sobriété numérique. Il a d'ailleurs fait partie du groupe de travail à l'origine du rapport « Pour une sobriété numérique » de *The Shift Project*. Il met ainsi en avant la nécessité d'une prise de conscience collective, notamment chez les utilisateurs, afin de limiter le phénomène « d'effet rebond ». « Lorsqu'on gagne en efficacité énergétique, on a souvent tendance à augmenter l'utilisation, décrit-il. Pour limiter cet effet rebond, il faut donc beaucoup travailler sur la sobriété à la fois côté offre et côté demande. »

Une opinion partagée par Jean-Louis Dirion, chercheur en génie des procédés à IMT Mines

Albi et responsable de l'option Énergie et transition numérique. Aujourd'hui, l'enseignement se concentre sur la manière dont le numérique peut favoriser la mise en place de politiques de transition énergétique. Mais le responsable souhaite enrichir son contenu, en intégrant davantage la notion d'impact environnemental. L'option suivrait alors l'évolution des mentalités sur le campus.

« Depuis quelques années, à IMT Mines Albi, les étudiants paraissent de plus en plus concernés par les considérations environnementales, constate Jean-Louis Dirion. Ils ont notamment créé une association (UNITA) à vocation écologique au sein de l'école. » Et seraient aujourd'hui particulièrement demandeurs de cours abordant en profondeur ces sujets. Par conséquent, ce serait plutôt à l'école de suivre la voie tracée par les élèves, « en avance par rapport à l'institution », du point de vue du chercheur.

Les futurs ingénieurs seraient donc moteurs sur les questions environnementales. « Mais ont-ils pleinement intégré l'impact du numérique et l'ont-ils identifié comme une priorité ? » s'interroge Jean-Louis Dirion. Il entend ainsi les faire travailler sur l'évaluation de l'empreinte énergétique du numérique, par exemple : quel est le coût environnemental de l'envoi d'un mail à l'ensemble de la promotion ? De cette façon, le but serait de les faire réfléchir sur les conséquences de leurs propres usages. Un premier pas, dès l'enseignement supérieur, vers une prise de conscience des bienfaits de la sobriété numérique. ▲

# MACHINE LEARNING : CHANGER D'APPROCHE POUR ÉCONOMISER L'ÉNERGIE

Le *machine learning* a été développé dans une logique de performance qui ne se souciait guère de l'impact environnemental. Aujourd'hui, les considérations croissantes envers le coût énergétique du numérique amènent à adapter les outils d'apprentissage, voire à les repenser. Chercheur en *machine learning* à Télécom Paris, Stéphane Cléménçon témoigne de cette tendance dans le milieu de la recherche.



**La consommation d'énergie est-elle un paramètre pris en compte dans le développement des outils de *machine learning* ?**

**Stéphane Cléménçon :** Avec l'essor du *big data*, les techniques se sont d'abord concentrées sur l'efficacité du traitement des données. Pour accroître la rapidité, améliorer la fiabilité et contourner les problèmes inhérents aux limites de mémoire des machines, l'approche la plus efficace est de couper et répliquer les données à plusieurs endroits, et de distribuer le calcul. Tout le cadre de travail de l'algorithmie s'est donc tourné vers cette logique. Il s'avère que cela permet de s'affranchir du calcul sur les terminaux, qui serait trop coûteux en énergie, voire impossible à supporter pour les batteries des smartphones. Cependant, beaucoup d'outils sont fondés sur un niveau de redondance et sur des protocoles de communication intensive entre les nœuds

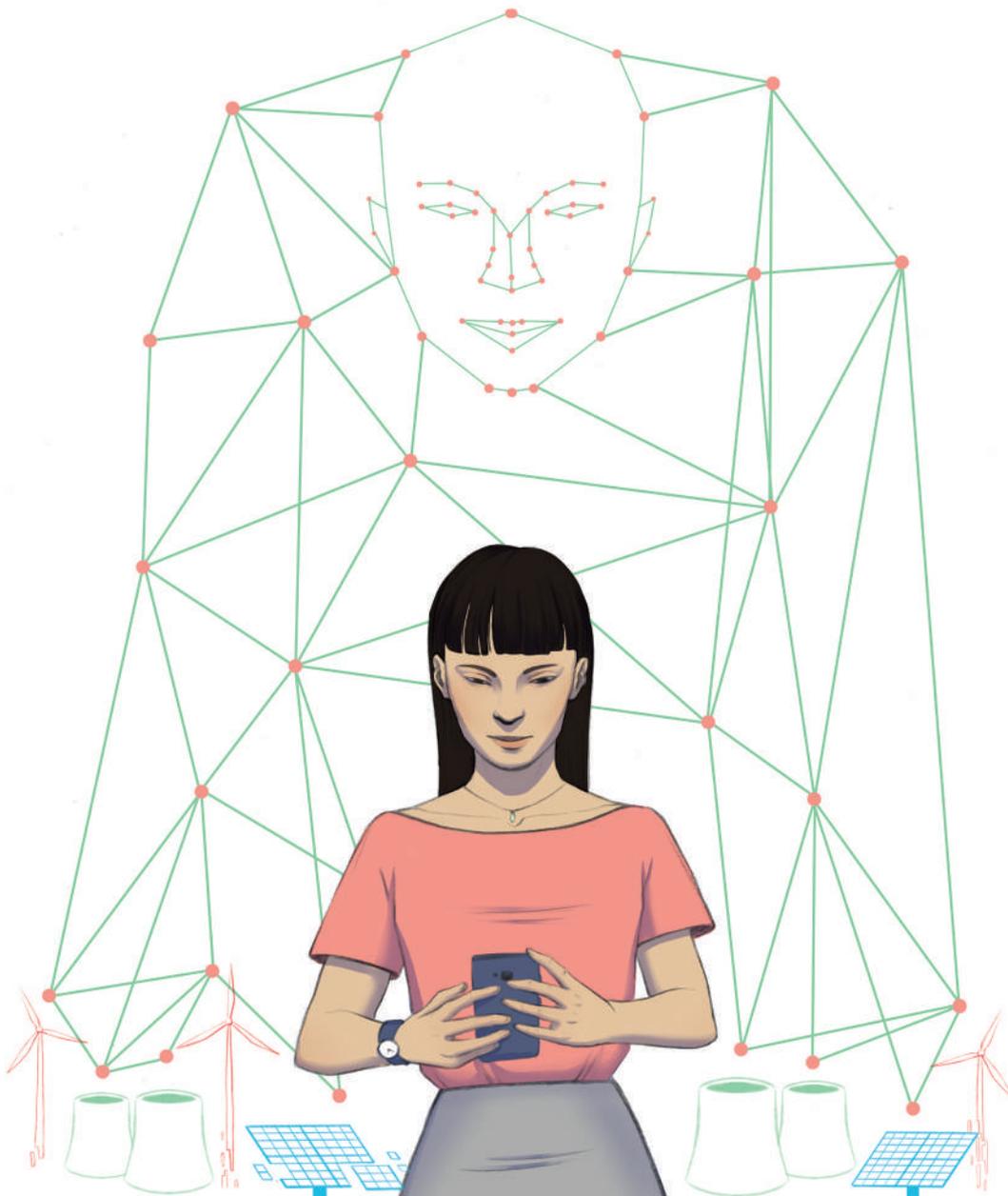
du réseau qui ne sont pas forcément nécessaires, et qui pourraient être un levier pour diminuer leur consommation énergétique.

### Comment serait-il possible d'économiser de l'énergie sur les outils de machine learning ?

**SC :** Dans la phase d'utilisation prédictive des algorithmes, la piste principale consiste à simplifier l'architecture parfois trop complexe des algorithmes. Lorsque l'on regarde certains réseaux de neurones actuels, utilisés dans le domaine de la vision par ordinateur par exemple, certains neurones ou certaines connexions ne sont pas forcément utiles.

Ils sont présents car ils sont hérités d'une approche où la flexibilité était primordiale, et où le souci d'économie énergétique n'existait pas. En simplifiant les architectures sans compromettre la performance prédictive, on réduit les calculs, et donc la consommation énergétique.

En phase d'apprentissage, les pistes d'amélioration consistent à intégrer des contraintes dans l'algorithme pour le forcer à adapter les communications de données et de calculs, et la complexité du modèle qu'il apprend, à la difficulté de la tâche prédictive.



### Privilégier la sobriété des algorithmes à leur robustesse ne risque-t-il pas de mettre à mal leur efficacité globale, et donc leur intérêt ?

**SC :** Pour certains usages, la perte de cette redondance ne présente pas beaucoup de risques. Par exemple, la reconnaissance d'image fait partie des tâches qui demandent le plus d'énergie dans le *machine learning*. Lorsque vous faites de la reconnaissance de visage dans un aéroport avec un passeport biométrique, vous avez besoin d'une grande fiabilité, et donc d'algorithmes lourds. En revanche, s'il s'agit de déverrouiller votre téléphone portable par reconnaissance faciale, la tâche est moins critique, et vous pouvez avoir une précision moins grande, et donc un algorithme qui requiert moins d'énergie. C'est cette approche qu'il est important d'avoir, en adaptant la complexité de l'algorithme à son usage. Il est évident que l'impact d'un faux positif n'est pas le même entre une bannière publicitaire en ligne mal adaptée à l'utilisateur, et une prédiction de maintenance sur un avion. L'idée est d'être moins demandeur en énergie là où on le peut.

### Cette solution vise à optimiser les outils déjà existants. Existe-t-il des approches plus radicales ?

**SC :** Disons que nous arrivons à un goulot d'étranglement où les marges de manœuvre sur ce qui existe sont de plus en plus faibles. Si nous voulons être plus économiques, il faut aller vers des approches nouvelles. C'est le rôle des académiques d'explorer de nouvelles solutions, mais nous ne pouvons pas le faire tout seuls, car cela touche aux applications et relève de compromis. Si nous développons des méthodes très peu consommatrices, encore faut-il qu'elles correspondent aux besoins des ingénieurs et des industriels, et aux usages des consommateurs. Nous pouvons éclairer ces compromis, mais pas les faire nous-mêmes.

### Les entreprises sont-elles conscientes de ce besoin d'exploration collective avec les académiques sur la question du numérique responsable ?

**SC :** La communauté du *machine learning* dans son ensemble prend conscience qu'il faut revisiter les approches en ce qui concerne la consommation énergétique. C'est le cas des scientifiques, et c'est aussi le cas des entreprises. Une des illustrations de cette tendance est le nouveau centre dédié à l'intelligence artificielle que nous montons en partenariat avec des entreprises. Dans ce cadre, l'un des axes de travail que nous avons en commun avec les industriels est la réduction de l'empreinte énergétique du numérique. ▲

## Pour aller plus loin :

- Fabrice Flipo, *L'inquiétante trajectoire de la consommation énergétique du numérique*, The Conversation France, 2020, [www.theconversation.com/fr](http://www.theconversation.com/fr)
- *Datafarm : une énergie bas carbone au service des data centers*, l'MTech, 2020, [www.imtechnews.fr](http://www.imtechnews.fr)
- Rapport « L'insoutenable usage de la vidéo en ligne », The Shift Project, 2019, [www.theshiftproject.org](http://www.theshiftproject.org)



# IV

## L'USAGE, ET APRÈS ?

---

Que faire de nos téléphones et ordinateurs lorsque ceux-ci sont en fin de vie ? Entre recyclage, reconditionnement ou vente de pièces détachées, les pistes sont multiples, mais pas toutes équivalentes. La complexité de structuration des filières et des marchés, ainsi que la volonté des industriels et des consommateurs sont des paramètres cruciaux à prendre en compte dans la mise en place de nouvelles stratégies et politiques de seconde vie des produits numériques.

# 1

RECYCLER  
L'IDÉE  
DU RECYCLAGE ?

---

GESTION  
DES DÉCHETS :  
RESPONSABILITÉ  
ET RÉGLEMENTATION

---

# 3

# 2

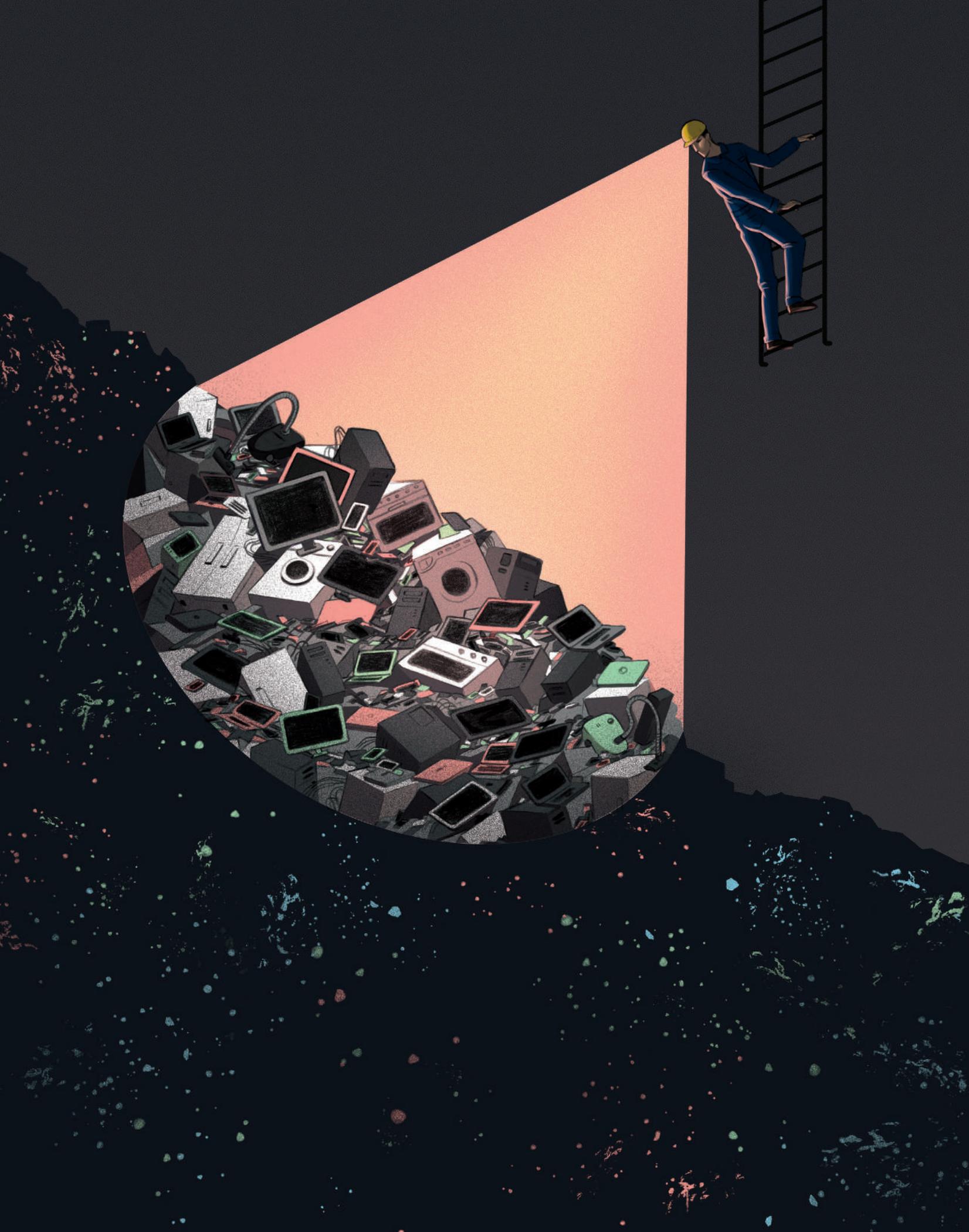
OFFRIR  
UNE DEUXIÈME VIE  
AUX PRODUITS  
NUMÉRIQUES

---

DU RÉALISME  
DE LA SOBRIÉTÉ  
NUMÉRIQUE

---

# 4



L'USAGE, ET APRÈS ?

# RECYCLER L'IDÉE DU RECYCLAGE ?

---

**Le recyclage est le porte-étendard de la seconde vie des produits après leur usage. Pourtant, les filières peinent à se structurer, et font face à de nombreuses limites. Technologie, économie et politique internationale se mêlent et freinent encore largement le développement du recyclage comme solution viable à la gestion des déchets du numérique.**

Quel est le point commun entre 4 500 Tours Eiffel et la totalité des avions de ligne jamais construits ? Ils permettent tous les deux d'imaginer les 50 millions de tonnes de déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE) produits en 2018 à travers le monde. Ordinateurs, téléphones portables, mais aussi appareils électroménagers, sont autant d'exemples de DEEE. Ces gisements de nature complexe se composent majoritairement de métaux, de plastiques et de composés chimiques spécifiques, ce qui rend leur traitement difficile. Et si nos consommations de produits électroniques ne changent pas, c'est un tsunami de 120 millions de tonnes de DEEE qui déferlera en 2050.

Face à ces prédictions, investir dans le recyclage semblerait être une piste incontournable pour le secteur de l'électronique. Pourtant, seuls 20 % des DEEE sont effectivement recyclés. Pourquoi ? Grazia Cecere, chercheuse en économie à Institut Mines-Télécom Business School, ne dénombre que deux moteurs d'activité de recherche sur le recyclage

de ces déchets. Le premier concerne la mise en place de nouvelles réglementations – notamment par l'Union européenne dans les années 2000 – qui ont su booster les recherches de la filière jusqu'en Chine. Le deuxième moteur est économique. Recycler coûte plus cher que d'extraire des matières premières. « *On va recycler d'autant plus certains équipements si le cours de métaux essentiels à l'électronique (or, argent, et cuivre) augmente. Les portées économiques l'emportent toujours sur l'écologie* », remarque Grazia Cecere.

**« Les portées économiques  
l'emportent toujours  
sur l'écologie. »**

---

## Des déchets qui valent de l'or

À travers le monde, les enjeux géopolitiques du recyclage des matériaux de l'électronique sont prégnants. En 1992, l'ancien chef suprême chinois, Deng Xiaoping, a déclaré que « *le Moyen-Orient a du pétrole, la Chine a des terres rares* ». En effet, les ressources sont mal réparties sur le globe et l'Union européenne a pris conscience des enjeux stratégiques des minerais nécessaires au numérique

dès les années 2000. La rupture d'approvisionnement du Japon en terres rares orchestrée par la Chine en 2010 pourrait d'ailleurs se reproduire avec d'autres nations. « *Nous avons analysé des facteurs comme l'état des réserves, la substituabilité ou encore le taux de recyclage de dix-huit groupes de matériaux afin d'évaluer l'exposition du groupe Orange aux ressources. L'or et l'argent, beaucoup utilisés en microélectronique ont des taux de recyclage corrects et peuvent être fournis par plusieurs pays contrairement aux terres rares* », précise Samuli Vaija, expert chargé des questions liées à l'analyse du cycle de vie des produits chez Orange.

## « Le recyclage, encore sous-développé, n'est pas une solution à court terme à la hauteur du problème pour traiter les DEEE. »

Bien qu'ayant accès aux ressources critiques, la Chine a également la filière qui recycle le plus de DEEE au monde, car elle a su investir dans son développement. Sachant qu'il y a plus d'or dans une tonne de téléphones mobiles que dans une tonne de minerai, cela signifie que de nombreux pays ont une mine urbaine à portée de main. Exploiter ces déchets limiterait la demande en matières premières et favoriserait un modèle d'économie circulaire.

### Complexité et recyclage ne font pas bon ménage

Les ressources sont là, encore faut-il développer les techniques qui permettront de les exploiter. L'innovation en électronique consiste actuellement à apporter toujours plus de fonctionnalités au sein d'appareils de taille réduite qui peuvent contenir jusqu'à 1 000 substances

différentes. La grande diversité des éléments présents en petite quantité dans ces appareils devenus déchets génère un minerai complexe à traiter et donc à recycler. À titre d'exemple, le meilleur recycleur d'Europe est l'organisme belge Umicore, capable de recycler 17 métaux parmi les plus de 60 éléments du tableau périodique constituant un smartphone. La marge de progression est donc importante, mais la filière n'attire pas autant les investisseurs que celle des produits qu'elle est censée recycler.

Quelles techniques arrivent à tirer leur épingle du jeu ? Soutenir la recherche sur le recyclage équivaut à explorer de nouveaux procédés de broyage et d'extraction des métaux rares et des minéraux présents dans nos appareils. En France, l'hydrométallurgie est la plus utilisée, car elle est également dépendante de l'industrie du nucléaire. D'autres pistes très différentes sont à l'étude à travers le monde allant du broyage à température contrôlée aux méthodes de récupération biologique par des micro-organismes (champignon, bactérie) appelée biolixiviation. Mais il est probable que les solutions les plus prometteuses reposent davantage sur une combinaison de plusieurs techniques plutôt que sur une méthode unique. « *Mettre au point des solutions industrialisables demande du temps. Le recyclage, encore sous-développé, n'est donc pas une solution à court terme à la hauteur du problème, pour traiter les DEEE* », souligne Fabrice Flipo, chercheur en philosophie des sciences et techniques à Institut Mines-Télécom Business School.

### Les limites du recyclage

Bien que l'Europe ait mis en place des directives pour cadrer le traitement des DEEE, chaque état gère sa mise en application sur son territoire. En France, des éco-organismes gouvernés par des distributeurs et producteurs collectent et traitent les déchets. De plus, « *depuis 2010, afin d'encourager l'écoconception des produits, la France est*

*le seul pays à avoir introduit l'éco-modulation dans la filière des DEEE comme cela a déjà été fait pour les emballages », explique Helen Micheaux, chercheuse en sciences de gestion à AgroParisTech. Des critères incitatifs ont été définis comme l'interdiction de certaines substances, la mise à disposition de pièces détachées, l'intégration de plastiques recyclés, la standardisation des connectiques, etc. Si le producteur les respecte, il bénéficie d'une réduction des contributions sur le produit concerné. Dans le cas contraire, un malus lui est imposé et ses contributions augmentent.*

**« Afin d'encourager l'écoconception des produits, la France est le seul pays à avoir introduit l'éco-modulation dans la filière des DEEE. »**

---

Mais il y a un hic : l'établissement de critères d'éco-modulation à long terme est difficile, car les innovations technologiques s'enchaînent très vite. Alors que la communauté européenne regarde de près cette expérimentation française, la filière DEEE souffre d'un manque de coordination globale. Beaucoup de déchets font l'objet d'un trafic à l'échelle mondiale en direction des pays sous-développés malgré l'interdiction de leur exportation. Il a fallu que la Chine ferme la porte aux déchets occidentaux en 2017 pour que les failles de l'industrie du recyclage fassent surface.

Enfin, demeure un problème majeur pour les déchets recyclés dans les bonnes conditions : les DEEE d'aujourd'hui sont les équipements d'hier. Aussi, est-il difficile de pouvoir répondre aux besoins de matières premières des produits de demain toujours plus innovants

à partir des DEEE. Le modèle d'économie circulaire envisagé dans le cadre de l'électronique serait-il vraiment la réponse à la croissance exponentielle des déchets de son secteur ? D'autant que le recyclage n'a d'influence ni sur l'obsolescence accélérée, ni sur la croissance des équipements des particuliers et des entreprises dont la demande croît d'environ 2 à 3 % chaque année. Recycler ne ferait que diminuer la tension sur l'extraction et ses conséquences. Tant que la politique du « produire plus » dominera le marché, le recyclage ne pourra être qu'une source d'approvisionnement parmi d'autres. ▲

L'USAGE, ET APRÈS ?

# OFFRIR UNE DEUXIÈME VIE AUX PRODUITS NUMÉRIQUES

**Si les filières de recyclage ont du mal à absorber la quantité de déchets électroniques produits, quelles sont les alternatives ? La philosophie générale pourrait être de trouver des moyens d'offrir une seconde vie d'utilisation aux produits usagés. Entre reconditionnement et vente de pièces détachées, de nouveaux modèles économiques voient le jour.**

Imaginons que l'économie circulaire soit un jeu dont le plateau est un cercle. Les déchets issus du numérique seraient simplement des pions chargés d'en faire le tour avant de reprendre la partie sous une nouvelle forme. Cependant, ne serait-il pas possible de changer les règles pour que la partie dure plus longtemps ? Créer des appareils durables, favoriser la réutilisation, développer des nouveaux marchés de composants, pourraient être autant de quêtes secondaires dans lesquelles l'aventure d'un appareil pourrait se poursuivre sans avoir à sortir du circuit. Des durées de vie plus longues permettraient de réduire la production et laisser le temps à des filières comme celle du recyclage d'avancer sans courir après le train déjà en marche. Qu'en est-il sur le terrain ?

## **Durabilité : de l'écoconception à la réparabilité**

Une première piste pour lutter contre l'augmentation des déchets du numérique consiste à allonger la durée de vie des produits. « *L'aspect recyclable est difficile à prendre en compte sur des échelles de temps long, car les filières et les technologies de recyclage évoluent très vite. C'est pourquoi nous misons, principalement, sur une longue durée de vie*

*avec des produits conçus pour être maintenus en opérabilité le plus longtemps possible afin de réduire leurs impacts environnementaux »,* indique Julien Weber, chargé de l'**écoconception** chez Airbus Defence and Space. Les satellites ont par exemple une durée de vie théorique de quinze ans. Ces appareils ne sont pas recyclés, mais ceux en orbite basse (jusqu'à 2 000 km d'altitude) sont conçus pour se désintégrer lors de leur nouvelle entrée dans l'atmosphère. Néanmoins, l'industriel mène des recherches afin de les réutiliser et les réparer en orbite.

Dans le cas d'un smartphone, la phase de fabrication est la plus impactante sur l'environnement. Dans le cas d'équipements réseaux — comme les serveurs — alimentés en permanence et sur une longue durée de vie, la phase d'utilisation est quant à elle primordiale pour des indicateurs environnementaux. Il est possible de réduire ces effets en misant sur l'écoconception pour augmenter la durée de vie et favoriser la réparabilité. Un exemple de conception alternative est le Fairphone : un téléphone facilement réparable composé de sous-ensembles interchangeables pour en faciliter la réparation. Toutefois, ce concept a

rencontré des difficultés majeures au lancement de ses premiers modèles. « Il y avait de la tension sur le marché concernant les panneaux LCD (écrans à cristaux liquides) et ils n'étaient pas forcément servis les premiers, car ils avaient besoin de volumes plus petits que les grands acteurs du marché », rapporte Samuli Vaija, expert chargé des questions liées à l'analyse du cycle de vie des produits chez Orange. Malgré cette mise en œuvre difficile, l'idée de modularité s'installe dans les esprits.

## Pour un smartphone, la phase de fabrication est la plus impactante sur l'environnement.

En ce sens, l'Agence de la transition écologique (Ademe) travaille depuis deux ans sur l'élaboration d'un indice de réparabilité. Cet affichage prévu en 2021 devrait tenir compte du prix des pièces détachées, de la possibilité de démonter un produit, etc. L'objectif étant

d'atteindre un taux de 60 % de réparation des appareils électriques et électroniques en France en cinq ans, contre 40 % actuellement.

### La location : un modèle qui favorise le reconditionnement

Différents modèles commerciaux, notamment la servicisation des produits, incitent le fabricant à veiller à l'utilisation optimale des ressources pendant le cycle de vie d'un de ses appareils. Certaines entreprises ont déjà adopté le système de *leasing* comme EDF. Celle-ci loue l'ensemble de ses équipements informatiques auprès d'un fournisseur, soit environ 80 000 ordinateurs renouvelés tous les 4 à 5 ans. La gestion de la fin de vie des appareils revient donc directement au producteur ou loueur.

De l'autre côté du miroir, Orange loue également son matériel (box internet, décodeur TV) à ses utilisateurs. Ainsi, dès la conception de ses produits, l'entreprise intègre les besoins de leur futur reconditionnement. Cette étape favorise la rotation du matériel qui est récupéré auprès d'un client et remis à neuf avant d'être réintroduit chez un autre. « La recherche sur le reconditionnement est essentielle, car nous avons la possibilité d'assurer une réduction



*d'impact globale ainsi qu'une bonne rentabilité économique avec des produits facilement reconditionnés et qui durent donc plus longtemps* », décrit Samuli Vaija. À titre d'exemple 2,9 millions de boxes ont été reconditionnées en 2018.

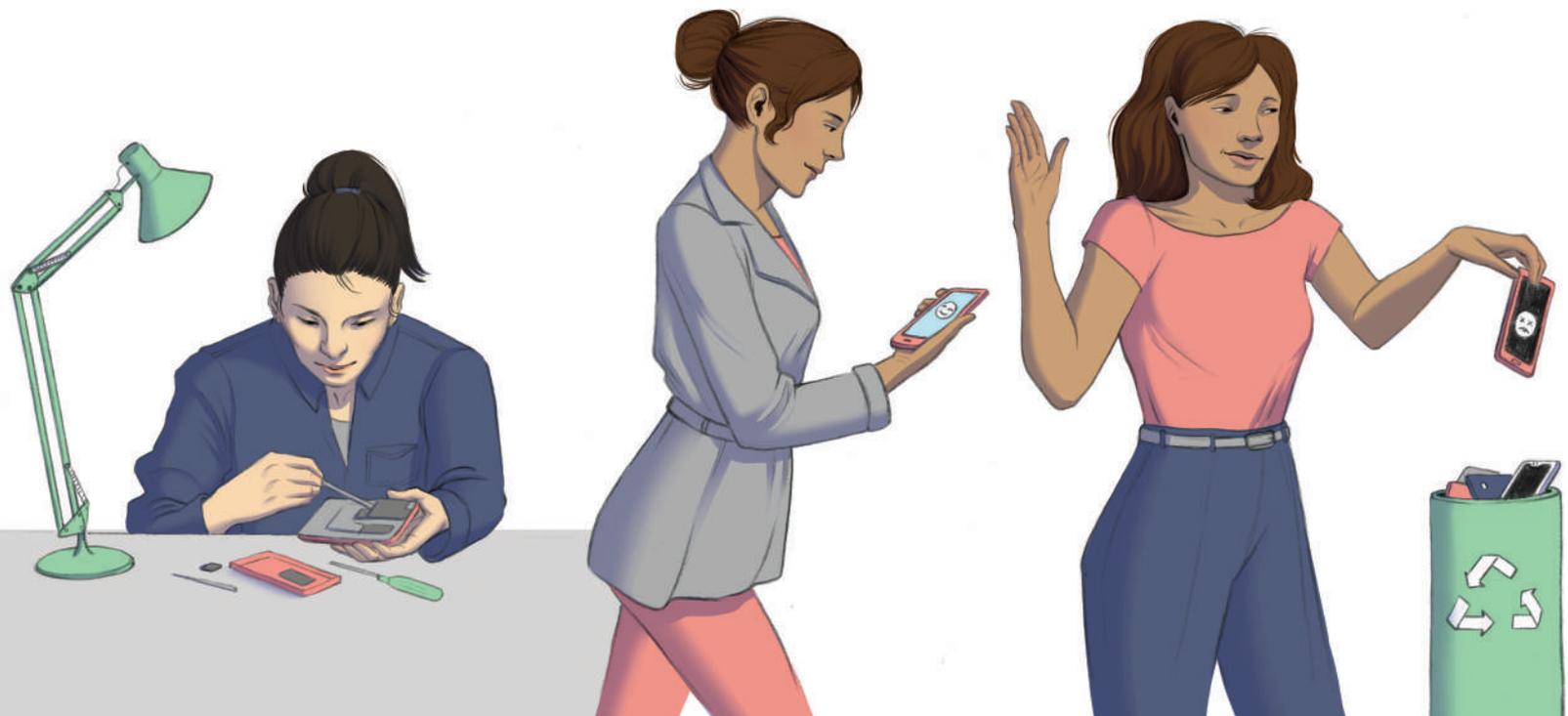
### Une porte ouverte à de nouveaux marchés

La rotation du matériel a des limites, notamment le marketing. L'arrivée de nouvelles offres pour attirer des nouveaux clients impose le retrait du matériel le plus ancien dont les spécifications techniques ne correspondent plus aux demandes du marché. Dans ce cadre, Orange a envisagé plusieurs pistes en faveur d'une réutilisation de ses box au-delà du reconditionnement, sans trouver de solution idéale. Par exemple, vendre en dehors du groupe Orange imposerait de retirer tous les logos des marchandises et coûterait trop cher. Qu'en est-il de la vente des pièces détachées comme dans l'automobile ? Actuellement, la revente de composants électroniques n'est pas suffisamment développée pour offrir une seconde vie à des marchandises industrielles. Car en définitive, ces marchés pourraient jouer un rôle clé dans le cadre de la démarche d'indice de réparabilité de l'Ademe.

Par ailleurs, des solutions émergent lorsque les quantités de marchandises sont moindres. EDF s'octroie les services d'un *broker* : un acteur intermédiaire qui rachète le matériel avant de le revendre à d'autres utilisateurs aux besoins de performance moins importants. Selon la quantité de volume de matériel vendu, une entreprise peut négocier un droit de regard pour suivre la gestion de son ancien bien.

## « La revente de composants électroniques n'est pas suffisamment développée. »

Enfin, une dernière filière encore sous-développée est celle du don. « *Il faudrait développer une politique publique en France comme celle du gaspillage alimentaire qui déclarerait par exemple qu'un certain pourcentage des appareils changés par les grandes entreprises serait redistribué aux écoles* », propose Grazia Cecere, chercheuse en économie à Institut Mines-Télécom Business School. En effet, du matériel est souvent considéré obsolète



par des entreprises, mais ne le serait pas pour d'autres utilisateurs. L'autorégulation n'est pas non plus prescrite et des démarches au sein des entreprises pourraient être mises en avant sans intervention des pouvoirs publics. Jusqu'à présent, la valeur économique des biens recyclés l'emporte sur leur réutilisation.

### Conserver ses appareils : un facteur de risque ?

Longévité rime-t-elle toujours avec sécurité ? Les *data centers* utilisent des batteries au plomb reconnues comme étant stables, facilement recyclables de par la maturité de la filière. Cependant, le plomb pose des problèmes sanitaires et environnementaux s'il est mal traité en fin de vie. De plus, le renouvellement de ces batteries est une prise de décision stratégique pour les entreprises. Certaines les remplacent à la fin de la garantie (5 ans). EDF les change tous les 8 ans en s'appuyant sur son retour d'expérience et de performance. Sachant que plus l'utilisateur conserve ses batteries longtemps, moins son impact environnemental est important mais plus sa prise de risque est grande. Au mieux, une batterie ne délivre plus de service, mais au pire, une batterie peut s'oxyder et exploser. La solution est donc de changer régulièrement ces outils afin d'assurer leur régularité.

En parallèle, les batteries au lithium sont réputées comme étant plus performantes et fonctionnant jusqu'à 20 ans dans le cas des *data centers*. Sauf qu'elles s'avèrent plus instables que les autres batteries ! Face aux avantages et inconvénients de chaque technologie, la question du déchet est remplacée par celle de la prise de risque dans son processus industriel. « *Le déchet, aussi vertueux que l'on veuille être, se confronte toujours à la performance de la technologie et à son cycle de vie. Les batteries au lithium ne sont disponibles que depuis deux ans pour les data centers, il y a donc peu de retour d'expérience et on ne sait pas les recycler, contrairement à celles au plomb qui restent une valeur sûre pour le moment* », conclut Raphaël Jamet, responsable d'exploitation de *data centers* d'EDF. ▲



L'USAGE, ET APRÈS ?

# GÉRER LES DÉCHETS ÉLECTRONIQUES : UN PROBLÈME GLOBAL

---

La responsabilité autour des déchets issus du numérique est multiple. D'un côté, il incombe aux états de renforcer les contrôles aux frontières pour mieux gérer les flux de déchets et éviter leur transfert dans des pays en développement. De l'autre, les producteurs d'appareils électroniques doivent assumer leur position en facilitant la gestion de leurs produits en fin de vie. Quant au consommateur, il doit prendre conscience des conséquences «invisibles» de ses usages, car externalisées dans d'autres pays.

Pour comprendre comment sont gérés les déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE), il faut se tourner vers la Convention de Bâle de 1989. Ce traité multilatéral était initialement prévu pour gérer les mouvements transfrontières de déchets dangereux, auxquels les DEEE ont été rattachés *a posteriori*. « La Convention de Bâle a été traduite en accords régionaux et en législations nationales par un grand nombre de pays qui, pour certains d'entre eux, interdisent l'exportation ou l'importation de DEEE », précise Stéphanie Reiche-de Vigan, chercheuse en droit du développement durable et des nouvelles

technologies à Mines ParisTech. *Tel est le cas du règlement de l'UE sur les transferts de déchets qui interdit l'exportation de DEEE vers des pays tiers.* » Néanmoins, le projet européen de recherche EFFACE, dédié au combat contre le crime environnemental, estimait en 2015 qu'environ 2 millions de DEEE quittaient illégalement l'Europe chaque année. Comment autant de déchets électroniques peuvent-ils traverser les frontières de manière clandestine ? « Un manque de collaboration internationale entrave les efforts visant à détecter, enquêter et poursuivre les crimes environnementaux liés au trafic de déchets électroniques », pointe la chercheuse. Ainsi, même si un accord international dédié aux DEEE venait à voir le jour, celui-ci n'aurait que peu d'impact sans volonté réelle des pays producteurs de ces déchets de limiter leur transfert.

À cela s'ajoute que le trafic de déchets électroniques est pris entre deux volontés des gouvernements : celle de punir les crimes environnementaux et celle de promouvoir le commerce international afin de récupérer des

**« Chaque année, 2 millions de déchets électriques et électroniques quittent illégalement l'Europe. »**

---

parts de marché liées au transport maritime international. Dans un souci de compétitivité, la Convention de Londres de 1965 visant à faciliter le trafic maritime international a permis un meilleur transfert des navires, des marchandises et des passagers vers les ports. « *En résultent une simplification des procédures douanières pour favoriser un passage compétitif dans les ports, et des distorsions de concurrence entre ports de pays développés dans la mise en œuvre a minima de la réglementation relative aux transferts transfrontaliers de déchets électroniques et en particulier du contrôle par les autorités douanières et portuaires* », souligne Stéphanie Reiche-de Vigan. L'Union européenne a fait le constat que les entreprises d'exportation et d'importation des DEEE avaient tendance à utiliser les ports où l'application de la loi était la plus faible, et donc la moins efficace.

## « Les entreprises d'exportation et d'importation des DEEE utilisent les ports où l'application de la loi est la moins efficace. »

Alors comment couper l'engrenage de ce trafic international ? « *Il est indispensable que l'Organisation maritime internationale se saisisse du sujet afin de favoriser un partage des meilleures pratiques, et d'unifier les procédures de contrôle* », répond l'enseignante-chercheuse. Il en va de la responsabilité des états de renforcer leurs contrôles au niveau des ports pour limiter cette criminalité. Et pour les aider dans cette tâche, la technologie pourrait être un atout majeur. « *La mise en place et l'utilisation obligatoire par les ports de la visualisation par scanner à rayons-X du contenu des conteneurs pourrait permettre de réduire le problème* », insiste Stéphanie Reiche-de Vigan. À l'heure actuelle,

seulement 2 % de tous les conteneurs maritimes du monde sont physiquement inspectés par les autorités douanières.

### La responsabilité des entreprises du numérique

La chaîne du numérique est compartimentée en maillons distincts : l'extraction minière, la fabrication, la commercialisation et le recyclage. Les différentes étapes de vie d'un appareil électronique sont donc isolées et déconnectées les unes des autres. Ainsi, les producteurs ne sont qu'incités à collaborer avec la filière du recyclage. « *Tant que les producteurs des équipements électriques et électroniques n'auront aucune obligation de limiter leur production, d'amortir le coût du recyclage, ou d'améliorer la recyclabilité de leurs produits, alors les flux de déchets électroniques ne pourront être gérés* », insiste Stéphanie Reiche-de Vigan. Y remédier consisterait notamment à reconnecter les maillons de la chaîne dans une **analyse du cycle de vie** des équipements électriques et électroniques et redéfinir la responsabilité des entreprises.

Repenser la responsabilité des entreprises imposerait de faire pression sur les géants du numérique, mais les pays développés semblent en être incapables. Pourtant, c'est bien sur les états que se reportent les coûts associés au tri et au recyclage. Jusqu'à présent, cette prise de conscience ne suffit pas à mettre en place des actions concrètes qui s'avèrent être davantage des recommandations. Des conseils nationaux du numérique en Allemagne et en France ont établi des feuilles de route afin de penser un numérique sobre. Ils proposent des pistes de réglementations futures telles que le rallongement de la durée de vie des appareils. Toutefois, la solution n'est pas simple, car un appareil qui dure deux fois plus longtemps signifie deux fois moins de production pour l'industriel. « *Investir dans quelques entreprises de plus chargées de reconditionner les appareils et allonger la durée de vie n'est pas suffisant. On est encore loin d'avoir des propositions viables*



## L'USAGE, ET APRÈS ? GÉRER LES DÉCHETS ÉLECTRONIQUES : UN PROBLÈME GLOBAL

*pour l'environnement et l'économie », insiste Fabrice Flipo, chercheur en philosophie des sciences et techniques à Institut Mines-Télécom Business School.*

### « Les étapes de vie d'un appareil électronique sont déconnectées les unes des autres. »

Par ailleurs, les pays ne sont pas les seuls à se confronter à la puissance des grandes entreprises du numérique. « À partir de 2007 chez Orange, nous avons tenté de mettre en place un système d'affichage environnemental afin d'inciter les clients à acheter les téléphones ayant le moins d'impact », révèle Samuli Vajja, expert chargé des questions liées à l'analyse du cycle de vie des produits chez Orange. En amont, cette démarche incitait les fabricants à intégrer le respect de l'environnement dans leurs gammes de produits. Au moment d'être présentée à l'Union internationale des télécommunications, la démarche d'Orange se retrouve rapidement étouffée par l'opposition américaine (Apple, Intel) qui ne souhaite pas afficher la notion d'empreinte carbone sur ses appareils.

Reste encore la société civile et notamment les ONG pour enclencher une volonté politique. Le frein majeur : la population des pays développés n'a pas, ou peu, conscience



des impacts environnementaux causés par sa consommation excessive des outils du numérique, car elle ne les subit pas directement. « *On oublie trop souvent qu'il y a aussi des violations des droits de l'homme derrière les outils numériques sur lesquelles nos sociétés occidentales reposent, depuis l'extraction des ressources nécessaires à la fabrication des équipements jusqu'au transfert des déchets qu'ils engendrent au bout de quelques années seulement. Du premier maillon au dernier, ce sont principalement les populations des pays en développement qui subissent les impacts de la consommation des populations des pays développés. Les effets sanitaires ne sont pas visibles en Europe, car ils sont externalisés* », constate Stéphanie Reiche-de Vigan. Au cœur des pays riches, le numérique serait-il enfermé dans une bulle informationnelle ne contenant que la somme de ses aspects bénéfiques ? L'importance donnée aux technologies du numérique ne devrait pas se faire au détriment de ses aspects négatifs.

En ce sens, « *il en va aussi de la responsabilité des universités, des écoles d'ingénieurs et des écoles de commerce de former les étudiants dès le premier cycle aux enjeux environnementaux tout en intégrant à leurs programmes l'analyse du cycle de vie avec la prise en considération des impacts environnementaux et humains* », rappelle Stéphanie Reiche-de Vigan. Former sur ces thématiques, c'est surtout apporter ces profils aux entreprises qui concevront les outils de demain et aux administrations censées les encadrer. ▲



L'USAGE, ET APRÈS ?

# DU RÉALISME DE LA SOBRIÉTÉ NUMÉRIQUE

---

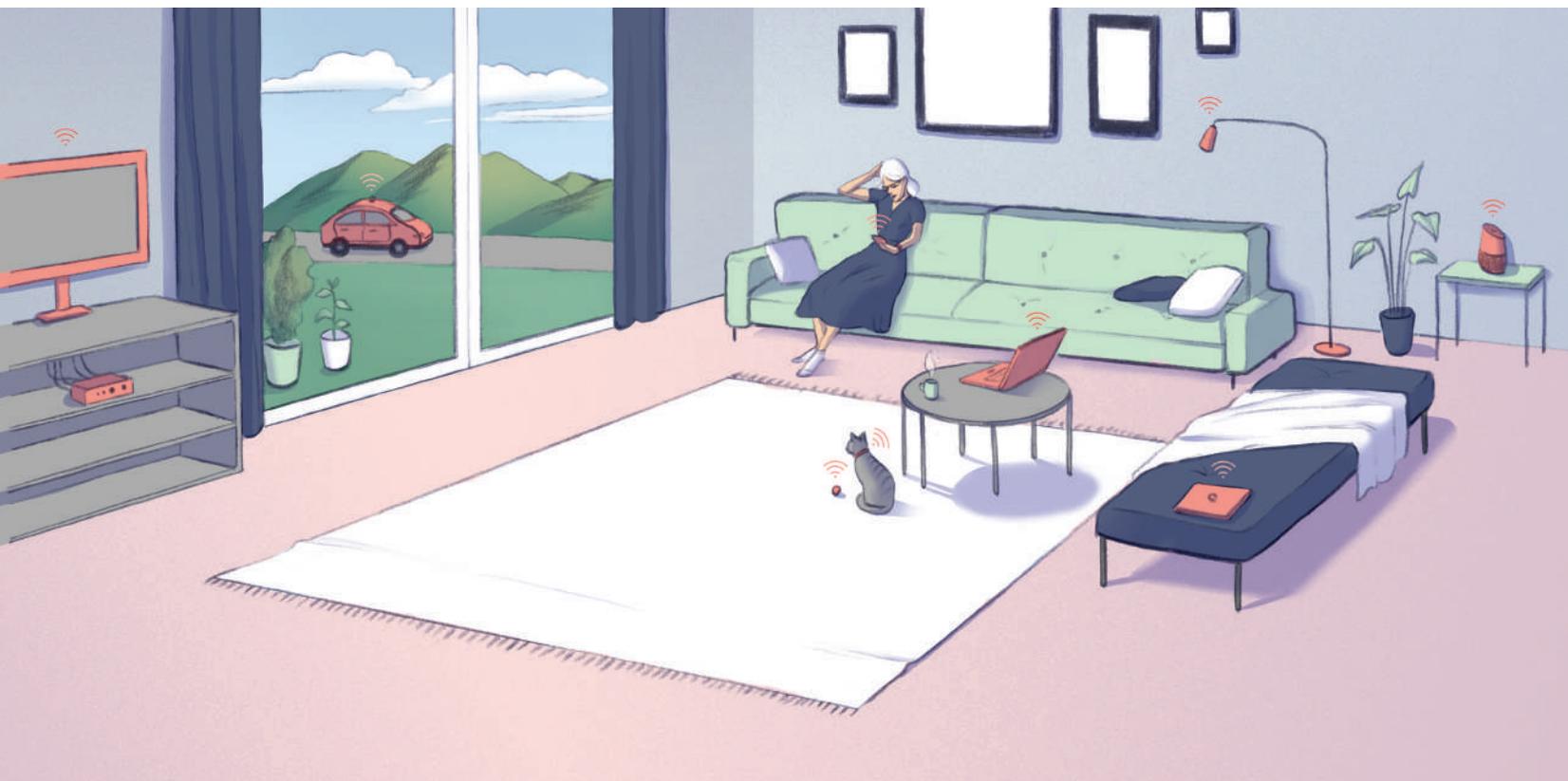
Dans cette course effrénée à la donnée, des cadavres non virtuels s'amassent sur le côté du parcours. La quantité colossale de déchets électroniques interroge la vision de croissance poursuivie par le secteur du numérique. Et si la solution était tout autre ? C'est la question posée par l'idée de sobriété numérique.

Alors que les progrès techniques permettent des économies d'énergie, de matière et donc la baisse des coûts, ils facilitent aussi la démultiplication des usages et irrémédiablement l'impact environnemental. C'est l'**effet rebond**. Cette surconsommation des pays développés appelle à une modification des usages. Cela implique de comprendre comment fonctionne un utilisateur et d'intégrer que *le plus n'est pas le mieux*. « Depuis deux ans, nous travaillons sur la notion de sobriété et comment une entreprise peut s'approprier ce concept. Il y a tout un imaginaire à créer qui s'éloigne de la consommation », défend Marc Vautier, expert chargé des questions liées à l'analyse du cycle de vie des produits chez Orange. La solution serait-elle dans la définition d'une nouvelle approche marketing ? Celui-ci doit intégrer de nouvelles valeurs au travers d'offres qui ne prôneraient pas *toujours plus* de fonctionnalités, mais peut-être plus de la liberté et moins de dépendance aux technologies. « Il y a déjà des choses simples à mettre en place comme par exemple réintégrer l'offre de forfaits sans données qui a disparu des catalogues », ajoute Marc Vautier.

La logique actuelle des offres numériques repose sur la notion d'illimité, incitant à des usages débridés. « Globalement, toutes ces pratiques sont trompeuses », souligne Francis Jutand, directeur général adjoint de l'IMT, insistant sur le besoin d'éclairer le contenu réel des offres. « Le fait de payer le prix de notre téléphone dans celui de l'abonnement, sous couvert d'utilisation illimitée des réseaux, ne nous responsabilise pas sur la fréquence de renouvellement de nos smartphones. » De la même façon, les offres de vidéo à la demande invitent à une consommation de films et séries sans modération pour une dizaine d'euros par mois. « Il y a une réflexion profonde à avoir sur le rapport qualité-prix des usages », insiste ainsi Francis Jutand.

**« La logique actuelle  
des offres numériques repose  
sur la notion trompeuse  
d'illimité. »**

---



La question posée par un changement de modèle économique est terriblement complexe. Actuellement, rien n'oblige les services numériques à proposer des indicateurs de consommation. Pas d'information sur la consommation de dioxyde de carbone, d'eau, ou plus généralement d'énergie que représente le visionnage d'un épisode de série en ligne. « *L'énergie est un bien commun, et nous consommons du bien commun sans conscience* », regrette Francis Jutand face à cette absence d'informations du citoyen. Mais les produits se vendraient-ils aussi bien si leur nocivité était affichée ? À Fabrice Flipo, chercheur en philosophie des sciences et techniques à Institut Mines-Télécom Business School, d'ajouter : « *Une information plus*

*complète du consommateur entre en contradiction avec les objectifs des entreprises de faciliter la vente au maximum. Ils sont aussi en contradiction avec les objectifs des états, à savoir de disposer d'une infrastructure "compétitive", et donc d'une masse d'usagers qui l'utilisent, et la financent.* »

Et pour informer le consommateur, plusieurs réglementations peuvent être envisagées. Il peut s'agir d'indicateurs, de certifications ou de labels identifiables par l'utilisateur. Sous une forme plus stricte, « *on pourrait imaginer une obligation pour les entreprises d'effectuer des études d'impact environnemental de leurs services, et de les rendre transparents pour les consommateurs* », ajoute Francis Jutand.

*Et enfin, dans la forme la plus encadrée juridiquement, il faut poser la question de l'interdiction de certaines pratiques tarifaires ou commerciales irresponsables. »*

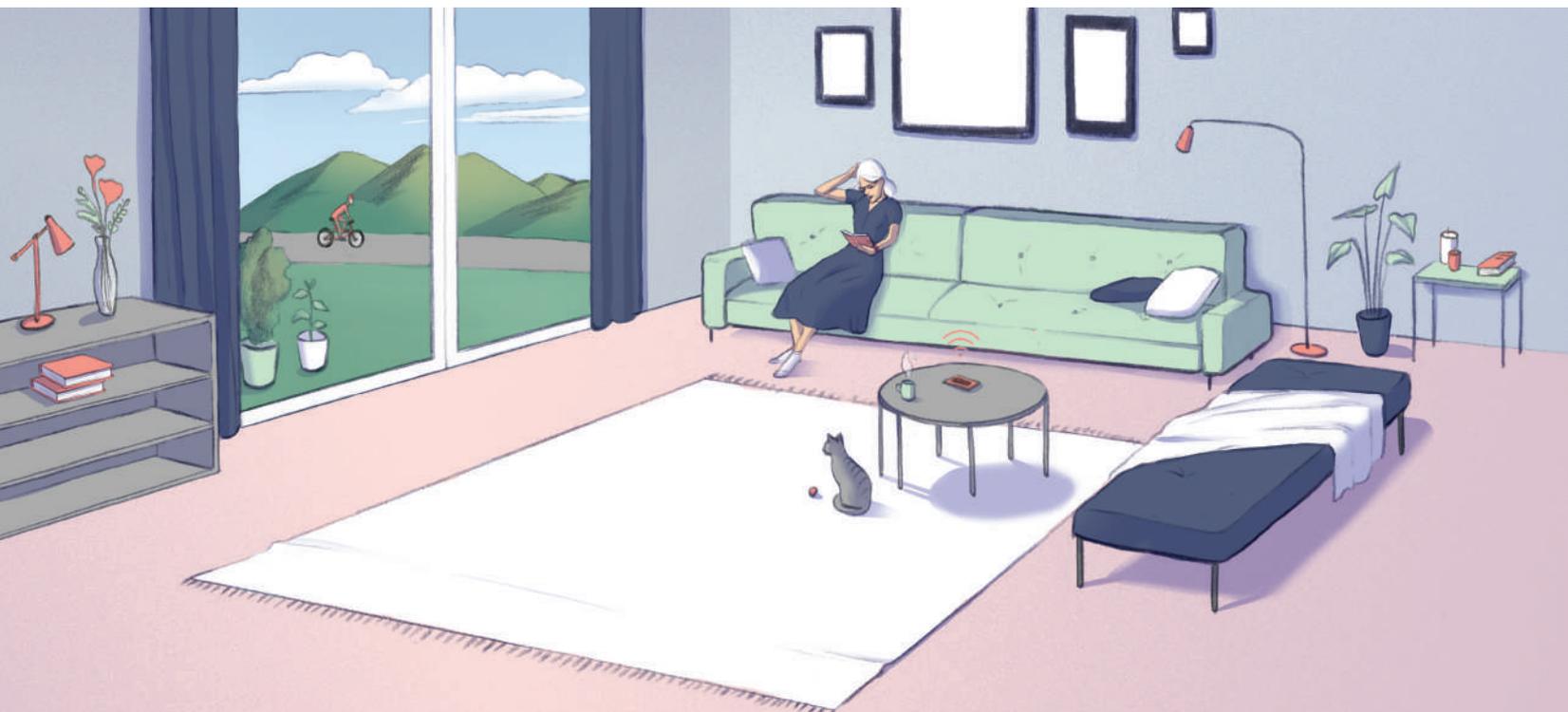
## « L'énergie est un bien commun, et nous consommons du bien commun sans conscience. »

Fabrice Flipo propose également que les entreprises soient contraintes de rendre publiques les implications écologiques de leur stratégie globale.

### Une transition numérique plus sobre

Au-delà de l'encadrement du marketing et des offres de consommation, la sobriété numérique demande de s'interroger en profondeur sur l'utilité sociétale des produits et services du secteur. Le *Shift Project*, association française d'intérêt général, a publié un rapport

en 2018 alertant sur l'impact du numérique dans le cadre de la transition énergétique. Son réseau d'experts propose notamment un débat collectif et public sur l'utilité réelle des technologies déployées qui sont très gourmandes en énergie. En ligne de mire : la 5G, la voiture autonome, les objets connectés et les débits vidéo (HD, 4K, 8K). « *Il est attendu que la 5G fasse transiter encore plus de données plus vite. Elle ne devrait pas avoir pour autre effet que d'accélérer la numérisation et la rotation des appareils* », s'inquiète Fabrice Flipo. Par ailleurs, la voiture autonome exige de nombreuses transformations des infrastructures routières. Elle interroge alors les arguments de limitation des émissions de gaz à effet de serre que porte le secteur automobile. Fabrice Flipo voit derrière ces enjeux l'opportunité de mettre en place une politique numérique digne de ce nom pour une industrie plus résiliente. La dépendance de l'Europe à la Chine et aux États-Unis lui demandera de se mobiliser rapidement, de lancer des démarches exploratoires ambitieuses et de prendre des risques.



### L'innovation au cœur de la souveraineté des états

Derrière ces débats, se jouent la limitation de la consommation des ressources, afin de la rendre compatible avec la protection de l'environnement, et la préservation des apports sociétaux essentiels. « *C'est bien là le nœud du problème, il ne faudrait pas mettre de côté les besoins essentiels des français, aussi bien physiologiques que sécuritaires, dont l'environnement fait partie* », répond Axelle Delagoutte, experte environnement d'Airbus

## « Il faut accroître nos capacités numériques, tout en trouvant le moyen d'y introduire des objectifs de protection de l'environnement. »

Defence & Space. Envisager une réduction de la consommation de ressources, reviendrait à prendre le risque de creuser un écart technologique avec les pays avec lesquels nous sommes en compétition. Cela ne signifie pas pour autant faire une croix sur la sobriété numérique : « *Il faut accroître nos capacités dans le numérique tout en trouvant le moyen d'y introduire des objectifs de protection de l'environnement pour compenser ses effets* », justifie-t-elle. Renoncer à un développement technologique disponible n'a de sens que si la décision est prise de manière globale. Or, les enjeux politiques et économiques rendent cette hypothèse irréaliste. Si l'Europe prenait la décision d'une 5G sobre, elle n'imposerait pas pour autant sa philosophie à la Chine. Or, la technologie a des implications dans des dispositifs de la défense et du spatial. Poussé à l'extrême, réduire l'innovation impacterait alors le développement économique du pays et entraînerait une moindre efficacité

de ses entreprises dans la course internationale. L'innovation technologique joue un rôle clé en faveur de la souveraineté des états. Il n'y a pas de réponse simple à cette problématique. Si une solution existe, elle se trouvera à l'intersection des enjeux diplomatiques, économiques, sociétaux et scientifiques ; une gouvernance à l'échelle d'une planète, à l'image de l'urgence environnementale. ▲

## Pour aller plus loin :

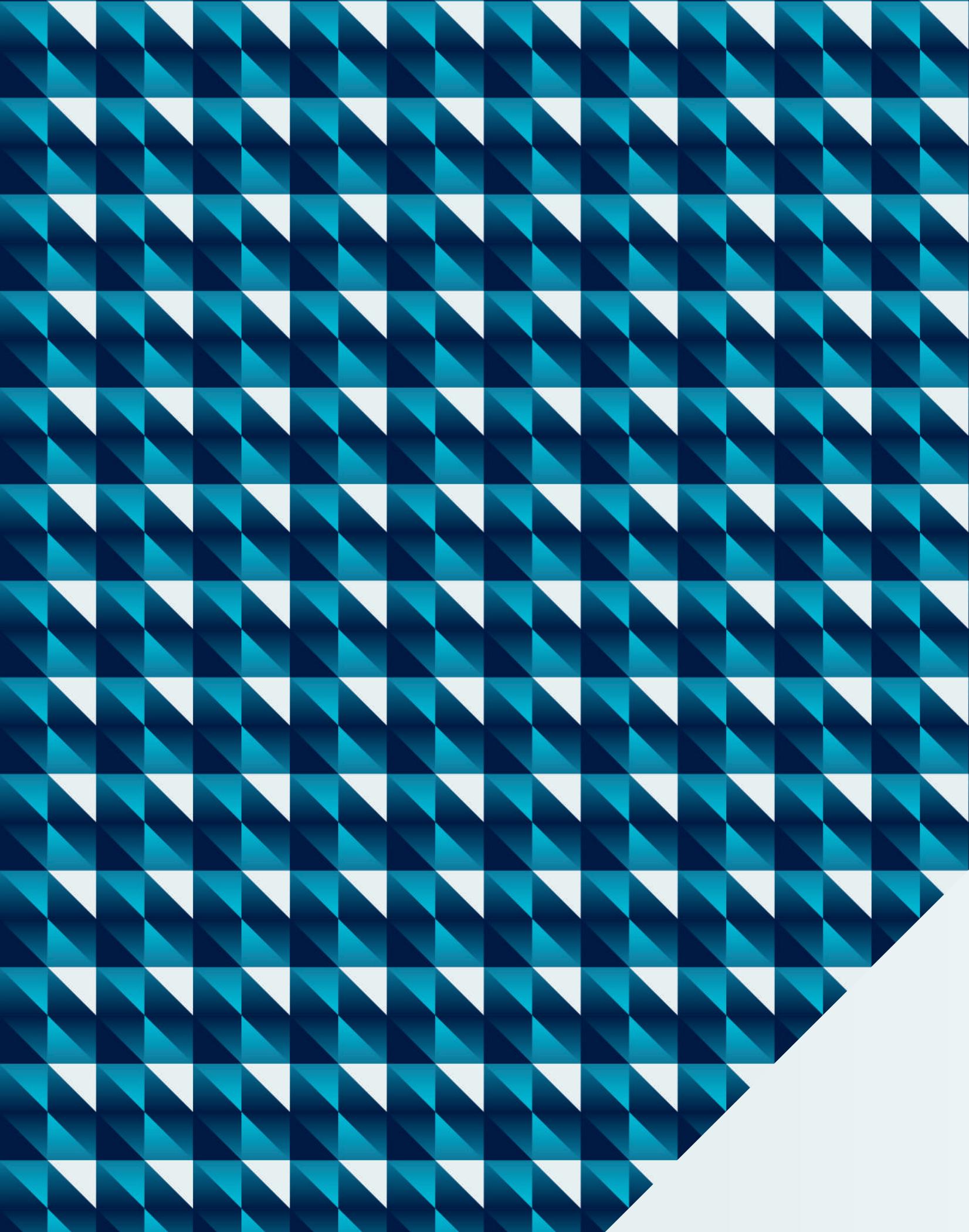
- Helen Micheaux, *Responsabiliser pour transformer : des déchets aux mines urbaines*, Presses des mines, 2019, 178 p
- Rapport intermédiaire « Déployer la sobriété numérique », The Shift Project, 2020, [www.theshiftproject.org](http://www.theshiftproject.org)
- *Feuille de route sur l'environnement et le numérique*, Conseil National du numérique, 2020, [www.cnnumerique.fr](http://www.cnnumerique.fr)
- Rapport d'information n° 555 sur l'empreinte environnementale du numérique, Commission de l'aménagement du territoire et du développement durable, 2020, [www.senat.fr](http://www.senat.fr)

## LEXIQUE

---

1. **Accord de Paris sur le climat** — Accord international sur le climat établi en 2015 suite aux négociations tenues lors de la Conférence de Paris sur les changements climatiques (COP21). Il fixe notamment comme objectif de contenir la valeur du réchauffement climatique sous 2 °C d'ici 2100 par rapport aux niveaux préindustriels.
2. **ACV : Analyse du cycle de vie** — Outil permettant d'évaluer de manière globale les impacts environnementaux d'un produit ou service, sur l'ensemble de ses phases d'existence, et en prenant en compte le maximum de flux de ressources et d'énergie entrant et sortant durant cette période.
3. **Code minier** — Code juridique réglementant l'exploration et l'exploitation des ressources minérales en France, datant de 2011 et issu des principes fondamentaux de la loi Napoléonienne de 1810.
4. **Data centers** — Infrastructure rassemblant les équipements nécessaires au fonctionnement d'un système informatique, tels que les matériels destinés au stockage et au traitement des données.
5. **DEEE** — Déchets d'équipements électriques et électroniques — Tout déchet issu de produits fonctionnant grâce à des courants électriques, et contenant ainsi des composants électriques ou électroniques.
6. **Écoconception** — Manière de concevoir un produit ou service en limitant au maximum son impact sur l'environnement, et en utilisant le moins de ressources non renouvelables possible.
7. **Éco-modulation** — Principe de bonus/malus financier accordé aux entreprises selon leur respect des bonnes pratiques environnementales. Surtout utilisé dans le secteur de la collecte et de la gestion du déchet, pour récompenser les entreprises soucieuses de la recyclabilité de leurs produits.
8. **Écoresponsabilité** — Comportement d'une personne, d'une collectivité ou d'une entreprise visant à agir en accord avec les principes de développement durable.
9. **Effet rebond** — Augmentation des usages suite à un gain de performance environnementale (diminution de la consommation d'énergie ou de l'utilisation de ressources).

10. **Green IT (Information Technologie)** — Pratiques du secteur informatique permettant de réduire l'empreinte environnementale de ses activités.
11. **Innovation responsable** — Manière de penser l'innovation avec une finalité répondant à des enjeux environnementaux ou sociaux, tout en étant réflexif sur la façon dont l'innovation elle-même est recherchée ou générée.
12. **Mix énergétique** — Ensemble des sources d'énergies utilisées sur un territoire, rassemblant les parts du renouvelable et du non renouvelable.
13. **PUE : Power Usage Effectiveness** — Ratio entre l'énergie totale consommée par le centre de données et celle consommée par les serveurs uniquement.
14. **RFID : Radio-frequency identification** — Méthode de communication à très courte distance basée sur des micro-antennes prenant la forme d'étiquettes.
15. **RSE : Responsabilité sociétale des entreprises** — Démarche volontaire d'une entreprise pour intégrer les préoccupations sociales et environnementales au sein de ses activités commerciales et partenariales.
16. **Réseaux 5G** — 5e génération de réseaux mobiles, faisant suite à la 4G, et permettant d'améliorer les débits de données mobiles, ainsi que d'ouvrir les usages des réseaux mobiles à de nouveaux secteurs.
17. **Salar** — Désert de sel d'altitude, parfois immergé sous une mince couche d'eau, contenant notamment du lithium recherché pour les batteries des équipements électroniques.
18. **Stérile minier** — Lors de l'extraction minière, partie de la roche non utilisée par l'industrie car trop pauvre en matériau recherché.
19. **Terres rares** — Groupe de 17 métaux dont plusieurs sont utilisés pour leurs propriétés uniques dans l'industrie numérique.
20. **Virtualisation** — Action de dématérialiser une action informatique, généralement chez un prestataire, afin de réaliser des économies sur les coûts d'équipement informatique.



# L'IMT et la Fondation Mines-Télécom remercient les enseignants-chercheurs, les experts d'entreprise et les mécènes de leur participation à ce 12<sup>e</sup> cahier de veille.

---

## Directrice de la publication :

Odile Gauthier

## Directrice de la rédaction :

Audrey Loridan-Baudrier

## Rédacteur-en-chef :

Benjamin Vignard

## Rédacteurs :

Tiphaine Claveau, Bastien Contreras, Anaïs Culot, Benjamin Vignard

## Secrétaire de rédaction :

Véronique Charlet

## Création graphique et illustrations :

Diane Rottner

## Comité éditorial consultatif :

Zoélie Adam-Maurizio, Dominique Balbi, Cécile Boulnois, Philippine de Nicolay, Philippe Sehier, Sébastien Soleille, Dimitra Touli-Lebreton

## Conception éditoriale :



Institut Mines-Télécom

19 place Marguerite Perey  
91 120 Palaiseau  
recherche@imt.fr



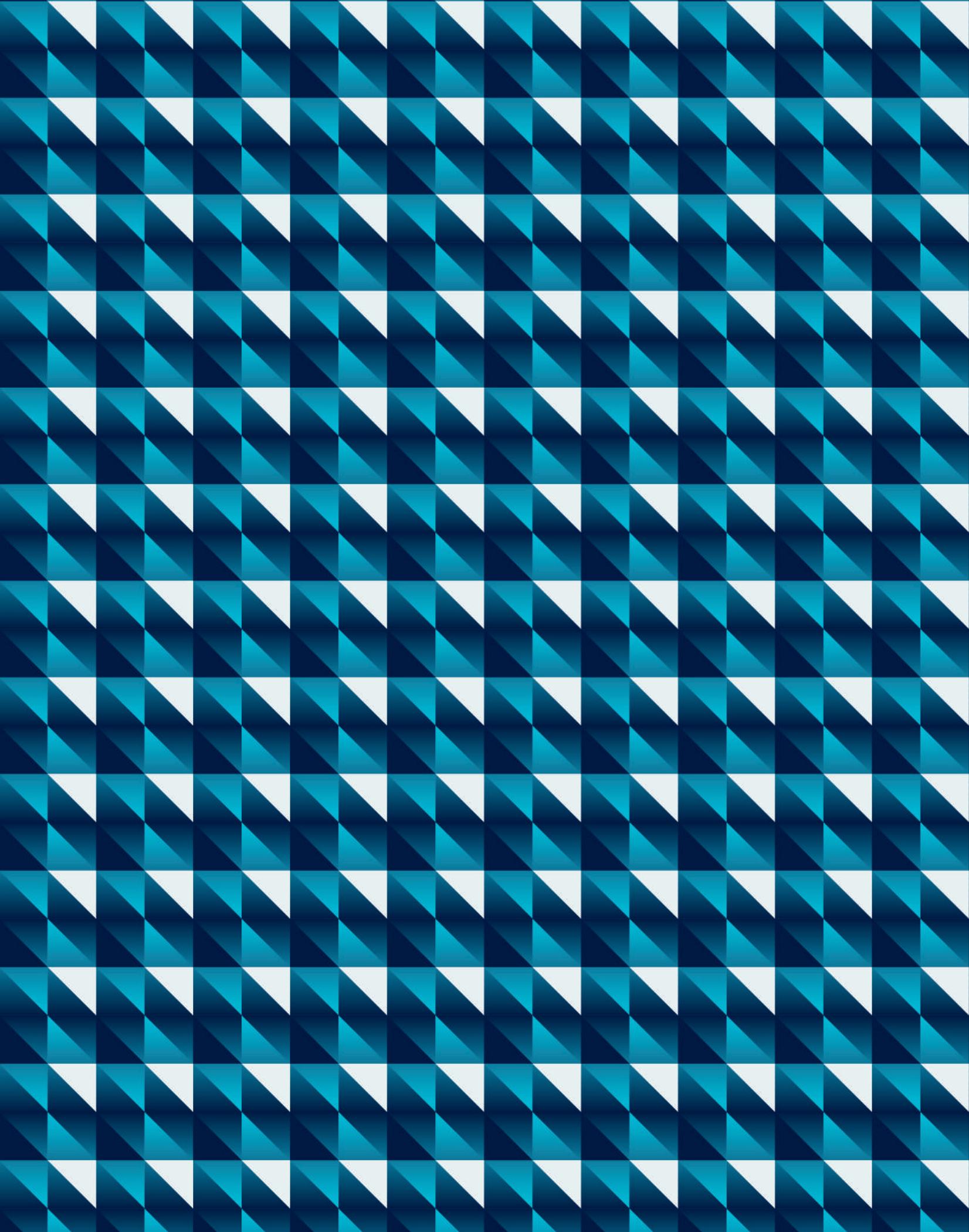
FONDATION  
Mines-Télécom

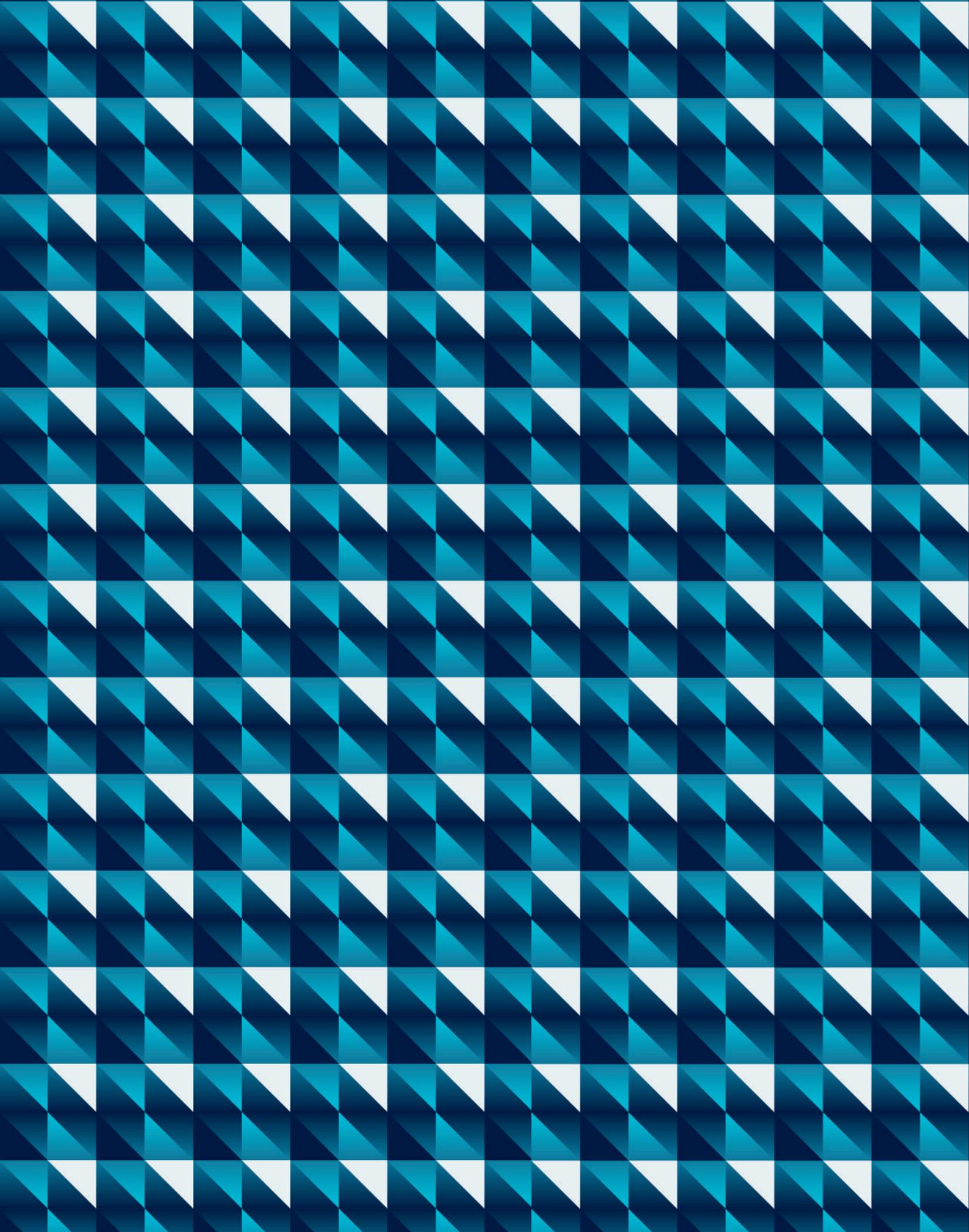
La Fondation de l'IMT

Fondation Mines-Télécom,  
2 villa Thoréton  
75015 Paris  
contact@fondation-mines-telecom.org

**Imprimé en août 2020 par Imprimerie Escourbiac,  
sur papier 100 % recyclé**

ISBN 978-2-9574278-0-2





Avec le soutien d'**EDF**, mécène du cycle de veille 2020,  
et le soutien des grands partenaires programmes  
de la Fondation Mines-Télécom.

