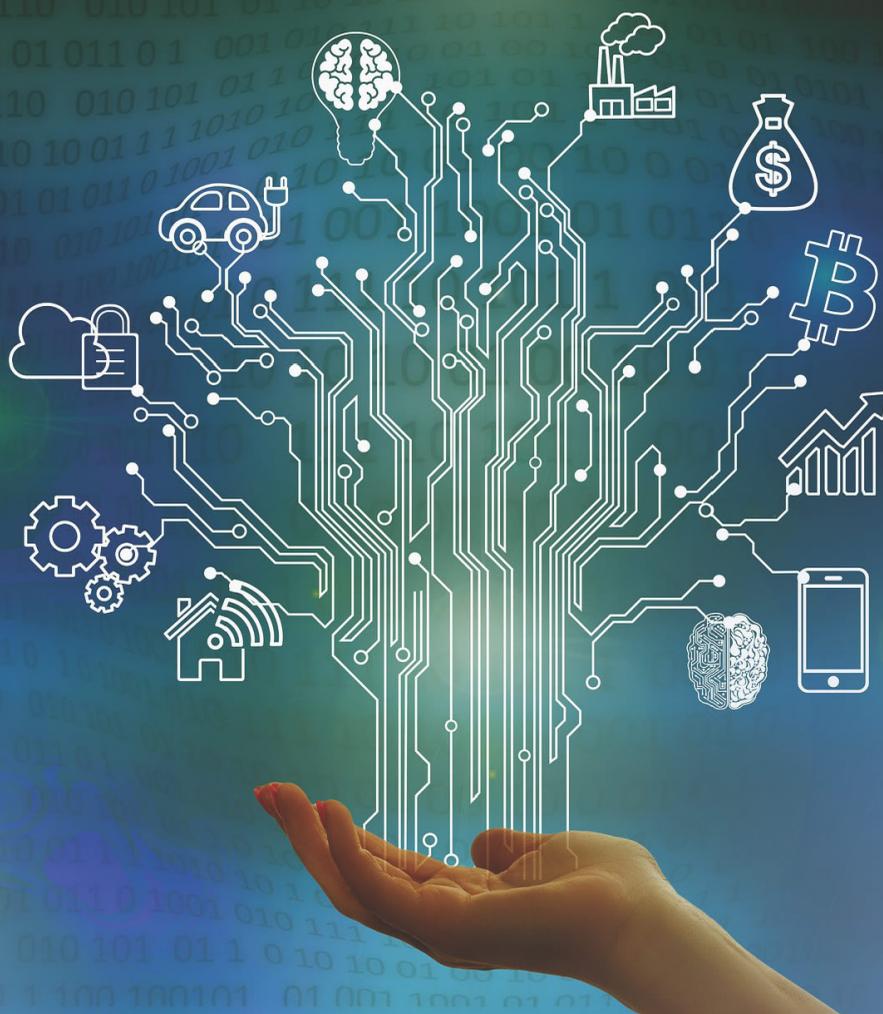


RESPONSABILITÉ & ENVIRONNEMENT

« Se défier du ton d'assurance qu'il est si facile de prendre et si dangereux d'écouter »
Charles Coquebert, Journal des mines n°1, Vendémiaire An III (septembre 1794)



Transitions énergétique et numérique

UNE SÉRIE DES
ANNALES
DES MINES

FONDÉES EN 1794

Publiées avec le soutien
de l'Institut Mines Télécom

N°110
AVRIL 2023

UNE SÉRIE DES
**ANNALES
DES MINES**
FONDÉES EN 1794

RESPONSABILITÉ & ENVIRONNEMENT

ISSN 1268-4783

Série trimestrielle - N°110 - Avril 2023

Rédaction

Conseil général de l'Économie (CGE)
Ministère de l'Économie, des Finances
et de la Souveraineté industrielle et numérique
120, rue de Bercy
Télédoc 797
75572 Paris Cedex 12
Tél. : 01 53 18 52 68
<http://www.annales.org>

Grégoire Postel-Vinay
Rédacteur en chef

Gérard Comby
Secrétaire général

Alexia Kappelmann
Secrétaire générale adjointe

Magali Gimon
Assistante de rédaction et Maquettiste

Myriam Michaux
Webmestre et Maquettiste

Publication

Photo de couverture
Photo libre de droits téléchargée
sur le site de Pixabay
([https://pixabay.com/fr/illustrations/
pilotage-l-informatique-7673519/](https://pixabay.com/fr/illustrations/pilotage-l-informatique-7673519/))
Photo©Gerd Altmann

Iconographie
Gérard Comby

Mise en page
Magali Gimon

Impression
Dupliprint Mayenne

Membres du Comité de rédaction

Pierre Couveinhes
Président du Comité de rédaction

Patricia Blanc

Paul-Henri Bourrelier

Fabrice Dambrine

Dominique Dron

Jean-Luc Laurent

Richard Lavergne

Philippe Merle

Michel Pascal

Didier Pillet

Grégoire Postel-Vinay

Claire Tutenuit

Benjamin Vignard

La mention au regard de certaines illustrations du sigle « D. R. » correspond à des documents ou photographies pour lesquels nos recherches d'ayants droit ou d'héritiers se sont avérées infructueuses.

Le contenu des articles n'engage que la seule responsabilité de leurs auteurs.

Transitions énergétique et numérique

04

Préface

Gérard ROUCAIROL

06

Introduction

Olivier APPERT et Richard LAVERGNE

Vers des besoins croissants en électricité et en numérique

09

Why data is vital to build a better energy future for the world

Dr Fatih BIROL

14

Consommation énergétique des usages du numérique en France

Michel SCHMITT

19

Autonomie stratégique comparée dans l'énergie et le numérique

Grégoire POSTEL-VINAY

26

Comment l'Europe s'organise-t-elle pour assurer la convergence des efforts en faveur des transitions verte et numérique ?

Valérie DREZET-HUMEZ

30

Énergie et numérique : se préparer à un autre combat

Jean-Pierre HAUET

37

Les technologies du numérique font à la fois partie du problème et de la solution en matière environnementale

Patrice GEOFFRON

41

Quid après les lois de Moore et de Koomey ?

Vincent MAZAURIC, Alexia AUFFÈVES, Olivier EZRATTY et Sergio CILIBERTO

La décarbonation de l'économie dans le contexte de nouveaux modèles

46

Le numérique, une solution sous-utilisée pour répondre aux défis de la gestion des systèmes électriques

Étienne BEEKER

52

La place du numérique dans la transition énergétique

Gilles GUÉRASSIMOFF

57

Le rôle de la flexibilité dans le système électrique d'aujourd'hui et de demain

Alain BURTIN

65

La *blockchain* est-elle bonne pour le climat ?

Paul JOLIE

Le numérique comme vecteur de la décarbonation des secteurs d'activité économique

72

Comment la reconquête « industrielle » du numérique par l'Europe peut-elle contribuer à la neutralité carbone ?

Aurélie PICART

78

Comment concilier décarbonation et compétitivité de l'industrie ?

Romain BONENFANT

82

Le numérique, allié ou ennemi de la transition écologique ?

Claire TUTENUIT et Benoît GALAUP

86

L'apport du numérique dans la décarbonation des mobilités : le cas de l'automobile

Christophe MIDLER et Patrick PÉLATA

91

L'apport du numérique en matière de décarbonation du bâtiment

François BERTIÈRE

95

Comment réduire l'impact environnemental de la microélectronique dans un domaine du semi-conducteur en pleine évolution ?

Sébastien DAUVÉ et Léa DI CIOCCIO

102

Traductions des résumés

106

Biographies des auteurs

Ce numéro a été coordonné
par Olivier APPERT et Richard LAVERGNE

Préface

Par Gérard ROUCAIROL

Président du pôle Numérique de l'Académie des technologies
et président honoraire de l'Académie des technologies

Le caractère extrêmement diffusant des technologies du numérique et leur rythme d'adoption rapide pour des usages grand public ou professionnels de plus en plus nombreux rendent naturellement nécessaires l'étude et la mise en œuvre de leur transition énergétique.

Cependant, les techniques du numérique ont largement démontré, depuis plusieurs décennies, leur capacité à piloter et à soutenir les changements de comportement des organisations et des individus au service d'objectifs divers et variés, et cela à des échelles de plus en plus importantes. C'est pourquoi tout aussi naturellement que se pose la question de l'usage du numérique pour faciliter la transition énergétique, l'accélérer et déployer des solutions efficaces au sein de la société dans son ensemble.

Une première réponse à la transition énergétique du numérique passe bien sûr par l'utilisation d'une électricité de plus en plus décarbonée¹, mais pas seulement. La formidable expansion des usages du numérique va de plus en plus nécessiter la mise en œuvre de solutions plus efficaces en énergie² et ³. Des transformations profondes sont déjà en cours. Au niveau des micro-processeurs, on s'oriente vers une spécialisation de plus en plus poussée en fonction de certaines classes d'applications afin de maîtriser le besoin en énergie, tout en augmentant les performances (microprocesseurs neuromorphiques, emploi du parallélisme massif sous diverses formes...). Au niveau de l'architecture des systèmes numériques, l'utilisation de *clouds* favorise la mutualisation des ressources matérielles et logicielles au service de nombreux utilisateurs et pour plusieurs applications, simultanément. Ces transformations ont déjà un impact significatif sur la structure de l'industrie mondiale. Au-delà, ce sont des méthodologies adaptées qu'il conviendra de mettre en œuvre pour concevoir, déployer et opérer des systèmes numériques qui consomment « juste assez » pour un usage donné. On peut aussi se poser la question de l'intérêt de certaines applications particulièrement consommatrices en énergie, comme celles des cryptomonnaies.

En ce qui concerne l'apport du numérique à la transition énergétique, remarquons en premier lieu que le numérique fournit des opportunités pour substituer à des opérations gourmandes en énergie des opérations mobilisant beaucoup moins d'objets manufacturés ou de ressources physiques (matériaux, eau, végétaux, énergies fossiles...). Il s'agit notamment d'utiliser la capacité du numérique à gommer les distances (télétravail, téléconsultation...) ou encore à virtualiser des objets physiques (maquette numérique d'un véhicule ou d'un bâtiment, gestion électronique de documents, jumeaux numériques...). La mutualisation des ressources utiles à un service accessible en ligne par le biais d'une plateforme, par exemple dans le cas du covoiturage, permet de limiter le nombre d'objets physiques utilisés par une communauté. De même, la fabrication additive autorise la diminution des stocks physiques de pièces détachées et facilite la réparabilité et la durée de vie des équipements.

En plus de ces actions ponctuelles, la recherche systématique d'économies énergétiques au sein d'une société conduit à reconsidérer globalement les processus qui la font exister. Cette approche systémique amène alors à devoir simuler, puis piloter et optimiser en temps réel des systèmes complexes caractérisés par un très grand nombre de paramètres. Il devient alors indispensable de déployer des infrastructures numériques de contrôle/commande, qui sont seules capables à tout instant d'anticiper les besoins, de suivre de bout en bout des processus souvent sophistiqués, de procéder à des arbitrages, à des optimisations permanentes... Ainsi en est-il du pilotage de réseaux de transport et de distribution d'électricité, de réseaux de télécommunications, de systèmes de gestion de la mobilité, de processus de fabrication et de logistique, de la gestion de l'énergie à l'échelle d'un bâtiment, d'un quartier, d'une agglomération ou d'une région, ...

On le voit, aborder en même temps les transitions énergétique et numérique par le biais de leurs interactions est riche en questionnements, en solutions et en innovations potentielles. On peut même penser que l'exigence généralisée d'efficacité, quel que soit le secteur, dont le numérique lui-même, constitue un facteur majeur d'évolution des

¹ À titre d'exemple, on peut remarquer que les associations d'opérateurs de « centres de données » en Europe ont signé un pacte prévoyant, pour 2030, l'atteinte de la neutralité carbone, mais aussi le recours à des solutions favorisant l'allongement du cycle de vie des équipements, ainsi que la conservation de l'eau : <https://www.climateutraldatacentre.net/>

² ANDRÉ J. C., BENVENISTE A. & ROUCAIROL G., *Du trop vers le juste assez Numérique*, 04-Sobriete-Du-trop-vers-le-juste-assez-Numerique-final.pdf (academie-technologies.fr).

³ ANRT (2022), « Électricité et Numérique : des défis réciproques », rapport.

technologies consacrées à ce dernier. À l'inverse, le numérique apparaîtra probablement de plus en plus comme un levier nécessaire à l'acceptabilité énergétique de nombreux processus économiques et sociétaux.

Dans ce contexte, ce numéro des *Annales des Mines*, coordonné par Olivier Appert et Richard Lavergne, reflète parfaitement la problématique évoquée ici, en faisant coexister à la fois des analyses des enjeux avec la description concrète de solutions propres à différents secteurs économiques.

La qualité des auteurs et leur expertise reconnue ainsi que la diversité des points de vue exprimés font de ce numéro un ouvrage rare, qui, par conséquent, constituera à n'en pas douter une référence.

Introduction

Par Olivier APPERT

Académie des technologies, Centre Énergie de l'IFRI

Et Richard LAVERGNE

Conseil général de l'Économie

Le présent numéro des *Annales des Mines* a été conçu de façon à actualiser et prolonger un précédent numéro, paru dans la série *Responsabilité & Environnement*, le n°87 (de juillet 2017) intitulé « Transition numérique et transition écologique ». Mais il trouve aussi des complémentarités avec plusieurs autres numéros récents et anciens portant sur l'énergie et le numérique, dont le n°15 (de septembre 2021) paru dans la série *Enjeux numériques* et intitulé « Le numérique et la refondation du système électrique ».

Ce numéro tire également profit des réflexions d'un groupe de travail co-présidé par Olivier Appert et Gérard Roucairol, qui a été créé au sein de l'ANRT (Association nationale Recherche Technologie) dans le cadre de la préparation de la Stratégie nationale de recherche énergétique. Ce groupe a rendu son rapport¹ en mai 2022, avec pour intitulé « Énergie et Numérique : des défis réciproques », un rapport que les coordonnateurs ont amplement utilisé pour organiser le présent numéro.

Le lecteur pourra aussi se reporter à un rapport² publié en 2019 par le Conseil général de l'Économie (CGE) sur le thème « Réduire la consommation énergétique du numérique », ainsi qu'à un numéro récemment publié par les *Annales des Mines* dans la série *Responsabilité & Environnement* et titré « L'électricité dans la transition énergétique » (n°109, janvier 2023), en particulier l'article « Les enjeux de la numérisation pour les gestionnaires du réseau de distribution » (coécrit par Sébastien Jumel et Pierre Mallet, d'Enedis).

La « double transition », comme elle est souvent appelée, vise à décarboner l'économie et à introduire le numérique dans toutes les activités où il peut apporter une amélioration en termes de compétitivité, d'efficacité, de transition écologique et de cohésion sociale. Ces deux transitions sont en fait très imbriquées, puisque le numérique est indispensable pour réduire les émissions de CO₂ de beaucoup d'activités, alors que le numérique est lui-même doté d'une empreinte carbone très variable selon les technologies *hardware* et *software* propres au secteur, l'origine des composants, terminaux et équipements lui permettant d'être mis en œuvre et selon le mix de production d'électricité qui alimente ces mêmes composants, terminaux et équipements.

En France, pour chacune de ces transitions, l'État a mis en place des instances de concertation et de sensibilisation, notamment le Conseil national pour la transition écologique et le Haut Comité pour un numérique écoresponsable. Une feuille de route « Numérique et environnement », que le gouvernement a publiée le 23 février 2021, définit trois axes d'action :

- connaître pour mieux agir : il est nécessaire de disposer de données fiables et objectives sur les impacts du numérique sur l'environnement ;
- réduire l'empreinte environnementale du numérique, depuis les terminaux jusqu'aux usages et aux services ;
- innover pour faire du numérique un véritable outil de la transition écologique en optimisant la consommation d'énergie, en réduisant les trajets, en évitant ou en gérant mieux nos déchets, etc.

Diverses lois ont été publiées pour accompagner la mise en œuvre de cette feuille de route, comme la loi AGEC n°2020-105 du 10 février 2020 relative à la lutte contre le gaspillage et à l'économie circulaire, la loi REEN n°2021-1485 du 15 novembre 2021 visant à réduire l'empreinte environnementale du numérique en France ou la loi Climat et résilience n°2021-1104 du 22 août 2021 portant lutte contre le dérèglement climatique et renforcement de la résilience face à ses effets. Mais, en France, l'État et les citoyens par leur comportement n'ont qu'une influence limitée sur des transitions qui concernent le monde entier et qui dépendent d'usages qui se transforment ou qui se créent, ainsi que de progrès techniques itératifs ou en rupture.

Dans cette brève introduction, les coordonnateurs ont choisi de ne mettre en exergue que quelques-uns des articles figurant dans le présent numéro, faute de place pour les présenter tous. Mais tous les articles présentent chacun leur richesse.

¹ Rapport téléchargeable à l'adresse suivante : <https://www.anrt.asso.fr/fr/snre-32334>

² <https://www.economie.gouv.fr/cge/consommation-energie-numerique>

Le présent numéro des *Annales des Mines* met tout d'abord l'accent sur le besoin de données permettant de mesurer l'impact réel du numérique en termes de consommation d'énergie et de matériaux critiques, ainsi que d'empreinte carbone. L'incertitude actuelle sur les données conduit ainsi à de vives controverses entre les experts quant au véritable impact du numérique sur les émissions de CO₂.

Le Dr Fatih Birol souligne dans son article en quoi les « data » jouent un rôle primordial dans la mise en œuvre de scénarios désirables, notamment ceux issus du World Energy Outlook dont la parution est annuelle. Selon l'AIE (Agence internationale de l'énergie), au niveau mondial, le numérique serait aujourd'hui responsable d'environ 700 MtCO₂e par an, soit 2 % des émissions de gaz à effet de serre, y compris les émissions indirectes. Michel Schmitt précise dans son article que l'empreinte liée à la fabrication des équipements représente 45 % de l'empreinte carbone totale, au niveau mondial, et beaucoup plus dans des pays à électricité décarbonée, comme la France.

Valérie Drezet-Humez va dans le même sens que le Dr Birol en mettant en exergue les bénéfices de la double transition numérique et énergétique, tout en soulignant un écueil à éviter : celui du coût social sur les plus vulnérables.

Les usages du numérique vont continuer à se développer très rapidement au cours des prochaines décennies, notamment sous l'effet conjugué de :

- l'usage généralisé d'Internet et du haut débit (dont la 5G) ;
- la multiplication des objets connectés (montres, domotique, transport...);
- le remplacement nécessaire des énergies fossiles par l'électricité, notamment dans l'industrie ;
- le développement des systèmes de flexibilité, des réseaux et micro-réseaux, ainsi que des compteurs intelligents entraînés par la mise en œuvre de la transition énergétique ;
- la recherche accrue d'efficacité, de compétitivité, de sûreté et de fiabilité, par exemple dans les centrales nucléaires.

En outre, de nouveaux usages ne cesseront d'apparaître dans tous les secteurs d'activité (industrie, bâtiment, transports, jeux et consommation courante...) qui pourront améliorer l'empreinte environnementale de ces secteurs ou, au contraire, être source, au moins dans un premier temps, d'un accroissement important des consommations d'énergie et de matériaux critiques, comme dans le cas du *streaming*, des *blockchains*, des *crypto-assets* (actifs numériques basés sur la cryptographie, comme le Bitcoin et autres cryptomonnaies), des NFT ou encore du méta-vers. Il en est du numérique comme du cholestérol : il faut distinguer le bon du mauvais. Le numérique est au centre de nombreuses technologies contribuant à la transition énergétique. Mais quelle est la valeur ajoutée de la *blockchain* ou du *streaming video* en comparaison de leur impact énergétique et climatique ?

Alain Burtin nous indique, dans son article, que le développement des énergies renouvelables intermittentes nécessite d'adapter l'exploitation des systèmes électriques et de développer de nouveaux leviers de flexibilité grâce au numérique (réglage rapide de fréquence, systèmes de prévision, marchés infra-journaliers, *smart grid*, *virtual power plants*, *smart charging*...). Le numérique devient ainsi un outil incontournable pour assurer le bon fonctionnement des mix électriques décarbonés.

Nul ne sait ce que l'avenir nous réserve, mais il convient d'anticiper ces nouveaux usages en prévoyant et en planifiant en conséquence l'offre d'électricité et de matériaux, et en engageant des travaux de R&D pour limiter autant que possible les consommations.

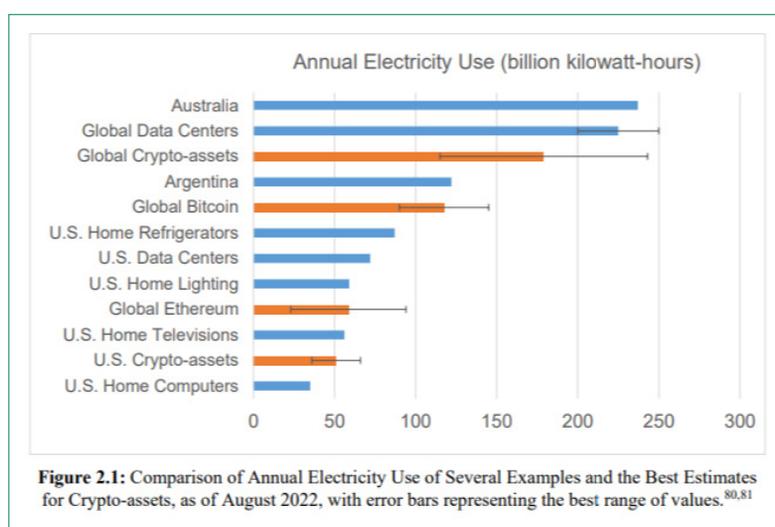
Des progrès considérables ont d'ores et déjà été obtenus comme l'observe l'AIE : par exemple, au niveau des *data centers* dont la consommation globale a stagné depuis dix ans, alors que dans le même temps le trafic des données a explosé. De plus, la multiplication des usages du numérique entraîne des menaces en termes de cybersécurité, que l'État doit veiller à juguler.

Par ailleurs, comme l'indiquent Vincent Mazauric et ses co-auteurs dans leur article, le numérique devra faire face au défi technologique que représente le ralentissement observé en matière de miniaturisation des composants électroniques, voire même la fin de la pertinence de la « loi de Moore ».

Le graphique situé en page suivante compare les consommations d'électricité aux États-Unis liées à certains usages spécifiques, comme celles des *data centers*, des téléviseurs ou des crypto-actifs (ou *crypto-assets*), par rapport à la consommation d'électricité au niveau mondial ou à celle de pays entiers, comme l'Australie ou l'Argentine.

Dans son article, Paul Jolie précise ainsi que les États-Unis accueillent environ un tiers des opérations mondiales de crypto-actifs, qui consomment actuellement entre 0,9 % et 1,7 % de la consommation totale d'électricité du pays, soit l'équivalent d'environ 50 TWh. Cette fourchette d'utilisation de l'électricité est similaire à celle de tous les ordinateurs domestiques ou de tout l'éclairage résidentiel aux États-Unis.

Aurélien Picart souligne que la réduction de l'empreinte carbone du numérique doit s'appuyer, au niveau mondial, sur trois leviers principaux : le progrès technique, l'évolution des comportements et la décarbonation de la production d'électricité.



Source: Climate and Energy Implications of Crypto-Assets in the United States. White House Office of Science and Technology Policy. Washington D.C., September 8, 2022.

Les coordonnateurs de ce numéro remercient chaleureusement les différents auteurs qui ont bien voulu nous consacrer un peu de leur temps pour contribuer à ce numéro. Ils remercient tout particulièrement Gérard Roucairol pour avoir accepté de le préfacer.

Ils espèrent que, dans la période actuelle de crise multiforme de l'énergie et d'urgence climatique, la riche analyse proposée ici permettra de mieux comprendre les enjeux et d'éclairer les décideurs, notamment politiques et économiques, sur les bons choix à faire.

Why data is vital to build a better energy future for the world

By Dr Fatih BIROL

Executive Director of the International Energy Agency

In this contribution, Dr. Fatih Birol, Executive Director of the International Energy Agency (IEA), highlights how data is essential to understand and map progress in clean energy transition, to bring down global greenhouse gas emissions, achieve key international Sustainable Development Goals on universal access to modern energy and ensure energy security worldwide. The article depicts how the IEA produces, maintains and continuously improves essential datasets, indicators and data-based projections to help countries navigate this challenge.

Data is essential to understand and improve our complex global energy system. It allows us to map pathways for and track progress on countries' transitions to cleaner and more secure energy – efforts that are essential to bring down greenhouse gas emissions and achieve key international Sustainable Development Goals, such as universal access to modern energy.

In its half-century of existence, the International Energy Agency (IEA) has become the authoritative point of reference and go-to source for independent, data-driven analysis on energy security and clean energy transitions. Data-based projections are at the core of the IEA's all-fuels and all-technologies analysis, notably our annual flagship report, the World Energy Outlook. Advanced and comprehensive collection of energy statistics is one of the key requirements of Membership to the IEA. Without reliable data, countries would struggle to secure the energy supplies needed to power their economies today and to chart their transitions to a low-emissions future, which is essential to avoid the worst effects of climate change. Robust, comparable and timely data and statistics are key to foreseeing shortages, identifying priorities, setting clear targets and measuring progress.

Data is also crucial for responding to crises. As early as September 2021 the IEA was the first observer to publicly provide data-based evidence that Russia was deliberately holding back natural gas supplies to European customers. That early anticipation allowed the Agency to act rapidly in providing advice to policy makers. Within a week of Russia's invasion of Ukraine in February 2022, we produced a 10-Point Plan to Reduce the European Union's Reliance on Russian Natural Gas¹, with a focus

on the measures to prepare Europe for the following winter.

The Plan drew on detailed data and quantitative estimates of energy supply sources, gas storage refilling needs, trends in the deployment of renewables, and many other key elements. It proposed a suite of measures – spanning resource management, diversification options, consumer protection and end-user adaptability – to enable the EU to reduce its imports of Russian natural gas by a third within a year. The 10-Point Plan, with its emphasis on greater energy efficiency and accelerated rollout of renewables, was also aligned with the EU's own climate goals.

The Plan and our subsequent follow-up work with the European Commission and governments across the EU helped to enable Europe to go into the 2022-2023 winter with EU gas storage facilities filled well above their five-year average, providing an important buffer. And our work with our EU partners continues, with the aim of ensuring Europe has sufficient energy supplies for next winter as well, while at the same time avoiding price spikes, factory closures, increased use of coal for power generation and fierce international competition for cargoes of liquefied natural gas.

Similarly, more than nine months before the EU implemented a ban on Russian crude oil imports, we put forward a 10-point plan on oil² to immediately avert the risk that rising oil demand during the northern hemisphere summer "driving season" would coincide with curtailed supply from Russia. This plan proposed 10 actions that can be taken to reduce oil demand with immediate impact – and provides recommendations to put oil demand onto a more sustainable downward

¹ <https://www.iea.org/reports/a-10-point-plan-to-reduce-the-european-unions-reliance-on-russian-natural-gas>

² <https://www.iea.org/reports/a-10-point-plan-to-cut-oil-use>

longer-term path. Many of those measures, from hastening the adoption of electric and more efficient vehicles to preferring high-speed trains to planes when possible, were implemented by governments worldwide, notably in France.

As well as working with governments around the world on responding to the current global energy crisis, the IEA is committed to assessing and spurring progress on clean energy transitions globally. Efforts to reduce greenhouse gas emissions need to accelerate rapidly if the world is to meet the climate goals set out in the Paris Agreement, including limiting the average rise in global temperatures to well below 2°C – preferably to 1.5°C – compared with pre-industrial levels.

Developing accurate, up-to-date and innovative tools to track the many facets of clean energy transitions is essential to measure how the world is faring in efforts to reach net zero emissions globally by 2050, which would provide an even chance of limiting global warming to 1.5°C. Data helps us understand what trajectory we are on – and to determine where to channel investment and policy attention to shift onto a more sustainable path.

Because no single index can fully capture the complexity of clean energy transitions, the IEA maintains comprehensive sets of indicators at global, regional, national and sectoral levels. The Agency notably monitors global carbon dioxide (CO₂) emissions from energy combustion and industrial processes, based on detailed region-by-region and fuel-by-fuel analysis, drawing on the latest official national statistics, as well as energy, economic and weather data.

The figures show that after the largest ever annual decline in global energy-related CO₂ emissions, which took place in 2020 as a result of the Covid-19 pandemic, emissions rebounded sharply in 2021 and grew again, albeit more slowly, in 2022. Emissions are still going in the wrong direction for us to reach international climate goals – making clear the need for stronger policies by governments.

However, despite these troubling trends, we at the IEA see reasons for optimism. Responses by governments around the world promise to make this a historic turning point towards a cleaner, more affordable and more secure energy system.

The data-driven energy modelling in the 2022 edition of our World Energy Outlook (WEO 2022) concludes, for the first time, that a definitive peak in global demand for fossil fuels is now within sight. Under today's policy settings, coal demand is set to peak in the next few years, natural gas demand reaches a plateau by the end of the decade, and oil demand reaches its highest point in the mid-2030s before falling slightly. From 80% today – a level that has been constant for decades – the share of fossil fuels in the global energy mix is set to drop just below 75% by 2030 and to just above 60% by midcentury.

WEO 2022 also shows that policy and technology changes since the Paris Agreement in 2015 have reduced projected temperature increases, although we are still far from what is needed to limit them to 1.5°C. In a scenario based on today's policy settings, emissions reach a plateau at around 37 billion tonnes a year before falling slowly to 32 billion tonnes in 2050, a trajectory that would lead to a 2.5°C rise in global average

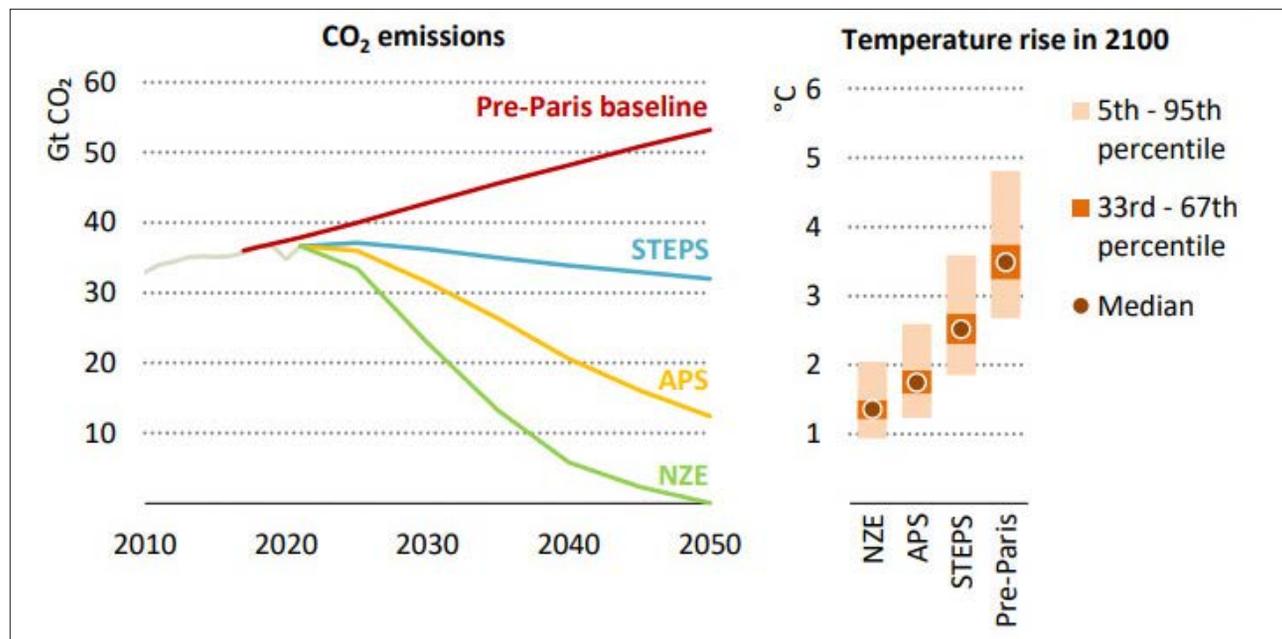


Figure 1: Energy-related and process CO₂ emissions, 2010-2050 and temperature rise in 2100 by scenario: policy and technology advances since 2015 have shaved 1°C off the temperature rise in 2100 but stated policies still lead to a temperature rise well above the Paris Agreement goals.

Notes: Pre-Paris trajectory is based on the Current Policies Scenario from the WEO 2015 (IEA, 2015). Temperature rise estimates are relative to 1850-1900 and match the IPCC Sixth Assessment Report definition of warming of 0.85°C between 1995-2014 (IPCC, 2022a) – Source: IEA CC BY 4.0.

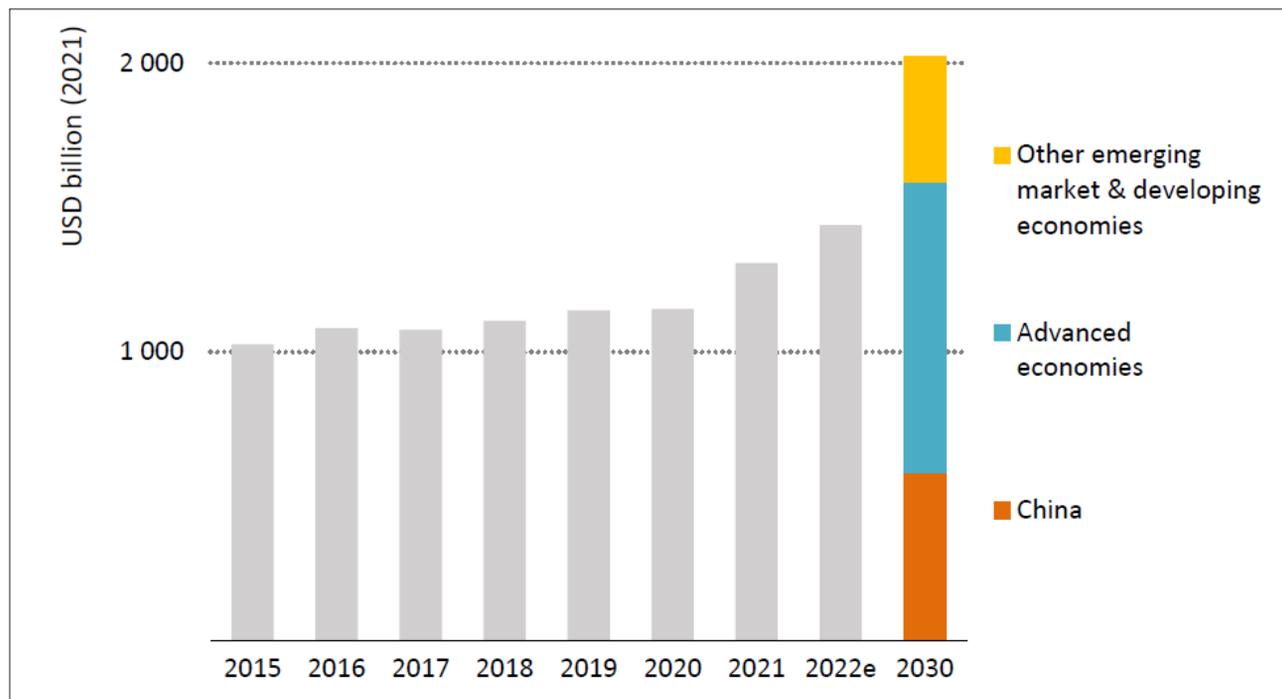


Figure 2: Annual average clean energy investment by region in the Stated Policies Scenario compared to historic levels, 2015-2030 – Source: IEA CC BY 4.0.

temperatures by 2100, around 1°C lower than the baseline trajectory prior to the Paris Agreement. If governments fully achieve the national energy and climate pledges they have announced as of today, emissions would peak in the mid-2020s and fall to 12 billion tonnes a year in 2050, resulting in a global temperature rise of 1.7°C by 2100.

Reaching net zero emissions will require innovative technologies, many of which are not yet ready for market. To support progress on this front, the IEA has in recent years developed a series of cutting-edge data tools to determine trends, developments and advances across a wide range of fields in order to keep track of the key technological advances in clean energy.

Our Tracking Clean Energy Progress³ tool assesses recent developments for 55 components of the energy system that are critical for clean energy transitions, with progress assessed against the benchmark of our Net Zero Emissions by 2050 Scenario. It looks into all relevant technologies, infrastructure and sectors. In our latest update in September 2022, of the 55 components tracked, only two were judged to be fully "on track" with what is needed to reach net zero by 2050 – electric vehicles and lighting. However, recent policy action and technology developments indicate that momentum is accelerating in many areas, including renewable electricity capacity additions, which are at record levels, and hydrogen and carbon capture project announcements. But these are not yet fast enough to align with a pathway to net zero by 2050.

³ <https://www.iea.org/topics/tracking-clean-energy-progress>

In addition, the IEA brings together key technological development data through a series of other tools, such as the Energy Start-up Data Explorer⁴, and the Energy Technology Patents Data⁵ Explorer. Together, they provide an instant picture of what sectors are most benefiting from company creation, technological development and public interest.

Renewable energy technologies, especially batteries and solar panels, require large and varied quantities of critical minerals, many of which are sourced or processed in a limited number of countries. Our Critical Minerals Policy⁶ Tracker keeps track of those potential bottlenecks, highlighting prominent policies and regulations already in place around the world to enhance security of supply, incentivise new resource development and ensure sustainable and responsible production.

The IEA also keeps track of the transformation of the fossil fuel sector. A dedicated online tool follows policymakers' efforts to tackle methane emissions from the energy sector⁷, which is today one of the best near-term opportunities to limit global warming.

The transition to clean energy will require a massive increase in investment in developing and deploying the necessary technologies and the supporting infrastructure. The IEA unpacks global energy investment trends

⁴ <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/energy-start-up-data-explorer>

⁵ <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/energy-technology-patents-data-explorer>

⁶ <https://www.iea.org/reports/critical-minerals-policy-tracker>

⁷ <https://www.iea.org/reports/global-methane-tracker-2022>

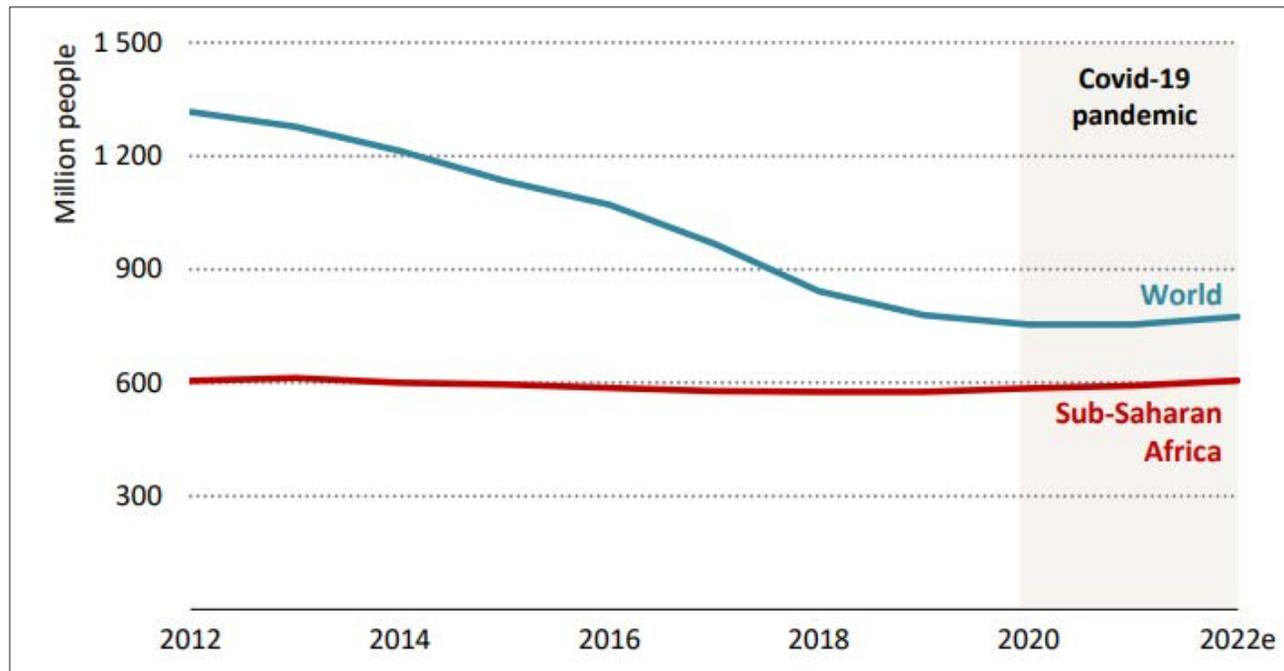


Figure 3: Number of people without access to electricity in sub-Saharan Africa and the world, 2012-2022: On the heels of the Covid-19 pandemic, the 2022 energy crisis is leading to a reversal of global progress on electricity access for the first time in more than a decade. Notes: 2022e = estimated values for 2022 – Source: IEA CC BY 4.0.

through its yearly World Energy Investment⁸ report. The most recent edition showed that clean energy investment is picking up – but not yet quickly enough to reach international energy and climate goals. Clean energy investment grew by only 2% a year in the five years after the Paris Agreement was signed in 2015. But since 2020, the pace of growth has accelerated significantly to 12%.

Our regularly updated Government Spending Tracker⁹ covers economic recovery packages enacted by governments worldwide both in response to the Covid-19 and the global energy crisis. The latest edition of the Tracker shows that such packages now represent USD 1.215 billion in clean energy investment support, well over twice the financial commitments made to green recovery measures after the 2007-2008 financial crisis. This government spending is set to mobilise substantial flows of additional public and private investment. Based on today's policy settings, total annual clean energy investment is set to grow by nearly 50% from today's levels to over USD 2 trillion in 2030. However, our data also shows that this spending is almost entirely in advanced economies and China, making clear the urgent need for policy actions and international efforts to mobilise and channel more capital into emerging and developing markets.

The transition to a clean energy future has major repercussions for employment, both in terms of job losses in fossil fuel industries and the need for new skilled

workers to install and maintain the energy technologies of the future. While the transition to clean energies will lead to a net increase in energy sector employment, the jobs being created are not always in the same places or do not require the same skills as those being lost. Detailed data are vital in this situation to know where job training and other supports are needed most.

To provide a global picture, in 2022, we launched our new World Energy Employment report¹⁰, the first comprehensive inventory and analysis of the global energy workforce. The report examines how countries around the world are looking to accelerate the growth of clean energy industries. It uses data on expected job needs to help governments identify where job training is most needed to ensure there will be enough skilled labour for the rolling out of clean and efficient energy technologies.

The IEA is also one of the international organisations charged with monitoring progress towards the United Nation's Sustainable Development Goal 7 (SDG7) to "ensure access to affordable, reliable and modern energy for all by 2030". SDG7 targets universal access to electricity and clean cooking by 2030, significantly higher shares of renewables in the global energy mix, and a doubling of the annual rate of improvement in energy efficiency compared with 2000-2010.

The Covid-19 pandemic, the energy crisis, and rising inflation have led to major setbacks on many of these targets, notably on electricity access. In order to reach universal electricity access by 2030, the world would need to connect around 110 million people every

⁸ <https://www.iea.org/reports/world-energy-investment-2022>

⁹ <https://www.iea.org/reports/government-energy-spending-tracker-2>

¹⁰ <https://www.iea.org/reports/world-energy-employment>

year from now to 2030, the vast majority of them in sub-Saharan Africa. But for the first time in decades, the number of people without access to electricity is set to increase in 2022 due to the impacts of the energy crisis and the pandemic. We estimate that around 75 million people who recently gained access to electricity actually lost the ability to pay for it in 2022, while another 100 million people have reverted to the use of traditional biomass for cooking, carrying with it serious health repercussions.

With so much of its work dependent on a steady supply of quality data, the IEA is deeply involved in helping its partners improve the quality of their energy statistics. Launched in 2017, our Clean Energy Transitions Programme¹¹ notably conducts training and capacity

building activities in major emerging economies through workshops, training events and guidance manuals. Priority countries include Brazil, China, India, Indonesia, Mexico and South Africa, as well as key regions such as Southeast Asia, Latin America and Africa.

As the world continues to grapple with the combined challenge of coping with the first truly global energy crisis while at the same time building the clean energy systems of the future, the IEA's data will continue to play a leading role in setting priorities and mobilising investment to ensure we can all benefit from sustainable, secure and affordable energy.

¹¹ <https://www.iea.org/programmes/clean-energy-transitions-programme>

Consommation énergétique des usages du numérique en France

Par Michel SCHMITT

Ingénieur général des Mines,
membre du Conseil général de l'Économie

En 2018, le Conseil général de l'Économie avait évalué à 35 750 GWh la consommation électrique résultant des usages du numérique en France, laquelle était en net retrait par rapport au chiffre de la précédente étude de 2008. Ce même rapport a anticipé cette consommation, à usages similaires, à un niveau de 31 843 GWh en 2030. À la lumière des deux dernières éditions (2020 et 2022) du Baromètre du numérique, nous analysons dans cet article les tendances observées depuis 2018, comparons les données anticipées à l'époque pour 2022 avec les données actuelles et mettons à jour les prévisions 2030. En particulier, le confinement a modifié les comportements, avec le retour en force des ordinateurs et tablettes lors des périodes de télétravail.

Le Conseil général de l'Économie (CGE) a publié en 2019 le rapport « Réduire la consommation énergétique du numérique »¹. Ce sujet, recouvrant une double interrogation (combien le numérique consomme-t-il et quelle sera demain sa consommation ?), s'inscrivait dans les réflexions de nombreux organismes, en particulier le Shift Project qui prévoyait une consommation électrique de plus du double à horizon 2025, si l'on extrapolait à partir des données de l'époque². Ces études concernaient la consommation mondiale et avaient mis en évidence que l'empreinte carbone du numérique ne se limitait pas à sa consommation électrique, pointant notamment que l'empreinte liée à la fabrication des équipements représentait 45 % de l'empreinte totale.

Estimation 2018 des usages du numérique

Le rapport du CGE se limitait, quant à lui, à la France. Le territoire national présentait plusieurs spécificités notables, toujours d'actualité. Tout d'abord, les Français étaient déjà bien équipés en appareils numériques (par exemple, en 2018, 94 % des Français possédaient un téléphone portable) et certains phénomènes de saturation commençaient à voir le jour. Ensuite, les usages consommaient essentiellement de l'électricité pro-

duite en France, donc une électricité déjà fortement décarbonée (moins de 100 gCO₂/kWh, environ dix fois moins que la production d'électricité par une centrale à charbon). Enfin, les équipements étaient essentiellement importés, ce qui, au niveau de la France, portait à environ 75 % la part de l'empreinte de la fabrication des équipements.

Les conclusions du rapport CGE étaient les suivantes :

- « Pour les usages actuels, la consommation électrique globale a tendance à diminuer (41,5 GWh en 2008, contre 35,8 GWh en 2018, et une projection de 31,8 GWh en 2030), du fait de l'efficacité croissante des dispositifs (technologies des téléviseurs, des réseaux...). La croissance ou non de la consommation future dépendra donc des usages nouveaux : IoT, *blockchain*, IA, voiture connectée, etc.
- En termes méthodologiques, on manque cruellement de données, aussi bien sur le parc installé que sur la consommation élémentaire de chaque appareil en fonction de son mode de fonctionnement (telle la veille), ou sur celle liée à la transmission de vidéos, au calcul intensif, etc.
- L'impact des équipements est de l'ordre de 75 % en France, contre 45 % au niveau mondial. Donc, pour réduire l'impact, l'allongement de la durée de vie des équipements est primordial. »

Les recommandations formulées dans le rapport peuvent être résumées en ces quelques mots : sensibiliser, suivre l'impact, éco-concevoir, commande publique éco-responsable ou encore formation.

¹ <https://www.economie.gouv.fr/cge/consommation-energie-numerique>

² « Lean ICT – Les impacts environnementaux du numérique » par The Shift Project, <https://theshiftproject.org/lean-ict/>

Les évolutions qualitatives observées depuis 2018

Que s'est-il passé depuis cette photo prise en 2018 ? De nombreux acteurs ont avancé sur le sujet de la consommation énergétique du numérique.

En premier lieu, les politiques s'en sont emparés : tout d'abord, avec la « feuille de route sur l'environnement et le numérique »³ qui a abouti à la loi du 15 novembre 2021 « visant à réduire l'empreinte environnementale du numérique en France »⁴. Deux points notables de cette loi sont à souligner : l'étiquetage des produits numériques selon différentes catégories environnementales et la création du « Haut comité sur le numérique écoresponsable » qui a été installé le 14 novembre 2022 et est chargé d'établir d'ici le printemps 2023 une feuille de route sur le verdissement de la filière numérique⁵.

Ensuite, plusieurs rapports et bases de données ont vu le jour. Nous en citons ici quelques-uns :

- Les données *open source* de l'Ademe⁶ : base de données qui permet de mieux quantifier les impacts des différents équipements tant pour leur fabrication que pour leur usage.
- Shift (2020), « Déployer la sobriété numérique », l'étude réalisée par The Shift Project⁷.
- ADEME – ARCEP (2022), « Évaluation de l'impact environnemental du numérique en France et analyse prospective »⁸ : les grandes lignes du constat fait dans cette étude sont les mêmes que celui du rapport CGE. Est ainsi mis l'accent sur l'empreinte liée à la télévision, qui est, parmi les équipements des particuliers, le facteur prépondérant de l'empreinte du numérique.
- ANRT (2022), « Énergie et Numérique : des défis réciproques » : note de synthèse publiée dans les cahiers Futuris⁹ qui propose une analyse très fine et très documentée des grandes tendances en matière de numérique.
- Deux éditions du Baromètre du numérique (2020¹⁰ et 2022¹¹), qui sont source d'innombrables informations statistiques sur l'équipement des particuliers et de leur usage du numérique en France. La plupart des chiffres ci-après en sont issus.

³ https://cnnumerique.fr/environnement_numerique

⁴ https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/JORFTEXT000044327272?init=true&page=1&query=empreinte+environnementale+du+num%C3%A9rique&searchField=ALL&tab_selection=all

⁵ <https://www.banquedesterritoires.fr/le-numerique-ecoresponsable-son-haut-comite>

⁶ <https://www.ademe.fr/nos-missions/donnees/>

⁷ <https://theshiftproject.org/article/deployer-la-sobriete-numerique-rapport-shift/>

⁸ <https://librairie.ademe.fr/consommer-autrement/5226-evaluation-de-l-impact-environnemental-du-numerique-en-france-et-analyse-prospective.html>

⁹ https://www.anrt.asso.fr/sites/default/files/anrt_energie_et_numerique_rapport_snre_2022.pdf

¹⁰ <https://www.economie.gouv.fr/cge/barometre-numerique-2021>

¹¹ <https://www.economie.gouv.fr/cge/barometre-numerique-2022>

Enfin, plusieurs événements ont modifié les usages du numérique depuis 2018, parmi lesquels :

- le confinement, avec l'essor du télétravail, qui, quasi inexistant avant 2018, touche aujourd'hui 45 % des personnes en emploi ;
- l'accès à Internet *via* la fibre, qui remplace progressivement l'ADSL (18 % des foyers étaient raccordés par la fibre en 2017, ils étaient 56 % à la mi-2022) ;
- de nouveaux usages : la télémédecine, NFT¹², etc.

Le numérique est aujourd'hui de plus en plus omniprésent. On ne peut plus s'en passer, même un court instant ; il envahit nos temps morts.

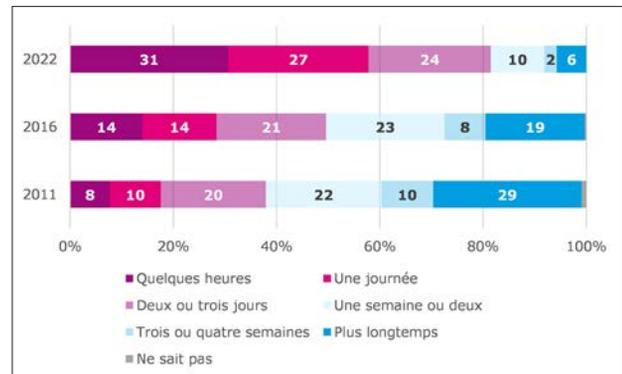


Figure 1 : Combien de temps pouvez-vous passer d'Internet sans que cela vous manque ? – Champ de l'enquête : internautes de 12 ans et plus (en %) – Source : Baromètre du numérique 2022.



Figure 2 : Pratique d'activités pendant les temps morts : lorsque vous êtes dans les transports en commun, que vous êtes passager dans une voiture, que vous attendez quelqu'un, que vous patientez à un rendez-vous ou que vous êtes dans une file d'attente, comment occupez-vous ces temps morts ? Cumul des réponses « souvent » et « de temps en temps » – Champ de l'enquête : ensemble de la population des 12 ans et plus disposant d'une connexion fixe à domicile (en %) – Source : Baromètre du numérique 2022.

¹² NFT (Non-Fungible Token). S'appuyant sur la technologie de la *blockchain*, les NFT garantissent l'originalité d'un fichier, permettant de le distinguer de sa copie pourtant identique au bit près. Alors que le marché des NFT ne représentait que quelques 200 M\$ en 2020, celui-ci a littéralement explosé pour représenter aujourd'hui plus de 40 G\$ (multiplication par 130 entre 2020 et 2021).

Cependant, du point de vue des données, on enregistre peu de nouveautés permettant de mettre à jour les chiffres de 2018, hormis les deux dernières éditions précitées du Baromètre du numérique, dont nous avons utilisé les éditions antérieures pour établir la consommation 2018 et surtout les prévisions d'évolution de celle-ci.

Où en est-on par rapport à la trajectoire initiale anticipée 2018-2030 ?

Dans le présent article, nous regardons, à la lumière des deux éditions du Baromètre du numérique postérieures à 2018, la consommation en 2022 et revenons sur la prospective 2030 que nous avons faite à l'époque. À noter que l'enquête du Baromètre ne s'adresse qu'aux personnes de plus de 12 ans et ne concerne que leurs usages du numérique, qu'ils soient privés ou professionnels. Les entreprises ne sont concernées qu'indirectement, au travers des personnes qu'elles emploient.

La méthodologie adoptée pour réaliser les projections 2030 est simple : quelle est l'évolution du parc installé et quelle est l'évolution des usages individuels au sein de ce parc ? :

- en ce qui concerne le parc, les évolutions projetées ont tenu compte de l'évolution de la population française ainsi que du nombre de foyers, ainsi que de l'évolution du taux d'équipement ;
- au niveau des usages individuels (télévision, Internet et vidéo en streaming), ceux-ci ont été projetés en tenant compte des nécessaires effets de saturation, notamment dans le cas de la vidéo en streaming, qui actualisée par rapport au taux de croissance passé donnait une moyenne de 80 heures par semaine de visionnage de films...

Les résultats sont donnés dans le tableau suivant (les précisions méthodologiques sont données dans le rapport CGE de 2018).

	Consommation 2018 (en GWh)	Variation du parc	Variation du temps d'utilisation	Efficacité énergétique	Consommation 2030 (en GWh)
Téléviseurs	10 000	- 0,6 %	- 3,2 %	- 5 %	4 996
Smartphones	240	+ 1,9 %	+ 4,5 %	- 5 %	255
Ordinateurs/tablettes	7 510	0 %	+ 4,5 %	- 7 %	4 924
Box Internet	5 030	0 %	0 %	0 %	5 030
Data centers	7 870	+ 10,1 % (pour moitié)		- 4 %	10 096
Réseaux	5 100	+ 10,1 % (pour moitié)		- 4 %	6 543
Total	35 750				31 843

Tableau 1 : Projection 2030 réalisée en 2018 – Source : rapport CGE 2018.

La réalité en 2022

En 2022, où en est-on par rapport à cette trajectoire ?

Vers des besoins croissants en électricité et en numérique

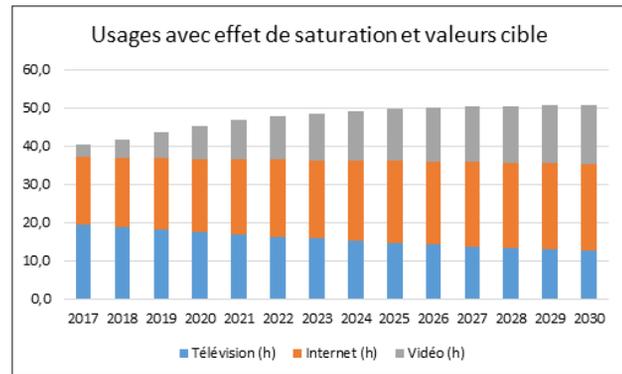


Figure 3 : Projection 2030 des usages réalisée en 2018 – Source : rapport CGE 2018.

Évolution des usages

Nous avons anticipé 11,3 h/semaine de streaming vidéo. Le baromètre 2022 indique 8 heures. Pour la télévision, nous annonçons 16,3 heures, alors que l'on constate un nombre de 17 heures. Pour Internet, la question n'a pas été posée dans l'enquête 2022, y substituant une question portant sur le temps total passé devant un écran. Celui-ci était en 2022 de 32 heures en moyenne, soit en dessous de la somme des durées constatées des différents usages au titre des années précédentes. Il semble donc que les années précédentes, un même usage ait été comptabilisé plusieurs fois, par exemple regarder une vidéo en streaming et regarder la télévision. Ce point montre l'importance de disposer de séries chronologiques cohérentes en termes de périmètre.

Nous allons donc actualiser le Tableau 1 pour 2022 et 2030.

Estimation de l'évolution du parc de téléviseurs

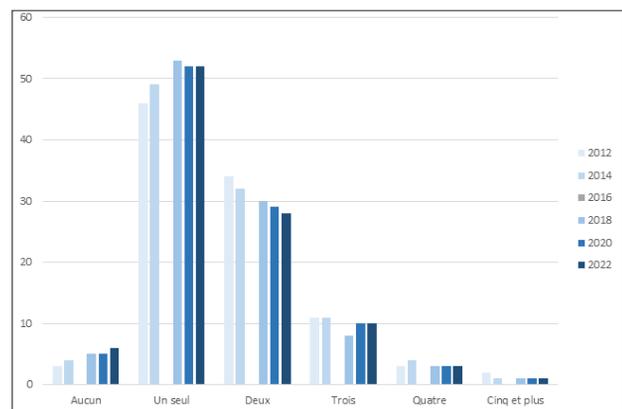


Figure 4 : Taux d'équipement en postes de télévision – Champ de l'enquête : ensemble de la population des 12 ans et plus (en %) – La question n'a pas été posée en 2016, d'où l'absence de cette donnée dans les séries chronologiques – Source : Baromètre du numérique 2022.

Le nombre moyen de téléviseurs par foyer baisse un peu plus lentement qu'anticipé. Comme le nombre des foyers augmente, le produit des deux est en augmentation de + 0,29 % par an, à comparer à la diminution anticipée de - 0,6 % par an.

Estimation du parc de smartphones

Le taux d'équipement en smartphones a crû de manière importante jusqu'en 2018, pour se stabiliser par la suite à 95 %. Ainsi, le parc a augmenté comme la population française.

Estimation du parc d'ordinateurs fixes et de tablettes

C'est ici que les comportements se sont le plus modifiés. En effet, l'équipement en ordinateurs (fixes et mobiles) ainsi qu'en tablettes semblait se stabiliser en 2018. Le confinement a profondément modifié cet état de fait conduisant à un accroissement spectaculaire du taux d'équipement, probablement lié à la pratique du télétravail.

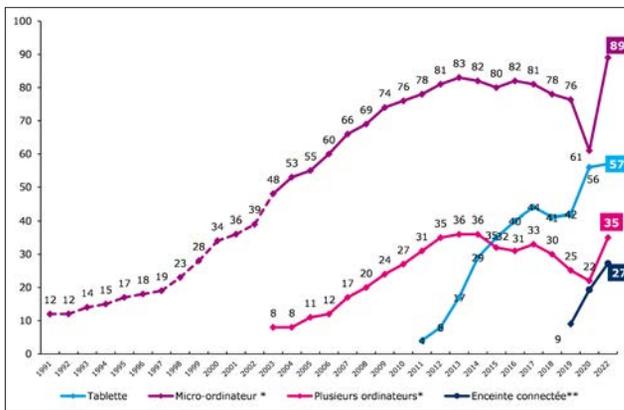


Figure 5 : Taux d'équipement en ordinateurs, tablettes et enceintes connectées à domicile (en %) – Champ de l'enquête : ensemble de la population des 12 ans et plus – Source : Baromètre du numérique 2022.

Le taux d'équipement en micro-ordinateurs est ainsi passé de 78 à 89 %. Le taux des personnes en ayant plusieurs a crû de 30 à 35 %.

Le taux d'équipement en tablettes a progressé de 41 à 57 %.

Estimation du parc de box Internet

Le parc a augmenté comme le nombre des foyers, qui ont crû un peu plus que la population (les foyers diminuant légèrement en taille).

Conclusion pour 2022

Tous les calculs ont été refaits, en prenant les mêmes formules de calcul. Le tableau mis à jour nous donne les résultats suivants.

Base	Consommation 2018 (en GWh)	Variation du parc	Variation du temps d'utilisation	Efficacité énergétique	Consommation 2022 (en GWh)
Téléviseurs	10 000	0,29 %	0,73 %	- 5,00 %	8 436
Smartphones	240	0,78 %	- 3,33 %	- 5,00 %	176
Ordinateurs/tablettes	7 510	5,79 %	- 4,27 %	- 7,00 %	5 909
Box Internet	5 030	0,60 %	0,00 %	0,00 %	5 152
Data centers	7 870	13,62 %		- 4,00 %	8 912
Réseaux	5 100	13,62 %		- 4,00 %	5 776
Total	35 750				34 361

Tableau 2 : Estimation 2022 des usages du numérique en France.

Actualisation de la projection 2030

Si l'on reprend l'exercice de prospective pour 2030, les résultats actualisés sont alors les suivants.

Base	Consommation 2022 (GWh)	Variation du parc	Variation du temps d'utilisation	Efficacité énergétique	Consommation 2030 (en GWh)	Consommation 2030 (en GWh) Estimation 2018
Téléviseurs	8 436	0,15 %	0,87 %	- 5,00 %	5 993	4 996
Smartphones	176	0,29 %	3,82 %	- 5,00 %	161	225
Ordinateurs/tablettes	5 909	1,81 %	5,91 %	- 7,00 %	6 044	4 924
Box Internet	5 152	0,43 %	0,00 %	0,00 %	5 332	5 030
Data centers	8 912	8,17 %		- 4,00 %	9 242	10 096
Réseaux	5 776	8,17 %		- 4,00 %	5 989	6 543
Total	34 361				32 762	31 843

Tableau 3 : Estimation 2030 des usages du numérique en France.

Malgré ces changements profonds dans l'usage du numérique, nous sommes donc toujours sur une trajectoire de décroissance de la consommation énergétique associée aux usages du numérique en France, qui est cependant moindre que celle anticipée.

Qu'en est-il des nouveaux usages ?

Les objets connectés

Le Baromètre du numérique nous fournit des indices permettant d'appréhender quelques évolutions en la matière. Ainsi, l'usage des objets connectés se répand sur l'ensemble des secteurs de marché. On notera cependant qu'une moitié des personnes interrogées pense que cela ne la concerne pas.

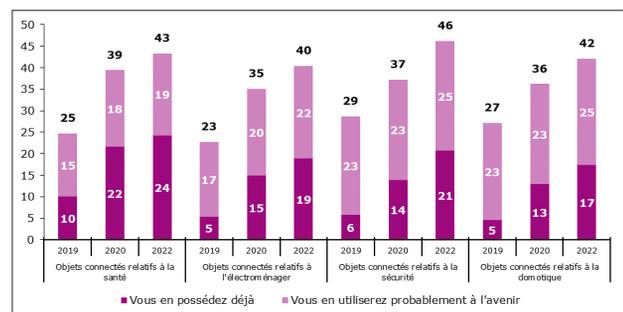


Figure 6 : En dehors des téléphones, enceintes, télévisions et consoles de jeux, on peut disposer à domicile d'objets connectés à Internet grâce à une technologie sans fil ; ce sont des objets de type montres connectées, électroménager connecté, thermostat, dispositifs de sécurité, etc. Par rapport à ces objets, aujourd'hui, quelle est votre situation ? – Source : Baromètre du numérique 2022.

Le métavers

Ce sujet est beaucoup plus prospectif. Le Baromètre du numérique l'a appréhendé à partir de l'un des équipements nécessaires à son usage, à savoir les casques de réalité virtuelle ou augmentée.

En ce qui concerne les nouveaux usages, les particuliers ne voient pas toujours les consommations induites (celles liées à l'intelligence artificielle pour les phases

d'apprentissage, à la *blockchain* pour l'ajout d'une information) et la quantification correspondante est délicate à réaliser. Cependant, pour la *blockchain*, des programmes de recherche montrent que cette consommation peut être considérablement réduite par la preuve d'enjeu.

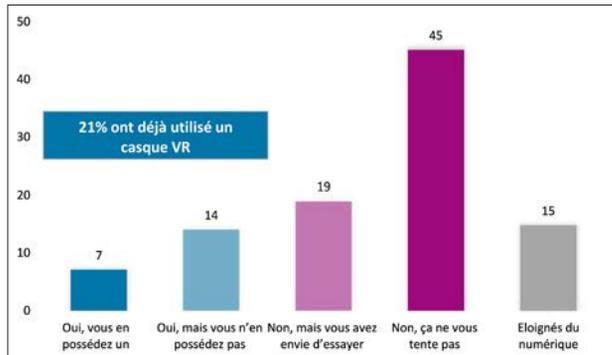


Figure 7 : Avez-vous déjà utilisé un casque de réalité virtuelle ? – Champ de l'étude : ensemble de la population des 12 ans et plus (en %) – Source : Baromètre du numérique 2022.

En guise de conclusion

Nous avons montré comment le Baromètre du numérique permettait de comprendre et de mettre à jour la consommation électrique liée aux usages du numérique. D'autres aspects des enquêtes menées peuvent également éclairer sur l'empreinte associée aux équi-

pements numériques. L'enquête 2020 s'est focalisée sur les *smartphones* (âge des équipements, habitudes d'achat, de fin de vie), tandis que celle de 2022 a porté sur les téléviseurs. Cependant, ces deux sujets n'ont été abordés que dans ces deux dernières éditions ; il ne peut donc pas être dégagé de tendances. Toutefois, ces études ouvrent des pistes pour réduire l'empreinte carbone, par exemple celle des *smartphones*, car 31 % de ces équipements ont moins d'un an et 63 % moins de deux ans. Seuls 17 % ont été achetés reconditionnés ou d'occasion...

Enfin, la décroissance de la consommation liée aux usages du numérique est bien moindre que la décroissance de 55 % des émissions de gaz à effet de serre attendue à l'horizon 2030. Il est dès lors nécessaire de quantifier de manière objective la réduction des émissions que le numérique permet d'induire. Reste alors à quantifier l'apport global du numérique.

Autonomie stratégique comparée dans l'énergie et le numérique

Par Grégoire POSTEL-VINAY

Conseil général de l'Économie

Les situations des trois plus grands blocs mondiaux divergent, s'agissant de l'autonomie énergétique : les États-Unis sont devenus exportateurs, la Chine est dépendante pour environ 21 % de sa consommation primaire, l'Union l'est pour 57 %, et ce chiffre s'aggrave depuis vingt ans, et la France pour 44 %. Un effort majeur est requis tant de l'Union que de notre pays pour améliorer ces chiffres, ce qui implique, entre autres, une inversion de tendance pour le nucléaire. Pour le numérique, la situation de dépendance de l'UE s'est encore accrue, en particulier vis-à-vis des États-Unis. Une prise de conscience, aggravée par les crises récentes, conduit à des inflexions majeures. Dans les deux cas, l'ordre de grandeur des investissements privés et publics requis est le billion d'euros sur la décennie. De même, de nouvelles compétences sont nécessaires, ainsi qu'une planification de long terme. Enfin, les efforts à conduire sont étroitement liés entre les deux domaines.

Ces quatre dernières années ont vu la montée en puissance des thématiques de l'indépendance stratégique dans les priorités publiques, et, de là, privées. Et ce pour quatre raisons. La crise du Covid-19 a mis en évidence les dangers d'une trop grande dépendance de l'UE pour les vaccins, les masques et les respirateurs, mais aussi en ce qui concerne les semi-conducteurs et toutes les industries ou services qui en dépendent. La guerre d'Ukraine a mis l'accent sur les énergies, à commencer par le gaz et, dans la foulée, l'électricité, mais aussi sur le numérique avec ses enjeux de surveillance spatiale, de cybersécurité, d'intelligence artificielle et ses usages possibles pour la propagande, la désinformation. Plus structurales encore, les réactions au changement climatique montrent notre dépendance aux matières premières pour les énergies de substitution ou de stockage, et l'entretissage étroit entre numérique et énergies. Enfin, à la fois conséquence et partiellement cause des trois précédents, le durcissement géopolitique entre les blocs diminue leur coopération et accroît leur conflictualité. Ainsi le multilatéralisme est-il battu en brèche au profit d'accords régionaux.

Les enjeux sont donc à la fois de survie, d'impact sur les niveaux de vie et de maîtrise de notre sort par des voies démocratiques. Ils impliquent de repenser les questions d'autonomie stratégique sous plusieurs angles : quelles sont les activités réellement stratégiques ? Quelle gouvernance est-elle utile pour les prendre en compte, et sur quel historique repose-t-elle ? À quels niveaux, national, européen, mondial, peut-on utilement

les traiter ? Quelles compétences faut-il pour cela ? Quelles technologies sont en jeu ? Quels financements sont nécessaires ? Sans traiter les aspects intrinsèques à la Défense et l'ensemble des infrastructures vitales, le présent article se focalise sur un aperçu de la situation française au regard de l'énergie et du numérique. En effet, sans fourniture d'énergie, pas de développement économique : l'histoire de celui-ci, depuis deux siècles et demi, a reposé largement sur un accès multiplié à l'énergie. Mais il n'y a pas non plus de développement sans information. De plus, il y a des liens toujours plus étroits entre énergie et information, et, plus spécifiquement, l'électricité et l'information ne vont pas l'une sans l'autre, pas seulement parce qu'il s'agit d'électrons, mais aussi parce que sans énergie, pas de numérique, et sans numérique, très peu d'énergies. Une brève description de l'état des lieux pour chaque domaine est complétée de quelques pistes d'action, dont certaines déjà entreprises.

L'énergie : un glorieux passé, des défis majeurs

Les degrés d'indépendance ont évolué historiquement très différemment dans notre pays, en Europe et aux États-Unis, et, plus récemment, en Chine.

Le cas de la France

En France, le souci d'autonomie stratégique pour l'énergie apparaît très tôt, lié à la guerre et aux crises.

Clémenceau demande du pétrole à Wilson lors de la bataille de Verdun en ces termes : « une goutte de pétrole vaut une goutte de sang ». Ainsi la loi de 1928, qui confie à l'État le monopole de l'importation du pétrole brut, qu'il délègue ensuite aux sociétés pétrolières, amorce-t-elle le développement d'une industrie pétrolière nationale : sans essence, point d'usines qui tournent, pas de transports, pas de logistique, une armée immobilisée et donc inutile. Cette industrie permettra, dans un pays qui, après l'épuisement de ses ressources charbonnières, dépendra à 80 % de ses consommations d'énergie en hydrocarbures importés, et devra disposer d'opérateurs lui assurant des approvisionnements diversifiés, tant pour le pétrole que pour le gaz. La création du CEA en 1945 va simultanément permettre d'assurer une indépendance stratégique avec la force de frappe, de réduire la dépendance énergétique grâce à la filière nucléaire civile avec son développement massif entre la fin des années 1970 et le début des années 1990 et de conférer un rôle accru à l'électricité dans les usages de l'énergie. Après les chocs pétroliers, amplifiés du choc dollar au début des années 1980, les politiques de maîtrise de l'énergie et de développement, limité, des EnR complètent le dispositif. Toutefois, un certain découplage apparaît entre politique d'offre et de demande, lorsque l'énergie est rattachée au ministère de l'Environnement en 2008, situation qui perdurera jusque mi-2022, avec la création d'un ministère de la Transition énergétique. Le plan de relance amorce un retour vers le nucléaire avec les petits réacteurs, et le discours de Belfort du Président de la République, en février 2022, relance la filière nucléaire des EPR, tandis que celui de juillet 2022 insiste en même temps sur la sobriété énergétique.

Les Livres blancs sur la Défense insistent, quant à eux, sur la sécurité d'approvisionnement en énergie, avec deux horizons : à long terme, afin d'éviter de manquer de ressources pour couvrir les besoins, ce qui implique une certaine surcapacité pour faire face aux crises ; à court terme, pour éviter une rupture d'approvisionnement et, si elle arrive, la compenser. Ils insistent aussi sur le fait que toutes les énergies ne sont pas systématiquement substituables. Ils soulignent à juste titre que la sécurité énergétique n'est pas synonyme d'indépendance ou d'autarcie : l'indépendance peut être source de fragilité, alors que l'interdépendance peut renforcer notre sécurité. Le marché, notamment intégré de l'UE, est le premier garant de notre sécurité. Il doit cependant être conforté par des politiques publiques pour garantir la sécurité d'approvisionnement. Cela concerne les infrastructures (redondances, diversification et tarification qui permettent les investissements de long terme¹), et des règles et procédures. Enfin, ils insistent sur le fait que les vulnérabilités proviennent autant, si ce n'est plus, de l'interne que de l'externe. Dans le cas récent, c'est une concomitance d'événements internes (la faible disponibilité du parc nucléaire) et externes (la guerre d'Ukraine, les embargos sur le gaz et sanctions sur le pétrole) qui a abouti à une situation de crise.

¹ Voir, notamment, le numéro des *Annales des Mines – Responsabilité & Environnement* de janvier 2023, https://annales.org/re/2023/re_109_janvier_2023.html

Plus récemment, le plan de relance de 100 milliards en consacre 34 à la transition énergétique, tous azimuts. Il est complété par France 2030, doté de 54 milliards et dont cinq des dix axes d'action concernent l'énergie : SMR, hydrogène vert, décarbonation de l'industrie, véhicules électriques et hybrides, et avions bas-carbone.

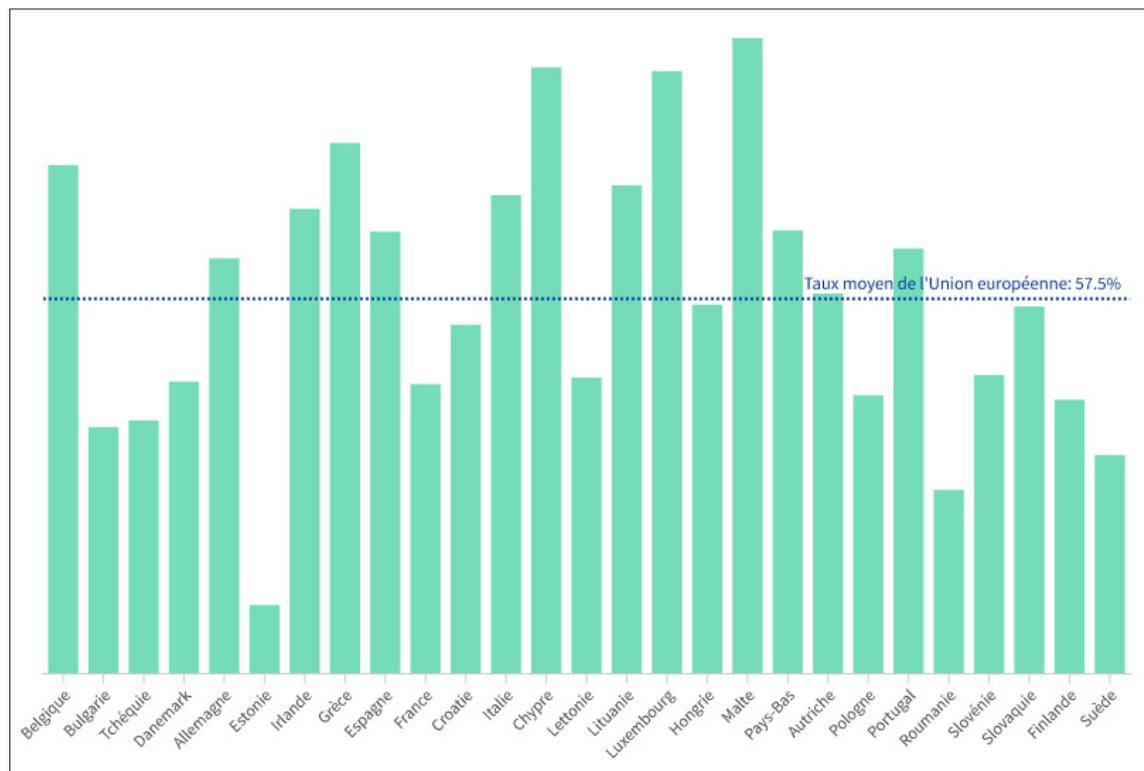
L'Allemagne et l'Europe

Si l'Allemagne se lance, elle aussi, dans un programme nucléaire à la suite des chocs pétroliers, elle le fait à plus petite échelle, disposant, contrairement à la France, de ressources importantes de lignite et de charbon. Sa politique énergétique diffère ainsi de celle de notre pays, une divergence accentuée lorsque Gérard Schroeder facilite, après son départ du pouvoir, une politique plus intense d'échanges de gaz russe contre la vente de technologies allemandes, qui accroîtra la dépendance de son pays à la Russie, partant du constat qu'aux pires moments de la Guerre froide, la Russie n'a jamais cessé ses fournitures d'hydrocarbures à l'Ouest. Angela Merkel, qui lui a succédé, maintient un parc nucléaire dont son prédécesseur avait déjà avalisé politiquement la régression. Elle change d'avis à la suite de Fukushima, contrairement aux autres grands pays industrialisés, ce qui induira une dépendance accrue à la Russie. Les Accords de Paris la conduisent à accélérer une politique en faveur des renouvelables, et à la promouvoir très activement dans les instances de l'UE, tant au niveau de sa R&D² que de sa réglementation et de la taxonomie, politique qu'amplifiera Olaf Scholz³. En outre, elle tarifie l'énergie plus chèrement aux ménages et moins aux entreprises – contrairement à l'équilibre qui prévaut en France –, ce qui aboutit à des investissements plus importants des premiers dans le verdissement de leur habitat. L'invasion de l'Ukraine et ses conséquences vont mettre en évidence le risque de dépendance stratégique, qui, du fait du poids allemand dans l'Union, va aggraver les tensions créées simultanément dans d'autres États membres par la guerre.

Concomitamment, les engagements du Conseil européen de décembre 2020, durcissant les objectifs de l'Union de réduction des émissions de gaz à effet de serre de - 40 à - 55 % en 2030 et de l'atteinte d'une neutralité carbone en 2050, impliquent des modifications profondes de son mix énergétique et de ses consommations, requérant des investissements qui se chiffrent

² Le programme Horizon Europe comporte environ 15 milliards pour le *cluster* 5 dédié à l'énergie, au climat et aux transports verts. S'y ajoutent les PIEEC pour les batteries et l'hydrogène. Le rôle de l'UE en faveur du nucléaire, *via* Euratom, est au regard de ces montants très faible, et porte, entre autres, sur des aspects qui tendent à ajouter des contraintes.

³ Le niveau d'ambition du gouvernement fédéral pour l'Energie a crû avec la coalition élue en 2021, la part des énergies renouvelables visée pour le mix électrique d'ici à 2030 a été fixée à 80 % (contre 47 % en 2022). Compte tenu de l'intermittence des EnR, qui impose des importations de gaz à défaut pour l'Allemagne de bénéficier de nouvelles ressources nucléaires, cela implique pour elle de demeurer dépendante de ressources gazières importées, dont une part coûteuse de GNL.



Graphique 1 : Taux de dépendance énergétique des pays de l'Union en 2020 – Source : Eurostat.

à l'échelle européenne en milliards d'euros⁴, et, pour la France, autour de 70 milliards par an.

Une Europe très dépendante

Plus globalement, l'Europe est dépendante à 95 % de l'extérieur pour ses approvisionnements en pétrole, aux deux tiers pour le gaz, et presque autant pour le charbon. Globalement, l'Europe était dépendante énergétiquement à hauteur de 57,5 % en 2020, un taux de dépendance qui n'a cessé de se détériorer depuis 2001 (47,4 %).

La France, dépendante à 44,4 %, fait figure de bon élève dans cet ensemble, compte tenu d'une quasi-absence de ressources d'hydrocarbures et d'une production charbonnière nulle.

Mais, il est illusoire de s'abstraire du contexte européen, le moins favorable des trois plus grandes puissances mondiales en termes de dépendance. Renverser la tendance qui a prévalu durant vingt ans, alors même que les États-Unis et la Chine s'assurent d'une plus grande indépendance, suppose une politique de décarbonation qui ne peut se satisfaire seulement des EnR et implique des importations de gaz et de métaux et terres rares. Cela implique aussi une relance du nucléaire en Europe ; amorcée en France, elle s'ébauche dans quelques autres pays de l'Union

⁴ Pour la France, les évaluations des investissements nécessaires d'ici 2030 oscillent de 22 à 100 milliards par an, selon les méthodes. France Stratégie évoque l'équivalent de 2,5 points de PIB, <https://www.i4ce.org/publication/edition-2022-panorama-financements-climat/> et <https://www.strategie.gouv.fr/sites/strategie.gouv.fr/files/atoms/files/fs-na114-action-climatique-pisani-mahfouz8novembre2022-20h.pdf>

(Pays-Bas, Pologne, République tchèque, Suède) et se poursuit au Royaume-Uni. La Belgique, quant à elle, a stoppé son programme de fermetures.

Les États-Unis : une course à l'indépendance

En position de « gendarme du monde » après la fin de la Guerre froide, les États-Unis, qui consommaient 16,2 % de l'énergie mondiale en 2019, ont développé une stratégie énergétique reposant, d'une part, sur une faible taxation des sources carbonées (d'où des émissions par habitant presque du double de celles de l'UE) et, d'autre part, sur un accès aux hydrocarbures mondiaux, couplé à une diplomatie garantissant leur accès à ces ressources, et, enfin, sur le développement des ressources de la fédération. Le tout conduisait à une production d'énergies primaires fossiles pour plus des trois quarts du total, contre environ 10 % de nucléaire et 13 % d'EnR. Toutefois, depuis 2001, ils ont mené une politique, certes variable selon les gouvernements au pouvoir, mais qui les a amenés globalement à passer d'une situation de dépendance pour un tiers de leurs énergies à une situation globalement exportatrice en 2022. Les efforts conduits sont multiples : si la production charbonnière régresse, le gaz et le pétrole extraits par *fracking* croissent ; les EnR également, et un effort massif de R&D a été lancé par Obama à la suite de la crise de 2008. Les États-Unis sont devenus exportateurs nets de pétrole en 2020, même si l'indépendance globale en valeur n'implique pas une autarcie. Elle conforte leur résilience dans un contexte de durcissement géopolitique (et, dans une certaine mesure, elle facilite aussi ce durcissement).

Enfin, l'Inflation Reduction Act (IRA), promulgué le 16 août 2022, reflète surtout un plan de 370 milliards dédiés à la réduction des émissions de gaz à effet de serre passant de 50 à 52 % d'ici à 2030 par rapport à 2005. Et comme tel, il pèsera massivement sur l'énergie, sa production et ses consommations, tout en privilégiant les sources nationales, et contribuera donc à renforcer une situation d'indépendance (sauf peut-être pour les matières premières).

L'UE et ses États membres ont réagi, notamment par des visites d'État aux États-Unis, et lors du Conseil européen⁵ du 9 février 2023. D'où il devrait résulter plutôt des réponses de type confédéral (assouplissement par l'Union de ses règles sur les aides d'État, et donc des dépenses par les États eux-mêmes, mais avec des situations budgétaires contrastées), plutôt qu'une réponse de type fédéral, comme cela avait été le cas pour le Covid-19. Il est trop tôt, à l'heure où ces lignes sont écrites, pour en faire un bilan.

La Chine

Premier producteur (18,4 %) et premier consommateur (23,5 %) d'énergie primaire au monde, la Chine est dans une situation intermédiaire par rapport à celle des États-Unis et à celle de l'Europe au regard du critère d'indépendance énergétique. En 2019, elle était ainsi dépendante à hauteur de 21 % pour ses besoins d'énergie primaire. Son mix énergétique est très différent de celui des deux autres grands blocs : 61,2 % de charbon (soit 50,8 % de la production mondiale, 53,8 % de la consommation mondiale et 19,5 % des importations mondiales, bien que sa production couvre 98,8 %

de ses besoins en charbon), 19,1 % de pétrole, 8,7 % d'électricité, 7,3 % de gaz naturel et 3,7 % de bois.

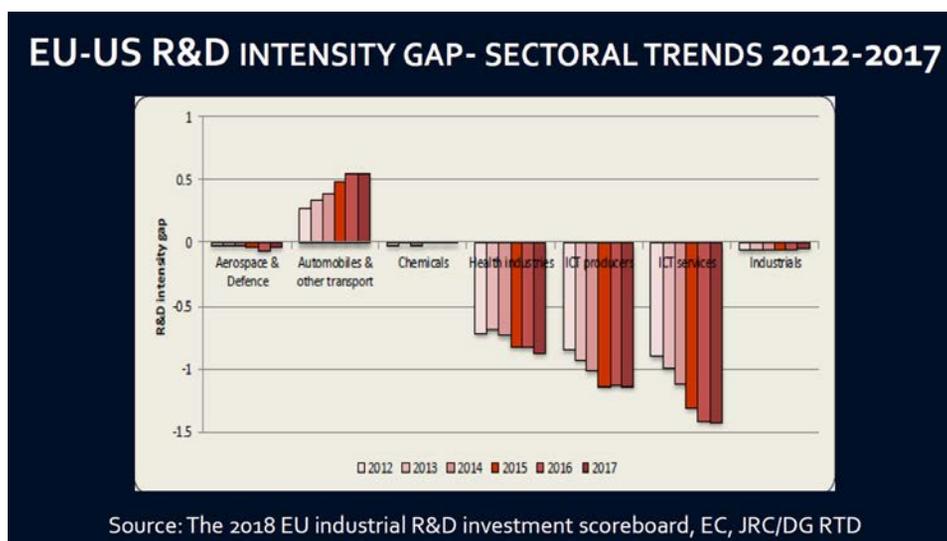
Cette approche quantitative est cependant insuffisante. La Chine mène une politique très active dans tous les domaines, en matière d'accès aux ressources carbonées de pays tiers (dont la Russie, l'Iran et le Kazakhstan), de décarbonation (nucléaire, EnR avec une position très forte dans le solaire photovoltaïque, économies d'énergie), d'adaptation des consommations (véhicules électriques à coût réduit, batteries). Et, par ailleurs, elle maîtrise, sur et en dehors de son territoire, une part majeure des matières premières requises pour la transition écologique, ce qui est un défi majeur pour les stratégies des autres pays⁶.

Le Numérique

Dans ce domaine, plus que dans l'énergie, l'UE accuse un retard sur les États-Unis, et la montée en puissance de la Chine est rapide.

De plus, la Chine progresse rapidement tant dans les brevets que dans les publications scientifiques, en particulier dans le numérique.

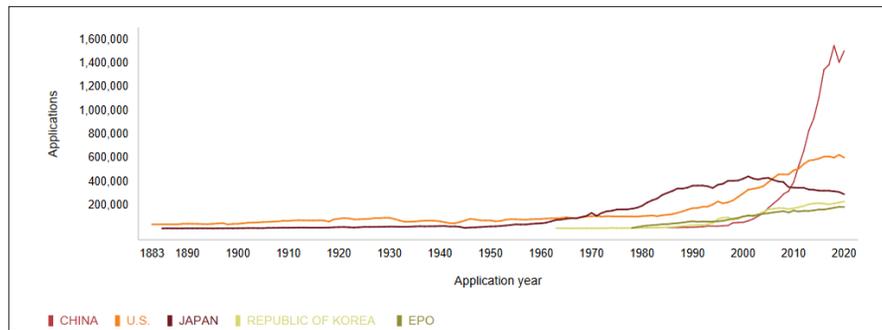
Or, si après la Seconde guerre mondiale être une grande puissance impliquait d'être une puissance nucléaire, le numérique a progressivement pris une place comparable depuis soixante-dix ans : en cause, d'abord les technologies spatiales, version moderne du conseil de Clausewitz de maîtriser les hauteurs. Puis se sont accumulés deux types d'analyses : les premières portent sur les risques liés à l'absence de souverai-



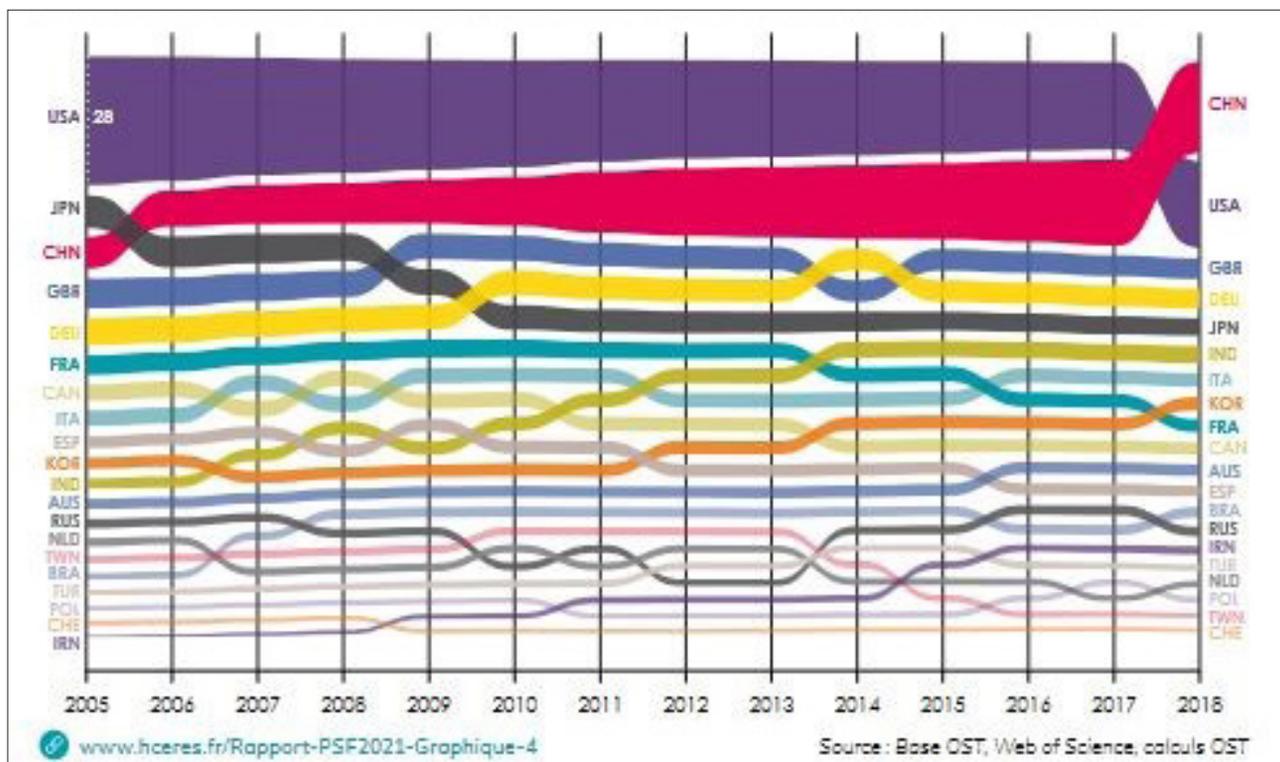
⁵ « Face à la nouvelle réalité géopolitique, l'Union européenne agira avec détermination pour assurer sa compétitivité et sa prospérité à long terme ainsi que son rôle sur la scène mondiale. L'Union européenne renforcera sa souveraineté stratégique et adaptera sa base économique, industrielle et technologique aux transitions écologique et numérique. Elle approfondira le marché unique et assurera des conditions de concurrence équitables tant à l'intérieur de ses frontières qu'à l'échelle mondiale », <https://www.consilium.europa.eu/media/62017/2023-02-09-euco-conclusions-fr.pdf>

Graphique 2 : Évolution des écarts entre la R&D de l'Union européenne et celle des États-Unis par secteurs : la prééminence américaine dans le numérique (d'après Patricia Nouveau, UC de Louvain).

⁶ Voir, par exemple, le rapport Varin, <https://www.economie.gouv.fr/gouvernement-devoile-strategie-securiser-approvisionnement-metiaux-critiques>



Graphique 3 : Demandes de brevets déposées auprès des cinq principaux offices de brevets – Source : OMPI rapport sur les dépôts de brevets en 2021.



Graphique 4 : Part mondiale des publications scientifiques des vingt premiers pays (en %). Durant la précédente décennie, la Chine monte rapidement, la part relative des États-Unis descend, l'UE stagne, la France régresse et la Russie reste contrainte économiquement.

neté numérique (dépendance économique, perte de compétitivité, déclassement militaire, espionnage par des puissances ou des entreprises étrangères, disruption du fonctionnement de l'économie, fuite des compétences, affaiblissement des institutions et de la vie démocratique). Les secondes concernent les technologies clés en cause :

- l'espace, pour son rôle dans l'observation de la Terre et le fonctionnement de systèmes de positionnement désormais omniprésents (comme le GPS). Pour ces technologies l'Europe, notamment entraînée par la France dès les années 1960, avait une position forte, mais elle est confrontée désormais au défi du « New space », des bouquets de microsattellites et des lanceurs réutilisables avec des acteurs privés américains (SpaceX, Blue Origin) et chinois (qui, par exemple, ont marqué les esprits par la prouesse

de leur alunissage sur la face cachée de la Lune en janvier 2019, mais aussi, dès 2007, par la démonstration de leur capacité de destruction de satellites) ;

- les semi-conducteurs et la nanoélectronique, dans un contexte où le monde est passé en vingt ans d'une vingtaine d'acteurs avec des technologies à 13 μm à deux maîtrisant le 3 nanomètre, et d'autres, dont les Européens, tentant leur chance sur des architectures 3D complexes. La pénurie observée lors de la crise du Covid a montré, au-delà des spécialistes, combien leur maîtrise était cruciale, amenant le commissaire Breton à plaider pour que l'UE revienne de 10 % de la production mondiale vers 20 % ;
- la cybersécurité, sans laquelle aucune stratégie publique ni privée n'est viable. Dans ce domaine, les compétences mathématiques et les talents de

l'INRIA et de l'ANSSI sont des atouts pour la France, ainsi que pour la sécurité des infrastructures du *cloud*, la qualification SecNumCloud et son extension progressive dans l'Union ;

- le calcul à haute performance, initialement développé pour satisfaire des besoins liés à la force de frappe, et dont les usages sont désormais cruciaux pour gérer des masses immenses de données (à échelle mondiale, les données produites atteignaient 10 zettaoctets en 2021) et permettre les développements de l'intelligence artificielle à une vitesse suffisante pour donner des résultats quasi immédiats (comme dans Chat GPT). La France dispose en la matière d'atouts, qui ont fait l'objet d'un autre article récent des *Annales des Mines*⁷. L'Europe s'est également investie⁸ ;
- les *Big Data* et le *cloud*, quant à eux, ont été marqués par l'évolution du cadre juridique les concernant. Au départ, était en cause l'entraide judiciaire internationale couverte par la convention de Budapest de 2001.

Les États-Unis, à la suite d'attentats terroristes, légifèrent le Patriot Act (adopté le 26 octobre 2001 et prolongé le 9 mars 2006 et le 26 mai 2011), qui donne au FBI accès aux bases de données personnelles des fournisseurs d'accès à Internet et des opérateurs privés. Le Cloud Act (23 mars 2018), quant à lui, donne aux forces de l'ordre américaines accès aux données personnelles sans que l'intéressé soit informé, ni son pays de résidence et ni le pays où sont stockées ces données. Il a un impact sur l'extraterritorialité du droit avec des enjeux géopolitiques majeurs (l'usage du dollar ou potentiellement seulement des mails portant sur une transaction non libellée en dollar légitime une action de la justice américaine).

Concomitamment, la Chine met en place un contrôle de l'Internet par ses autorités et une obligation, pour l'exercice d'activités économiques sur son sol, soit d'avoir recours à des sites gérés en Chine, soit de disposer d'un domaine .cn, avec effets équivalents. En parallèle, les FAI d'origine chinoise croissent rapidement.

L'UE réagira en plusieurs temps : d'abord avec le RGPD, adopté en 2016 et entré en vigueur en 2018, puis au travers d'une série plus récente de législations majeures⁹ : en 2022, le règlement sur les marchés numériques (DMA), le règlement sur les services numériques (DSA) et la loi sur la gouvernance des données¹⁰, et, enfin, en 2023, la loi sur les données.

- l'intelligence artificielle a, quant à elle, des applications dans l'industrie, la finance, l'assurance, les

transports, la santé, l'emploi, le commerce, l'éducation, mais aussi la Défense. Elle a connu une effervescence dans les années 1980, puis une retombée, et de nouveau une montée en puissance à compter de 2013 du fait des puissances de calcul. À la fin de la décennie 2010, elle suscite des ambitions fébriles, soutenues par les gouvernements des grandes puissances, aux États-Unis d'abord, puis en Chine et en Europe.

Ainsi le gouvernement américain mène-t-il une course en tête sur la R&D, publique, puis privée, avec, par exemple, un plan quinquennal lancé en 2018 et dotant la DARPA de deux milliards de dollars. Les GAMAM investissent lourdement sur le sujet (Amazon avec Alexa, Google, Facebook par R&D interne et des fonds...). Et les États-Unis jouent un rôle majeur sur les investissements dans les écosystèmes de *start-ups* (38 % du total mondial).

La Chine, quant à elle, a lancé en juillet 2017 un plan pour être le leader mondial en 2030 de l'IA et construire une industrie nationale d'environ 150 milliards de dollars. Il prévoit un soutien en capital, en orientation des marchés et en renforcement des liens entre les entreprises, les instituts de recherche et les organismes militaires. Il incite les gouvernements locaux à créer des plans locaux et à développer des centres de R&D en IA (par exemple, à Xiantang (2 Mds\$)). Il prévoit de s'appuyer sur la taille du marché intérieur, estimant que la Chine produit 13 % des données mondiales et espère arriver à 20-25 % en 2020, surpassant alors les États-Unis : passant de 364 exabits en 2012 à 8,6 zettabits en 2020, contre une progression de 898 exabits à 6,6 zettabits pour les États-Unis. Il vise à rapatrier en Chine les chercheurs aux États-Unis ayant des liens avec la Chine. 43 % des meilleurs articles académiques sur l'IA sont publiés en comptant un ou plusieurs Chinois parmi leurs auteurs. Il s'appuie sur ses grandes plateformes (Baidu, Tencent, Alibaba) et leurs centres de recherche. Il est concomitant avec un plan de quinze ans lancé sur les sciences cognitives. Et il insiste sur les investissements pour les *fintechs*, l'assurance et les détections de fraudes.

La France, quant à elle, a lancé un plan en 2018 qui porte sur le développement d'un écosystème de l'IA (talents, réseau de R&D et expérimentations), sur l'ouverture des données (favorable aux *start-ups*), sur le financement de projets français et européens (santé, véhicule autonome) et sur l'éthique.

Simultanément, le 28 avril 2018, la Commission annonce un soutien en trois points (marchés, éthique et R&D) et son intention d'accroître son investissement en matière d'IA de 1,5 G€ sur la période 2018-2020 dans le cadre du programme Horizon 2020. Cet effort se poursuit depuis¹¹.

- les *blockchains* qui permettent de décentraliser la valeur, comme Internet l'a fait avec l'information. Ainsi, tout internaute peut créer et échanger ses

⁷ ANDRÉ Jean-Claude & ROUCAIROL Gérard, *Compétitivité et calcul à haute performance*, <https://annales.org/ri/2021/ri-novembre-2021/2021-11-17.pdf>

⁸ <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/high-performance-computing>

⁹ https://annales.org/ri/2022/ri_aout_2022.html

¹⁰ https://annales.org/enjeux-numeriques/2022/en_18_06_22.html

¹¹ <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/european-approach-artificial-intelligence>

propres actifs de valeur avec l'internaute de son choix, (quasi) instantanément, sans nécessiter la permission d'un tiers. Si les applications les plus répandues sont les cryptoactifs (traités par ailleurs dans ce numéro), un très grand nombre de *start-ups* prospèrent sur cette technologie¹², avec une prédominance marquée des États-Unis en termes de capital-risque. 30 milliards de dollars ont ainsi été investis en capital risque en 2022, après 19,4 milliards en 2021.

Quelles synergies ?

À l'évidence, le numérique ne peut fonctionner sans électricité, et si des batteries (qui relèvent aussi de technologies numériques) peuvent limiter les blocages liés à des pannes temporaires, aucun système numérique n'est viable sans un dispositif énergétique capable de fournir de l'électricité d'une qualité et d'une puissance adéquates. La réciproque est moins simple, ce que l'on peut illustrer de mille exemples. En voici quelques-uns :

- les réseaux électriques du futur, avec des sources décentralisées d'EnR nombreuses et intermittentes, vont requérir, tant pour l'ajustement instantané que pour la cybersécurité, des logiciels et architectures nouveaux ;
- les jumeaux numériques sont un puissant moyen de faire des gains de productivité pour la conception et le montage d'objets complexes, qu'il s'agisse de plateformes éoliennes en mer ou de centrales nucléaires ;
- l'Internet des objets permet une maintenance plus efficiente, préventive et moins consommatrice d'énergie ;
- l'économie circulaire contribue à la sobriété énergétique, et requiert pour cela des places de marché qui sont numériques ;
- l'intelligence artificielle permet des économies d'énergie majeures, qu'il s'agisse des transports multimodaux verts, des bâtiments ou des villes intelligentes ;
- l'observation spatiale permet des pratiques agricoles plus sobres en intrants, eux-mêmes consommateurs d'énergie ;
- la part de numérique dans la valeur des véhicules (voitures, camions, trains électriques, navires à propulsions mixtes, avions) croît constamment et peut contribuer à la réduction de leurs émissions de GES ;
- les analyses globales sur les technologies clés menées au niveau français¹³ et les « key enabling technologies » au niveau européen¹⁴ convergent également pour les priorités : les principales évolutions sont surtout tirées par le numérique (capteurs,

Internet des objets, *Big Data*, modélisation, cobotique, intelligence artificielle, infrastructures 5G, technologies immersives...), en interaction avec des *clusters* Énergie (production et usages, avec des montants amplifiés par les enjeux climatiques) et Santé/biotechs.

Ces différents éléments justifient la multidisciplinarité des programmes de R&D tant nationaux qu'europeens, pour réduire les émissions de GES et améliorer l'efficacité énergétique. La présidence française de l'Union a insisté simultanément sur l'autonomie stratégique de l'Union, de janvier à juin 2022 sur le numérique¹⁵ et en mars sur l'énergie¹⁶. Cette dynamique se poursuit, quoique la guerre d'Ukraine conduise simultanément, via l'OTAN, à conforter l'influence américaine.

¹² https://media.lesechos.com/api/v1/images/view/63c0f4226416bd485b6734cb/contenu_article/image.jpg

¹³ <https://www.entreprises.gouv.fr/fr/technologies-cles-2020> et priorités de France 2030.

¹⁴ https://knowledge4policy.ec.europa.eu/foresight/topic/accelerating-technological-change-hyperconnectivity/key-enabling-technologies-kets_en?etans=fr

¹⁵ <https://www.economie.gouv.fr/bilan-pfue-des-avancees-remarquables-sur-le-volet-numerique>

¹⁶ <https://www.tresor.economie.gouv.fr/Evenements/9c629852-dab0-449e-9ff8-64ed5dedc55e/files/413b0b0c-fd19-42b6-8494-5d0c6cbac919>, et <https://www.economie.gouv.fr/conference-reussir-transition-acces-energie-decarbonee-finance-durable>

Comment l'Europe s'organise-t-elle pour assurer la convergence des efforts en faveur des transitions verte et numérique ?

Par Valérie DREZET-HUMEZ

Cheffe de la Représentation de la Commission européenne en France

Réussir la double transition verte et numérique constitue un défi majeur pour l'Union européenne. Dans son dernier rapport de prospective stratégique sur « le couplage des transitions verte et numérique », la Commission européenne souligne le fait que la mise en œuvre des deux transitions précitées doit être coordonnée et cohérente, afin d'identifier les opportunités, les arbitrages et les compromis à faire entre ces deux ambitions. Pour ce faire, elle recense dix domaines d'action clés pour accroître les synergies, tout en réduisant les risques potentiels qui découlent de ce couplage.

Opérer les changements nécessaires au service d'une transition durable et numérique permettra de faire émerger une nouvelle économie régénératrice et neutre pour le climat. La Commission européenne est engagée et déterminée à faire avancer l'Europe sur la voie de cette double transition, tout en conjuguant cette orientation avec ses valeurs démocratiques et de justice sociale, et ce au bénéfice de l'ensemble des citoyens et des territoires.

La double transition verte et numérique est au cœur de l'agenda politique de l'Union européenne (UE).

La lutte contre les dérèglements climatiques constitue une priorité de longue date de la Commission européenne, cristallisée dans l'Accord de Paris de 2015 et l'engagement unique de l'UE et de ses États membres à devenir le premier continent à atteindre la neutralité climatique à l'horizon 2050, dans le cadre du « Pacte vert ».

Si les transitions écologique et énergétique représentent le grand enjeu de ce début du XXI^e siècle, l'Europe doit également relever des défis importants en matière de transition numérique. La Commission souhaite faire des années 2020 « la décennie numérique » de l'Europe, en renforçant sa souveraineté, en fixant ses normes et en veillant à leur respect en la matière, en favorisant l'accès aux données, tout en assurant leur protection, et en développant les technologies, infrastructures et compétences indispensables.

Ces deux transitions ont leur nature propre, mais interagissent aussi. Leur mise en œuvre doit donc être coordonnée, comme le souligne le dernier rapport de prospective stratégique de la Commission européenne¹ sur le « couplage des transitions verte et numérique ». C'est un impératif pour assurer leur cohérence et garantir l'atteinte pleine et entière des objectifs définis dans ces deux domaines.

Avant de préciser comment l'UE prévoit de mettre en œuvre de manière cohérente ses actions dans ces deux domaines pour mieux faire face aux nouveaux défis mondiaux, il faut rappeler son action en matière de lutte contre les dérèglements climatiques et de transition numérique.

¹ Commission européenne (2022), « Communication de la Commission au Parlement européen et au Conseil : rapport de prospective stratégique », COM (2022), 289 final, juin, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/PDF/?uri=CELEX:52022DC0289&from=EN>

Le « Pacte vert » : une boussole pour atteindre la neutralité carbone en 2050

Le Pacte : un agenda de la transformation pour l'Union européenne

Dès sa prise de fonction à la tête de la Commission européenne, fin 2019, la Présidente, Ursula Von der Leyen, a présenté le « Pacte vert » pour l'Europe, une stratégie transversale qui vise la neutralité climatique d'ici 2050. Réponse au rapport alarmant du GIEC de 2018 invitant les décideurs politiques à respecter les engagements de l'Accord de Paris, cette feuille de route ambitieuse élaborée dans un contexte politique favorable (marches pour le climat, montée des partis écologistes au Parlement européen) se veut être aussi un vecteur de projection et de transformation à l'échelle de l'UE ; elle constitue désormais sa nouvelle stratégie de croissance.

Une stratégie holistique au service d'une transition « juste »

Ce programme ambitieux repose sur une transformation radicale de l'économie européenne et de nos sociétés. Cela passe par une réduction des émissions de gaz à effet de serre dans tous les secteurs d'activité (industrie, transports, bâtiments, agriculture, production d'énergie...) et par une compensation des émissions résiduelles par des puits de carbone naturels ou des technologies spécifiques, telles que la captation et le stockage du carbone.

Cette approche holistique, qui intègre l'ensemble des politiques publiques européennes et les zones de leur interaction, s'est traduite dans un changement de gouvernance avec la nomination d'un Vice-président responsable du « Pacte vert », chargé de coordonner l'ensemble des politiques ayant un impact sur le climat et l'environnement.

Cette démarche repose également sur la notion centrale de transition « juste ». Pour reprendre les propos du Vice-président Timmermans, l'atteinte de la neutralité carbone en l'espace d'une génération n'est réalisable qu'en répartissant équitablement le fardeau de l'action en faveur du climat entre les industries, les gouvernements et les individus, tout en protégeant les plus vulnérables d'entre eux.

Du « Pacte vert » au paquet « Ajustement à l'objectif 55 »

Le niveau d'ambition élevé et un horizon lointain (2050) nécessitaient de baliser le chemin jusqu'à la neutralité carbone et de suivre les avancées des actions engagées, avec des étapes intermédiaires contraignantes. Ainsi, les objectifs 2030 ont été revus à la hausse en matière de réduction des émissions de gaz à effet de serre (de - 40 à - 55 %), d'énergies renouvelables et d'efficacité énergétique. De même, l'objectif de - 55 % est devenu contraignant pour tous les États membres avec l'adoption en juin 2021 de la loi européenne sur le climat.

Pour décliner cette feuille de route, la Commission a présenté une cinquantaine de stratégies sectorielles² touchant tous les pans de la société. En juillet 2021, la Commission est passée de la stratégie aux actes, avec la présentation d'un paquet intitulé « Ajustement à l'objectif 55 » : pas moins de douze propositions législatives ont été mises sur la table dans le but de réviser la législation en vigueur et de mettre en place de nouvelles initiatives pour atteindre l'objectif de - 55 % d'ici 2030.

Ce vaste paquet législatif repose sur trois outils principaux : tout d'abord, la tarification, au travers des mécanismes de marché agissant sur les prix de la pollution (comme le renforcement du système d'échanges de quotas pour rendre le CO₂ plus cher, la fiscalité de l'énergie intégrant le coût environnemental ou le mécanisme d'ajustement carbone aux frontières). À cela s'ajoute une modification du cadre réglementaire, avec la fixation de nouvelles normes (notamment sur les performances des véhicules légers). Enfin, des objectifs contraignants sont imposés aux États membres, notamment en matière d'énergies renouvelables, d'efficacité énergétique ou de réduction de leurs émissions.

Outre ce volet législatif, la Commission a renforcé la coordination des politiques économiques autour de la transition écologique, illustrant parfaitement la nature holistique de son approche. Les objectifs de lutte contre le changement climatique font désormais partie intégrante de la stratégie européenne pour la croissance et l'emploi, et, dans le cadre du « Semestre européen », la place accordée aux « recommandations spécifiques pays » concernant les politiques « énergie/climat »³ a été accrue, se positionnant aux côtés des recommandations en matière fiscale, de compétitivité ou d'emploi.

Une fois l'horizon défini et les étapes fixées, il fallait prévoir les moyens. L'UE a ainsi décidé de consacrer 30 % de ses ressources financières (cadre financier pluriannuel 2021-2027 et plan de relance NextGenerationEU) à la lutte contre les changements climatiques, soit environ 600 milliards d'euros sur l'ensemble de la période. Dans le cadre du plan de relance européen, la part des mesures en faveur du climat est proche de 40 % (c'est-à-dire au-delà du seuil des 37 % imposé de manière réglementaire⁴), et le principe du « do no significant harm » a permis de s'assurer qu'aucune des mesures financées ne porte préjudice à l'environnement, traduisant à la fois la

² Une cinquantaine de stratégies ont été présentées entre décembre 2019 et juillet 2021, dont « De la ferme à la table » dans le domaine de l'agriculture, ainsi que d'autres portant sur l'économie circulaire, l'hydrogène, l'intégration des systèmes énergétiques, la biodiversité, les bâtiments durables...

³ COMMISSION EUROPÉENNE (2022), "Recommendation for a Council recommendation on the 2022 National Reform Programme of France", COM (2022), 612 final, mai, https://commission.europa.eu/publications/2022-european-semester-country-specific-recommendations-commission-recommendations_en

⁴ PARLEMENT EUROPÉEN et CONSEIL, Règlement (UE) 2021/241 établissant la facilité pour la reprise et la résilience, du 12 février 2021, article 16, *Journal officiel de l'Union européenne*, 18 février 2021, L 57/17, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/PDF/?uri=CELEX:32021R0241&from=EN>

nécessité de cohérence mais aussi d'efficacité globale des politiques. Enfin, l'UE mobilise également son plan « InvestEU » pour mettre des financements privés au service de la transition verte.

Des crises qui viennent accélérer la transition écologique

Alors que le législateur négociait l'ensemble de ces propositions, la crise de la Covid-19, puis la guerre d'agression de la Russie contre l'Ukraine sont venues renforcer la nécessité d'accélérer la transition écologique à l'œuvre. La réponse européenne pour juguler l'impact de la pandémie, avec le plan de relance (environ 800 milliards d'euros), s'est focalisée sur la résilience de l'économie, grâce à des investissements massifs, et des réformes, en faveur de la double transition verte et numérique. La guerre en Ukraine, quant à elle, a apporté un argument de poids supplémentaire pour accélérer la transition : celui de la sécurité énergétique du continent européen, qui passe par la fin des dépendances énergétiques, notamment par une sortie rapide des énergies fossiles.

Une transition numérique qui doit être couplée avec la transition écologique

De la « boussole numérique » à la « décennie numérique » pour l'Europe

Alors que l'UE se positionne en promoteur de la transition écologique, la transition numérique est également en marche. À ce niveau, il s'agit de donner aux entreprises et aux citoyens les moyens d'en saisir les opportunités, dans le respect des valeurs démocratiques européennes. L'Europe doit prendre toute sa place dans cette course mondiale, où la maîtrise des technologies est centrale afin de garantir notre indépendance, notre capacité d'innovation et notre compétitivité, tout en servant la transition verte.

Le 9 mars 2021, la Commission européenne a présenté sa « boussole numérique », sa vision et des pistes concrètes pour la transformation numérique de l'Europe d'ici à 2030. Cela passe par les compétences, les infrastructures, les entreprises et les services publics. Cette « boussole » a donné le coup d'envoi de la « décennie numérique européenne », qui fixe quelques objectifs chiffrés :

- la connectivité gigabit de tous les foyers européens et la couverture de l'ensemble des zones d'activité par la 5G ;
- la production dans l'UE de 20 % de la valeur mondiale des microprocesseurs ;
- le doublement du nombre des licornes européennes (122 en 2021) ;
- le niveau élémentaire d'intensité numérique doit être atteint par plus de 90 % des PME ;

- l'utilisation par trois entreprises sur quatre de services tels que le *cloud*, le *Big Data* et l'intelligence artificielle ;
- l'accélération du développement des solutions d'identité numérique régaliennne nationale et la création d'une identité numérique européenne pour assurer la numérisation de la totalité des services publics clés et des dossiers médicaux électroniques accessibles en ligne.

La transition numérique : quels liens avec la transition verte ?

Les technologies numériques peuvent jouer un rôle déterminant dans l'atteinte des objectifs de durabilité. Par exemple, l'Internet des objets connectés combiné à l'intelligence artificielle peut servir à optimiser l'itinéraire à suivre pour la livraison d'un colis, en tenant compte d'une variété de contraintes, telles que le temps de trajet, le trafic routier ainsi que des arrêts intermédiaires obligatoires. De même que la récolte massive de données peut permettre d'optimiser les stocks pour éviter les surplus, et donc le gaspillage. Le renforcement mutuel des politiques se combine ici dans une convergence entre économie et environnement, les entreprises optimisant leurs coûts, tout en limitant leur impact environnemental.

Des tensions peuvent aussi exister entre ces deux transitions. Tout d'abord, en raison de l'impact environnemental du numérique : le nombre croissant de données échangées et les matières premières utilisées pour la fabrication des matériels informatiques peuvent avoir un impact négatif sur l'environnement, générant une consommation d'énergie élevée au regard des efforts à réaliser en matière d'efficacité énergétique.

Il existe en outre un écueil à éviter, celui du coût social sur les plus vulnérables. Tout comme la transition écologique présente des risques en matière de justice sociale, la transition numérique pourrait également accentuer un sentiment d'exclusion chez les personnes qui maîtrisent peu ou mal les technologies numériques. C'est pourquoi la notion de « transition juste » est au cœur des préoccupations de la Commission européenne dans ces deux domaines. Une part significative de ses financements est affectée à la numérisation des PME, à la couverture des zones blanches ainsi qu'au renforcement des compétences numériques. Sur le plan de la transition verte, et dans le but d'assurer une répartition équitable des efforts requis, la Commission a mis en place un « fonds social pour le climat », ainsi qu'un « fonds pour la transition juste » qui vise les territoires les plus touchés par la sortie des énergies fossiles.

Comment réussir le couplage : assurer la cohérence et développer les synergies

Dans son rapport de prospective stratégique 2022, la Commission européenne recense dix domaines d'action clés dans lesquels une réponse stratégique est nécessaire pour réaliser le maximum de synergies et

Exemples d'apports du numérique à la transition verte	
Énergie	Amélioration de la prévision de la production et de la demande d'énergie, grâce aux nouveaux capteurs, aux données satellitaires et à la <i>blockchain</i> , en anticipant notamment les conditions météorologiques.
Transports	Nouvelle génération de batteries et nouvelles technologies numériques (IA et Internet des objets) qui rendront possible la mobilité multimodale.
Industrie	Les jumeaux numériques amélioreront la conception, la production et la maintenance des produits industriels, en réduisant leur impact environnemental.
Bâtiments	La modélisation des informations sur les bâtiments améliorera leur efficacité énergétique et leur consommation de ressources.
Agriculture	L'information quantique, combinée à la bio-informatique, améliorera la compréhension des processus biologiques et chimiques et contribuera ainsi à réduire l'utilisation des pesticides et des engrais.

de cohérence, tout en réduisant les risques potentiels qui découlent du couplage :

- renforcer la résilience et l'autonomie stratégique ouverte dans les secteurs essentiels à la double transition ;
- renforcer la diplomatie verte et numérique, en tirant parti du pouvoir réglementaire et de normalisation de l'UE, tout en promouvant les valeurs de cette dernière ;
- gérer de manière stratégique et systémique l'approvisionnement en matériaux critiques et produits de base, afin d'éviter de tomber à nouveau dans le piège de la dépendance ;
- renforcer la cohésion économique et sociale, en consolidant la protection sociale et l'État-providence, les stratégies de développement régional et les investissements ;
- adapter les systèmes d'éducation et de formation à une réalité technologique et socio-économique en mutation rapide, et soutenir la mobilité des travailleurs ;
- mobiliser des investissements supplémentaires à l'épreuve du temps dans les nouvelles technologies et infrastructures, et dans les synergies entre capital humain et technologies, en mettant en commun des ressources européennes, nationales et privées ;
- élaborer des cadres de suivi pour mesurer le bien-être au-delà du seul critère PIB et évaluer les effets favorables de la transition numérique, notamment au regard de son empreinte carbone, énergétique et environnementale globale ;
- garantir un cadre réglementaire à l'épreuve du temps pour le Marché unique, qui soit propice à des modèles d'entreprise et de consommation durables (par exemple, boîte à outils européenne en matière

d'aides d'État, ou intelligence artificielle pour soutenir l'élaboration de politiques) ;

- renforcer une approche globale de la normalisation axée sur le principe des 4 R (réduction, réparation, réutilisation et recyclage) ;
- promouvoir un cadre solide en matière de cybersécurité et de partage sécurisé des données afin de garantir que les entités stratégiques puissent prévenir les perturbations, y résister et s'en remettre et, en fin de compte, d'instaurer la confiance dans les technologies liées à la double transition.

Conclusion

Le couplage réussi entre les transitions verte et numérique constitue bel et bien un enjeu central pour l'Union européenne au titre des prochaines décennies. Ce n'est qu'à ce prix que nous pourrions faire émerger une économie nouvelle, régénératrice et neutre pour le climat. La Commission européenne est pleinement engagée et déterminée à faire avancer l'Europe sur cette voie, tout en veillant à conjuguer cette double transition avec un impératif de justice sociale et territoriale, au bénéfice de l'ensemble des citoyens, des communautés et des territoires.

Énergie et numérique : se préparer à un autre combat

Par Jean-Pierre HAUET

Président du Comité scientifique d'Équilibre des énergies

Le numérique est, aujourd'hui, souvent montré du doigt en tant que consommateur effréné d'énergie électrique. Pourtant, des progrès considérables ont été accomplis, mais l'extension des services offerts, l'effet rebond et les excès de quelques applications gloutonnes font que les consommations continueront probablement d'augmenter à l'avenir.

Il est de l'intérêt général de contenir ces consommations, tout en les décarbonant. Mais il faut aussi s'intéresser à leur cause première, c'est-à-dire à l'efficacité même de l'électronique comme moyen de traiter des bits d'informations. On s'aperçoit alors que l'électronique est un processus particulièrement inefficace sur le plan de la thermodynamique, mais qu'il existe aussi des voies de progrès en la matière qui pourraient constituer une véritable révolution, comme l'a été l'arrivée des LED dans le domaine de l'éclairage.

C'est le défi posé à la spintronique qui se propose de piloter les électrons non seulement par leur charge électrique, mais aussi par leur spin. C'est un domaine dans lequel la France dispose de bons atouts, qu'il faut préserver et dont il faut tirer parti.

Une croissance de la consommation électrique qui ne semble pas vouloir s'arrêter

Le transistor, réalisé pour la première fois aux Bell Labs en décembre 1947 par John Bardeen et William Shockley (prix Nobel de physique 1956), est certainement l'invention la plus marquante du XX^e siècle. Ce composant a marqué le début de l'électronique moderne et on le retrouve encore aujourd'hui dans la quasi-totalité des appareils domestiques et professionnels. C'est lui aussi qui, logé par millions au sein des microprocesseurs inventés par Intel en 1971, a permis le développement de l'informatique telle que nous la connaissons aujourd'hui.

Même si la fameuse loi de Moore tend aujourd'hui à s'infléchir, les progrès n'ont eu de cesse, puisque la densité des transistors présents dans les microprocesseurs a régulièrement doublé pendant des années, au point qu'aujourd'hui 100 milliards de transistors peuvent être logés dans un microprocesseur avec des finesses de gravure de 5 nanomètres, voire 3, selon des technologies que seuls les géants asiatiques (Samsung et TSMC) maîtrisent aujourd'hui.

Ces progrès fantastiques réalisés en termes de miniaturisation, de capacité, de rapidité et de coût ont permis le développement à très grande échelle des industries de l'information et de la communication, sous toutes

leurs formes : appareils domestiques et professionnels, grands calculateurs et centres de données, Internet et réseaux associés, sans oublier l'apparition récente des centres de « minage » des cryptomonnaies, en commençant par le Bitcoin.

Cette expansion des usages du numérique, qui ne semble pas aujourd'hui vouloir se calmer, s'est bien évidemment accompagnée d'une croissance des consommations des énergies – essentiellement l'électricité – nécessaires au fonctionnement des appareils et des infrastructures. Le progrès technique a, pendant de longues années, masqué cette évolution, et ce n'est que relativement récemment que les questions du réchauffement climatique, d'épuisement des ressources naturelles et, plus généralement, d'impact environnemental ont porté la question énergétique sur le devant de la scène. Il faut dire que les consommations élevées des grands centres de données et des immenses fermes de minage du Bitcoin ont à juste titre interpellé les opinions publiques et les responsables politiques sur les problématiques induites.

Il est difficile de savoir avec précision ce que consomment aujourd'hui les industries du numérique, car ces consommations ne correspondent pas aux rubriques que l'on retrouve habituellement dans les bilans énergétiques des États. Une note publiée en septembre 2022 par le Parliamentary Office of Science and Technology de Grande-Bretagne, combinée avec les données de l'Agence internationale de l'énergie (AIE) mises à jour

en 2022, permet cependant d'en faire une estimation récapitulée dans le tableau suivant.

Secteur	Consommation	% par rapport à la consommation d'électricité mondiale (2021)
Data centers	220 - 320 TWh (2021)	0,9 % - 1,3 %
Crypto mining	100 - 140 TWh (2021)	0,4 % - 0,6 %
Réseaux	260 - 340 TWh (2021)	1,0 % - 1,3 %
Utilisateurs finaux	335 - 535 TWh (2020)	1,3 % - 2,1 %
Total ICT	915 - 1 335 TWh	3,6 % - 5,3 %

Estimation des consommations d'électricité du secteur des industries de l'information et de la communication au titre de l'année 2021 – Sources : UK Parliament POST, Energy Consumption of ICT, POSTNOTE 677, September 2022 ; et Agence internationale de l'énergie, *Data Centres and Data Transmission Networks*, September 2022.

Ces consommations restent orientées à la hausse, car la courbe de l'utilisation du numérique est très loin d'avoir atteint son asymptote et les progrès réalisés sur les consommations unitaires ne compensent pas l'accroissement des consommations induites par le développement des communications et des usages de l'informatique sous des formes de plus en plus variées.

Il faudrait en outre tenir compte de l'énergie grise embarquée par les équipements de stockage et de traitement, les équipements des réseaux et les appareils exploités par les utilisateurs finaux. Cette énergie grise, qui doit être évaluée en termes de cycle de vie, est encore plus mal connue que l'énergie consommée en exploitation. Certains l'évaluent à environ 30 % des consommations finales.

À court et moyen terme : sobriété, efficacité, optimisation

Pour contenir cette évolution et faire en sorte que les consommations énergétiques du numérique ne prennent pas des proportions excessives au point de

remettre en cause les fondements mêmes de la révolution qu'il représente, plusieurs actions se développent en parallèle.

Ce sont tout d'abord les incitations à faire preuve de « sobriété » : non seulement chez les particuliers, en les invitant à éviter de maintenir sous tension des équipements qui n'ont pas de raison de l'être, mais aussi chez les professionnels, en leur demandant de s'abstenir de générer du trafic inutile et de faire preuve d'« hygiène énergétique » : audits et suivi des températures et des consommations, déconnexion des serveurs inutilisés, etc.

Ce sont ensuite la gestion de toutes les consommations auxiliaires nécessaires au traitement des données, en particulier la réduction, dans les centres de données, des consommations liées au refroidissement des serveurs et des *switches* : utilisation de l'air ambiant et bonne organisation des circulations d'air ou, dans le cas d'un refroidissement par l'eau, utilisation de ressources locales et récupération des calories rejetées pour chauffer des logements ou des bureaux.

Un indicateur usuellement utilisé est le PUE (ou Power Usage Effectiveness), qui rapporte l'énergie totale consommée à celle consommée uniquement par les équipements de traitement de l'information. Un PUE de 1,2 signifie que le centre de données affiche un taux de pertes de 20 %. Les PUE de la plupart des centres de données ont décliné fortement au cours des dernières années. Google annonce des PUE moyens de l'ordre de 1,10 (voir la Figure 1 ci-dessous), ce qui semble correspondre à une asymptote.

Un autre levier important est celui de l'optimisation. Celle-ci doit être envisagée à plusieurs niveaux.

Tout d'abord, au niveau des protocoles de transfert et de traitement des données. Certains conduisent à collecter et à véhiculer des masses considérables de données qui, pour la plupart, sont inutiles, d'autres offrent un rapport médiocre entre la charge utile des datagrammes et la longueur totale des messages incluant les *overheads* des préambules et postam-

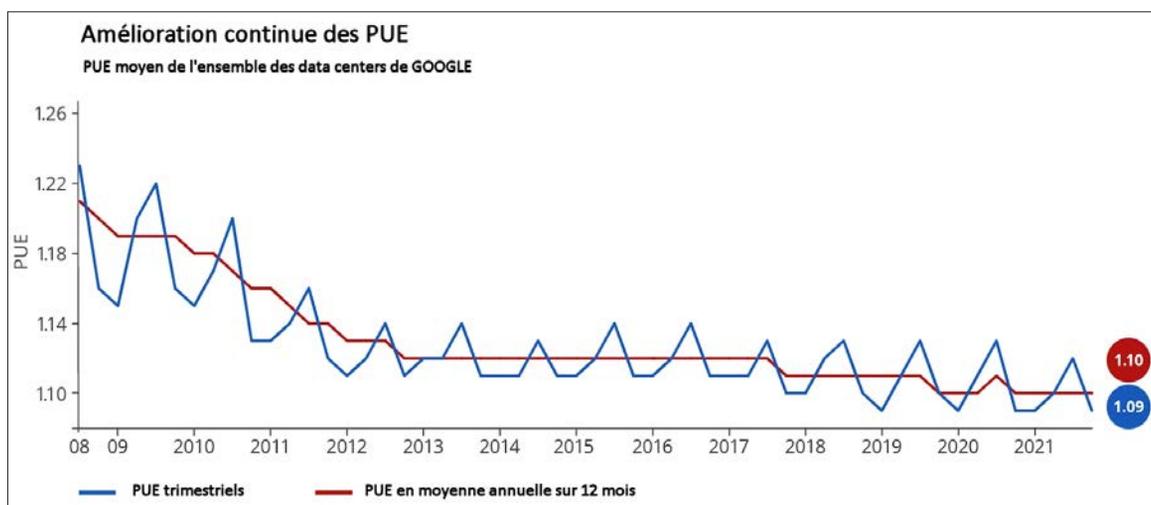


Figure 1 : Évolution du PUE moyen des centres de données de Google – Source : Google.

bules. Ainsi, le protocole pub/sub MQTT¹ peut s'avérer 1 000 fois plus efficace que des protocoles client-serveur de *polling* collectant inutilement, à cadence rapide, des données, dont très peu ont varié.

L'optimisation doit porter également sur les architectures de systèmes : faut-il envoyer des données dans un *cloud* public, *via* Internet, alors qu'un stockage ou un traitement local, en *edge computing*, serait plus approprié ? Faut-il laisser éveillés en permanence des équipements qui n'ont rien à transmettre, alors qu'il est possible d'utiliser des processus de réveil périodique ou aperiodique ?

Une autre voie d'optimisation, et non des moindres, est celle des architectures physiques des microprocesseurs. L'accroissement considérable de la finesse de gravure, qui est passée en cinquante ans de 10 μm à 3 nm, et la miniaturisation qui s'ensuit ont eu un effet drastique sur la réduction des consommations.

Toutes ces actions permettent de réduire fortement les consommations unitaires. Ainsi est-il affirmé que la 5G est, par unité de trafic, dix fois plus efficace que les réseaux de radiocommunications actuellement en service². Cependant, il est clair que l'accroissement du nombre des abonnés, lié notamment à l'avènement de l'Internet des objets, la diversification des services et l'amélioration des performances nécessiteront plus de stations de base, plus de traitements, plus de centres de données, plus d'antennes et, *in fine*, plus d'énergie.

Face à la nécessité de contenir les consommations et les émissions liées au numérique, l'exemple des

centres de données et du plafonnement du PUE amène à s'interroger non plus seulement sur la façon d'utiliser efficacement l'électronique dans les traitements numériques, mais aussi sur le procédé lui-même, c'est-à-dire sur le futur de l'électronique.

L'électronique : un procédé extraordinairement inefficace

L'électronique actuelle, née du transistor, a quelque chose en commun avec la lampe à incandescence : ce sont deux inventions fondamentales qui ont révolutionné la vie quotidienne. La lampe à incandescence, inventée par Thomas Edison en 1879 et ayant été la vedette de l'Exposition internationale de l'électricité de Paris en 1881, a tellement apporté de progrès à l'humanité que l'on a cru, pendant des décennies, qu'elle serait éternelle. On en oubliait le rendement lumineux très médiocre (de l'ordre de 1,5 %) pour ne voir que les services qu'elle nous rendait. Pendant plus d'un siècle, on a vécu avec elle, jusqu'à ce qu'arrivent, après quelques errements du côté des lampes fluorescentes, les diodes électroluminescentes, dont le rendement lumineux se trouve multiplié par un facteur 10.

Ce résultat ne s'est pas fait en un jour et la saga de l'éclairage, résumée par la Figure 2 ci-dessous, a comporté beaucoup d'étapes, aucune n'étant vraiment décisive, jusqu'à ce que les LED s'imposent sur le marché.

L'électronique a de son côté remarquablement progressé. Il suffit pour s'en convaincre de comparer les

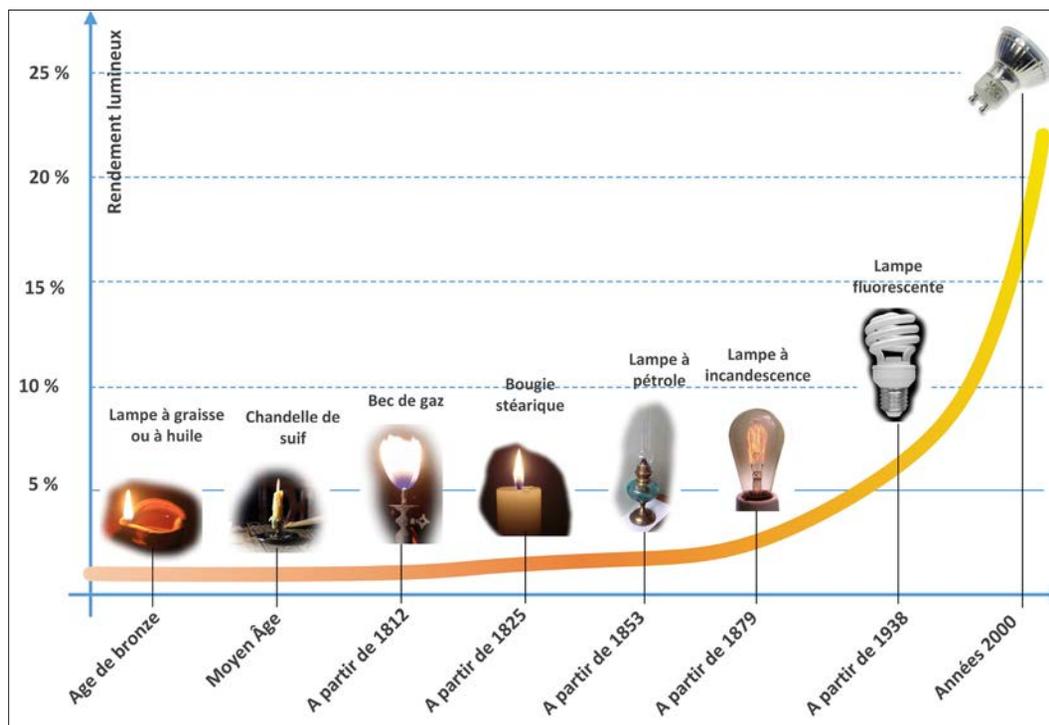


Figure 2 : La saga de l'éclairage –
Source : auteur du présent article.

¹ MQTT : Message Queuing Telemetry Transport.

² Voir le communiqué de Nokia en date du 2 décembre 2020, <https://www.nokia.com/about-us/news/releases/2020/12/02/nokia-confirms-5g-as-90-percent-more-energy-efficient/>

tubes à vide des années 1950 aux microprocesseurs d'aujourd'hui, ou bien encore les mémoires à tores de ferrite qui équipaient les fameux IBM 360 des années 1970 avec les mémoires flash qui équipent nos ordinateurs actuels et dont le coût est 15 millions de fois moins élevé.

Cependant, l'électronique actuelle reste sur le plan thermodynamique, c'est-à-dire de l'efficacité énergétique, extraordinairement inefficace. Les traitements numériques reposent sur une succession de basculements de bits entre le 0 et le 1, et vice-versa. Or, il a été démontré, théoriquement et expérimentalement, que l'écrasement d'un bit était une source d'entropie et dégageait une chaleur minimale que l'on appelle la limite de Landauer³.

Celle limite s'écrit : $kT \ln 2$, où :

- k est la constante de Boltzmann (approximativement $1,38 \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$);
- T est la température du système physique considéré, en kelvins ;
- $\ln 2$ est le logarithme népérien de 2 (approximativement 0,693).

Théoriquement, la mémoire d'un ordinateur à température ambiante fonctionnant à la limite de Landauer (soit $2,75 \times 10^{-21} \text{ J}$ par bit à 20°C) pourrait être modifiée à la vitesse d'un milliard de bits par seconde, avec seulement 2,85 trillièmes de watt de puissance se dégageant dans le module de mémoire. Les ordinateurs modernes utilisent des millions de fois plus d'énergie⁴ !

AlphaGo: 150 kW

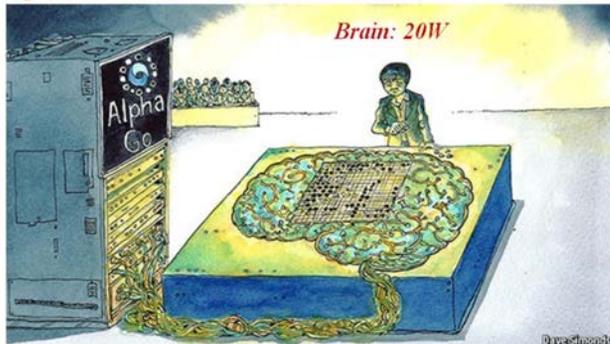


Figure 3 : "The brain is the winner" – Source : ©Dave Simonds.

Pour se convaincre de l'inefficacité thermodynamique de l'électronique actuelle, il suffit de comparer le cerveau humain au plus grand des calculateurs (voir la Figure 3 ci-dessus). Le cerveau humain brûle environ

4,2 g de glucose par heure⁵, ce qui équivaut à une puissance de 38 W. Le plus grand ordinateur au monde, actuellement le Frontier en service aux États-Unis, consomme une puissance électrique de 21 MW pour une puissance de calcul de 1,102 exaflop/s⁶.

Un calcul en ordre de grandeur permet de conclure, qu'à puissance électrique égale, le cerveau humain est près de 10 000 fois plus efficace que les plus grands calculateurs actuels. L'électronique se situe donc aujourd'hui tout au bas de la courbe d'une évolution comparable à celle qu'a connue l'éclairage et qui permettra sans doute, d'ici quelques dizaines d'années, de regarder les grands centres de données, ces dévoreurs d'énergie que l'on construit actuellement, comme on contemple aujourd'hui les lampes à huile.

Que sera l'électronique du futur ?

Quand on parle d'électronique du futur, on pense à l'ordinateur quantique qui fait aujourd'hui beaucoup parler de lui. Les technologies quantiques ont déjà des applications, notamment dans le chiffrement des données, la distribution de l'heure, la microscopie et les capteurs. L'ordinateur quantique n'est pas à un stade aussi avancé.

On connaît un petit nombre d'algorithmes, comme l'algorithme de Shor, qui permettront de résoudre, grâce à des calculateurs quantiques, des problèmes difficiles, tels que la factorisation des entiers naturels. Beaucoup de systèmes classiques de chiffrement, tel le RSA, deviendront alors vulnérables. Le monde s'y prépare. Mais il n'est pas sûr que les calculateurs quantiques puissent connaître une application générale.

Par ailleurs, la réalisation physique des calculateurs quantiques nécessite que l'on puisse construire des machines permettant de gérer des milliers de qubits, portés par des particules ou des photons intriqués, dont la cohérence des états quantiques devra pouvoir être maintenue pendant un laps de temps suffisant pour exécuter les algorithmes. Cette préservation de la cohérence nécessite de travailler à l'abri de toute perturbation par le milieu environnant et donc à des températures très proches du zéro absolu. Il y a donc peu de chances, en l'état actuel de nos connaissances, de pouvoir nous doter, sauf pour des applications spécifiques, de calculateurs plus efficaces énergétiquement que ceux que nous connaissons aujourd'hui.

L'optique continuera à jouer un rôle croissant pour assurer les liaisons, peut-être aussi pour la commutation et le stockage. Mais l'architecture d'un ordinateur photonique reste à imaginer.

L'ordinateur biologique est une autre voie que certains investiguent, mais qui semble encore bien lointaine.

Aujourd'hui, il nous semble qu'en raison de son niveau d'avancement et de la continuité industrielle qu'elle peut

³ Rolf Landauer était un chercheur d'IBM qui a énoncé, pour la première fois en 1961, le principe qui porte aujourd'hui son nom. Ce principe, qui conforte le lien entre la théorie de l'information et la thermodynamique, a été pour la première fois vérifié expérimentalement en 2012 par des chercheurs du Laboratoire de physique de l'École normale supérieure de Lyon, en collaboration avec un groupe allemand de l'Université d'Augsbourg.

⁴ Source : l'article de Wikipédia consacré au principe de Landauer, https://fr.wikipedia.org/wiki/Principe_de_Landauer

⁵ Source : Julie Grollier, directrice de recherche à l'Unité mixte de physique CNRS/Thales.

⁶ 1 exaflop/s = 10^{18} opérations en virgule flottante par seconde.

offrir par rapport à l'électronique actuelle, que la spintronique – ou électronique du spin – est la technique qui offre les meilleures perspectives de développement pour les décennies à venir.

La spintronique tient la corde

L'électronique d'aujourd'hui manipule, comme son nom l'indique, des électrons. Mais elle le fait en n'utilisant qu'une seule de leurs propriétés intrinsèques : la charge électrique. Or, les électrons en possèdent une autre qui est leur moment magnétique, autrement appelé « spin ». Le spin, qui peut être représenté de façon imagée comme un petit aimant, est une grandeur quantique qui, dans le cas des électrons, peut prendre deux valeurs : $+\frac{1}{2}$ (*up*) ou $-\frac{1}{2}$ (*down*) (voir la Figure 4 ci-contre).

Dans un courant électrique ordinaire, les spins se répartissent de façon égale entre le *up* et le *down*. Mais lorsque ce courant d'électrons traverse un champ magnétique, par exemple au travers d'un conducteur magnétique (fer, cobalt, nickel), dont les atomes constitutifs possèdent eux-mêmes une valeur de spin (du fait de la répartition des électrons dans les différents niveaux

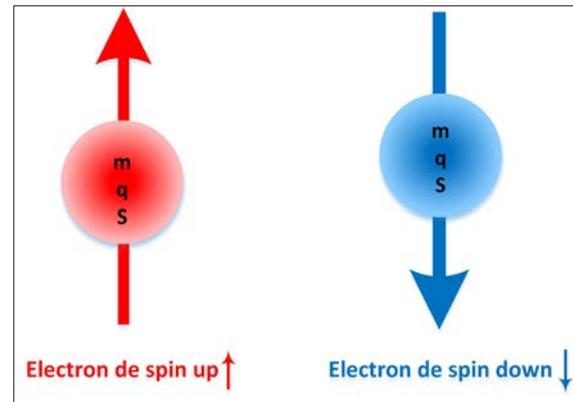


Figure 4 : Le spin des électrons.

d'énergie), les électrons dont le spin correspond à l'aimantation régnant dans le conducteur se propagent mieux que les électrons de spin opposé. Le courant est en quelque sorte polarisé par le champ magnétique. Cet effet augmente la résistance électrique du matériau. Cet effet, que l'on appelle **magnétorésistance**, a été découvert dès 1857 par William Thomson. Mais c'est un effet de faible intensité, et ce n'est que récemment (en 1988) que, grâce aux travaux du Français,

Les principes de la magnétorésistance géante (GMR)

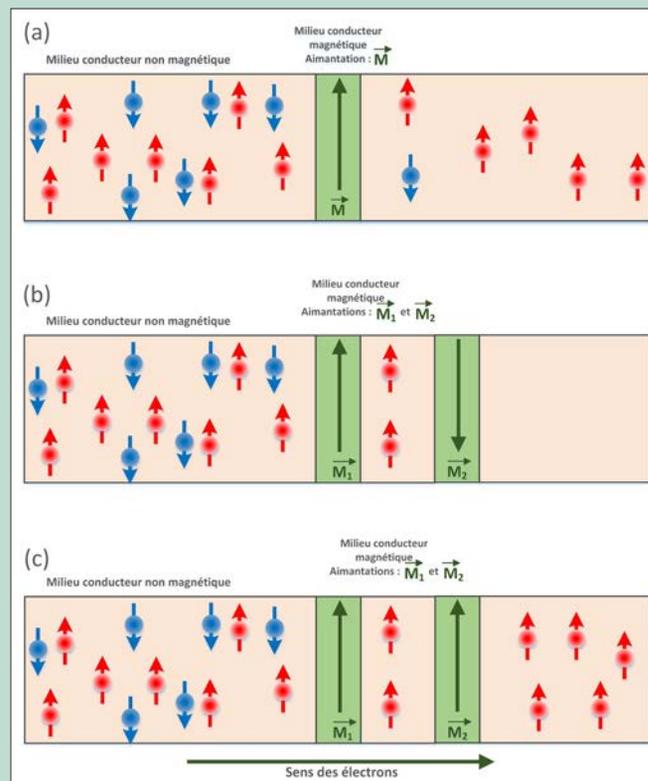
L'idée générale est d'empiler des couches suffisamment minces pour que la polarisation en spin des électrons qui les auront traversées soit conservée, en alternant matériaux conducteurs non magnétiques et matériaux conducteurs magnétiques.

Lorsqu'un électron de spin donné traverse une couche magnétique dont l'aimantation, notée M_1 , va dans la même direction que son spin, il a dès lors de fortes chances de la traverser (voir la Figure 5-a ci-contre).

Si l'on installe une deuxième couche d'aimantation (M_2), cette deuxième couche laissera passer ou ne laissera pas passer les électrons qui auront déjà traversé la première couche, selon que l'aimantation M_2 sera parallèle ou antiparallèle à M_1 (voir les Figures 5-b et 5-c ci-contre).

On a ainsi réalisé un filtre à électrons en fonction de leur spin ; il est alors facile de montrer que la résistance électrique équivalente du système varie fortement selon que M_1 et M_2 sont parallèles ou non.

Figure 5 : Les principes de la magnétorésistance géante –
Source : Hélène Fischer,
Université de Lorraine.



Albert Fert, et de l'Allemand, Peter Grünberg (tous deux prix Nobel de physique en 2007), a été découverte la **magnétorésistance géante (GMR)**, c'est-à-dire la possibilité, par un effet quantique observé dans des structures de films minces composées d'une alternance de couches magnétiques et de couches non magnétiques, de baisser de façon très importante la résistance observée sous l'application d'un champ magnétique externe (voir l'Encadré de la page précédente).

Ce résultat est amplifié lorsque l'on associe la GMR à la **magnétorésistance tunnel (TMR)**, qui a été découverte en 1975 par le Français, Michel Jullière, et dans laquelle la résistance électrique opposée au passage par effet tunnel du courant d'un matériau à l'autre au travers de la couche isolante varie en fonction de l'orientation relative de l'aimantation des deux couches de matériaux. La TMR a conduit au développement des jonctions magnétiques à effet tunnel (voir la Figure 6 ci-dessous), qui sont à la base d'applications industrielles importantes rendues possibles par le développement des techniques de dépôt en couches minces, telles que la fabrication de capteurs de champs magnétiques ultra-sensibles, destinés en particulier aux têtes de lecture des disques durs d'ordinateur, et les mémoires magnétiques à accès direct (MRAM) qui combinent les avantages des SRAM (la vitesse) et des FLASH (non-volatilité) et affichent une endurance quasi infinie.

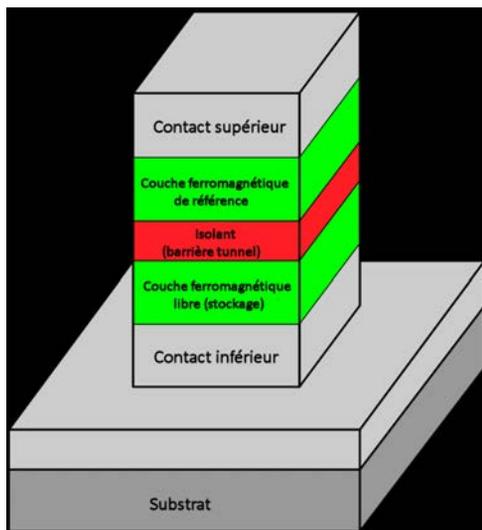


Figure 6 : Schéma d'une jonction tunnel MTJ. Les magnétisations de chacune des couches ferromagnétiques peuvent être orientées par des champs magnétiques externes (créés, par exemple, par des lignes conductrices situées au-dessus et en dessous de la cellule MTJ). Selon que les directions sont parallèles ou anti-parallèles, la cellule laisse ou ne laisse pas passer le courant, ce qui permet de lire ou d'écrire l'information stockée dans la couche libre – Source : d'après Wikipédia.

Ces mémoires magnétiques demeurent un important sujet de recherche, notamment pour l'amélioration des techniques d'écriture de façon à réduire le courant d'écriture ainsi que les dimensions de la cellule.

Une technologie, dite STT-MRAM, utilise un deuxième effet essentiel pour la spintronique, qui est le **transfert de spin (STT : Spin Transfer Torque)**. Il s'agit cette

fois d'un effet de surface permettant à la couche ferromagnétique libre d'être aimantée par interaction tunnel avec un courant de spin circulant dans une couche inférieure. Ce courant de spin est lui-même créé en utilisant l'**effet Hall de spin quantique**, qui renvoie vers la périphérie du conducteur les électrons d'un spin donné sous l'influence d'un champ magnétique parallèle au feuillet (voir la Figure 7 ci-dessous). Les premières mémoires STT-RAM sont apparues en 2013⁷.

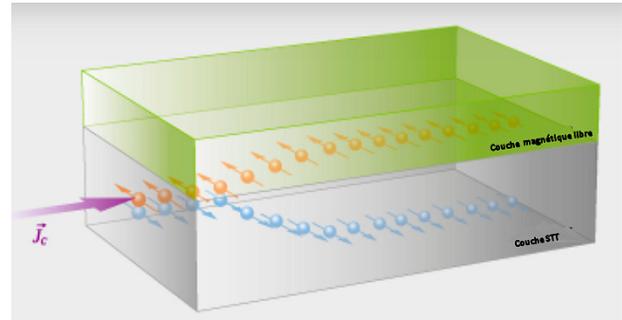


Figure 7 : Schématisation de l'effet Hall de spin.

Un mode d'écriture encore plus performant utilise l'**interaction spin-orbite** (couplage du champ magnétique interne lié au mouvement orbital de l'électron avec son spin) et l'effet Rashba. Il a donné naissance à la technologie SOT-MRAM, qui s'avère être encore plus performante en termes de densité et de consommation d'énergie que la technologie STT-RAM.

Toutes ces technologies illustrent la possibilité de manipuler des courants avec des aimants de taille nanométrique et, inversement, de contrôler des aimantations par des courants.

La spintronique ouvre d'autres perspectives. Au lieu de stocker l'information dans les nano-aimants des jonctions MTJ, il semble possible de la stocker dans des tourbillons de spin que l'on appelle des skyrmions (voir la Figure 8 ci-dessous) et que l'on ferait défiler, sans faire appel à des auxiliaires mécaniques, sous des têtes de lecture spintroniques.

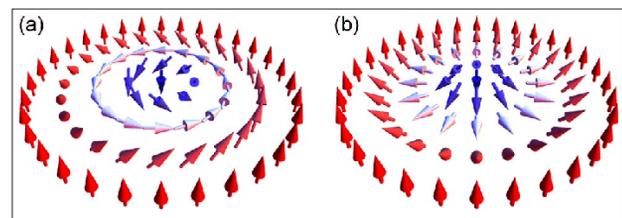


Figure 8 : Schémas de skyrmions de type Bloch (a) et de Néel (b) – Source : Skyrmion-Electronics: An Overview and Outlook. WANG Gang *et al.*, IEEE, octobre, 2016.

Par ailleurs, et c'est peut-être là le point essentiel, on a vu que le concept de MTJ associé à la fois capacité mémoire et traitement de l'information. Ce serait là le moyen de s'affranchir du modèle d'architecture de Von

⁷ Société Everspin Technologies, <https://www.everspin.com/>

Neumann élaboré en 1945 et qui reste à la base des calculateurs actuels, et dans lequel mémoire et processeur sont des entités distinctes nécessitant des allers et retours incessants générateurs de dissipation d'énergie et d'augmentation des temps de calcul (voir la Figure 9 ci-dessous).

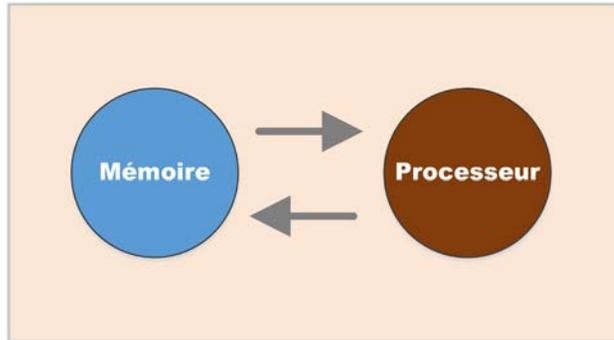


Figure 9 : Principes simplifiés de l'architecture de Van Neumann.

Les applications potentielles de la spintronique vont dès lors bien au-delà de la seule question des mémoires.

Le laboratoire dirigé par Sophie Grollier, directrice de l'Unité mixte de physique CNRS/Thales de Palaiseau, a démontré la possibilité de construire des nano-oscillateurs de spin (STNO) permettant d'émuler, par multiplexage temporel de leurs radio-émissions, les réseaux de neurones tels qu'on les utilise aujourd'hui en matière d'intelligence artificielle. Le gain en efficacité serait de l'ordre de 100 et ces réseaux neuro-morphiques, utilisant l'approche dite *reservoir computing*, seraient un moyen de se rapprocher de l'architecture du cerveau, dont on a vu qu'elle était beaucoup plus efficace que celle de nos plus grands calculateurs et dans laquelle quelques 10^{11} neurones sont associés à 10^{15} synapses qui sont étroitement imbriqués ; les neurones étant responsables des traitements, tandis que les synapses supportent la mémoire.

En conclusion

Les consommations d'énergie liées aux industries de l'information et de la communication continuent de croître, en dépit des progrès considérables réalisés au cours des dernières années afin d'améliorer l'efficacité énergétique des traitements. Il est possible qu'en 2030, le numérique représente près de 10 % de la consommation totale d'électricité dans le monde. Bien entendu, le numérique est porteur de progrès social et ses applications permettent de contenir les consommations d'électricité qui sont nécessaires dans les secteurs du bâtiment, de l'industrie et des transports.

Cependant, dans le contexte tendu que nous connaissons aujourd'hui et qui est probablement appelé à durer, il est de l'intérêt de tous de poursuivre les efforts faits pour mieux utiliser l'énergie, en limiter les consommations et la réutiliser chaque fois que cela est possible, mais surtout de donner une absolue priorité aux énergies décarbonées.

Néanmoins, et parce que les besoins continueront à croître dans tous les domaines et parce que d'immenses champs d'application restent à défricher, les efforts à réaliser à court et moyen terme ne doivent pas nous détourner de la nécessité de nous doter d'une vision de long terme. Dans le cas du numérique, il faut s'interroger sur l'efficacité du procédé de base auquel il fait appel, celui de l'électronique classique. Nous avons montré dans cet article que l'électronique, qui apporte tant de services et de satisfactions, reste néanmoins un processus thermodynamiquement inefficace. Le parallèle fait avec le cerveau humain montre qu'il existe des voies de progrès, et l'électronique de spin – ou spintronique – en est une.

La France est bien placée dans ce domaine avec les travaux menés au CEA, au CNRS et dans différentes universités (Grenoble, Paris Cité, Paris Saclay, Lorraine...), mais aussi chez Thales et dans d'autres entreprises (Crocus Technology). À horizon 2050, le défi est celui-ci : quelle solution viendra à cet horizon remplacer notre électronique, comme les LED ont remplacé les lampes à incandescence ?

Les technologies du numérique font à la fois partie du problème et de la solution en matière environnementale

Par Patrice GEOFFRON

LEDa, Université Paris-Dauphine, Université PSL, IRD, CNRS

Le débat relatif à l'impact environnemental du numérique présente un degré de complexité qui ne peut être approché à la seule observation de la progression de son poids dans les émissions de CO₂ ou les consommations électriques. Des travaux récents permettent de mieux appréhender ses effets induits, en établissant notamment dans quel sens les usages du numérique influencent la trajectoire des émissions des États ou agissent sur des cobénéfices de l'action climatique (comme la qualité de l'air). En outre, ces analyses devront être resituées dans le prolongement de la crise sanitaire (et du développement des activités socio-économiques « à distance »), ainsi que dans celui de la crise énergétique (qui implique une optimisation de systèmes gagnant en complexité du fait d'un développement accéléré des renouvelables, des efforts d'efficacité...). Ces travaux débouchent sur un constat contrasté de l'impact environnemental du numérique (qui, toutefois, n'invalide pas l'impératif de l'effort de sobriété).

La « versatilité » des technologies de l'information et de la communication

Le débat sur l'empreinte environnementale des technologies de l'information et de la communication (TIC) s'est intensifié ces dernières années : l'Accord de Paris ayant établi comme nouvelle cible la limitation de l'augmentation de la température à + 1,5°C, l'horizon de la neutralité carbone s'est rapproché à 2050, impliquant de surveiller les secteurs les plus émissifs. Dans ce contexte, dès lors que l'empreinte carbone des activités numériques croît (et est usuellement comparée à celle du transport aérien), il est logique et souhaitable qu'elle constitue un sujet à qui il faut accorder une très grande attention.

Mais le débat sur les effets environnementaux du numérique présente un ordre de complexité élevé et ne peut être circonscrit à la mesure de l'empreinte carbone (ou d'autres paramètres connexes relatifs à l'extraction de matières premières, à la consommation d'eau...), sans prendre également en compte la manière dont ces technologies peuvent concourir à la transformation des systèmes énergétiques et, au-delà, des organisations socio-économiques.

Cette nécessité s'impose d'autant plus qu'à l'abord de la décennie 2020, la crise sanitaire a accéléré le

recours aux activités « à distance » (télétravail, télé-enseignement, télé-médecine...) rendues possibles par le haut degré d'équipement des ménages et des entreprises et la progression des connexions à haut débit (tout au moins dans les économies les plus avancées). Et, elle se renforce plus encore, sans doute, du fait des tensions économiques durables induites par la guerre en Ukraine, qui bouleversent la carte mondiale des énergies fossiles, impliquant un déploiement accéléré des énergies renouvelables, dont l'intégration dépend également des capacités numériques (IEA 2022). Dans ce contexte, il convient certes de se garder de la tentation « technosolutionniste », en postulant que les TIC portent intrinsèquement des ruptures décisives dans la lutte contre le changement climatique¹. Mais il importe tout autant d'éviter un simple « dénigrement » du numérique, en ne regardant que les tensions environnementales liées à son expansion.

Les données de Sandvine (2023) illustrent parfaitement la « versatilité » des technologies numériques : le trafic vidéo, en 2022, a augmenté de près de 25 %, dont une large part au travers de l'activité des plateformes (Netflix et Youtube trônant au premier rang). Mais les mêmes équipements permettent également les interac-

¹ Certaines études considèrent que les TIC pourraient réduire de 4 à 10 % les émissions d'ici à 2030 dans les trois secteurs les plus émetteurs (l'énergie, les matériaux et la mobilité) et de 20 % à l'horizon 2050 (WEF, 2022).

tions socio-économiques « à distance », partiellement en substitut à l'usage des transports, avec un effet qui est, lui, positif (voir Tao Y. *et al.*, 2021, pour les conférences internationales).

La blockchain, au-delà du Bitcoin^a

L'empreinte énergétique du Bitcoin ne conduit pas spontanément à imaginer que la *blockchain* puisse servir à développer des instruments au service de la transition environnementale.

Des projets pilotes sont pourtant développés, notamment autour d'une production électrique décentralisée (à base de photovoltaïque, généralement) et échangée de pair-à-pair dans le voisinage (un écoquartier, une zone industrielle, etc.). La *blockchain* permet également de certifier l'origine verte de l'énergie échangée et à en encourager le développement.

D'autres expérimentations visent à insérer cette technologie dans la logique de l'Accord de Paris. C'est le cas, par exemple, des processus de MRV (measurement, reporting and verification^b) : la mise à disposition *via* la *blockchain* de registres distribués, fiables et infalsifiables présente un grand intérêt pour les crédibiliser.

^a Voir : *Blockchain for good* (2022), pour une analyse de la diversité des expérimentations.

^b Le MRV s'articule autour de trois tâches : la mesure et la collecte des données sur les émissions, les actions et le soutien à la réduction des émissions ; le rapport des informations collectées dans des formats normalisés ; et la vérification régulière de la conformité aux normes par des examinateurs certifiés.

Une évaluation qui implique d'aller au-delà de l'empreinte carbone du système numérique

À la fin de la décennie 2010, les émissions de CO₂ liées aux TIC représentaient, selon les estimations disponibles, environ 4 % des volumes mondiaux (Andrae, 2020 ; GeSI, 2019 ; GreenIT, 2019 ; The Shiftproject, 2019). À partir de ce constat, en termes prospectifs, deux visions s'opposent. D'un côté, Andrae (2020) estimait que, pour 2030, les émissions devraient suivre une pente modérée pour atteindre environ 5 %, mettant en avant les gains d'efficacité des TIC durant la décennie

2010 (schématisée par la « loi de Koomey »)². Mais, d'un autre côté, certains travaux sont plus alarmistes, comme ceux de The ShiftProject (2019) qui envisagent une augmentation pouvant aller jusqu'à 6 % des émissions globales dès 2025, si les gains d'efficacité énergétique observés durant la décennie 2010 étaient épuisés³.

Mais, l'essentiel se trouve sans doute au-delà du périmètre des systèmes de télécommunication, avec la prise en compte des effets induits ; ce que s'efforcent d'analyser de nombreux travaux récents :

- Wang *et al.* (2021) analysent le couplage entre les investissements dans les TIC et les émissions de CO₂ dans 20 économies de l'OCDE. Leurs résultats indiquent que le nombre des économies considérées présentant un état de découplage « idéal » (c'est-à-dire, schématiquement, une contribution des TIC à une croissance décarbonée) était, dans l'OCDE, de 9 entre 2009 et 2018, contre aucune économie entre 2000 et 2009. Selon un angle s'approchant de l'étude précitée, Nguyen *et al.* (2020) tendent à démontrer que l'importation d'infrastructures TIC de pointe peut réduire la dégradation de l'environnement dans les pays du G20.
- D'autres recherches adoptent une approche s'inscrivant en termes de « productivité totale des facteurs verts », c'est-à-dire consistant en une mesure de l'efficacité globale qui prend en compte simultanément la croissance économique, la consommation d'énergie et la pollution environnementale. Les résultats montrent que l'économie numérique a un effet « dynamique » sur la productivité « verte », jouant d'abord un rôle d'inhibiteur, puis de promoteur, selon une courbe en U, ce que confirment des recherches centrées sur l'intelligence artificielle (Liu *et al.*, 2023).
- Certains travaux, portant notamment sur les économies émergentes, analysent plus spécifiquement les effets du numérique sur la qualité de l'air (en particulier, la concentration de PM 2,5), en montrant l'impact positif, mais seulement à partir d'un certain niveau d'urbanisation et de densité de la population (Li *et al.*, 2021).
- Une autre voie de recherche considère les effets du numérique au sein des entreprises. Bendig *et al.* (2023) ont analysé, sous cet angle, la situation des entreprises américaines du Standard and Poor's 500, tout au long de la décennie 2010, en déduisant, premièrement, que l'orientation numérique d'une entreprise a un effet significatif et positif sur sa performance environnementale et, deuxièmement, que cet effet est encore plus prononcé dans les environnements commerciaux technologiquement « turbulents » (en permettant, en quelque sorte, d'accroître

² La « loi de Koomey » décrit une tendance à long terme dans l'histoire du matériel informatique. Le nombre de calculs par joule d'énergie dissipée a doublé tous les 18 mois ; une tendance remarquablement stable depuis les années 1950.

³ Se fondant sur la crainte que les gains de performance énergétique soient plafonnés une fois que toutes les « bonnes pratiques » auront été appliquées.

la résilience des entreprises présentant les meilleures performances environnementales).

Sans que l'évocation de ces différents travaux récents puisse tenir lieu d'une large recension, elle fait toutefois écho à des recherches qui ont toutes pour positionnement d'analyser certains des effets environnementaux induits par l'usage des technologies du numérique, au-delà de leur périmètre direct d'application.

« Neutralité du Net » versus « neutralité carbone » ?

La « neutralité du Net » est le principe qui conduit à exclure une discrimination entre les flux circulant sur Internet, dans le but de préserver ainsi un espace de liberté d'expression, de communication, d'accès au savoir^a. Mais la pression des offres de contenus orientées vers une consommation « illimitée » (abonnement ou financement par la publicité) conduit à s'interroger sur les effets de la neutralité du Net sur l'environnement. Les objectifs climatiques sont de plus en plus contraignants et la neutralité du Net n'incite pas à la mise en œuvre d'incitations à la sobriété dans les usages. La neutralité du Net renforce ainsi le risque de « tragédie des communs », chaque acteur utilisant le réseau sans prendre en compte l'impact de sa consommation sur la congestion dudit réseau et sur l'environnement.

^a Voir la définition proposée par l'Arcep : <https://www.arcep.fr/nos-sujets/la-neutralite-du-net.html>

Ce que les crises sanitaire et énergétique changent aux termes du débat

Il n'est pas possible d'instruire le débat sur les effets environnementaux du numérique sans l'inscrire dans le contexte des chocs successifs que représentent la crise sanitaire du Covid-19 et la crise énergétique résultant de la guerre en Ukraine.

Tout d'abord, la pandémie du Covid-19 a contribué à accélérer les usages des TIC⁴ : s'il reste à ce stade difficile de mesurer avec certitude l'ampleur et la durée des transformations induites, celles-ci pourraient néanmoins avoir des conséquences structurelles, avec, par exemple, le développement du travail à distance ou le déploiement de services en ligne concernant l'éduca-

tion ou la médecine⁵. Ces transformations produisent à leur tour des effets complexes qui nécessiteront des analyses circonstanciées, et ce dans la durée.

Dans certains domaines, les résultats sont clairs : c'est le cas des téléconférences (qui se substituent à des événements en « présentiel »), qui se traduisent par une réduction considérable de l'empreinte carbone (supérieure à 90 %) (Tao Y. *et al.*, 2021). Ce type d'observation n'est, à l'évidence, pas surprenant, dès lors que les connexions à distance viennent, notamment, rendre moindres l'utilisation des transports aériens. Mais, concernant le télétravail, les analyses présentent un ordre de complexité nettement plus élevé (en raison d'une diversité d'effets rebond), dès lors que la faculté de télétravailler peut encourager les gens à s'éloigner de leur lieu de travail (créant le risque d'un allongement des trajets) ou à effectuer d'autres déplacements non professionnels, voire à influencer le comportement des autres membres du ménage en matière de déplacement (Caldarola et Sorrell S., 2022). En outre, l'effet de substitution dépendra des configurations locales : en moyenne, les trajets domicile-travail aux États-Unis sont plus longs qu'en Europe et sont plus largement effectués en voiture individuelle.

Enfin, soulignons le fait que les préoccupations en matière de sécurité énergétique suscitées par l'invasion de l'Ukraine par la Russie ont incité les pays à se tourner de plus en plus vers les énergies renouvelables, dont la capacité mondiale de production est susceptible de doubler au cours des cinq prochaines années (IEA, 2022). L'Europe s'inscrit dans cette dynamique, et ce d'autant plus qu'elle est la zone la plus directement affectée par la détérioration de la sécurité d'approvisionnement. Le plan « REpowerEU » de la Commission européenne, destiné à réduire la dépendance de l'UE au gaz russe, prévoit ainsi de porter de 40 à 45 % la part des énergies renouvelables dans le mix énergétique en 2030, renforçant les contraintes de pilotage, et donc d'optimisation de ces énergies, notamment *via* des moyens numériques. Dans ce contexte, la Commission considère la transformation numérique du système énergétique comme une priorité politique, fixant à cette fin différents objectifs, notamment ceux de développer une infrastructure européenne de partage des données pour favoriser le déploiement de nouveaux services énergétiques et de promouvoir des actions de neutralité climatique dans le secteur des TIC (CE, 2022).

Bibliographie

ANDRAE A. S. G. (2020), "Hypotheses for primary energy use, electricity use and CO₂ emissions of global computing and its shares of the total between 2020 and 2030", WSEAS Transaction on Power Systems.

ANDRAE A. S. G. (2021), "Internet's handprint", *Engineering and Applied Science Letter*, March.

⁴ Arcep, « Rapport d'activité : L'état d'Internet en France », édition 2021, juillet.

⁵ L'Organisation internationale du travail considère qu'environ un cinquième des emplois dans le monde pourraient potentiellement être organisés à domicile, ce taux montant à près de la moitié dans les pays européens (OIT, 2020).

- BENDIG D., SCHULZ C., THEIS L. & RAFF S. (2023), "Digital orientation and environmental performance in times of technological change", *Technological Forecasting and Social Change*, Volume 188.
- BLOCKCHAIN FOR GOOD (2022), « Rapport *Blockchains & développement durable* », Association Blockchain for Good, France, septembre.
- CALDAROLA B. & SORRELL S. (2022), "Do teleworkers travel less? Evidence from the English National Travel Survey", *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Volume 159.
- GESI (2019), "Digital with a Purpose – Delivering a smarter 2030".
- GREENIT (2019), "The environmental footprint for the digital world".
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (2022), "Renewables".
- LI Z., LI N. & WEN H. (2021), "Digital economy and environmental quality: evidence from 217 cities in China", *Sustainability* 13 (14), 8058.
- LYU Y., WANG W., WU Y. & ZHANG J. (2023), "How does digital economy affect green total factor productivity? Evidence from China", *Science of The Total Environment*, Volume 857, Part 2.
- NGUYEN T. T., PHAM T. A. T. & TRAM H. T. X. (2020), "Role of information and communication technologies and innovation in driving carbon emissions and economic growth in selected G-20 countries", *Journal of Environmental Management*, 261.
- PÉREZ-MARTÍNEZ J., HERNANDEZ-GIL F., SAN MIGUEL G., RUIZ D. & ARREDONDO M.-T. (2023), "Analysing associations between digitalization and the accomplishment of the Sustainable Development Goals", *Science of The Total Environment*, Volume 857, Part 3.
- SANDVINE (2023), "How have the past two years changed us?", *The Global Internet Phenomena Report*, January.
- TAO Y., STECKEL D., KLEMEŠ J. J. & YOU. F. (2021), "Trend towards virtual and hybrid conferences may be an effective climate change mitigation strategy", *Nat. Commun* 12, 7324.
- THE SHIFT PROJECT (2019), "Climate crisis: The unsustainable use of online video".
- THE SHIFT PROJECT (2019), "Lean ICT: Towards digital sobriety".
- WANG J., MA X., ZHANG J. & ZHAO X. (2022), "Impacts of digital technology on energy sustainability: China case study", *Applied Energy*, Volume 323.
- WEI C., LI C.-Z., LÖSCHEL A., MANAGI S. & LUNDRÉN T. (2023), "Digital technology and energy sustainability: Recent advances, challenges, and opportunities", *Resources, Conservation and Recycling*, Volume 190.
- WORLD ECONOMIC FORUM (2022), "Digital solutions can reduce global emissions by up to 20%. Here's how", May.
- ZHENG J. & WANG X. (2021), "Can mobile information communication technologies (ICTs) promote the development of renewables? Evidence from seven countries", *Energy Policy* 149.

Quid après les lois de Moore et de Koomey ?

Par Vincent MAZAURIC

Principal Scientist, Schneider Electric

Alexia AUFFÈVES

Directrice de recherche au CNRS,
directrice du laboratoire international MajuLab du CNRS
et cofondatrice de la Quantum Energy Initiative

Olivier EZRATTY

Consultant, auteur et cofondateur de la Quantum Energy Initiative

Et Sergio CILIBERTO

Directeur de recherche au CNRS, École normale supérieure de Lyon

Pendant près de cinquante ans, les lois de Moore et de Koomey ont caractérisé les progrès continus des performances computationnelles des microprocesseurs, et accompagné – voire fondé – l'exceptionnelle croissance de l'industrie du semi-conducteur. Ainsi, les ordinateurs sont devenus de plus en plus petits et de moins en moins coûteux, tout en étant de plus en plus rapides et puissants, alimentant ainsi un perpétuel « effet rebond » du secteur des technologies de l'information et de la communication (TIC) qui n'est toujours pas arrivé à « satiété » ! Néanmoins, les fabricants de microprocesseurs se heurtent, depuis quelques années, aux limites physiques des hypothèses qui avaient permis de conjecturer la loi de Koomey. Si bien que l'avenir de l'industrie des semiconducteurs, et plus généralement du secteur des TIC, doit désormais se construire au-delà de la loi de Moore.

Dans le même temps, la massification actuelle a conduit à identifier le secteur des TIC comme étant largement intensif en énergie électrique, et donc fortement émissif en CO₂, mais aussi extractif en matériaux critiques, alors qu'il était perçu comme « immatériel » il y a encore quelques années de cela. Pour envisager le rôle que peuvent jouer les technologies de l'information et de la communication en tant que réponse aux enjeux du développement durable, il faut donc relativiser le concept de performance computationnelle et revenir au lien entre information et énergie, qui a été énoncé, y compris dans le contexte digital, bien avant la loi de Moore. Les lois de Moore et de Koomey n'apparaissent alors que comme des « sentiers » conjoncturels menant à la maturité thermodynamique, qui est mesurée par une tendance vers la réversibilité. Afin que le « data deluge » ne se transforme pas en « mur de l'énergie », d'autres paradigmes devront être envisagés pour accompagner les futurs défis à relever par un secteur des technologies de l'information et de la communication engagé sur la voie de la soutenabilité.

Énergie et information

Le lien entre énergie et information a été pour la première fois évoqué dans le paradoxe du Démon de Maxwell (1867), sans pour autant avoir été élucidé. La résolution de ce paradoxe au cours du XX^e siècle a permis de clarifier le rôle thermodynamique des technologies de l'information et d'établir l'équivalence entre information manquante et entropie (Brillouin, 1956).

Du point de vue thermodynamique

Le rôle des technologies de l'information est de maintenir ou d'accroître la connaissance dont on dispose sur un système donné. Elles opèrent donc un traitement des mesures globalement imputé au « Démon de Maxwell ».

D'un point de vue thermodynamique, cette ambition contrarie l'évolution naturelle d'un système isolé vers une augmentation de son « information manquante », si

bien que, pour respecter le second principe de la thermodynamique, l'acquisition d'informations opérée par le biais de ce traitement est forcément moindre que la création d'entropie réalisée par ailleurs par la dégradation d'énergie noble en chaleur.

Le processeur est la machine thermodynamique qui réalise cette acquisition : pour accroître la connaissance d'un système donné ou pour, de manière équivalente, en faire baisser l'entropie, cette machine consomme de l'énergie noble (d'origine électrique) qu'elle dissipe dans un thermostat en conservant globalement les transferts d'énergie, selon le premier principe de la thermodynamique.

La machine duale du processeur étant le moteur de Szilard (voir la Figure 1 ci-contre), la classification thermodynamique suggère de voir un processeur comme une machine frigorifique, dont l'efficacité est définie par un coefficient de performance (CoP) pouvant varier de 0 à l'infini. Le CoP est utile pour calculer le service thermodynamique rendu par la numérisation.

État de l'art thermodynamique résultant du choix de la représentation digitale

Les technologies actuelles s'appuient toutes sur un codage binaire matérialisé par des bits¹ regroupés en registres, sur lesquels des opérations de calcul (respectivement de mémoire) séquencées par une horloge se succèdent sans ambiguïté, grâce à des portes d'électronique logique élémentaires, essentiellement NAND ou NOR², qui sont associées en circuits combinatoires (respectivement séquentiels) intégrés dans un processeur (Mange, 1995). Afin de disposer du processeur pour réaliser le calcul suivant, les machines classiques, inspirées de la machine de Turing, obéissent au principe de Landauer, qui fixe le coût énergétique minimal de l'effacement de l'information acquise (Gershenfeld, 1996 ; Landauer, 1961). Qualitativement, le principe de Landauer exprime l'idée qu'il n'est pas possible d'extraire du travail (selon la Figure 1 ci-contre) une fois (la certitude de) l'information binaire perdue, soit par nécessité de libérer le registre pour réaliser le calcul suivant, soit après l'exécution irréversible³ d'une porte logique : cette opération de perte de mémoire de la valeur antérieure du registre ou de la valeur des entrées d'une porte logique conduit à une dégradation de l'énergie en chaleur, *a minima* correspondant à l'information acquise préalablement ; dans les faits, à l'énergie consacrée à l'opération d'effacement pour la technologie considérée.

Autrement dit, « savoir », pour ensuite « oublier » a un coût énergétique irréductible – en l'espèce $k_B T \ln 2$ (où $k_B = 1,38 \times 10^{-23} \text{J/K}$ est la constante de Boltzmann, et

où $T^\circ\text{K}$ correspond à la température absolue) – dissipé en chaleur à chaque réinitialisation d'un registre binaire ou à chaque exécution d'une porte logique élémentaire.

Le principe de Landauer a été validé expérimentalement par observation de la dissipation thermique associée à un cycle d'effacement, successivement, sur un dispositif optique piégeant l'information dans un double puits de potentiel (Berut *et al.*, 2012 ; Berut *et al.*, 2015 ; Lutz et Ciliberto, 2015), puis sur un dispositif micromécanique (Dago *et al.*, 2021). D'autres expériences ont confirmé ce résultat (Jun *et al.*, 2014 ; Peterson *et al.*, 2016), dont une réalisée sur une structure magnétique proche de celles utilisées pour les mémoires des ordinateurs (Hong *et al.*, 2016).

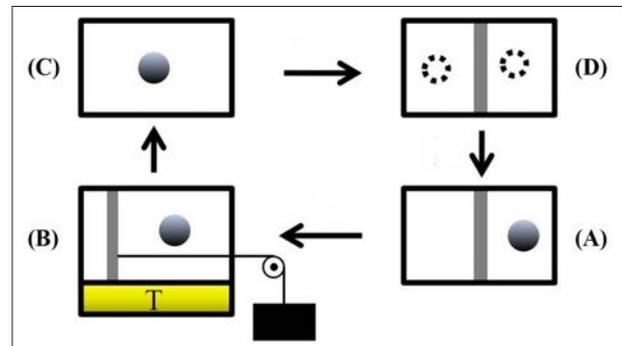


Figure 1 : Moteur de Szilard (Szilard, 1929 ; Szilard, 1964). La connaissance du compartiment occupé par le gaz (A) permet de récupérer un travail gravitaire grâce à l'agitation procurée par une source thermique $T^\circ\text{K}$ (B). Au terme du déplacement du piston, l'information sur le compartiment occupé par le gaz est perdue, puisque celui-ci se disperse dans l'ensemble du volume accessible. Mais elle a été convertie en travail, qui, en l'espèce, est au maximum égal à $k_B T \ln 2$ pour une évolution quasi statique, compte tenu du rapport double entre le volume accessible et celui initial (C). La réinitialisation du dispositif (positionnement du piston au centre (D) et assignation du gaz dans un compartiment (A)) permet de fermer le cycle de fonctionnement. La possibilité d'extraire du travail à partir d'informations est formalisée dans Sagawa et Ueda (2008) et dans Toyabe *et al.* (2010). Le cycle peut évidemment être décrit en sens inverse afin de proposer un « processeur mécanique » : un travail de compression (B) d'un gaz occupant initialement l'ensemble du volume accessible (C) permet d'accroître la connaissance sur sa position « moyenne » (A). Une fois le résultat copié, le cycle suivant n'est possible qu'à condition de « remonter » la source de travail mécanique d'au moins $k_B T \ln 2$, établissant ainsi la nécessité de disposer d'une source d'énergie noble pour acquérir à nouveau de l'information (k_B est la constante de Boltzmann).

En confirmant expérimentalement le lien entre théorie de l'information et thermodynamique, le coefficient de performance (CoP) d'une technologie de l'information donnée s'évalue, après « fermeture » du cycle de fonctionnement du processeur, par le rapport entre la valeur énergétique de l'information élémentaire donnée par la limite de Landauer et l'énergie qui lui a été consacrée par la polarisation des circuits d'électronique logique.

Rapportée à un transistor élémentaire⁴, l'énergie de commutation en logique CMOS (Complementary

¹ Pour Binary digIT.

² Respectivement « NON ET » et « NON OU ».

³ Une opération logique est dite irréversible, quand la connaissance de la sortie ne permet pas de « remonter » à l'entrée de manière univoque : par exemple, la sortie a NAND b = 1 peut être le résultat de trois entrées différentes : 1 NAND 0, 0 NAND 1 et 0 NAND 0.

⁴ Pour fixer les idées, il faut, en logique CMOS, quatre transistors pour réaliser une porte NAND ou NOR, et donc huit transistors pour une mémoire à bascule monostable.

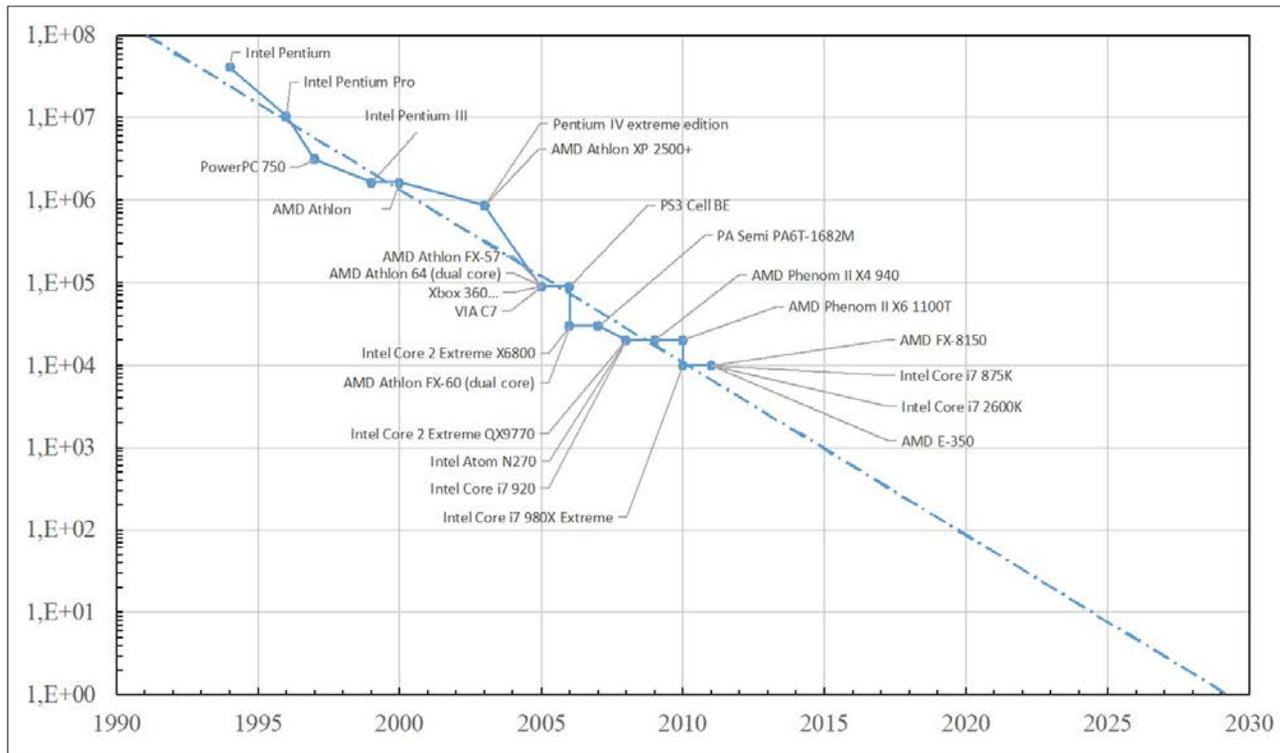


Figure 2 : Énergies de commutation des transistors à effet de champ en technologie CMOS (Complementary Metal Oxyde Semi-conducteur) rapportées à la limite de Landauer calculée à la température ambiante (300°K) pour différentes générations de microprocesseurs : l'énergie nécessaire à une commutation est divisée par deux chaque 1,45 année avec un coefficient de détermination $R^2=0,95$, selon la régression linéaire représentée par le trait mixte – Source : Données extraites de International Technology Roadmap for Semiconductors (ITRS), <http://www.itrs2.net>

- Si les lois d'échelle de Dennard avaient été respectées, la réduction par deux des énergies de commutation aurait été constatée sur 1,33 année.
- Si les progrès réalisés entre 1994 et 2011 devaient se poursuivre tendanciellement, la limite de Landauer serait atteinte en 2029.

D'autres régressions portant sur des périmètres fonctionnels et des périodes d'analyse différents sont données dans Delahaye (2017) et Zhirnov *et al.* (2014). Elles aboutissent aux mêmes conclusions tendancielles.

Metal Oxyde Semi-conducteur) est actuellement de 4 à 5 ordres de grandeur au-dessus de la limite de Landauer (voir la Figure 2 ci-dessus). Avec l'électronique de spin (Joshi, 2016), l'énergie de commutation gagnerait de 2 à 3 ordres de grandeur supplémentaires. Si la performance absolue reste faible, un tel gain permet de gagner un temps précieux face à l'urgence de soutenabilité.

En d'autres termes, les circuits microélectroniques les plus efficaces sur un plan énergétique actuellement envisagés consommeraient mille fois plus d'énergie que la limite de Landauer établie pour des machines de Turing irréversibles. Il existe donc d'autres sources de dissipation de l'énergie, qui sont toujours largement dominantes et sur lesquelles portent les efforts de recherche en microélectronique (Ernst, 2022). La réduction de cette dissipation permettrait d'atteindre une « maturité thermodynamique » qui signifierait la fin des lois de Moore et de Koomey.

Les lois de Moore et de Koomey

Depuis l'avènement de la technologie CMOS et des microprocesseurs à la fin des années 1960, les progrès

réalisés par les industries de la microélectronique au niveau des procédés lithographiques des substrats semi-conducteurs ont permis d'augmenter l'intégration des transistors selon la loi de Moore (1965), qui prévoyait un doublement de la densité des transistors dans les microprocesseurs tous les deux ans (Moore, 1965). Dans les faits, la loi de Moore a été effectivement vérifiée avec un doublement tous les deux ans (plus précisément au rythme de 1,96 année) entre 1976 et 2001.

Les caractéristiques des transistors CMOS (énergie de polarisation, tension de grille, fréquence de commutation) permises par la réduction de leur taille s'expriment au travers des lois d'échelle de Dennard (Dennard *et al.*, 1974), qui sont à l'origine de la loi de Koomey (Koomey *et al.*, 2011). Selon cette loi, pour une surface donnée de semi-conducteur, la performance des microprocesseurs exprimée par le nombre de calculs par unité d'énergie croît encore plus rapidement que la loi de Moore. Dans la Figure 2 ci-dessus, la régression linéaire (en trait mixte) constitue une analyse compatible avec l'énoncé de la loi de Koomey. Alors que l'estimation initiale d'un doublement de la performance des microprocesseurs tous les 18 mois se soit avérée sous-évaluée sur la période 1945-2000 – le nombre des calculs par Joule dépensé ayant doublé à un rythme d'environ 1,57 an (Koomey, 2010), en tenant

compte des effets de la miniaturisation des logiques à transistors des années 1950 sur la performance –, on constate depuis un essoufflement de la loi de Koomey, dont le rythme de progression désormais plus lent que celui de la loi de Moore selon les dernières estimations, exprime la perte de pertinence des lois de Dennard à des échelles inférieures aux lithographies nanométriques, et ce en raison :

- de la limite quantique de la théorie semi-classique décrivant les phénomènes de transport des charges dans les semi-conducteurs à l'origine des équations de Dennard ;
- et de la complexité croissante des liaisons métalliques entre les composants, conduisant à évoluer vers des structures tridimensionnelles et, par conséquent, contrariant l'analyse d'échelle bidimensionnelle proposée par Dennard. Par ailleurs, l'allongement de ces liaisons augmente les temps de propagation des signaux et, de fait, bride la fréquence d'exécution d'un calcul.

Globalement, alors que les pertes dynamiques liées aux commutations des transistors décroissent avec la finesse de la gravure, les pertes statiques causées par les courants de fuite liés à la polarisation des transistors CMOS nanométriques et aux effets capacitifs entre les liaisons métalliques s'accroissent à mesure que l'intégration augmente.

Finalement, la miniaturisation des logiques CMOS n'apparaît plus comme le facteur réconciliant la performance computationnelle avec une efficacité énergétique qui progresserait vers la limite de Landauer, réputée être la limite thermodynamique des machines classiques. Si, à court et moyen terme, l'hybridation avec des technologies issues de l'électronique de spin constitue un levier d'efficacité énergétique, d'autres paradigmes de calcul sont également à envisager dans un souci de soutenabilité des technologies de l'information.

Vers d'autres paradigmes de calcul

Deux causes d'irréversibilité ont été mises en évidence :

- l'irréversibilité d'origine physique induite par la commutation de transistors en un temps fini qui conditionne en partie la performance computationnelle escomptée⁵ ;
- l'irréversibilité de nature computationnelle correspondant à l'énergie dissipée en chaleur à chaque réinitialisation d'un registre binaire ou à chaque exécution d'une porte logique élémentaire non bijective, selon le principe de Landauer. Même si cette cause d'irréversibilité reste aujourd'hui marginale (voir la Figure 2 de la page précédente), l'existence d'un

⁵ Cette formulation peut sembler contradictoire avec la loi de Koomey. En fait, la miniaturisation permet une décroissance de l'énergie par commutation plus rapide que la croissance de la fréquence, selon les lois de Dennard. Si, toutes choses égales par ailleurs, la fréquence avait augmenté, les pertes se seraient elles aussi accrues, au moins proportionnellement.

« talon » irréductible de dissipation limiterait fondamentalement le recours à la numérisation pour accompagner la soutenabilité des infrastructures, de plus en plus dispersées, des commodités (Mazauro et Ciliberto, 2022).

En adoptant des polarisations par des rampes de tension plutôt que des échelons (Dickinson et Denker, 1995), l'irréversibilité d'origine physique – qui se manifeste, en l'espèce, par la dissipation dans les résistances de charge – peut être arbitrairement réduite en ralentissant suffisamment les processus de charge et de décharge des transistors. Pour que l'exécution du programme s'effectue dans un temps comparable, on doit adopter une parallélisation qui sera d'autant plus importante que les processeurs auront été ralentis (Konopik *et al.*, 2023).

Intrinsèque au codage binaire, puis à l'utilisation de portes logiques irréversibles, l'irréversibilité de nature computationnelle pourrait être réduite par l'adoption du calcul réversible (paradigme de Bennett). Sous réserve d'utiliser des portes logiques réversibles et de conserver en mémoire tous les résultats intermédiaires du calcul, l'exécution du programme serait alors « rembobinée » après copie du résultat final afin de récupérer *a posteriori* l'énergie dépensée à chaque opération logique, à l'image de ce que permettrait une machine de Turing réversible (Bennett, 1973 ; Bennett, 1988).

Dans les deux cas, on aboutit à un report de la performance computationnelle sur le « hardware » (surcoût de mémoire, parallélisation massive de processeurs « multi-cores ») si bien que le compromis technologique entre énergie et matière doit être arbitré par une analyse de cycle de vie (ACV) complète, c'est-à-dire incluant les aspects logiciel et matériel, qui reste, à ce jour, encore balbutiante (Orlov *et al.*, 2019).

Une même approche systémique mérite d'être adoptée pour les ordinateurs quantiques, avec un nouveau paradigme de calcul promettant une accélération polynomiale ou exponentielle de certains traitements, notamment pour les applications de simulation de la matière, des optimisations diverses ou pour l'apprentissage supervisé. En effet, si la réversibilité est intrinsèque au calcul quantique, elle est obérée par le bruit qui affecte les qubits⁶ à l'échelle quantique et impose une forte redondance associée à des codes de correction d'erreurs. Cette dernière amène à un équilibre délicat à réaliser à grande échelle entre la dimension quantique des qubits et celle, classique, de leur contrôle à l'aide de systèmes de génération de micro-ondes, de tensions, de lumière laser et de systèmes informatiques classiques qui sont naturellement irréversibles et énergivores (Auffèves, 2021). L'enjeu est de concevoir des architectures matérielles et logicielles équilibrées, du quantique au classique, ayant le potentiel d'apporter un avantage énergétique par rapport au calcul classique (Auffèves *et al.*, 2022). C'est ce qui motive la « Quantum Energy Initiative » (<https://quantum-energy-initiative.org/>). Lancée à partir de la France, celle-ci ambitionne de fédérer à l'échelle internationale les savoir-faire

⁶ Abréviation donnée au bits quantiques.

dans toutes ces disciplines, allant de la recherche fondamentale aux entreprises du secteur, pour analyser, évaluer et optimiser la performance énergétique des ordinateurs quantiques d'aujourd'hui et de demain. Dans un monde aux ressources finies, il est désormais indispensable d'intégrer la question énergétique dès la conception de ces innovations disruptives.

Bibliographie

- AUFFÈVES A. (2021), « Optimiser la consommation énergétique des calculateurs : un défi interdisciplinaire », *Reflète de la physique* 69, pp. 16-20.
- AUFFÈVES A., EZRATTY O. & WHITNEY R. (2022), « Vers des technologies quantiques responsables », *Revue de l'électricité et de l'électronique* 5, pp. 109-113.
- BENNETT C. H. (1973), "Logical Reversibility of Computation", *IBM Journal of Research and Development* 17(6), pp. 525-532.
- BENNETT C. H. (1988), "Notes on the history of reversible computation", *IBM Journal of Research and Development* 32(1), pp. 16-23.
- BERUT A., ARAKELYAN A., PETROSYAN A., CILIBERTO S., DILLENCHNEIDER R. & LUTZ E. (2012), "Experimental verification of Landauer's principle linking information and thermodynamics", *Nature* 483, pp. 187-192.
- BÉRUT A., PETROSYAN A. & CILIBERTO S. (2015), "Information and thermodynamics: Experimental verification of Landauer's erasure principle", *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment*, P06015.
- BRILLOUIN L. (1956), *Science and information theory*, New York (USA), Academic Press.
- DAGO S., PEREDA J., BARROS N., CILIBERTO S. & BELLON L. (2021), "Information and Thermodynamics: Fast and Precise Approach to Landauer's Bound in an Underdamped Micromechanical Oscillator", *Physical Review Letters* 126(17), 170601.
- DELAHAYE J.-P. (2017), « Vers un calcul sans coût énergétique », *Pour la science* 471, pp. 78-83.
- DENNARD R. H., GAENSSLEN F. H., YU H. N., RIDEOUT V. L., BASSOUS E. & LEBLANC A. R. (1974), "Design of ion-implanted MOSFET's with very small physical dimensions", *IEEE Journal of Solid-State Circuits* 9(5), pp. 256-268.
- DICKINSON A. G. & DENKER J. S. (1995), "Adiabatic dynamic logic", *IEEE Journal of Solid-State Circuits* 30(3), pp. 311-315.
- ERNST T. (2022), « Vers une électronique soutenable dans un monde digital : enjeux et perspectives », *Revue de l'électricité et de l'électronique* 5, pp. 89-95.
- GERSHENFELD N. (1996), "Signal entropy and the thermodynamics of computation", *IBM Systems Journal* 35(3&4), pp. 577-586.
- HONG J., LAMBSON B., DHUEY S. & BOKOR J. (2016), "Experimental test of Landauer's principle in single-bit operations on nanomagnetic memory bits", *Science Advances* 2(3), e1501492.
- JOSHI V. K. (2016), "Spintronics: a contemporary review of emerging electronics devices", *Engineering Science and Technology, an International Journal* 19, pp. 1503-1513.
- JUN Y., GAVRILOV M. & BECHHOEFER J. (2014), "High-Precision Test of Landauer's Principle in a Feedback Trap", *Physical Review Letters* 113(19), 190601.
- KONOPIK M., KORTEN T., LUTZ E. & LINKE H. (2023), "Fundamental energy cost of finite-time parallelizable computing", *Nature Communications* 14(1), 447.
- KOOMEY J. G., BERARD S., SANCHEZ M. & WONG H. (2011), "Implications of Historical Trends in the Electrical Efficiency of Computing", *IEEE Annals of the History of Computing* 33(3), pp. 46-54.
- KOOMEY J. G. (2010), "Outperforming Moore's Law", *IEEE Spectrum* 47(3), p. 68.
- LANDAUER R. (1961), "Irreversibility and heat generation in the computing process", *IBM Journal of Research and Development* 5(3), pp. 261-269.
- LUTZ E. & CILIBERTO S. (2015), "Information: From Maxwell's demon to Landauer's eraser", *Physics Today* 68(9), pp. 30-35.
- MANGE D. (1995), *Analyse et synthèse des systèmes logiques*, Lausanne (Suisse), Presses Polytechniques et Universitaires Romandes.
- MAZAUURIC V. & CILIBERTO S. (2022), « Proposition thermodynamique vers un monde plus électrique : II – Des contraintes de l'exploitation aux externalités », *Revue de l'électricité et de l'électronique* 5, pp. 102-108.
- MOORE G. E. (1965), "Cramming More Components Onto Integrated Circuits", *Electronics Magazine* 38(8).
- ORLOV A. O., HÄNNINEN I. K., CAMPOS-AGUILLON C. O., CELIS-CORDOVA R., MCCONNELL M. S., SZAKMANY G. P., THORPE C. C., APPLETON B. T., BOEHLER G. P., LENT C. S. & SNIDER G. L. (2019), "Experimental tests of the Landauer Principle in electron circuits, and quasi-adiabatic computing systems", in "Energy limits in computation: A review of Landauer's Principle", *Theory and Experiments* (ed. LENT C. S., ORLOV A. O., POROD W. & SNIDER G. L.), Cham (Switzerland), Springer, pp. 177-230.
- PETERSON J. P. S., SARTHOUR R. S., SOUZA A. M., OLIVEIRA I. S., GOULD J., MODI K., SOARES-PINTO D. O. & CÉLERI L. C. (2016), "Experimental demonstration of information to energy conversion in a quantum system at the Landauer limit", *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 472(2188), 20150813.
- SAGAWA T. & UEDA M. (2008), "Second Law of Thermodynamics with Discrete Quantum Feedback Control", *Physical Review Letters* 100(8), 080403.
- SZILARD L. (1929), "Über die entropieverminderung in einem thermodynamischen system bei eingriffen intelligenter wesen", *Zeitschrift für Physik* 53, pp. 840-856.
- SZILARD L. (1964), "On the decrease of entropy in a thermodynamic system by the intervention of intelligent beings", *Behavioral Science* 9(4), pp. 301-310.
- TOYABE S., SAGAWA T., UEDA M., MUNAYUKI E. & SANO M. (2010), "Experimental demonstration of information-to-energy conversion and validation of the generalized Jarzynski equality", *Nature Physics* 6(12), pp. 988-992.
- ZHIRNOV V., CAVIN R. & GAMMAITONI L. (2014), "Minimum Energy of Computing, Fundamental Considerations", in *ICT – Energy – Concepts Towards Zero – Power Information and Communication Technology* (eds. FAGAS G., GAMMAITONI L., PAUL D. & BERINI G. A.), Rijeka (Croatia), IntechOpen, pp. 139-178.

Le numérique, une solution sous-utilisée pour répondre aux défis de la gestion des systèmes électriques

Par Étienne BEEKER

Conseiller scientifique à France Stratégie

La crise ukrainienne a révélé la double fragilité du système électrique européen : une très forte exposition au gaz et à la Russie, son fournisseur principal, mais aussi une sous-capacité en moyens de production pilotables. Cette crise, qui ne concerne que l'Europe, est à mettre sur le compte de l'aventurisme de la politique énergétique européenne qui a voulu mettre en place à marche forcée un nouveau système basé sur les EnR intermittentes, conduisant à se débarrasser trop rapidement de l'ancien système et à oublier les impératifs de sécurité d'approvisionnement et de compétitivité. De nombreux moyens de production pilotables ont ainsi été fermés, sans songer à compenser le déficit de flexibilité qui en a résulté. L'usage du numérique pourrait le combler. Mais bien que les technologies correspondantes soient matures, elles restent notoirement sous utilisées, à l'instar de Linky en France, qui est pourtant pratiquement déployé sur tout le territoire et est conçu pour piloter la demande d'électricité.

Introduction

Discerner les défis auxquels vont devoir faire face les systèmes électriques est un exercice délicat, tant bon nombre de certitudes ont été ébranlées, voire mises à bas par la crise actuelle. En janvier 2021, RTE et l'AIE publiaient une étude¹ laissant entendre à un lecteur peu attentif qu'un système électrique composé de 100 % d'énergies renouvelables (EnR) était viable en France à l'horizon 2050. Alors que dix mois plus tard, le même RTE affirmait dans un deuxième rapport² que se passer d'investir dans le nucléaire produirait une contrainte très forte sur le système électrique, notamment parce que les EnR rendent l'approvisionnement continu en électricité très complexe. Entretemps, les impératifs de sécurité d'approvisionnement sont revenus au premier plan, ce qui conduit à réinterroger la politique énergétique européenne qui était censée apporter une électricité sûre, propre et compétitive aux consommateurs.

¹ « Étude sur les conditions d'un système électrique à forte part d'énergies renouvelables en France à l'horizon 2050 », 27 janvier 2021, <https://www.rte-france.com/actualites/rte-aie-publient-etude-forte-part-energies-renouvelables-horizon-2050>

² « Futurs énergétiques 2050 : les scénarios de mix de production à l'étude permettant d'atteindre la neutralité carbone à l'horizon 2050 », 25 octobre 2021, <https://www.rte-france.com/analyses-tendances-et-prospectives/bilan-previsionnel-2050-futurs-energetiques>

Les défis qui se posent actuellement sont tout à la fois techniques, économiques et (géo-)politiques. Quelles technologies vont pouvoir s'imposer dans le futur ? Dans quelles proportions, à quels coûts et à quelles conditions de financement ? Et avec quelle disponibilité des ressources (technologiques, humaines, spatiales, matières premières...) ? Etc.

Le sujet est vaste. Le choix fait dans cet article est de nous focaliser sur les technologies dites de rupture (en particulier, le numérique), lesquelles offrent des solutions de flexibilité pour pallier l'intermittence des EnR.

Les énergies renouvelables : quelles limites ?

Les EnR, en particulier le solaire et l'éolien, sont vus par les instances européennes comme le moyen privilégié de décarboner l'économie et de garantir la sécurité d'approvisionnement. Leur développement a été porté par les politiques très volontaristes, depuis la directive « 3x20 » de 2008 jusqu'au plan « RePowerEU », encore en discussion à la fin 2022 et destinées à se passer des hydrocarbures importés de Russie. Les objectifs fixés en matière de développement des EnR sont extrêmement ambitieux (l'Allemagne vise un mix électrique de 100 % en 2035 !), alors que les conditions

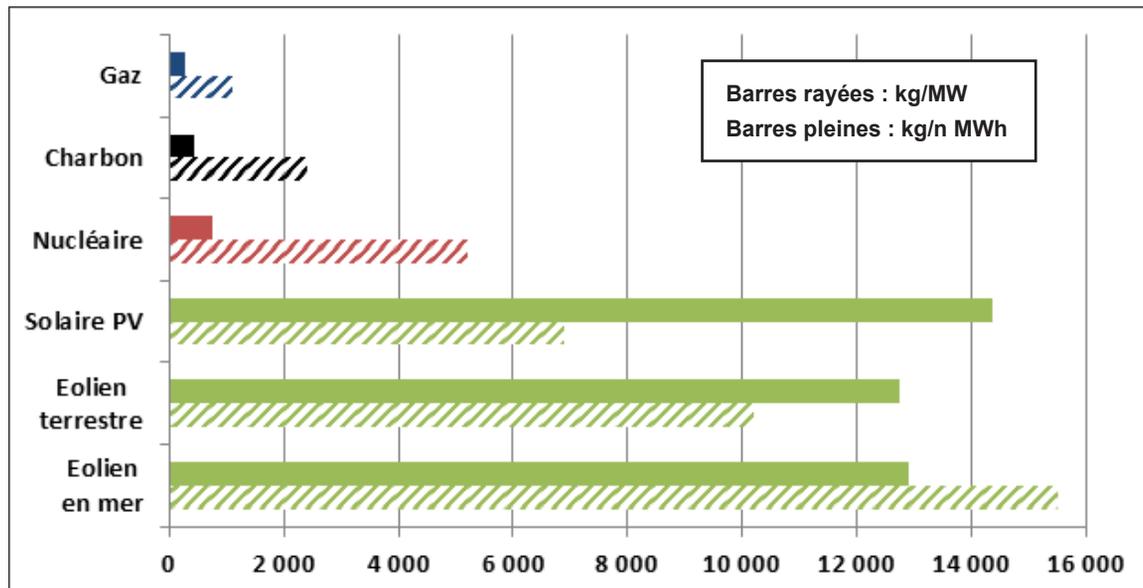


Figure 1 : Minéraux utilisés pour certains moyens de production d'électricité. Pour une quantité équivalente d'énergie produite, le nombre d'heures de fonctionnement sont pour le solaire PV de 1 200 h/an, pour l'éolien terrestre de 2 000 h/an, pour l'éolien en mer de 3 000 h/an et pour les autres moyens de 7 000 h/an. Les durées de vie des différents moyens de production sont de 20 ans pour les trois premiers cités et varient entre 30 et 50 ans pour les autres moyens (gaz : 30 ans, nucléaire : 40 ans et charbon : 50 ans) – Source : Calcul réalisé par l'auteur à partir de données de l'AIE.

de leur intégration dans le réseau ne sont pas garanties et que certaines limites se font jour.

Une baisse régulière du coût des EnR depuis quinze ans, qui a été brusquement stoppée en 2022

Des soutiens financiers massifs ont permis de faire baisser le coût du solaire photovoltaïque grâce à l'effet de série et à la délocalisation de sa production en Asie. La baisse est moins nette pour l'éolien.

Un changement de tendance a eu lieu à la fin 2021 en raison de la hausse des prix des matières premières et de celle des taux d'intérêt, une tendance haussière qui s'observe plus particulièrement sur le marché des cellules photovoltaïques (+ 20 à + 30 % en 2022) et qui affecte les résultats des appels d'offres. L'évolution future du coût des EnR est incertaine, sachant qu'il est peu probable que les conditions favorables de la dernière décennie (soutien financier hors normes, bas prix de l'énergie et des matières premières, taux d'intérêt très faibles, accueil bienveillant des riverains) se reproduisent avant quelque temps.

L'acceptabilité des EnR au regard de l'occupation des sols

La concurrence pour l'usage des sols se fait plus prégnante après que les sites les plus favorables ont été progressivement investis, au point de devenir le facteur de blocage principal du déploiement non seulement de l'éolien, mais aussi du solaire. Les populations deviennent plus sensibles aux atteintes aux paysages et aux impacts sur la biodiversité. En décembre 2022, a été discuté le projet de loi dit « d'accélération des énergies renouvelables », dont le but est de lever un certain

nombre de contraintes et d'alléger les procédures. Cela a donné lieu à de nombreuses passes d'armes entre les associations de défense de l'environnement et les professionnels de l'éolien et du solaire. Au moment où ces lignes sont écrites, l'issue des débats était encore incertaine. De grands espoirs sont placés dans l'éolien en mer, qui est mieux (ou moins mal) accepté et présente l'avantage d'avoir une production un peu plus régulière.

La dépendance à certaines ressources critiques et aux fournisseurs asiatiques

De nombreuses études – comme celle de l'AIE³ – ont montré le décalage entre les ambitions climatiques affichées au niveau mondial et la disponibilité des minéraux critiques essentiels à leur réalisation, notamment :

- le lithium, le nickel, le cobalt, le manganèse et le graphite pour les batteries ;
- les terres rares (dysprosium, néodyme, praséodyme) pour les éoliennes et les moteurs des véhicules électriques (VE) ;
- le cuivre, le silicium et l'argent pour le solaire PV ;
- le cuivre et l'aluminium pour les réseaux électriques.

Pour l'AIE, les ressources minérales ne manquent pas. Mais la volatilité des prix du cobalt, du cuivre, du lithium et du nickel révèle des tensions potentiellement

³ "The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions", 2021, <https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions>

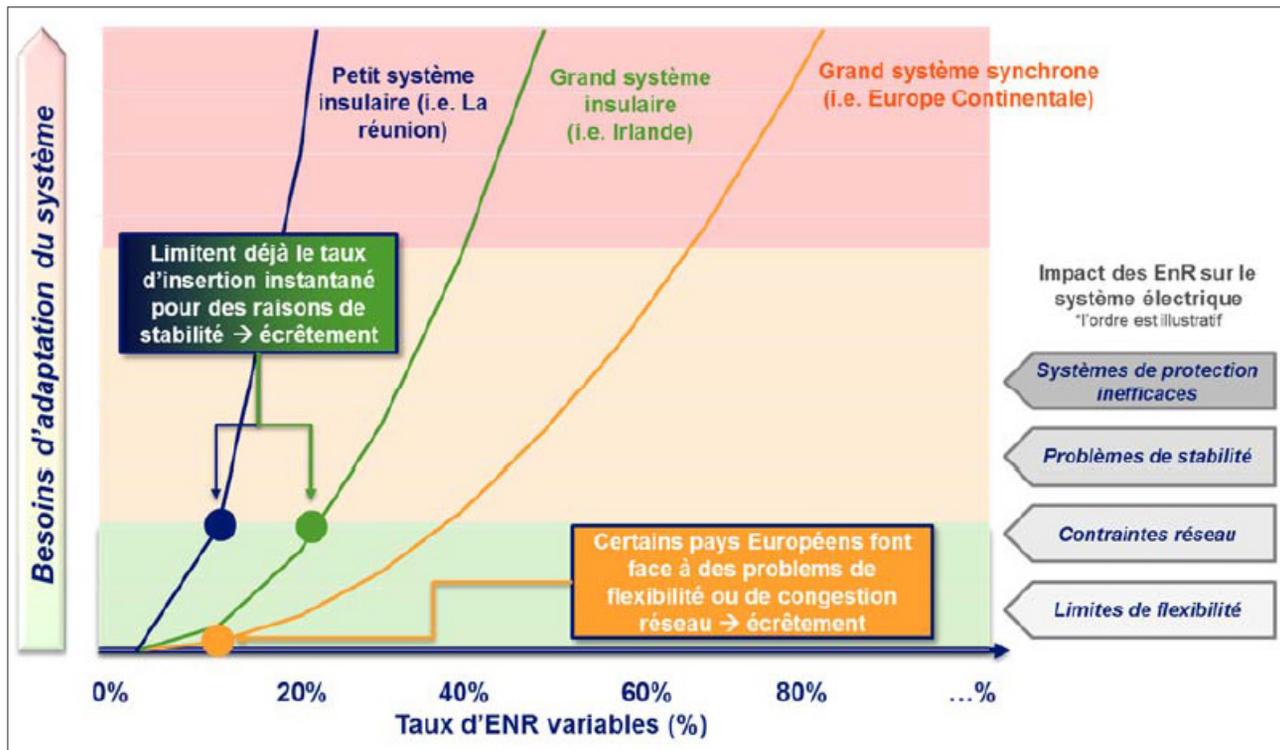


Figure 2 : Besoins d'adaptation des systèmes électriques selon le taux d'EnR – Source : EDF R&D, dans *Revue de l'Électricité et de l'Électronique*, décembre 2016.

pérennes. Cette même AIE, dans un rapport⁴ publié en juillet 2022, a alerté sur l'ultra-dominance de la Chine en matière de solaire PV (près de 85 % pour la fabrication des cellules et près de 100 % pour celle des *wafers* !) et appelle les décideurs à assurer la sécurité de l'approvisionnement par la diversification des fournisseurs et un encouragement de l'innovation.

L'intégration des EnR dans le réseau

Le caractère intermittent des EnR et leur localisation posent un défi particulier au niveau de la gestion du système électrique. Faussement présentées comme « locales », les EnR intermittentes nécessitent de fait le renforcement des réseaux en raison de la non-corrélation géographique entre offre et demande et de la nécessité de prévoir des pointes d'injection. Des moyens de « back-up » doivent être capables de prendre le relais pendant les périodes de non-production (par temps calme, la nuit, etc.). Inversement, les périodes où la production des EnRi (énergies renouvelables électriques intermittentes) excède fortement la consommation posent des problèmes nouveaux aux gestionnaires des réseaux⁵. Les besoins en services système – ceux nécessaires pour compenser les oscillations de court terme – et en moyens flexibles – qui

permettent de faire face à des variations importantes de puissance – iront en grandissant, et ce de manière exponentielle (voir la Figure 2 ci-dessus). Il est à noter que le taux d'EnR est apprécié en termes d'énergie, mais il serait beaucoup plus important si l'on raisonnait en termes de puissance (environ trois fois plus élevé pour l'éolien et cinq fois pour le solaire PV). Cette question devient critique au-delà d'un certain seuil qui dépend de la taille du système et de sa composition en moyens flexibles ou non.

Le stockage de l'électricité : des nouvelles technologies balbutiantes

Le stockage : le complément idéal des EnR intermittentes ?

Développer des installations de stockage apparaît au premier abord comme la réponse évidente pour pallier l'intermittence des EnR. En effet, certaines technologies, comme les batteries, ont beaucoup progressé ces dernières années, notamment grâce au développement de la mobilité électrique. Inversement, les véhicules électriques (VE) sont présentés comme des « batteries sur roue », apportant de la flexibilité au réseau quand ils y sont raccordés. Leur utilisation dans les applications de soutien au réseau reste toutefois balbutiante. En outre, ces technologies ne peuvent répondre qu'à des besoins correspondant à des cycles de quelques heures, comme le décalage de la demande intra-journalière, le soutien de la tension et le contrôle de la fréquence.

⁴ "SolarPVGlobalSupplyChains", 2022, <https://www.iea.org/reports/solar-pv-global-supply-chains/executive-summary>

⁵ L'Allemagne envisage de développer, avant 2030, 360 GW d'EnR intermittentes (215 GW de solaire PV et 145 GW d'éolien), un chiffre à comparer à une demande estivale moyenne d'environ 40 GW.

Le stockage massif de long terme, qui permettrait l'usage de l'énergie solaire en toutes saisons et de pallier l'insuffisance des réserves hydrauliques, pourrait être assuré par l'hydrogène. Mais ses coûts structurellement très élevés et sa dangerosité rendent son utilisation plus qu'hypothétique à court ou moyen terme.

Des progrès considérables dans les batteries observés depuis dix ans, mais qui semblent plafonner

Les batteries lithium-ion (Li-ion) se sont imposées de manière spectaculaire ces dernières années, grâce à des progrès technologiques et à une division par près de dix de leurs coûts de fabrication en dix ans. Cette baisse a, pour les mêmes raisons que pour les EnR, connu un arrêt, puis une hausse brutale en 2022. Selon BNEF, le coût d'un système de stockage d'énergie stationnaire clé en main de quatre heures a augmenté de 27 % entre 2021 et 2022 (voir la Figure 3 ci-dessous).

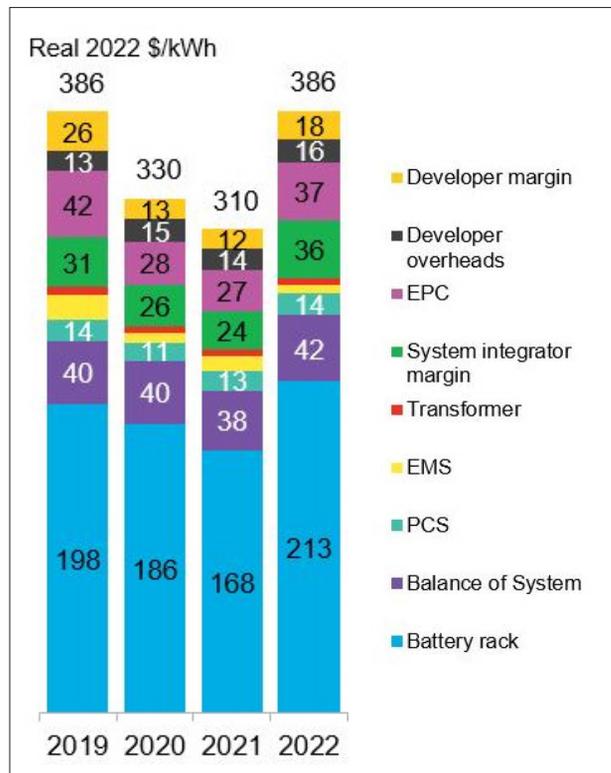


Figure 3 : Coût d'investissement total d'un système de stockage d'énergie stationnaire clé en main de quatre heures sur la période 2019 à 2022 – Source : BloombergNEF.

BNEF pronostique un retour de la baisse de ces coûts en 2024. D'autres experts sont plus réservés, estimant que l'électrochimie ne répond pas aux mêmes lois que la technologie du silicium⁶ (mobilisée pour l'électronique et les panneaux solaires) et qu'une baisse des prix des cellules ne peut passer que par l'émergence

⁶ La loi de Moore, qui postulait de manière empirique un doublement de la complexité des semi-conducteurs tous les deux ans à coût constant, tend aujourd'hui à s'infléchir.

d'une technologie de rupture (électrolyte solide, électrodes recouvertes de nanoparticules...).

Comme dans le cas du PV, une dépendance vis-à-vis de certains matériaux critiques et des fournisseurs asiatiques

Dans ses scénarios de transition énergétique de décembre 2022⁷, McKinsey montre qu'une croissance forte des VE pourrait être limitée par des difficultés d'approvisionnement en quatre « matériaux actifs » clés nécessaires à la fabrication des batteries, avec dans l'ordre croissant de criticité : lithium, cobalt, cuivre et nickel. Aujourd'hui, l'Asie (la Chine, le Japon et la Corée du Sud) représente 85 à 90 % du marché des batteries, mais, surtout, contrôle la quasi-totalité de la chaîne de production, y compris l'extraction et le raffinage des matériaux. Les constructeurs européens tentent de réagir et ont annoncé la construction de nombreuses *gigafactories*, mais les investissements à prévoir sont colossaux⁸.

Le numérique : un vrai *game changer*, mais seulement si la régulation évolue

Le numérique, un *game changer* potentiel⁹

La révolution numérique touche tous les secteurs économiques, et c'est sans aucun doute la technologie potentiellement la plus disruptive pour les systèmes électriques. Dans ce secteur, la transformation y est encore lente, mais elle affectera à terme tous les segments de valeur : production, transport, distribution, fourniture, agrégateurs... De nouveaux acteurs pénétreront ce secteur, comme les opérateurs télécoms, les sociétés de services en ingénierie informatique (SSII) ou encore les GAFAM (Google, Apple, Facebook, Amazon et Microsoft).

Contrairement au stockage d'électricité, le numérique dispose de solutions matures et répandues, qui peuvent être mises en œuvre dans le secteur électrique. Il pourra permettre au consommateur de prendre le contrôle sur son approvisionnement énergétique et sur sa consommation au travers de très nombreux services, comme :

- choisir, en quelques clics, son fournisseur et son type d'offre ;

⁷ <https://www.mckinsey.com/industries/oil-and-gas/our-insights/could-supply-chain-issues-derail-the-energy-transition>

⁸ Il est couramment retenu que 1 Md d'euros sont nécessaires pour construire une capacité de production de 10 GWh/an, soit de quoi équiper 200 000 VE.

⁹ Ce chapitre est inspiré du rapport de France Stratégie (Étienne Beeker) intitulé « Les réseaux de distribution d'électricité dans la transition énergétique », novembre 2019, <https://www.strategie.gouv.fr/sites/strategie.gouv.fr/files/atoms/files/fs-2019-dt-reseaux-electriques-beeker-novembre.pdf>

- disposer, grâce aux compteurs communicants, d'une information précise et fréquente sur sa consommation, et ainsi pouvoir optimiser sa facture ou améliorer son confort ;
- bénéficier d'offres d'effacement et d'une tarification plus dynamique sans avoir à intervenir personnellement ;
- devenir autoconsommateur, à titre individuel ou collectivement ; le cas échéant, en s'équipant d'un système de stockage ;
- se doter d'un véhicule électrique et gérer sa charge de manière optimale.

L'évolution de l'Internet des objets sera déterminante. La normalisation des protocoles et la standardisation des interfaces de communication ouvriront la voie à la production en série de composants en quantité colossale, entraînant une chute de leur coût qui permettra le pilotage d'équipements électriques de plus en plus nombreux. L'incertitude est élevée sur le calendrier ; mais cette révolution risque par la suite de se propager très rapidement, à l'instar de celle qu'a connue Internet après la standardisation du protocole de communication TCP/IP.

Le consommateur doit désormais être placé au centre du jeu

Il y a presque cinq ans, un groupe de prospective de la CRE¹⁰ notait déjà que plusieurs questions restent largement ouvertes, à commencer l'appétence du consommateur pour ces nouveaux services et son aptitude à les adopter, à quel rythme et à quelles conditions. Force est de constater que si ces technologies sont matures et permettent à divers équipements de pilotage des usages – chauffage et recharge des VE en tête – d'émerger sur le marché, elles restent notablement sous-utilisées.

Le cas du compteur communicant Linky est emblématique. Un temps présenté comme la « brique de base » des réseaux intelligents, il reste très peu utilisé, malgré un déploiement presque complet et sa capacité à instaurer une tarification dynamique. Il est très étonnant de constater que dans la crise actuelle, il n'ait pas été envisagé d'y avoir recours afin de limiter les risques de coupure, faisant reposer la sécurité du système électrique uniquement sur la responsabilité de citoyens avertis lors des périodes de tension grâce à des alertes (Ecowatt). Un véritable changement culturel est donc à opérer.

La protection des données personnelles est une question très sensible chez les consommateurs, alors qu'ils ne perçoivent pas clairement la valeur qu'ils pourront retirer des services offerts (en termes de confort, d'économies). Le déploiement du compteur Linky avait été fortement dénoncé lors de son lancement par une minorité de citoyens actifs, plaçant ainsi son acceptabilité au premier rang des freins à son utilisation.

¹⁰ Comité de prospective de la CREE (juillet 2018), « Les consommateurs d'énergie et la transformation du numérique ».

Évolution des métiers des différents acteurs

Les fournisseurs devront sortir de leur modèle actuel de vendeurs de kWh – à des prix peu différenciés temporellement ou selon l'origine – pour devenir des fournisseurs de services énergétiques. Pour ce faire, ils devront s'appuyer sur les données provenant des marchés de l'électricité, des éventuels moyens locaux de production, des gestionnaires de réseau (GRD), etc. De leur côté, les GRD doivent préparer leur avenir numérique, en matière de gestion de grandes quantités de données (le *Big Data*) issues, en particulier, du comptage, afin de les mettre à disposition des fournisseurs, des collectivités, des consommateurs individuels ou encore d'acteurs nouveaux, comme les agrégateurs.

La révolution numérique rend centrale la question de la cybersécurité

Un autre frein, voire un obstacle à la révolution numérique dans les réseaux électriques tient aux enjeux de cybersécurité. Le doublage du réseau électrique par un réseau numérique pose de nouvelles questions, alors que le nombre des attaques cybernétiques ne cesse de croître et que les systèmes énergétiques constituent des actifs stratégiques majeurs. Pour certains, la décentralisation de la production résultant notamment de l'augmentation de la part des EnR intermittentes dans le mix énergétique européen accroît encore ces risques. Une attaque coordonnée sur des équipements dispersés, comme les parcs éoliens ou les panneaux solaires, crée de fait de nouveaux défis pour la cybersécurité (une problématique trop vaste pour pouvoir être traitée dans cet article), ainsi que pour la régulation et les contrôles à mettre en place.

La pénétration des EnR et du numérique dans les systèmes électriques oblige à revoir la régulation du secteur

Vers une régulation « intelligente » des réseaux

Le GRD va devoir exercer des métiers qui sont actuellement l'apanage d'autres acteurs et gravitent autour de la gestion des données, ce qui fait apparaître des zones de recouvrement. Une nouvelle régulation doit émerger qui devra redéfinir les périmètres et les responsabilités de chacun des acteurs. Ce même GRD, dont la rémunération correspond aujourd'hui à un pourcentage de la base d'actifs qu'il a en gestion, doit pouvoir être incité à développer des solutions intelligentes qui viendraient en remplacement d'investissements dans du « hardware », ce qui obligerait le régulateur à aller au-delà d'un simple audit des comptes du GRD.

La tarification doit évoluer

L'absence de tarification dynamique constitue un frein majeur à la pénétration de technologies innovantes de

flexibilité comme le pilotage des usages ou le stockage. La rémunération des réseaux, qui sont le premier vecteur de flexibilité par le foisonnement des productions et des consommations qu'ils permettent, doit être revue. Avec des flux augmentant lors des pics de consommation, mais des volumes globaux à acheminer en baisse en raison de l'autoconsommation, les réseaux vont jouer un rôle de plus en plus assurantiel. Leurs coûts reposant majoritairement sur les investissements, la tarification des réseaux doit être rééquilibrée en faveur de la puissance (kW) au détriment de la consommation (kWh). De la même façon, un tarif indifférencié géographiquement limite la capacité à mener des politiques de maîtrise de la demande ou de gestion de ressources qui soient adaptées aux conditions locales.

Le bouclier tarifaire ne pouvant pas être prolongé indéfiniment, la tentation sera grande pour les consommateurs qui le peuvent de développer leurs propres solutions de production et de stockage face à des prix élevés. Si la rémunération allouée aux réseaux ne reflète pas leurs coûts d'usage assurantiel, cela peut générer des effets d'aubaine et même des comportements de passager clandestin.

Une telle évolution de la tarification bouscule la péréquation tarifaire, qui promeut la solidarité entre les territoires et qui constitue, avec l'égalité de traitement, un des fondamentaux du modèle énergétique français. Elle risque de plus d'amplifier la fracture numérique. Il sera difficile de s'affranchir d'un débat public sur les arbitrages à réaliser entre la solidarité nationale, les libertés locales et les réalités économiques.

En guise de conclusion

Avec la crise ukrainienne, les systèmes électriques se sont retrouvés fragilisés et exposés aux variations du prix du gaz ; une situation sortant de leur torpeur des consommateurs qui, habitués au confort d'un système stable depuis plusieurs décennies, se voient soudainement menacés de pénurie. Ce réveil peut être salutaire s'il induit des changements qui doivent porter à la fois sur les comportements, les technologies – au premier rang desquelles le numérique – et la régulation.

Plus globalement, cette crise est l'occasion pour les Européens de réinterroger leur politique énergétique actuelle, certes très volontariste et vertueuse, mais qui a négligé les fondamentaux économiques et géopolitiques et, surtout, ceux de la sécurité d'approvisionnement.

La place du numérique dans la transition énergétique

Par Gilles GUÉRASSIMOFF

Professeur à l'École des Mines de Paris
au Centre de mathématiques appliquées (CMA)

La transition énergétique est sur tous les fronts pour œuvrer à la limitation des effets du changement climatique. Le numérique est un candidat qui semble tout désigné pour contribuer à l'aboutissement de cette transition, vu l'adéquation entre l'urgence climatique et le dynamisme du développement du secteur. Pour tenter d'évaluer la place du numérique dans la transition énergétique, il est important de définir en premier lieu le périmètre de la notion de numérique. Ensuite, il est nécessaire de quantifier son impact énergétique pour évaluer les applications qui seront bénéfiques à cette transition. Enfin, il ne faut pas occulter les risques et les limites de son déploiement. Quelques exemples sont évoqués pour illustrer les domaines privilégiés de son application.

Introduction

Le numérique prend une place de plus en plus importante dans notre société. Il est souvent d'une aide précieuse dans de nombreux domaines du quotidien, tous secteurs confondus. Ses applications sont encensées quand on pense aux progrès médicaux ou industriels qui en découlent. Néanmoins, elles peuvent être critiquées lorsque leur usage est exacerbé jusqu'à l'addiction, comme avec les jeux vidéo ou les réseaux sociaux.

Au-delà de l'intérêt et des écueils du numérique dans ses applications, que peut-on dire de la place qu'il occupe dans la transition énergétique que nous vivons actuellement ? Tout d'abord, il faut bien définir ce que l'on entend par numérique, afin d'avoir une grille de lecture commune. Ensuite, il s'agira d'évaluer sa place dans la transition énergétique. Nous désignerons cette transition par l'ensemble des transformations concernant les systèmes de production, les transports et l'usage de l'énergie dans le but d'une réduction de leur impact environnemental et de les rendre durables. Enfin, il ne faut pas oublier d'évoquer les risques et les limites inhérents au déploiement de ces technologies (Association Événement OSE, 2023).

Qu'est-ce que le numérique ?

Depuis l'avènement de l'ordinateur au sortir de la Seconde Guerre mondiale grâce aux travaux de Von Neumann et Turing, les progrès n'ont cessé de croître suivant une loi de Moore prévoyant un doublement de la puissance de calcul tous les deux ans. Même si cette loi est aujourd'hui controversée, l'explosion des puissances de calcul n'est plus à prouver et a permis des développements toujours plus intensifs en termes de création et de transfert de données. De la création du

Web à l'élaboration de maquettes numériques à partir des *Big Data*, l'usage des données croît exponentiellement. Dans ce contexte, le déploiement du numérique et de son environnement a-t-il réellement un impact global bénéfique sur la transition énergétique ?

Pour tenter d'apporter des éléments de réponse à cette question, il est important de définir ce que l'on entend par le terme générique de « numérique ». Les technologies de l'information et de la communication engendrent une quantité de données et un trafic de celles-ci qui sont tous deux en croissance exponentielle. On exprime ces données numériques en bits (0 ou 1, unité la plus petite associée au transfert de l'information) ou en octets (en bytes de 8 bits, unité la plus petite de stockage de l'information). Passant d'un échange de 100 GB¹ de données par jour en 1992 à plus de 150 000 GB par seconde en 2022, la création de données est passée de 12 ZB² en 2015 à 47 ZB en 2020 et pourrait atteindre plus de 2 000 ZB en 2035 (Buss *et al.*, 2019 ; CISCO, 2022).

Ces données sont soit produites par des calculateurs, soit récoltées *via* des capteurs. Elles sont ensuite transportées et stockées afin de les valoriser, puis les échanger à nouveau. Toutes ces étapes demandent de disposer d'infrastructures lourdes (capteurs, ordinateurs, postes centraux, armoires de rue, lignes aériennes et souterraines, antennes, serveurs, sites spécifiques ou intégrés...). Tous ces composants ont un impact sur l'environnement tant au niveau de leur construction que de leur usage, notamment la nécessité de disposer de grandes quantités d'énergie.

¹ GB : gigabytes ou gigaoctets, soit 10⁹ octets. Attention à ne pas confondre avec Gb, ou Gigabit : 1 GB étant égal à 8 Gb.

² ZB : zettabytes ou zettaoctets, soit 10²¹ octets.

Technologie	Débit théorique ^a	Consommation annuelle moyenne par ligne (kWh) ^b
ADSL	100 Mbit/s descendant 40 Mbit/s montant	16
Fibre	100 Mbit/s à plusieurs Gbit/s symétrique	5

^a ARCEP (2022).

^b Fédération française des télécoms (2020).

Débits théoriques et consommations d'énergie selon les différentes générations de technologies.

Les réseaux

La partie la plus diffuse de cette infrastructure est la partie Réseaux. En effet, elle permet de relier tous les éléments entre eux, sur toute la planète, de la production des données jusqu'à leur usage terminal. Nous faisons ici référence aux réseaux filaires historiques qui ont été développés pour les télécommunications et qui ont été progressivement transformés, passant des paires de lignes de cuivre³, d'une efficacité limitée par des atténuations plus ou moins fortes selon les distances parcourues, à la fibre optique, qui offre des débits 100 fois supérieurs et qui ne subit aucune altération du signal sur de très longues distances. Ces lignes⁴ qui relient les différents continents représentent les dorsales de tout échange d'information, en plus des compléments satellitaires. Dans les années 1980, des réseaux sans fil font leur apparition, d'abord pour le transport de la voix. Puis, rapidement, l'augmentation des performances des différentes générations⁵ de technologies sans fil leur ont permis de transporter des volumes importants de données et ainsi de concurrencer la fibre optique pour les applications de courte distance. Ces technologies sans fil demandent aussi de disposer d'un maillage fin du territoire au travers d'antennes et de serveurs dédiés.

Ces deux réseaux cohabitent pour assurer la production et l'échange de toutes ces données numériques, en quasi-temps réel selon les applications.

Évaluons maintenant les consommations énergétiques liées au transit et au stockage de ces données.

Les progrès réalisés dans ces technologies ont permis une réduction drastique de la consommation d'énergie par octet transporté. Dans les réseaux fixes, il a

³ xDSL (x Digital Subscriber Line : ADSL, HDSL, VDSL...) : technologies de transmission de l'information par ligne de cuivre, permettant l'émission et la réception de données sur des distances de quelques kilomètres avec des débits maximaux de quelques dizaines de Mbit/s.

⁴ Pour la cartographie de toutes les lignes sous-marines en activité sur la planète, voir : <https://www.submarinecablemap.com/>

⁵ Les différentes générations de technologies sans fil (GSM, UMTS, LTE et, dernièrement, MU-MIMO) sont nommées par leur ordre d'apparition (1G, 2G, ..., 5G...), passant de 1,9 Mbit/s pour la 2G à 10 Gbit/s pour la 5G, et les 1 000 Gbit/s sont envisagés pour la future 6G, dont l'arrivée sur le marché est annoncée aux alentours de 2028.

Génération	Débit théorique ^a	Consommation énergétique (kWh/Go) ^b
2G	1,9 Mbit/s	37
3G	42 Mbit/s	2,9
4G	1 Gbit/s	0,6
5G	10 Gbit/s	0,06

^a PENDARIES (2022).

^b Fédération française des télécoms (2020).

ainsi été possible de diviser par trois la consommation moyenne par ligne entre 2015 et 2020, tandis que l'évolution des réseaux mobiles a permis une division par sept de l'énergie consommée par gigaoctet.

Les tableaux ci-dessus montrent les différences de débits et d'énergie consommées selon les différentes technologies. Les chiffres et les périmètres de comptage sont nombreux ; il est dès lors impossible de donner un chiffre exact. Selon une analyse des articles scientifiques réalisée par Aslan (Aslan *et al.*, 2018) et par extrapolation, le transport sur le réseau d'un Go demandait en moyenne en 2019 une consommation d'énergie de 0,01 kWh. Cette énergie représentait alors 16 % de la consommation du numérique.

Néanmoins, le trafic augmente plus vite que la baisse des consommations unitaires, montrant ainsi une progression de la part des consommations du numérique dans la consommation globale d'électricité. Le taux de croissance annuel des utilisateurs du réseau a été évalué par Cisco à 6 %, soit une prévision de 5,3 milliards d'utilisateurs en 2023 (CISCO, 2022).

L'utilisation des réseaux est donc un élément central de la consommation énergétique du numérique qui croît avec le nombre des utilisateurs et des équipements reliés.

Serveurs et équipements

De part et d'autre du réseau, nous avons deux grandes catégories d'équipements : les *data centers* pour le stockage et les calculs centralisés, et les équipements terminaux.

Les *data centers* requièrent une attention particulière, car ils concentrent de nombreux équipements informatiques (serveurs de données et de calcul, alimentations redondantes...). Ces composants dégagent en chaleur la quasi-totalité de l'énergie qu'ils consomment, un problème majeur se pose pour assurer leur fonctionnement en toute sécurité, celui de leur refroidissement. Ces contraintes ainsi que le besoin d'une bonne répartition de ces centres pour assurer un temps de latence minimal au regard des capacités de connexion locale contraignent le *design* et le déploiement des *data centers*. Ces centres sont de toutes tailles, allant de simples pièces pour les accueillir au sein d'entreprises

aux bâtiments dédiés de plusieurs millions de mètres carrés.

Les études quantifiant l'énergie nécessaire pour alimenter ces centres sont nombreuses (Malmodin *et al.*, 2018 ; The Shift Project, 2020) et présentent des disparités, car la méthodologie de comptage et la définition du périmètre ne sont pas encore complètement normalisées (IEA 4 EDNA, 2022a). Au niveau mondial, cette énergie représentait en 2019 de 200 à 900 TWh selon les études. À ces consommations doit être ajoutée l'énergie dédiée au minage des cryptomonnaies (qui pourrait représenter 60 TWh) (Bergmark *et al.*, 2021).

Même si de gros efforts sont faits pour améliorer l'efficacité énergétique de ces systèmes, la demande en supercalculateurs (qui résulte du déploiement du calcul haute performance) est en constante augmentation. Les performances de calcul s'expriment aujourd'hui en exaflops⁶, ce qui correspond à la puissance nécessaire pour le développement, par exemple, des modèles d'IA (Wu *et al.*, 2022). Ces calculateurs, dont la puissance électrique nécessaire à leur alimentation peut atteindre près de 30 MW (à l'instar du super computer Fugaku), augmentent les contraintes pesant sur les *data centers*. Ils requièrent en effet une réduction du taux des pannes tolérées ou des connexions en temps réel. Néanmoins, une attention particulière est à porter à la conception de ces calculateurs pour en améliorer l'efficacité énergétique (ou leur PUE (Power Usage Effectiveness)) et ainsi accroître les performances des nouvelles générations (DATA4, 2021).

Nous constatons de ce côté du réseau que la centralisation des moyens contribue à une amélioration de l'efficacité énergétique, permettant ainsi de modérer leur impact au regard de la croissance de la demande. Regardons maintenant ce que représente l'incidence énergétique de l'autre côté des réseaux au regard de la profusion des équipements qu'ils permettent de connecter.

Des milliards d'équipements sont connectés au réseau (ordinateurs individuels, TV, tablettes, *smartphones* et autres équipements du quotidien). De 17 milliards d'objets en 2018, nous sommes passés à près de 30 milliards en 2023. (CISCO, 2022 ; IEA 4 EDNA, 2022b). La consommation unitaire de ces d'équipements en fonction de leur type et de leur usage s'échelonne de 5 à 300 kWh/an, représentant au total plus de 150 TWh en 2022. À ces équipements vient s'ajouter une nouvelle catégorie en très forte croissance liée à l'Internet des objets (IoT)⁷. Elle englobe tous les objets qui par leur fonction nécessitent une connexion au réseau et qui, en outre, doivent être alimentés. Leur consommation en 2020 a été estimée à plus de 60 TWh. Cependant, les prévisions montrent un accroissement de leur efficacité, qui va permettre de compenser en partie leur large

⁶ Exaflops : unité qualifiant la rapidité de calcul des ordinateurs et correspondant à 10¹⁸ flops (*floating operation per second*, ou opération de calcul en virgule flottante par seconde).

⁷ IoT (Internet of Thing) : l'Internet des objets représente une constellation d'objets connectés au réseau qui permet la collecte d'informations émanant d'autres équipements et le contrôle de ces derniers.

déploiement ; il est ainsi prévu de passer le nombre des objets de contrôle de 7 milliards en 2020 à plus de 20 milliards en 2030 (IEA 4 EDNA, 2022c, 2021 ; IOT Analytics, 2022).

Le numérique, tel que nous venons de le définir, s'accompagne d'une consommation d'énergie allant toujours croissant en dépit des efforts d'efficacité réalisés à tous les niveaux de la chaîne. La demande exponentielle d'équipements connectés est à l'origine de cette constante augmentation. Les répercussions ne se résument pas uniquement à l'énergie consommée, mais se font aussi sentir au niveau des matières premières entrant dans la composition de tous ces composants, venant alourdir leur bilan environnemental lorsque l'on regarde les analyses de leur cycle de vie.

Alors quelle est la place de ce numérique dans la transition énergétique ? Quels sont les usages et les bonnes pratiques qui peuvent contribuer à l'accélération de cette transition ?

Les applications à la transition énergétique

On peut citer trois grands domaines du numérique profitant à la transition énergétique, il s'agit du *Big Data*, de l'intelligence artificielle (IA) et de la *blockchain*. En effet, la combinaison de ces trois domaines est source de nombreuses applications en faveur de cette transition (Ferreboeuf, 2019 ; Roussilhe, 2021 ; The Shift Project, 2020).

Le vecteur électrique est un bon exemple d'illustration des bénéfices liés aux progrès du numérique. Le besoin de modularité sur les réseaux électriques devient prépondérant avec la part croissante de la production renouvelable non pilotable et la gestion des pics de consommation. Des solutions de flexibilité, comme les effacements, peuvent être pilotées grâce au *Big Data* et à l'IA. La gestion des stockages diffus, comme l'eau chaude sanitaire, les véhicules électriques, mais également l'utilisation d'électrolyseurs facilitent aussi une meilleure valorisation des productions renouvelables. Le traitement de données toujours plus abondantes améliore la prévisibilité de la ressource. Par ailleurs, les supercalculateurs accroissent l'efficacité des modèles météorologiques et climatiques. Un autre usage du numérique, par le biais du comptage individuel (*smart metering*), permet d'envisager de nouveaux modèles économiques : par exemple, le déploiement d'une tarification dynamique peut assurer une meilleure fluidité dans l'adéquation entre l'offre et la demande sur les réseaux électriques. Toujours dans le domaine du comptage et de l'intégration des objets connectés, la gestion technique centralisée en coordonnant le contrôle des équipements œuvre à une meilleure efficacité énergétique dans les bâtiments ou les procédés industriels. Enfin, la sécurisation et le partage de l'information se prêtent à l'optimisation de bien d'autres domaines d'application, comme la logistique, l'agroalimentaire et même au sein du secteur énergétique.

La *blockchain*, par l'absence d'intermédiaires dans les transactions, permet d'envisager dans le domaine de l'énergie de nouveaux modèles plus sobres : développement du rôle des prosommateurs (ou consommateurs) (EEA, 2022) ; facilitation de l'autoconsommation (Ecochain⁸, Ethereum⁹) ou encore incitation à l'usage des technologies solaires (Solarcoin¹⁰). Pour que cette technologie puisse se développer plus largement, il est impératif que les validations des transactions par minage (les preuves) changent de concept. En effet, la méthode standard (Proof of work) peut demander une consommation d'énergie pouvant aller jusqu'à 700 kWh par transaction, ce qui efface complètement l'intérêt de la *blockchain* pour les applications précédemment citées. Le passage récent à une méthode de preuve d'enjeu (Proof of stake) pourrait permettre de réduire la consommation à moins de 10 kWh par transaction (CCRI, 2022), ce qui permettrait d'envisager une utilisation plus sobre.

La réduction de l'usage des énergies fossiles grâce à l'électrification des procédés industriels nous fait entrer dans l'ère de l'industrie 4.0, qui devient possible, d'une part, grâce au couplage de l'instrumentation par les objets connectés et, d'autre part, par l'utilisation de codes de calcul performants. Ces évolutions permettent d'envisager l'usage de méthodes d'IA pour procéder à des calculs en temps réel, ainsi qu'à l'identification des problèmes au travers de maquettes numériques et du calcul distribué. Ces modèles sont, par exemple, utilisés pour assurer une maintenance prédictive aboutissant à une réduction des consommations globales des systèmes. Nous pouvons aussi citer la généralisation du télétravail, des téléconsultations, de la téléchirurgie et de l'usage de la réalité augmentée. Tous ces exemples témoignent de la réduction de l'impact environnemental de chacune des applications correspondantes grâce à l'usage du numérique.

Pour que l'effet du numérique reste bénéfique, il faut cependant veiller à respecter de bonnes pratiques, notamment en se fiant aux analyses des cycles de vie des différents équipements. Ces pratiques doivent se mettre en place dès l'acquisition des équipements, en se référant notamment aux différents labels certifiant la prise en considération de l'impact environnemental de leur conception et de leur fabrication (écolabel, l'ange blue ou energy star)¹¹.

Une fois l'équipement certifié choisi, la question de l'impact de son usage se pose. Il faut veiller à éviter le sous- ou le suréquipement afin de maximiser l'usage des appareils correspondants. Ces considérations peuvent jouer sur le choix entre l'acquisition de matériels neufs ou de matériels reconditionnés. Durant leur utilisation, une optimisation de la gestion énergétique pourrait également permettre une économie de 25 % sur le plan de la consommation d'énergie.

⁸ <https://ecoc.io/>

⁹ <https://ethereum.org/fr/>

¹⁰ <https://solarcoin.org/>

¹¹ Ces labels institutionnels ou privés sont définis au niveau national ou européen.

Quant à la fin de vie de ces équipements, l'application de la règle des trois R (réduire, réutiliser et recycler) permettrait de minorer encore plus leur impact matière sur leur cycle de vie complet. Une analyse de l'obsolescence qu'elle soit technique, logicielle ou économique contribue à un meilleur amortissement des équipements. Pour aider à œuvrer dans ce sens, un indice de réparabilité a également été défini.

Le numérique, s'il est utilisé sans s'affranchir des bonnes pratiques que nous venons d'énoncer, s'avère être un atout indispensable pour être en mesure de réaliser une transition énergétique en phase avec l'urgence climatique. Néanmoins, l'explosion du numérique n'est pas sans risques et présente certaines limites qu'il est important de mentionner.

Risques et limites

Tout d'abord, la centralisation des données au sein d'un petit nombre d'entreprises, plus précisément les GAFAM¹², permet des avancées considérables pour tendre vers une neutralité carbone du numérique. Les connaissances acquises, grâce au développement d'algorithmes performants basés sur toutes les données recueillies, leur donnent une légitimité de plus en plus importante dans le monde de l'énergie (présence accrue sur les marchés, une offre d'outils d'information plus large, aide aux énergéticiens en matière de prévision...). Néanmoins, ces effets bénéfiques pourraient engendrer des dérives inquiétantes. En effet, l'hégémonie des GAFAM dans le numérique pourrait s'étendre à la fourniture d'énergie, ce qui fragiliserait la sécurité des États. En effet, leur accès à des domaines touchant à la protection des données et à la cybersécurité dans l'industrie énergétique, combiné à l'extraterritorialité des lois américaines (Cloud Act, 2018¹³), représenterait une réelle menace pour la souveraineté des États.

Les ressources naturelles nécessaires à la production de tous les composants du numérique sont considérables. Toutes les analyses de cycle de vie les concernant s'accordent sur ce constat (Malmodin *et al.*, 2018).

De plus, certains minerais rares indispensables à la filière peuvent engendrer de grandes tensions sur les ressources. Quelles soient de nature environnementale, économique ou géopolitique, ces tensions viennent réduire le bilan positif du numérique au regard de la transition.

Enfin, comme dans tout développement de nouvelles technologies, les effets rebond (GDS CNRS, 2022 ; Nuageo, 2021) sont inévitables. Dans le numérique, l'exemple du streaming vidéo (60 % du trafic) est édifiant. Son usage s'est amplifié et devient compulsif au travers du développement de technologies de plus en plus performantes qui génèrent de nouveaux besoins. Qu'il soit matériel, économique, structurel ou psychologique, l'effet rebond vient irrémédiablement réduire l'impact positif initialement envisagé.

¹² GAFAM : Google, Amazon, Facebook, Apple et Microsoft.

¹³ <https://www.justice.gov/criminal-oia/cloud-act-resources>

Conclusion

Le numérique tel que nous l'avons défini est indiscutablement un accélérateur de la transition énergétique. Pour optimiser son impact, il faut veiller à maîtriser son déploiement en intégrant dès la conception des équipements des analyses de cycle de vie pour en limiter l'impact environnemental. Il est également impératif d'informer et d'éduquer les utilisateurs afin qu'ils aient conscience de l'impact de leur usage quand celui-ci devient futile.

Bibliographie

- ARCEP (2022), « Grands dossiers/Réseaux fixes », <https://www.arcep.fr/la-regulation/grands-dossiers-reseaux-fixes.html>
- ASLAN J., MAYERS K., KOOMEY J. G. & FRANCE C. (2018), "Electricity Intensity of Internet Data Transmission: Untangling the Estimates", *Journal of Industrial Ecology* 22, pp. 785-798, <https://doi.org/10.1111/jiec.12630>
- ASSOCIATION ÉVÉNEMENT OSE (2023), « La place du numérique dans la transition énergétique », coll. « Énergie et développement durable », *Presses des Mines*, Paris (à paraître).
- BERGMARK P., STEPHENS A. & KAMIYA G. (2021), "Assessing the net climate impact of digitalization", CONNECT University Summer School 2021: Digital for our Planet, 81.
- BUSS S., NÖLDEKE G., BECKER D., BLUMTRITT C., DANIELS M. & STRIAPUNINA K. (2019), *Digital Economy Compass*.
- CCRI (2022), "The Merge – Implications on the Electricity Consumption and Carbon Footprint of the Ethereum Network".
- CISCO (2022), "Cisco Annual Internet Report (2018-2023)", White Paper No. c11-741490.
- DATA4 (2021), "What is PUE? (Power Usage Effectiveness)", DATA4 – Smart Data Centers at Scale, <https://www.data4group.com/en/datacenter-dictionary/what-is-pue/>
- EEA (2022), "Energy prosumers in Europe – Citizen participation in the energy transition", Publication n°01/2022.
- FÉDÉRATION FRANÇAISE DES TÉLÉCOMS (2020), « Étude économique 2020 – Les Télécoms : premiers acteurs du numérique ».
- FERREBOEUF H. (2019), « Lean ICT – Pour une sobriété numérique », *Futuribles* 429, 15, <https://doi.org/10.3917/futur.429.0015>
- GDS CNRS (2022), « Effets rebond du numérique », *Ecoinfo, pour une informatique éco-responsable*, <https://ecoinfo.cnrs.fr/thematiques/consequences-du-numerique/effets-rebond-du-numerique/>
- IEA 4 EDNA (2022a), *Energy Efficiency Metrics for Data Centres*, Electronic Device & Networks Annex EDNA.
- IEA 4 EDNA (2022b), *Mobile device efficiency*, Electronic Device & Networks Annex EDNA.
- IEA 4 EDNA (2022c), *Total Energy Model*, 4E Energy Efficient End-use Equipment, <https://www.iea-4e.org/edna/tem/>
- IEA 4 EDNA (2021), *Harnessing IoT for Energy Benefits*, Electronic Device & Networks Annex EDNA, Paris.
- IOT ANALYTICS (2022), *State of IoT 2022: Number of connected IoT devices growing 18% to 14.4 billion globally*, *IoT Analytics*, <https://iot-analytics.com/number-connected-iot-devices/>
- MALMODIN J., BERGMARK P. & MATINFAR S. (2018), "A high-level estimate of the material footprints of the ICT and the E&M sector", in "EPIc Series in Computing", presented at the *ICT4S2018 – 5th International Conference on Information and Communication Technology for Sustainability*, EasyChair, pp. 168-186, <https://doi.org/10.29007/q5fw>
- NUAGEO (2021), « Confort marginal et usages raisonnés dans le numérique », *L'atelier du numérique responsable*, <https://nuageo.fr/2021/11/confort-marginal-usages-raisonnes-numerique/>
- PENDARIES C. (2022), « Réseaux mobiles : connaissez-vous les différences entre 2G, 3G, 4G et 5G ? », *Échos du Net*, <https://www.echosdunet.net/dossiers/reseaux-mobiles-differences-entre-2g-3g-et-4g>
- ROUSSILHE G. (2021), *Que peut le numérique pour la transition écologique ?*
- THE SHIFT PROJECT (2020), « Déployer la sobriété numérique ».
- WU C.-J., RAGHAVENDRA R., GUPTA U., ACUN B., ARDALANI N., MAENG K., CHANG G., BEHRAM F. A., HUANG J., BAI C., GSCHWIND M., GUPTA A., OTT M., MELNIKOV A., CANDIDO S., BROOKS D., CHAUHAN G., LEE B., LEE H.-H. S., AKYILDIZ B., BALANDAT M., SPISAK J., JAIN R., RABBAT M. & HAZELWOOD K. (2022), "Sustainable AI: Environmental Implications, Challenges and Opportunities", *Proceedings of the 5th MLSys Conference*, Santa Clara, CA, USA 19.

Le rôle de la flexibilité dans le système électrique d'aujourd'hui et de demain

Par Alain BURTIN

Responsable des activités Management d'énergies
au sein de la R&D du groupe EDF

L'électricité ne se stocke pas. Il faut la produire, la transporter et la distribuer quand on en a besoin. Il faut pour cela disposer de marges et de leviers de flexibilité afin d'assurer l'ajustement physique de l'offre et de la demande d'électricité à chaque instant, en respectant des critères prédéfinis de sécurité et de fiabilité des réseaux électriques. La décarbonation des mix électriques avec le développement massif des EnR modifie en profondeur les fondamentaux d'exploitation des systèmes électriques, dont les besoins de flexibilité augmentent pour pouvoir gérer la variabilité des EnR, tandis que les principales sources de flexibilité constituées par les centrales conventionnelles se réduisent. Dans cet article, nous abordons la montée des enjeux de flexibilité dans le système électrique d'aujourd'hui et les leviers actionnés pour y répondre, les adaptations nécessaires pour atteindre les objectifs européens à l'horizon 2030, ainsi que les perspectives post-2030.

Introduction

Le système électrique est probablement le plus grand système industriel du monde. On lui demande d'être disponible vingt-quatre heures sur vingt-quatre, sept jours sur sept et immédiatement, tout en se faisant « oublier » pour l'immense majorité des utilisateurs. L'électricité ne se stockant pas, il est nécessaire de gérer l'équilibre entre l'offre et la demande d'électricité en temps réel et pour cela de disposer de leviers de flexibilité pour assurer cet ajustement physique, tout en respectant des critères prédéfinis de sécurité et de fiabilité.

Ce sont les moyens de production conventionnels centralisés (le nucléaire, l'hydraulique et le thermique à flamme) qui constituent aujourd'hui les principaux leviers de flexibilité des systèmes électriques. L'objectif de neutralité carbone et de décarbonation du mix électrique et le développement de la production renouvelable variable (éolien et photovoltaïque (PV)) et des usages de l'électricité (*smart home*, véhicules électriques, pompes à chaleur, production d'hydrogène (H₂)...) dans le cadre de la transition énergétique et numérique, modifient en profondeur l'exploitation du système électrique fondée historiquement sur les propriétés physiques des réseaux. Émergent ainsi de nouveaux besoins de flexibilité, mais aussi de nouvelles opportunités de contrôle et de pilotage reposant sur les technologies de l'information afin de mobiliser et de coordonner des leviers de flexibilité de plus en plus décentralisés et diffusés dans les réseaux.

Fonctionnement dynamique des systèmes électriques

L'électricité ne se stockant pas, il convient de la produire lorsque l'on en a besoin. Le développement des réseaux a permis de bénéficier du foisonnement des courbes de charge des différents consommateurs à des mailles locales. L'intérêt d'étendre les réseaux de transport pour couvrir tout le territoire d'un pays est vite apparu. Cela a permis de bénéficier de la complémentarité entre les courbes de charge résidentielles, industrielles et tertiaires, ainsi que des complémentarités entre les parcs de production (mix hydraulique/nucléaire/thermique), tout en bénéficiant d'économies d'échelle avec le développement de centrales de plus en plus puissantes.

L'électricité devant être produite lorsque l'on en a besoin, il est nécessaire de gérer l'équilibre entre l'offre et la demande d'électricité (EOD) en temps réel. Il s'agit pour ce faire d'optimiser un système production-réseau-consommation d'électricité sur une zone électrique, et ce en mettant en commun les capacités de production disponibles pour satisfaire la demande d'électricité.

Compte tenu des conséquences des accidents électriques et des enjeux économiques associés, il est indispensable de bien maîtriser la sûreté de fonctionnement des systèmes électriques. Cette maîtrise est au cœur des responsabilités confiées au Gestionnaire du réseau de transport (GRT), lesquelles s'exercent sur

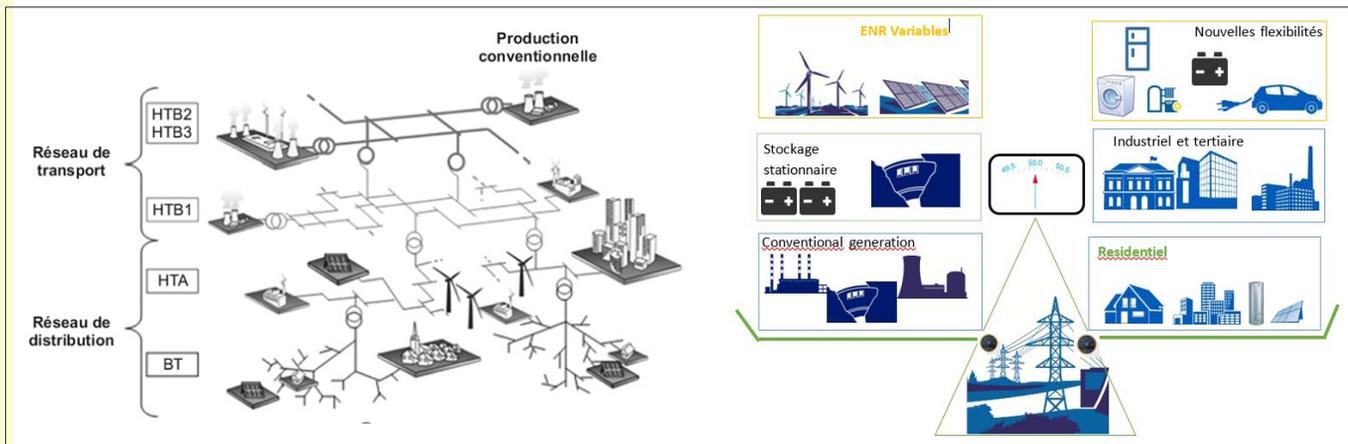


Figure 1 : Mécanismes de réglage de la fréquence (équilibre O/D) et de la tension (GRT/GRD).

la base des critères de sécurité fixés par les pouvoirs publics et déclinés dans les codes réseaux¹.

Les propriétés physiques des réseaux ont été mises à profit pour assurer ce bon fonctionnement du système électrique, le pilotage fin en temps réel de l'EOD étant assuré *via* les mécanismes de réglage de la fréquence et de la tension. En dehors des plages normales de fréquence et de tension, des protections s'activent pour délester la consommation et découpler les groupes de production, afin d'éviter un risque d'effondrement par des déclenchements en cascade.

Flexibilité et gestion de l'équilibre offre-demande

Afin d'assurer la sécurité et la fiabilité du système électrique, il est nécessaire de disposer de marges et de leviers de flexibilité pour gérer les variations prévisibles, mais aussi imprévisibles de la consommation, de la production et des flux dans les réseaux.

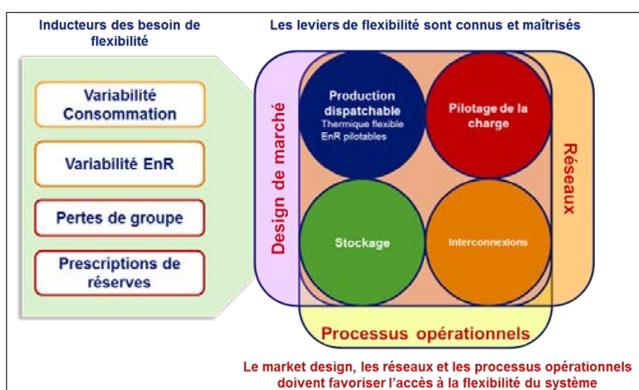


Figure 2 : Besoins et leviers de flexibilité – Source : EDF R&D.

¹ Les codes réseaux européens définissent les prescriptions techniques de raccordement au réseau pour les producteurs et les installations de consommation, les règles de sécurité et de planification opérationnelle, les règles de dimensionnement des réserves et de contrôle de la fréquence, ainsi que les règles de gestion des interconnexions de couplage des marchés et d'équilibrage du système.

Les besoins de flexibilité pour la gestion de l'EOD sont ceux relatifs au suivi de la charge relativement prévisible (cycles journaliers, hebdomadaires et annuels), à la gestion des indisponibilités des groupes de production, ainsi qu'à la couverture des aléas météo-climatiques qui affectent les usages thermosensibles (pointes mobiles en hiver, climatisation en été), la gestion des réservoirs hydrauliques et la production EnR variable.

Les leviers de flexibilité pour la gestion de l'EOD reposent sur la flexibilité des usages, sur le pilotage des capacités programmables de production d'électricité adossées à des stockages d'énergie sous différentes formes (les réservoirs hydrauliques (les centrales de lac, les installations éclusées ou au fil de l'eau), le combustible nucléaire stocké en réacteur, les centrales des mines de lignite, les réseaux et stockages gaziers, les stocks de charbon, la biomasse, les bacs de fioul, les batteries stationnaires, le stockage d'hydrogène...), sur le pilotage et la flexibilité des EnR variables (écrêtement, stockage), ainsi que sur des stations de transfert d'énergie (pompage hydraulique (STEP), batteries).

Le développement des interconnexions et le couplage des marchés en Europe au cours des vingt dernières années ont permis de tirer parti des synergies entre les mix électriques européens pour la gestion de l'équilibre offre-demande, de partager les marges de capacité disponibles en pointe, d'optimiser les arbitrages entre l'utilisation des centrales à charbon et celles au gaz avec la mise en place du marché européen des quotas de CO₂, tout en facilitant l'intégration d'un volume croissant d'EnR variables dans les réseaux européens.

Flexibilité et usages électriques

L'implémentation de tarifs horo-saisonniers en France a permis de lisser les consommations dans les réseaux de distribution à l'échelle de la journée, de la semaine et même de l'année, et de réduire les besoins de flexibilité pour le suivi de charge, ainsi que le besoin de capacité globale du système en augmentant le facteur d'utilisation des moyens installés, et ce au bénéfice de

l'ensemble des consommateurs². Les consommateurs bénéficient d'options tarifaires valorisant leur flexibilité (tarifs effacements jours de pointe, tempo, tarif heures pleines/heures creuses, avec asservissement de la production d'eau chaude sanitaire, du chauffage, de la charge des véhicules électriques (*smart charging* V1G ou V2G)...). Tandis que l'effacement de la consommation de sites industriels et tertiaires les jours de pointe sur les marchés de gros permet de réduire de plusieurs GW les besoins de capacités de pointe du système, tout en optimisant les coûts d'approvisionnement.

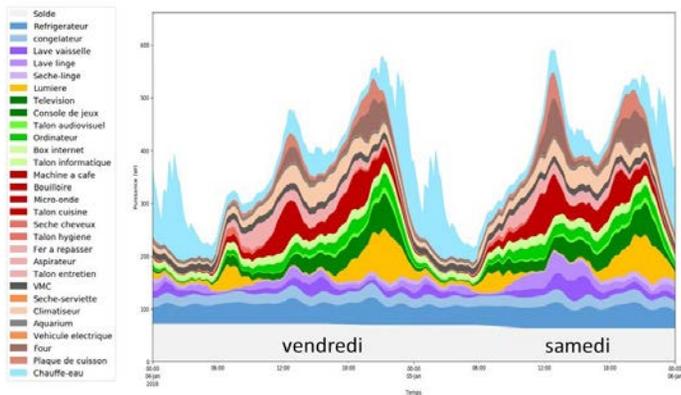


Figure 3 : Consommations d'électricité des ménages français par usage – Source : EDF R&D.

et au réglage de tension. Ils constituent aujourd'hui les principaux leviers de gestion des marges de capacité à l'horizon annuel et contribuent à la flexibilité dynamique, dans la limite de leurs performances techniques (délai de mobilisation pouvant aller de quelques heures à quelques minutes avant leur couplage au réseau, puissance minimale de fonctionnement, gradient de variation de charge, capacité de participation aux réglages primaires et secondaires de fréquence...).

Sur le plan économique, pour satisfaire la demande, les moyens de production sont mobilisés selon le coût croissant du combustible ; la fourniture des services système est optimisée pour en minimiser le coût. Dans la plupart des systèmes électriques, les moyens ont été développés pour répondre à des besoins de base ; les moyens plus anciens les moins compétitifs assurent les besoins de semi-base et de pointe.

Flexibilité et EnR variables

Comme pour la demande, l'intégration des EnR variables dans les réseaux permet de bénéficier du foisonnement naturel entre les sites et de lisser les courbes de charge EnR agrégées à l'échelle des systèmes électriques.

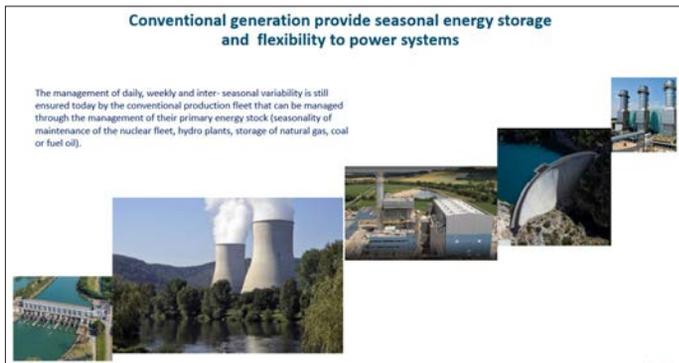


Figure 4 : Moyens de production conventionnels – Source : EDF.

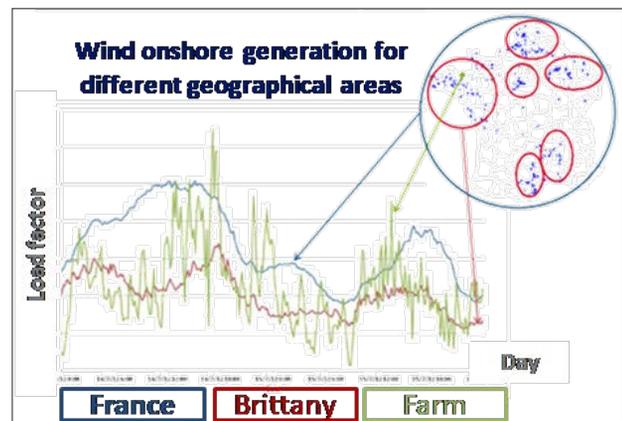


Figure 5 : Facteur de charge éolien – Source : RTE.

Flexibilité et moyens de production conventionnels

Les moyens de production conventionnels – l'hydraulique, le nucléaire, les centrales charbon ou cycle combiné gaz naturel, les turbines à combustion (TAC) ou les groupes diesel – sont, en dehors de leurs périodes de maintenance, susceptibles de fonctionner en continu en base, dans la mesure où ils sont approvisionnés en combustible ou disposent d'énergie en stock pour l'hydraulique. Ils sont également susceptibles de contribuer au suivi de charge en modulant leur niveau de production, de contribuer au réglage de fréquence

Le développement à grande échelle des filières éoliennes et photovoltaïques fait cependant apparaître de nouvelles problématiques pour l'exploitation des systèmes électriques :

- Leur taux de pénétration instantané peut varier énormément et rapidement, ce qui influe sur la dynamique et la stabilité du système électrique. Leur raccordement *via* une interface d'électronique de puissance conduit à une baisse de l'inertie du système de la différence des moyens de production conventionnels qui, au travers de leurs machines tournantes, contribuent à cette inertie, mais aussi à la stabilité du système.
- Ces énergies renouvelables sont dites variables (EnRv), dans la mesure où leur production peut varier fortement d'une heure à l'autre, en fonction des conditions météo-climatiques. Elles ne sont

² Un consommateur résidentiel isolé présente un facteur de charge de l'ordre de 500 heures, alors que la courbe de charge agrégée du secteur résidentiel est proche de 5 000 heures.

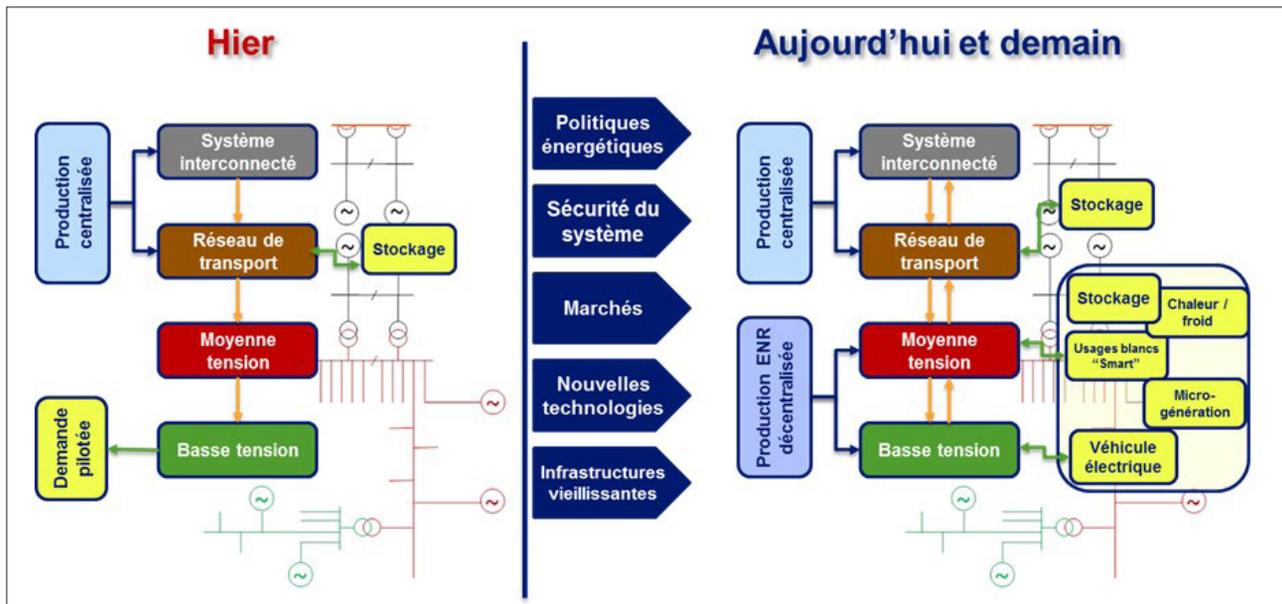


Figure 6 : Les enjeux de la flexibilité dans le système électrique actuel et ses évolutions dans le système de demain – Source : EDF R&D.

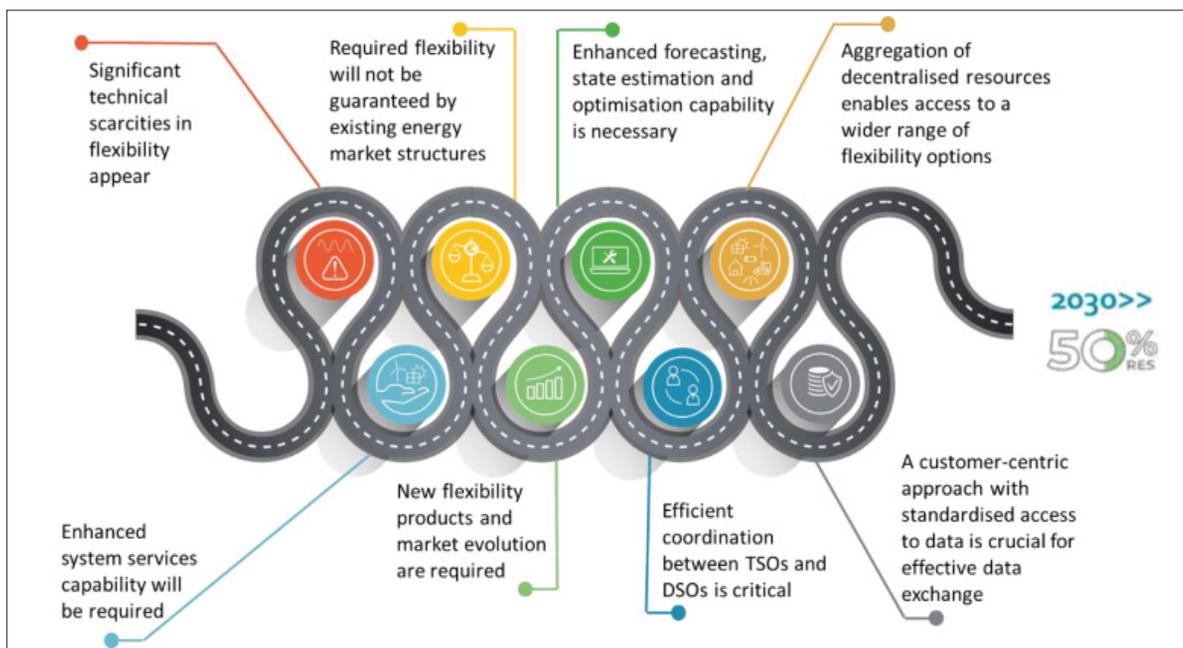


Figure 7 : Flexibility road Map – Source : EU-SysFlex.

pas programmables à la différence des moyens conventionnels adossés à des stockages d'énergie et génèrent des besoins de flexibilité (EOD, réseaux, inertie) pour gérer la variabilité et l'incertitude associée à leur production.

- Décentralisées et diffuses, elles modifient l'exploitation des réseaux de distribution auxquels elles sont raccordées et nécessitent de renforcer la coordination entre les opérateurs des réseaux de transport (GRT) et ceux des réseaux de distribution (GRD). Elles rendent les flux dans les réseaux de transport moins prévisibles et augmentent les risques de congestion.

Dans le cadre du projet européen EU-SysFlex, a été développée une feuille de route visant à répondre aux défis techniques posés par l'intégration de 50 % d'EnRv dans le mix électrique européen à l'horizon 2030 : contrôle de l'inertie et de la stabilité du système, coordination GRT/GRD, agrégation de ressources décentralisées (VPP), prévisions et gestion prévisionnelle des marges d'exploitation du système et des réseaux, nécessité de renforcer les services système et d'adapter les règles de marché afin de développer, de mobiliser et de valoriser les services de flexibilité nécessaires au bon fonctionnement du système.

Évolution des besoins de flexibilité en matière de gestion de l'EOD

Avec le développement des EnR variables, la gestion de l'EOD devient de plus en plus dépendante des conditions météo-climatiques : conditions de température, d'hydraulicité, de nébulosité et de vent.

À l'horizon journalier, l'amplitude des besoins de suivi de charge et de réglage ainsi que les erreurs de prévision de la veille pour le lendemain augmentent très fortement. Cela nécessite de développer les processus infra-journaliers afin d'optimiser la production au plus près du temps réel. Le développement en cours de plateformes d'optimisation de l'utilisation des interconnexions en infra-journalier (TERRE, PICASSO, MARI) vise à renforcer le couplage des marchés en

mutualisant les réserves au niveau européen. La capacité à contrôler, à écrêter et/ou à stocker la production EnR devient critique dans les périodes de très forte production d'EnR afin de maîtriser l'équilibre en dynamique et conserver la stabilité du système électrique.

Flexibilité et stockage d'énergie

La plupart des systèmes électriques ont développé des stations de transfert d'énergie par pompage (STEP) en tant qu'outils de flexibilité permettant de gérer les variations de demande à l'horizon journalier/hebdomadaire. Les volumes de stockage d'électricité restent cependant limités aujourd'hui dans les systèmes électriques (- 1 % de la demande), l'essentiel étant fourni par des STEP (160 GW).

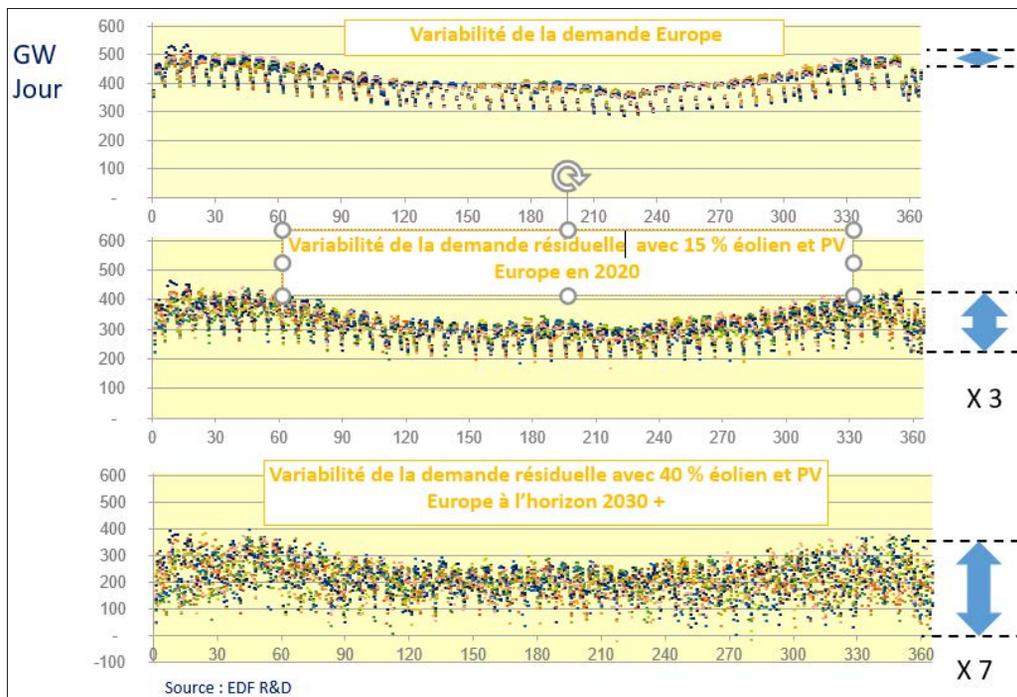


Figure 8 : Variabilité journalière de la demande résiduelle d'électricité en Europe en 2010, en 2020 et en 2030 – Source : EDF R&D.

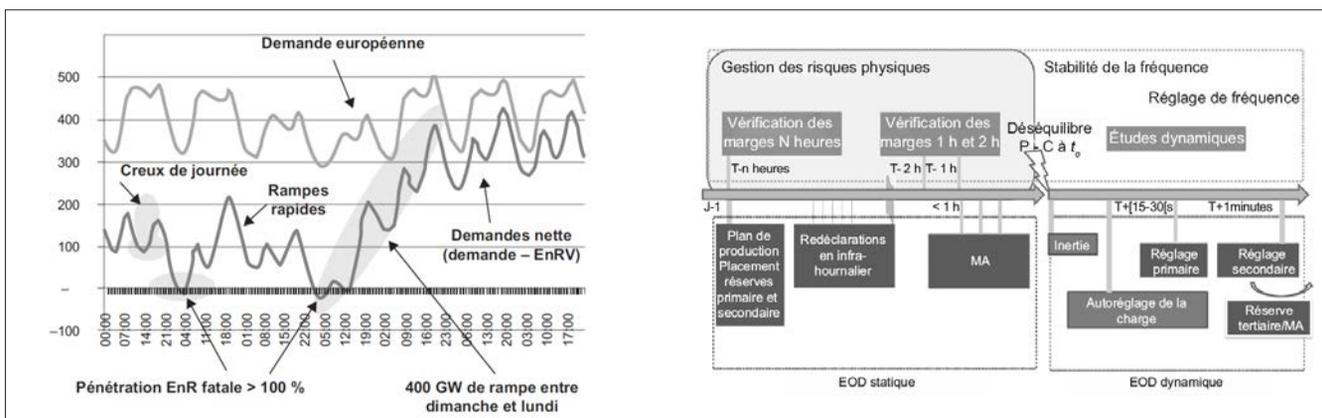


Figure 9 : Gestion EOD à l'horizon journalier et infra-journalier – Source : EDF R&D.

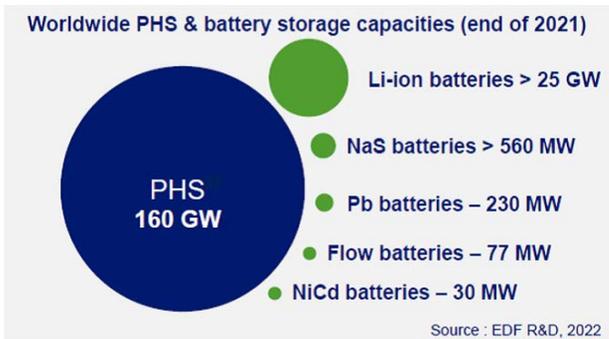


Figure 10 : Capacités de stockage de l'électricité au niveau mondial – Source : EDF R&D 2022.

Avec le développement des énergies renouvelables variables, le stockage de l'électricité est appelé à se développer : les batteries contribuent aujourd'hui au réglage primaire rapide de la fréquence dans un contexte de baisse de l'inertie des systèmes électriques. Elles se développent en association avec des centrales photovoltaïques pour permettre le lissage de la production à l'horizon journalier.

L'objectif de neutralité carbone va conduire à développer de nouvelles solutions en substitution des centrales thermiques : stockage de longue durée de l'électricité

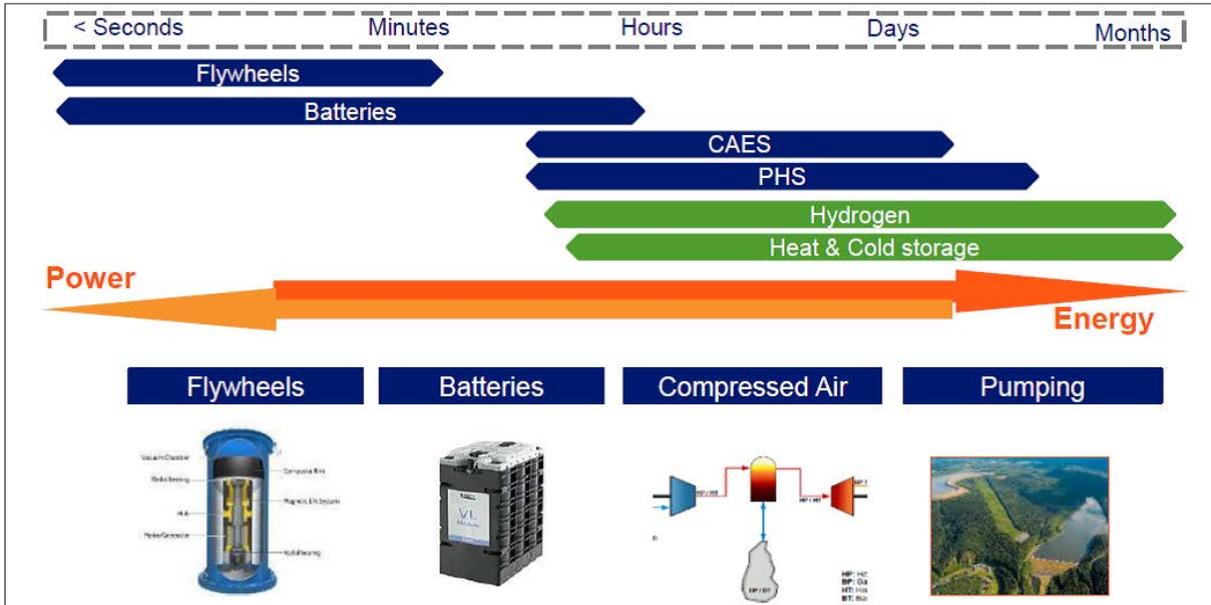


Figure 11 : Technologies de stockage de l'électricité et flexibilités associées – Source : EDF R&D.

NB : L'énergie décarbonée fournie par les EnR contribue à réduire fortement les émissions de CO₂ du système électrique, en se substituant à la production de centrales utilisant des énergies fossiles. Si ces centrales thermiques voient leur durée d'appel se réduire, les services de flexibilité rendus par ces centrales dotées de capacités de stockage de l'énergie restent essentiels pour assurer la sûreté d'exploitation et d'approvisionnement du système électrique.

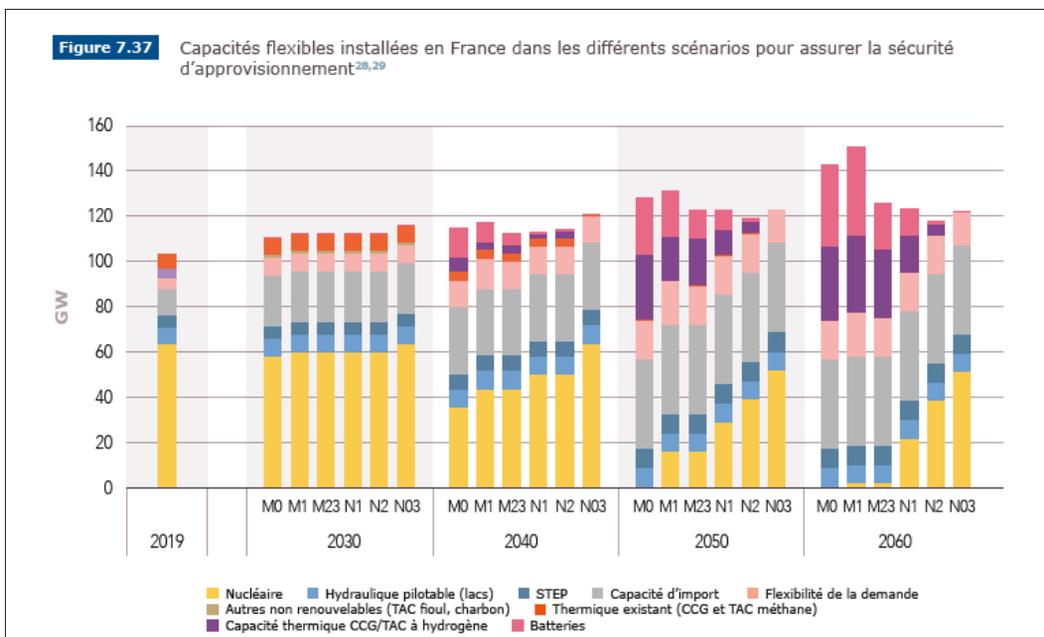


Figure 12 : Figure extraite du rapport « Futurs énergétiques 2050 – Capacités flexibles » – Source : RTE.

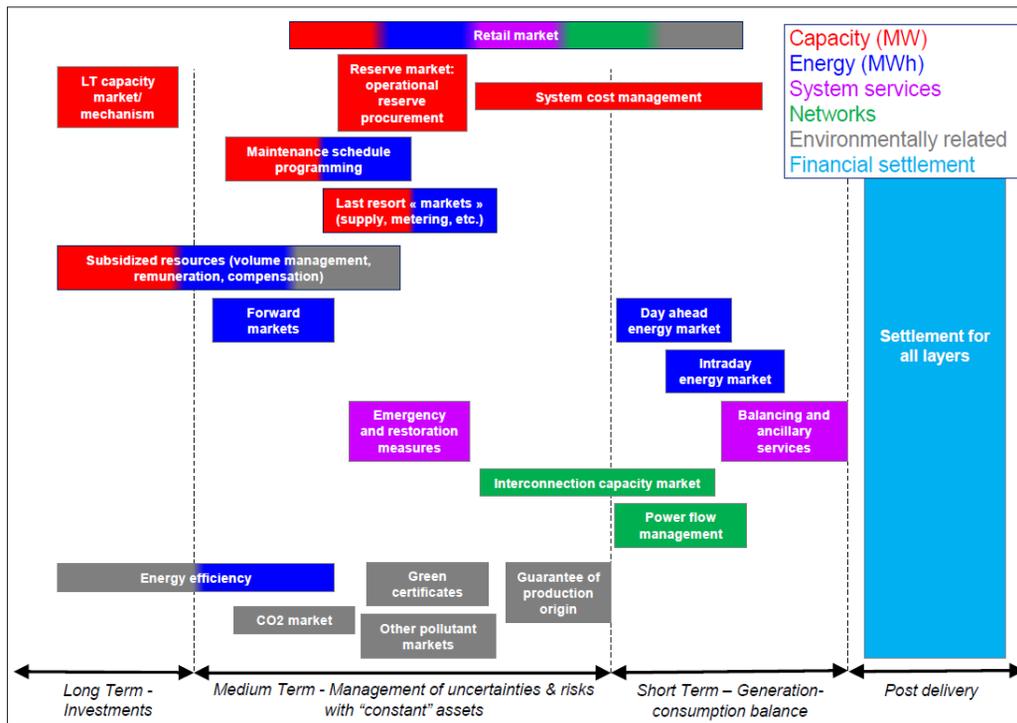


Figure 13 : Valorisation des produits et services sur les marchés de gros en Europe – Source : EDF R&D.

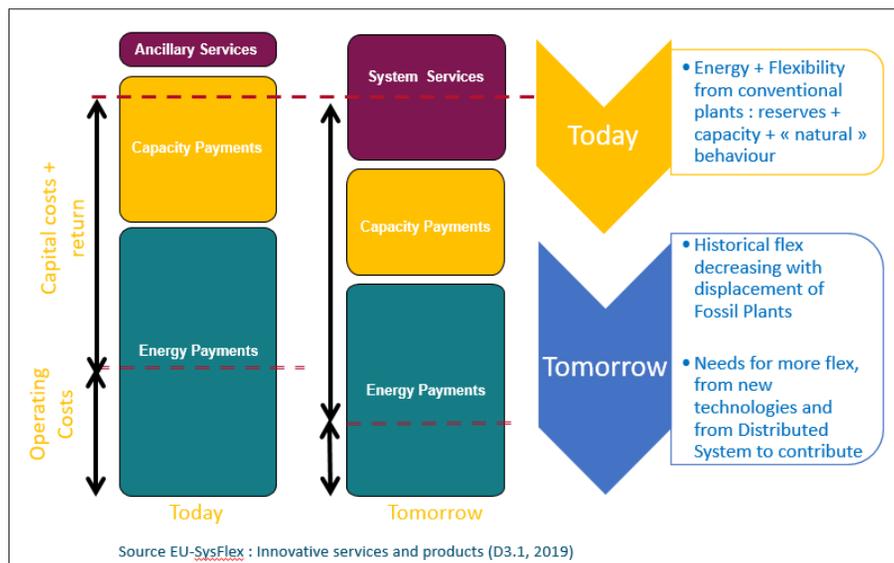


Figure 14 : Une valorisation croissante des services de flexibilité – Source : EU-SysFlex, "Innovative services and products", D 3.1, 2019.

ou solutions thermiques décarbonées (biomasse, biométhane, H₂, e-fioul...).

Responsabilité d'équilibre et marchés de gros de l'électricité

Le processus d'équilibre Production-Consommation-Réseau, pour être réalisé à chaque instant, fait l'objet d'une activité continue dans le temps, allant de plusieurs années à l'avance jusqu'au temps réel, faisant intervenir de nombreux mécanismes et acteurs en inter-

action sur les marchés de gros de l'électricité. Il nécessite une coordination assurée en Europe en temps réel sur chaque zone de réglage par les gestionnaires de réseaux de transport (GRT) en lien avec les acteurs responsables de l'équilibre (producteurs, fournisseurs, agrégateurs, *traders*) et les gestionnaires des réseaux de distribution (GRD).

La hausse des besoins de flexibilité se traduit par le poids croissant de la rémunération des services système et de la capacité sur les marchés de gros par rapport à la rémunération de l'énergie produite.

Conclusion

Le développement et la valorisation de la flexibilité constituent un enjeu essentiel en tant que supports de la pénétration des EnR variables dans des systèmes et marchés électriques en transition.

Ce sont les centrales conventionnelles (le nucléaire, l'hydraulique, le thermique à flamme) qui fournissent aujourd'hui l'essentiel des besoins de flexibilité du système électrique (inertie, services système, stockage d'énergie et capacités flexibles).

Pour atteindre les objectifs européens à l'horizon 2030, il est cependant nécessaire d'adapter l'exploitation des systèmes électriques et de développer de nouveaux leviers de flexibilité (réglage rapide de fréquence, systèmes de prévision, marchés infra-journaliers, *smart grid*, VPP, *smart charging*...) afin de répondre aux nouveaux besoins de flexibilité des mix décarbonés.

Si la durée de l'appel aux centrales thermiques à flamme diminue fortement, ainsi que leur impact sur le bilan carbone des systèmes électriques, leur rôle reste essentiel pour assurer la sécurité d'alimentation en complément des moyens EnR variables. La décarbonation profonde des systèmes à l'horizon 2050 nécessitera pour assurer la sécurité d'alimentation de développer de nouvelles solutions de stockage d'énergie : stockage de longue durée de l'électricité ou thermique décarboné.

Références bibliographiques

- BURTIN A. & SILVA V. (2015), "Technical and Economic Analysis of the European System with 60% RES", EDF Technical Report, Sustainable Development Week, Bruxelles, June.
- BELHOMME R., TROTIGNON M. *et al.* (2016), "Overview of the electricity system market and service layers in France, UK and Germany", EEM.
- EDF R&D (2018), « Les systèmes électriques de demain », éd. Lavoisier.
- EU-SysFlex.com (2022), "European power system flexibility roadmap".
- EVANS M.-A., BONO C., MONNOT E., NEAU E. & PRIME G. (2021), « Les défis posés par les EnR variables aux systèmes électriques », *Revue de l'énergie*, janvier-février.
- EVANS M.-A., BONO C. & WANG Y. (2022), "Toward Net Zero Electricity in Europe: What Are the Challenges for the Power System?", *IEEE Power & Energy magazine*, july-august.
- RTE (2021), « Futurs énergétiques 2050 ».

La *blockchain* est-elle bonne pour le climat ?

Par Paul JOLIE

Ingénieur général des Mines, Conseil général de l'Économie

La *blockchain* publique est une technologie récente qui permet de créer de la confiance. Dépourvue d'une instance centralisée, la *blockchain* repose sur un réseau de pair-à-pair. L'endommagement ou la perte d'un nœud n'affectera pas le fonctionnement de l'ensemble du système. Avec ses propriétés d'invulnérabilité, de traçabilité et de transparence, la *blockchain* permet de créer des services de notariation dans le monde numérique, entre des acteurs qui ne se font pas *a priori* confiance.

Comme applications récentes utilisant la technologie *blockchain*, on recense les cryptomonnaies, avec le succès que l'on connaît pour deux d'entre elles, le Bitcoin et Ethereum. Or, entre 2018 et 2022, la quantité annuelle d'électricité consommée provenant des crypto-actifs mondiaux a augmenté de façon importante. En août 2022, les estimations publiées de la consommation mondiale totale d'électricité liée aux actifs cryptographiques situaient celle-ci entre 120 et 240 milliards de kilowattheures par an, des volumes qui dépassent la consommation annuelle totale d'électricité de pays comme l'Argentine ou l'Australie. Cela représente de 0,4 à 0,9 % de la consommation d'électricité mondiale annuelle et est comparable à la consommation d'électricité annuelle de tous les *data centers* dans le monde. Cette consommation est principalement due aux activités de minage (qui servent à établir un consensus entre les acteurs) recourant à la méthode dite de « Preuve de travail » (PoW), celle utilisée en particulier pour le Bitcoin.

En ce sens, la *blockchain*, technologie cœur du Bitcoin, est très contributrice aux émissions de gaz à effet de serre. Heureusement, il existe d'autres mécanismes de consensus bien moins consommateurs d'énergie, comme le mécanisme de « Preuve de participation » (PoS), qui est utilisé par Ethereum.

D'un autre côté, les nouveaux services qu'offre la *blockchain* sont particulièrement attractifs pour combattre le réchauffement climatique.

Ainsi, la *blockchain* peut faciliter les échanges entre les producteurs des énergies qui sont difficiles à stocker. Elle est également très adaptée pour aider à la création d'infrastructures décentralisées et distribuées, tout en garantissant l'origine de l'énergie grâce à ses propriétés de traçabilité, et renforçant ainsi la confiance des consommateurs dans la provenance réelle de l'énergie qu'ils consomment.

Ainsi, grâce à la *blockchain*, un processus de collaboration entre les États devrait devenir possible pour élaborer des normes de performance environnementale efficaces et fondées sur des preuves.

Les origines

Stuart Haber et W. Scott Stornetta ont imaginé, dès 1991, ce que beaucoup de gens ont appris à connaître comme étant la *blockchain*. Leur premier travail a consisté à concevoir une chaîne de blocs cryptographiquement sécurisée (*via* une fonction de hachage¹ utilisant des algorithmes à clé publique), dont personne ne pouvait altérer l'horodatage des documents. En 1992, ils ont mis à jour leur système pour incorporer la technologie des arbres de Merkle² qui en a amélioré

l'efficacité, permettant ainsi la collecte d'un plus grand nombre de documents sur un seul bloc. Cette technologie de la *blockchain*, dite *blockchain* privée, repose sur le fait qu'il existe une entité centralisatrice qui joue le rôle de notaire des transactions effectuées. Cela pose la question de la confiance que l'on accorde à cette entité centralisatrice.

Cependant, ce n'est qu'en 2008 que l'histoire de la *blockchain* commence à être pertinente, grâce au travail de Satoshi Nakamoto³, qui « invente » la *blockchain* publique, dont la particularité est de ne

¹ Voir https://fr.wikipedia.org/wiki/Fonction_de_hachage

² Voir https://fr.wikipedia.org/wiki/Arbre_de_Merkle

³ Pseudonyme de la personne ou du groupe ayant développé la cryptomonnaie Bitcoin.

plus reposer sur une entité centralisatrice, mais sur un consensus d'acteurs décentralisés. Il développe ainsi le Bitcoin, la première application de la « technologie du grand livre numérique », dont on connaît depuis le succès. En 2009, il publie le premier livre blanc portant sur cette technologie, dans lequel il fournit des détails sur la façon dont la technologie pourrait améliorer la confiance numérique grâce à son aspect décentralisé, ce qui signifiait que personne ne pourrait jamais avoir le contrôle de quoi que ce soit.

Depuis que Satoshi Nakamoto s'est retiré de la scène et a confié le développement de Bitcoin à d'autres développeurs, la technologie est devenue de plus en plus complexe. La technologie du grand livre numérique a ainsi évolué, donnant lieu à de nouvelles applications qui constituent autant de jalons de l'histoire de la *blockchain*.

Après le Bitcoin, d'autres applications *blockchain* ont vu le jour, en particulier la cryptomonnaie Ethereum créée par Vitalik Buterin.

Ethereum est né en 2013, se présentant comme une nouvelle *blockchain* publique avec des fonctionnalités supplémentaires par rapport au Bitcoin. En particulier, elle dispose d'une fonction qui permet aux gens d'enregistrer d'autres actifs, tels que des contrats.

Depuis 2018, de nouveaux projets ont cherché à répondre à certaines insuffisances du Bitcoin et de l'Ethereum, tout en proposant de nouvelles fonctionnalités exploitant les capacités de la *blockchain*. Ainsi, Hyperledger, Monero, Zcash et Dash (pour ne citer que quelques-unes des *blockchains* d'un écosystème qui ne cesse de croître) sont apparus comme un moyen de résoudre certains des problèmes de sécurité et d'évolutivité associés aux premières applications de la *blockchain*.

Propriétés de la *blockchain*

Multi-centralisation

D'un point de vue architectural, la *blockchain* est basée sur un réseau P2P⁴. Par conséquent, la *blockchain* est une architecture multi-centralisée. L'endommagement ou la perte d'un nœud n'affecteront pas le fonctionnement de l'ensemble du système. Le système fait donc preuve d'une excellente robustesse.

En termes de stockage, la *blockchain* est une technologie de type distribué. Les données sont distribuées et stockées dans tous les nœuds, ce qui contribue à ce qu'un consensus soit atteint. Il n'y a pas de centre unique qui détienne ce droit de stockage. Par conséquent, la *blockchain* est également un dispositif de stockage multicentrique.

En termes de gouvernance, la *blockchain* n'a pas d'organisation ou d'institution centralisées, et les droits et obligations sont égaux entre tous les nœuds. La *blockchain* empêche qu'une ou plusieurs personnes,

quelles qu'elles soient, puissent contrôler l'ensemble du système, et ce grâce à un mécanisme de consensus ; la gouvernance de la *blockchain* est donc décentralisée ou multcentralisée.

Inviolabilité, traçabilité et transparence

Les activités d'échange d'informations peuvent être interrogées et tracées. Ce système de gestion des données, totalement transparent, fournit des raccourcis de suivi fiables pour des opérations telles que les processus de transactions énergétiques, le suivi logistique, les registres d'achat, le processus d'utilisation et l'audit.

Le système *blockchain* est ouvert et transparent. Hormis le cryptage des informations privées des parties à la transaction, les données sont transparentes pour l'ensemble des nœuds du réseau. Toute personne ou tout nœud participant peut interroger les enregistrements de données de la *blockchain* ou développer des applications connexes par le biais de l'interface publique. C'est le fondement de la fiabilité du système *blockchain*.

Haute fiabilité

D'un point de vue technique, l'essence de la *blockchain* est une base de données et un système informatique distribués.

Grâce à la forme distribuée du stockage des données, chaque nœud participant au réseau *blockchain* peut obtenir une copie de la base de données complète. Par conséquent, plus le nombre de nœuds participant au système est élevé, et plus la puissance de calcul est forte, et donc plus la sécurité des données du système est élevée.

Cette base de données fondée sur la technologie *blockchain* devrait, à l'avenir, donner naissance à plusieurs bases de données géantes au niveau mondial. Tous les échanges de valeurs liées à l'activité humaine (y compris l'inscription dans la base, l'ouverture de comptes, les paiements, les transactions, les compensations, etc.) peuvent être réalisés dans ces bases de données. Le modèle économique est, de fait, hautement extensible et inclusif.

Les problèmes que posent les crypto-actifs en matière de consommation énergétique

De 2018 à 2022, la consommation annualisée d'électricité des crypto-actifs mondiaux a connu une croissance rapide, les estimations de l'utilisation de l'électricité ayant conclu à un doublement ou à un quadruplement selon les sources. En août 2022, les estimations publiées de la consommation mondiale totale d'électricité liée aux crypto-actifs situaient celle-ci entre 120 et 240 milliards de kilowattheures par an, des volumes qui dépassent la consommation annuelle totale d'électricité de pays comme l'Argentine ou l'Australie. Cela représente de 0,4 à 0,9 % de la consommation mondiale annuelle d'électricité et est comparable à la consomma-

⁴ <https://fr.wikipedia.org/wiki/Pair-%C3%A0-pair>

tion annuelle d'électricité de tous les centres de traitement de données classiques (c'est-à-dire sans crypto-actifs) dans le monde.

Les États-Unis accueillent environ un tiers des opérations mondiales concernant les crypto-actifs, lesquelles représentent actuellement entre 0,9 et 1,7 % de la consommation totale d'électricité de ce pays. Cette fourchette de consommation d'électricité est, à l'échelle du pays, similaire à celle de tous les ordinateurs domestiques ou à celle de tout l'éclairage résidentiel.

L'extraction des crypto-actifs est également une activité très mobile. La part des États-Unis dans le minage mondial du Bitcoin, le plus grand des crypto-actifs, est passée de 3,5 % en 2020 à 38 % en 2022 (après que la Chine a pris des mesures interdisant cette activité sur son territoire). Ainsi, la consommation d'électricité américaine pour le minage de crypto-actifs, bien qu'encore relativement faible, a triplé depuis janvier 2021.

Aux États-Unis, le Texas, qui dispose de beaucoup de foncier disponible, d'une électricité bon marché et d'une régulation favorable, est le lieu idéal pour l'extraction des crypto-actifs, une opération qui utilise environ 3 % de la demande locale d'électricité de pointe. Au cours de la prochaine décennie, cet État pourrait connaître une nouvelle hausse de la demande d'électricité de 25 GW en lien avec cette opération d'extraction, ce qui équivaldrait à un tiers de la demande actuelle d'électricité de pointe au Texas.

La demande future en électricité liée aux opérations concernant les crypto-actifs est incertaine. La consommation d'électricité peut changer selon que les mineurs de crypto-actifs augmentent ou réduisent leur activité en fonction des fluctuations de la valeur du marché, ou lorsqu'ils adoptent de nouveaux équipements ou de nouvelles technologies. La consommation mondiale annualisée d'électricité pour les crypto-actifs a augmenté de plus de 67 % entre juillet 2021 et janvier 2022, avant de diminuer de 17 % à partir d'août 2022.

Il est donc d'une importance capitale qu'une énergie propre alimente cette demande d'une nouvelle électrification.

La consommation d'électricité varie considérablement selon les différentes technologies de crypto-actifs

La quasi-totalité de l'utilisation des crypto-actifs et des *blockchains* publiques repose sur des mécanismes de consensus.

Le mécanisme le plus connu est celui utilisé par le Bitcoin, le mécanisme dit de « Preuve de travail » (PoW en anglais, pour "Proof of Work"). Il a la particularité d'être très consommateur d'énergie et, surtout, de nécessiter de plus en plus de puissance de calcul au fur et à mesure que davantage d'entités tentent de valider les transactions pour obtenir des récompenses. C'est une caractéristique clé, en tant qu'elle a vocation à dissuader les acteurs malveillants d'attaquer le réseau.

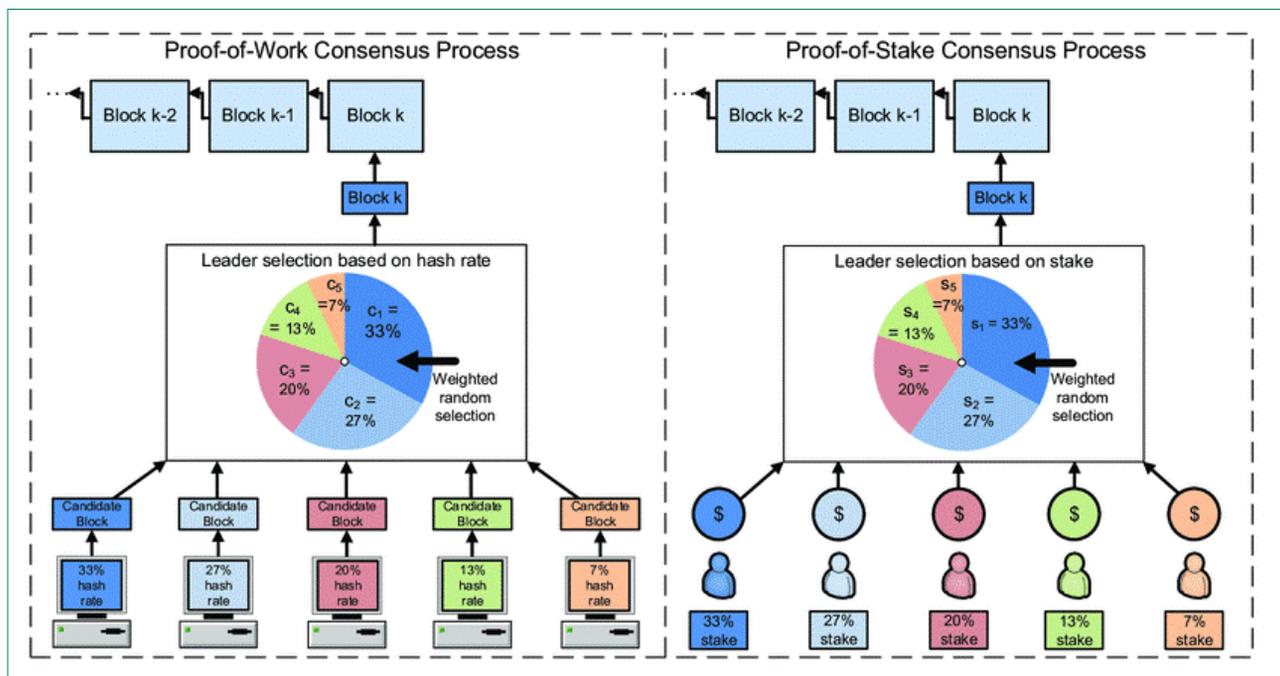


Figure 1 : Les mécanismes PoW et PoS – Source : *Proof-of-Stake Consensus Mechanisms for Future Blockchain Networks: Fundamentals, Applications and Opportunities*, IEEE, June 2019, DOI:10.1109/ACCESS.2019.2925010, <http://dx.doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2925010>

Différences entre le PoW et le PoS

Preuve de travail (PoW)

Dans le cas du PoW, les participants sont en compétition les uns avec les autres dans le but d'être le premier à trouver le bon résultat d'un problème posé par le système, ce qui suppose d'essayer différentes combinaisons avant de trouver la solution. La réalisation de ce calcul entraîne une grande consommation d'énergie pour les *blockchains* utilisant des mécanismes de consensus de type PoW, car les participants essaient d'augmenter leurs chances en multipliant les calculs réalisés en parallèle, ce qui accroît la consommation d'énergie associée.

En pratique, on constate que des acteurs, par stratégie, rejoignent souvent des pools rassemblant d'autres mineurs pour avoir plus de chances d'obtenir des revenus en effectuant des calculs en parallèle. Un pool minier est composé de participants qui souhaitent collaborer en apportant chacun leurs ressources informatiques. De cette façon, les tâches minières seront distribuées entre les différents mineurs. Et en raison de l'importance des ressources informatiques mobilisées, les pools miniers ont souvent plus de chances de gagner un nouveau bloc que les individus isolés.

Plus le temps passe, et plus les solutions sont difficiles à trouver, et cela demande une plus grande puissance de calcul et donc plus d'énergie. Le mécanisme PoW est au fil du temps de plus en plus consommateur de ressources.

Un point positif cependant : comme le mécanisme PoW est conçu pour nécessiter davantage de puissance de calcul au fur et à mesure que davantage d'entités tentent de valider les transactions pour obtenir des récompenses en cryptomonnaie, il contribue du fait de cette logique du nombre à dissuader les acteurs malveillants d'attaquer le réseau.

Preuve de participation (PoS)

Avec ce mécanisme de recherche de consensus, dit de « Preuve de participation », les participants dont « l'âge des pièces » est le plus élevé, c'est-à-dire le volume des jetons du réseau qu'ils possèdent et la durée de leur détention, ont le plus de chance d'être sélectionnés comme valideurs^a.

Avec ce processus de sélection du leader basé sur les enjeux, la chance d'un nœud d'être sélectionné en tant que leader ne dépend plus de sa puissance de calcul. La consommation d'énergie associée aux mécanismes de PoS est donc considérablement réduite par rapport à celle des PoW. De plus, puisqu'un seul bloc est créé à chaque tour dans le cas des mécanismes de type PoS, les vitesses de génération des blocs et de confirmation des transactions sont généralement beaucoup plus élevées que dans un modèle de type PoW.

^a C'est un procédé qui permet, *in fine*, à quelqu'un de démontrer son implication dans un système crypto-économique.

Comme Ethereum et Bitcoin sont aujourd'hui les cryptomonnaies dominantes (elles représentent plus de 60 % de la capitalisation totale du marché des crypto-actifs), leur impact sur la consommation d'électricité est donc majeur. En août 2022, le Bitcoin représentait près de 70 % de la consommation électrique totale des crypto-actifs dans le monde.

Il existe d'autres mécanismes de consensus moins gourmands en énergie. L'un d'eux est appelé la « Preuve de participation » ("Proof on Stake"). En septembre 2022, Ethereum a fait le choix de basculer sur ce mode pour réduire son empreinte énergétique lors d'une opération appelée « The Merge ».

En reprenant l'exemple des États-Unis, on estime que les activités liées aux crypto-actifs correspondent à environ 25 à 50 Mt de CO₂/an, soit 0,4 à 0,8 % des émissions totales de GES de ce pays, ce qui est d'un

niveau similaire aux émissions provenant du carburant diesel utilisé dans les chemins de fer américains !

Les émissions de GES provenant de l'utilisation de l'électricité varient selon les régions des États-Unis ; certaines régions dépendent davantage des combustibles fossiles à forte intensité en carbone, tandis que d'autres ont davantage recours aux sources d'énergie nucléaire ou renouvelable. En plus de l'électricité achetée sur le réseau, les opérations d'extraction des crypto-actifs ont également des répercussions au plan local au niveau du bruit, de l'eau, des déchets électroniques, de la pollution de l'air et autres pollutions liées à l'utilisation directe de l'électricité d'origine fossile. S'y ajoutent des répercussions supplémentaires en matière de qualité de l'air, de l'eau et de déchets liées à l'utilisation de l'électricité du réseau. Ces impacts locaux peuvent exacerber les problèmes en termes de

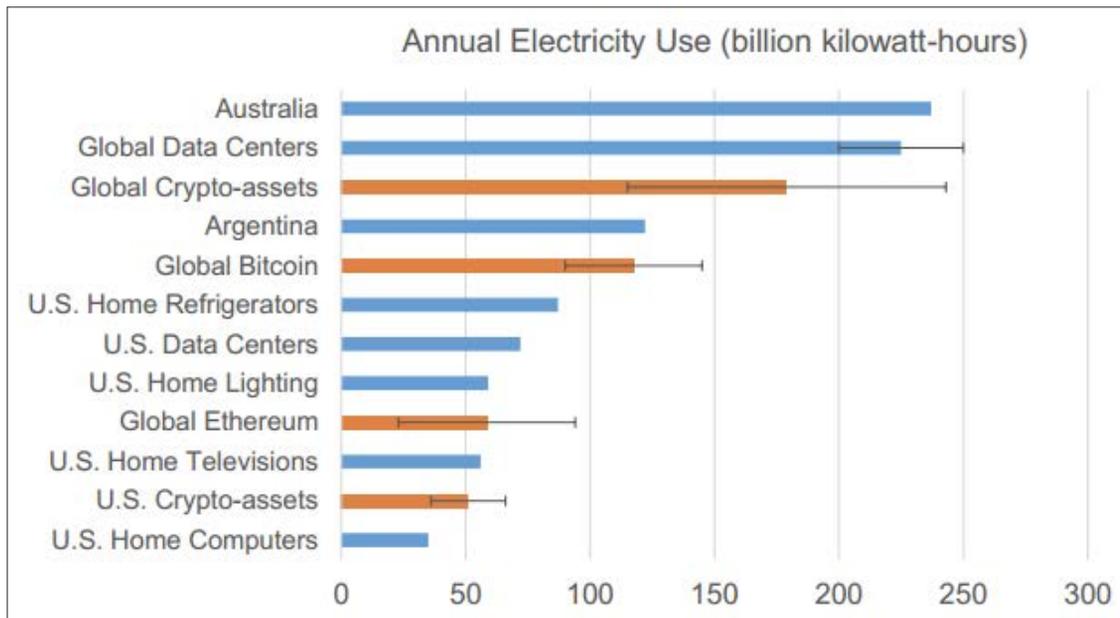


Figure 2 : Comparaison de la consommation annuelle d'électricité de plusieurs pays avec les meilleures estimations de cette consommation pour certains crypto-actifs, à partir d'août 2022 (les barres maigres représentent la marge d'erreur de l'estimation des valeurs pour certains consommateurs) – Source : The White House.

justice environnementale pour les communautés mal desservies.

Aux États-Unis, certains considèrent qu'une action du gouvernement fédéral est nécessaire pour encourager et assurer un développement responsable. Il s'agit notamment de minorer la consommation d'énergie lors du minage et d'utiliser de l'électricité propre. La recherche portant sur les actifs numériques, qui met l'accent sur les innovations que représentent les technologies de nouvelle génération, peut aider à faire progresser les objectifs des États-Unis en matière de sécurité, de confidentialité, d'équité, de résilience et de climat.

À l'instar de ce que proposent les États-Unis, la politique en matière de crypto-actifs à mettre en œuvre dans le cadre de la transition vers les énergies propres devrait être axée sur plusieurs objectifs :

- réduire les émissions de GES ;
- éviter les opérations qui augmentent le coût de l'électricité pour les consommateurs ;
- se dispenser des opérations qui réduiraient la fiabilité des réseaux électriques ;
- prévenir les impacts négatifs sur les communautés et l'environnement au niveau local.

L'idée serait de lancer un processus de collaboration entre les États, les communautés, l'industrie des crypto-actifs et d'autres acteurs pour développer des normes de performance environnementale efficaces et fondées sur des preuves pour encadrer la conception, le développement et l'utilisation responsables des technologies de crypto-actifs respectueuses de l'environnement.

Ces normes devraient inclure des règles prônant de très faibles intensités énergétiques, une faible consommation d'eau, de faibles nuisances sonores ou encore

l'utilisation d'une énergie propre par les opérateurs. Des normes qui doivent se renforcer au fil du temps pour assurer une production supplémentaire sans carbone équivalente, voire supérieure à la charge électrique correspondant aux nouvelles installations.

Il est possible également d'envisager une législation visant à limiter ou à éliminer l'utilisation de mécanismes de consensus à haute intensité énergétique pour l'extraction de crypto-actifs.

La technologie *blockchain* en soutien de l'atténuation du réchauffement climatique

La *blockchain* pourrait faciliter les échanges entre les acteurs producteurs d'énergies difficilement stockables

La technologie *blockchain* se prête particulièrement bien à la création d'infrastructures distribuées et décentralisées. Elle permet de mettre en place une gestion de l'énergie en P2P.

Cette technologie appliquée à l'énergie recouvre une multitude d'enjeux :

Garantir l'origine de l'énergie

La *blockchain* permet de certifier l'origine de l'énergie. Cela permet de distinguer l'énergie propre de l'énergie polluante et/ou non renouvelable. Les utilisateurs y sont de plus en plus vigilants dans leur consommation. Cette technologie peut permettre de s'assurer une consommation 100 % renouvelable si la production le permet. Il s'agit d'un point essentiel pour le développement et la gestion du mix énergétique futur.

Désintermédiaire et automatiser

Les *smart contracts* peuvent servir dans la gestion autonome de la distribution d'énergie au sein d'un réseau. On peut imaginer que ces *smart contracts* couplés aux *smart grids* permettent de gérer le réseau en optimisant la production et le stockage de l'électricité en fonction des besoins effectifs et prévisionnels. Avec une telle architecture, des unités de production peuvent en remplacer d'autres. Cela est primordial pour le développement des énergies renouvelables (EnR), mais aussi pour compenser l'intermittence de la production de certaines d'entre elles.

Inciter à la production d'énergie renouvelable

La *blockchain* peut être un moyen de stocker de la valeur et de récompenser certains comportements.

Le SolarCoin est une cryptomonnaie visant à promouvoir la production d'électricité photovoltaïque. La production d'un mégawattheure d'électricité au moyen de panneaux photovoltaïques donne le droit à 1 SolarCoin (SLR). Le but est de rétribuer 97 500 TWh d'électricité photovoltaïque sur quarante ans. Plusieurs fournisseurs français d'EnR acceptent le SolarCoin en tant que bon de réduction pour le paiement des factures.

Plus globalement, la *blockchain* peut être une solution très pertinente pour la création d'écosystèmes de production, de transfert et de répartition de l'énergie. La décentralisation permise par cette technologie est adaptée à la production d'énergie renouvelable.

Selon Bloomberg, « l'énergie éolienne et solaire devrait atteindre près de 50 % de la capacité de production mondiale d'électricité d'ici à 2050 ». La Banque mondiale et la Société financière internationale (SFI) estiment à près de 23 000 milliards de dollars les opportunités d'investissements intelligents sur le plan climatique dans les marchés émergents d'ici à 2030.

Un déploiement plus important des technologies énergétiques propres, notamment l'éolien et le solaire, se prête à la décentralisation, mais favorise aussi l'intermittence. Cette tendance rend nécessaire la mise en place de nouvelles structures de marché et l'élabora-

tion d'un plan d'action afin que les marchés de l'énergie puissent fonctionner efficacement.

Les principales caractéristiques de la technologie *blockchain*, telles qu'une piste d'audit immuable des transactions, un transfert de valeurs bon marché et sans frontière et l'exécution automatisée des contrats, peuvent aider à relever les défis de la mise en œuvre de l'action climatique. Plus précisément, cette technologie peut agir comme un mécanisme de transparence qui incite à réduire les émissions et peut fournir une infrastructure décentralisée pour permettre l'émergence de nouveaux modèles commerciaux en matière de financement du climat et de production d'une énergie propre.

La blockchain pour aider à la gouvernance climatique

À ce jour, les données nationales sur les émissions de GES disponibles dans la plupart des pays en développement proviennent de sources peu nombreuses et souvent incohérentes. Il n'existe donc que des estimations nationales approximatives.

L'Accord de Paris exige de tous ses signataires qu'ils fournissent des données précises et solides sur leurs émissions de GES, qu'ils valident les hypothèses concernant les scénarios d'émissions de référence actuels, qu'ils accroissent leurs ambitions au fil du temps et qu'ils suivent les progrès accomplis dans la réalisation de leurs engagements nationaux en matière de climat. Le transfert international de ces résultats d'atténuation nécessite une comptabilité solide pour garantir l'intégrité et la transparence environnementales.

La *blockchain* constitue un grand livre transparent qui permet de suivre efficacement les dons versés en faveur des causes climatiques. Avec la *blockchain*, les gouvernements et les groupes de surveillance peuvent facilement s'assurer que l'argent est bien utilisé pour financer efficacement les projets de technologies climatiques. Les gouvernements sont connus pour ne pas toujours assumer leurs responsabilités, la *blockchain* peut contribuer à résoudre ce problème.

La blockchain comme facilitateur du financement contre le réchauffement climatique

La réalisation des objectifs de l'Accord de Paris nécessitera des investissements considérables. L'Agence internationale de l'énergie (AIE) estime à 3 500 milliards de dollars la moyenne annuelle des investissements dans le secteur de l'énergie au niveau mondial, jusqu'en 2050.

Dans le cadre de l'Accord de Paris, les pays développés s'étaient déjà engagés à mobiliser 100 milliards de dollars par an (sur la période 2016-2020) pour aider les pays en développement en matière de financement climatique. Malgré ces contributions, un énorme déficit de financement persiste ; sur ce point, l'investissement privé est considéré comme un contributeur clé.

L'une des options possibles consiste à mobiliser des financements privés en mettant en place des structures

La place de marché SunContract

Cette place de marché offre une grande variété de fonctionnalités qui en font un lieu idéal pour acheter et vendre des énergies renouvelables. La plateforme SunContract, localisée en Slovaquie, compte aujourd'hui plus de 5 000 clients enregistrés dans l'UE. Ces derniers peuvent acheter et vendre de l'énergie directement entre eux, sans intermédiaire. Les activités de partage d'énergie réalisées sur cette place de marché sont toutes conformes aux cadres définis par les législations existantes.

incitatives appropriées (par exemple, des marchés du carbone) pour que les entreprises et les industries passent à des technologies à faible émission de carbone. Une autre option consiste à faciliter les investissements dans des projets rentables à faible intensité de carbone (par exemple, par le biais d'obligations vertes ou du *crowdfunding*), qui sont actuellement inhibés par des coûts de friction élevés et des mécanismes de responsabilité peu développés.

Dans les deux cas, la *blockchain* peut aider. Ainsi, ElectricChain est une plateforme de *blockchain* utilisant une application et qui, comme SolarCoin, vise à encourager le déploiement des installations solaires dans le monde entier.

Lorsque l'on fait un don à une organisation caritative environnementale, il peut être difficile de savoir où va l'argent et comment il est dépensé. La bureaucratie, la corruption et l'inefficacité sont des dérives encore courantes dans le secteur caritatif.

La technologie *blockchain* peut garantir que l'argent destiné à être une récompense pour une action en faveur de la conservation de la biodiversité ou correspondant à un don pour une cause spécifique, ne finisse pas dans des poches indécrites au travers des labyrinthes bureaucratiques. L'argent basé sur la *blockchain* pourrait même être libéré automatiquement au profit des bonnes parties en réponse à la réalisation par celles-ci d'objectifs environnementaux spécifiques.

À titre d'exemple, Bitgive et Bithope sont deux organisations caritatives qui travaillent avec des cryptomonnaies.

La *blockchain* pour aider au suivi comptable et au renforcement de la crédibilité d'une taxe carbone

Les comptabilités nationales des réductions des émissions de gaz à effet de serre, reliées par un grand livre enregistrant les transferts internationaux de ces réductions, permettent d'assurer la transparence au niveau de la responsabilité de tous les acteurs. De même, les flux financiers peuvent provenir de n'importe qui et de n'importe où dans le monde, être dirigés vers des projets spécifiques dans des conditions prédéfinies, et avec une documentation infalsifiable de chaque transaction.

Dans le système actuel, l'impact environnemental de chaque produit est difficile à déterminer, son empreinte carbone n'est donc pas prise en compte dans son prix. Cela signifie que les consommateurs sont peu incités à acheter des produits à faible empreinte carbone et que les entreprises ne sont pas plus encouragées à vendre de tels produits.

Le suivi de l'empreinte carbone de chaque produit à l'aide de la *blockchain* protégerait les données correspondantes de toute falsification et pourrait être utilisé pour déterminer le montant de la taxe carbone à appliquer au produit considéré. Si un produit à forte empreinte carbone est plus cher à l'achat, cela incite, d'une part, les acheteurs à acquérir des produits plus respectueux de l'environnement et, d'autre part, les

entreprises à restructurer leurs chaînes d'approvisionnement pour répondre à la demande de tels produits.

Un système de réputation basé sur la *blockchain* pourrait également attribuer à chaque entreprise et à chaque produit une note basée sur le carbone. Cela rendrait la fabrication plus transparente et découragerait le gaspillage et les pratiques peu respectueuses de l'environnement.

La *blockchain* comme un facilitateur de la gestion de la chaîne d'approvisionnement

La plupart des gens veulent acheter des produits fabriqués de façon éthique, mais ce type d'information est souvent indisponible et difficile à vérifier. Un produit passe par de nombreuses mains avant d'arriver en magasin. Il est très facile pour les entreprises de mentir sur la façon dont leurs produits sont fabriqués, sur les matériaux et les produits chimiques qu'elles utilisent, sur l'endroit où elles déversent leurs déchets ou sur l'équité avec laquelle elles traitent leurs employés.

Les *blockchains* peuvent être utilisées pour suivre les produits depuis le site du fabricant jusqu'à l'étagère du magasin et contribuer à prévenir le gaspillage, l'inefficacité, la fraude et les pratiques contraires à l'éthique, et ce en rendant les chaînes d'approvisionnement plus transparentes. Elles peuvent également aider les consommateurs à être mieux informés de la façon dont chaque produit a été fabriqué et expédié, afin qu'ils puissent faire des choix plus respectueux de l'environnement.

Si, par exemple, les aliments sont tracés, cela permettrait aux acheteurs de se tourner vers des produits locaux, en sachant que ceux-ci ont été, pour certains, cultivés à proximité de chez eux. Cela permettrait également de réduire les émissions de carbone, les aliments n'ayant pas à parcourir de longues distances. Les chaînes de blocs pourraient également garantir qu'un poisson vendu sur un marché aux poissons est réellement issu d'une pêche durable ou permettre de vérifier qu'un sac de café provient réellement d'un producteur du commerce équitable.

Comment la reconquête « industrielle » du numérique par l'Europe peut-elle contribuer à la neutralité carbone ?

Par Aurélie PICART

Déléguée générale du Comité stratégique de filière Industries
des nouveaux systèmes énergétiques

Pour s'assurer que la contribution du numérique à la neutralité carbone ne soit pas compensée par une hausse des usages du digital, il est nécessaire de mener une action cohérente sur trois leviers majeurs : la recherche, le changement des comportements et le développement d'une énergie décarbonée et compétitive.

Mais, plus largement, l'atteinte de nos objectifs de décarbonation et notre capacité à peser dans les négociations climatiques internationales dépendent de notre souveraineté industrielle, numérique¹ et énergétique.

Nous devons dès lors renforcer et décarboner nos filières industrielles et sécuriser nos approvisionnements, tout en mobilisant la demande du marché intérieur européen et en développant les compétences techniques clés. L'Europe a commencé à infléchir sa politique en ce sens. Il faut rapidement dégager un consensus entre les pays européens pour bâtir une politique cohérente et ambitieuse à la hauteur des challenges que représentent l'Inflation Reduction Act américain et l'inflation.

Introduction

La défense de l'environnement est devenue, avec la prise de conscience du réchauffement climatique, une des valeurs fondamentales de nos systèmes démocratiques. En France, la Charte de l'environnement de 2004 a désormais valeur constitutionnelle depuis son intégration au « bloc de constitutionnalité » à la faveur de la révision constitutionnelle du 1^{er} mars 2005.

Le numérique est au cœur de la transition environnementale et de la réindustrialisation. Il participe à la décarbonation en intervenant sur l'ensemble de la chaîne de valeur des produits, ainsi que sur la production d'énergie.

À chacune des étapes des *process* industriels – conception, extraction, achat, transformation et logistique –, les émissions de gaz à effet de serre peuvent être minimisées grâce à la modélisation (notamment avec le recours à des jumeaux numériques), la simulation, la

traçabilité et l'optimisation, en s'appuyant sur l'Internet des objets (IoT), la communication entre les machines (M2M) et, de plus en plus, en recourant à l'intelligence artificielle... La simple installation d'un système de pilotage de moteurs électriques permet d'économiser jusqu'à 30 % d'énergie ; or, seuls 7 % des moteurs dans l'industrie sont équipés d'un tel système. Les chiffres sont du même ordre pour le pilotage du chauffage dans le tertiaire.

Dans les réseaux énergétiques, le numérique permet d'accélérer l'intégration des énergies renouvelables (EnR), en anticipant leur production et les consommations et en gérant la flexibilité du réseau pour maintenir à tout instant l'équilibre entre l'offre et la demande. De plus, les *hyper data centers*, par leur capacité à moduler leur activité et donc leur demande d'électricité, pourraient jouer un rôle croissant dans la stabilité du réseau².

¹ Le terme « numérique » est entendu ici et dans la suite de l'article dans son acception large ; il désigne à la fois le *software* (logiciel, *data*...) et le *hardware* (électronique), et intègre la cybersécurité.

² IEA.

Si le recours au numérique réduit l’empreinte carbone des produits et des services, son utilisation de plus en plus prégnante dans les sociétés contemporaines conduit *de facto* à une augmentation générale des émissions carbone qui lui sont associées

En France, le secteur du numérique représentait 2 % des émissions de GES en 2019, un taux qui pourrait atteindre 7 % d’ici à 2040³.

En l’absence de normes, les données suivantes traduisent les tendances.

La fabrication et, dans une moindre mesure, l’utilisation des terminaux – téléphone, ordinateurs, capteurs, écrans... – constituent le premier poste d’émission de GES des activités numériques dans le monde (66 %). L’explosion des échanges de données (+ 20 à 35 % par an) a largement contrebalancé les économies d’énergie réalisées (jusqu’à 20 % par an) par les *data centers*. Ces derniers représentaient 20 % des émissions de GES du secteur en 2019, mais leur contribution ne cesse de croître.

Les émissions des réseaux de transport de données ne sont que peu ou pas du tout prises en considération dans l’utilisation des *clouds* situés à l’étranger, alors même que la fibre optique utilisée pour ce transport pèse sur le bilan environnemental du numérique à travers la fabrication des matériaux qui la composent. L’introduction régulière de nouvelles technologies souvent plus économes, comme la 5G, accélère

l’obsolescence des équipements et le développement de nouvelles applications, dont la diffusion fait croître, *in fine*, la consommation énergétique du secteur ; on parle en la matière d’effet rebond. Ainsi, le *streaming* s’est développé rapidement et représentait, en 2019, 60,6 % du flux de données en France⁴.

Trois leviers principaux sont mobilisables pour réduire l’empreinte carbone du numérique : les progrès technologiques, l’évolution des comportements et la décarbonation de la production électrique

En matière de recherche, les travaux visant à diminuer l’impact environnemental du numérique sont nombreux, avec pour ambition : de continuer à réduire la taille des puces (FD-SOI), de relever la fréquence de fonctionnement des composants de puissance et dissiper la chaleur produite (GaN, SiC...), de concevoir des architectures économes, d’améliorer l’efficacité du transport des données – 5G, câbles sous-marins, réseaux basse consommation pour l’IoT – ou encore de concevoir des *data centers* hyper optimisés ayant recours à la virtualisation et à la récupération de chaleur. La recherche développe des solutions pour prolonger la vie des équipements, leur réparabilité et leur recyclabilité, et ainsi réduire les impacts environnementaux de la production de ces équipements qui sont responsables de 44 % des émissions de GES du numérique.

En évitant le renouvellement trop rapide de leurs équipements⁵ et en privilégiant la réparation ou la réutili-

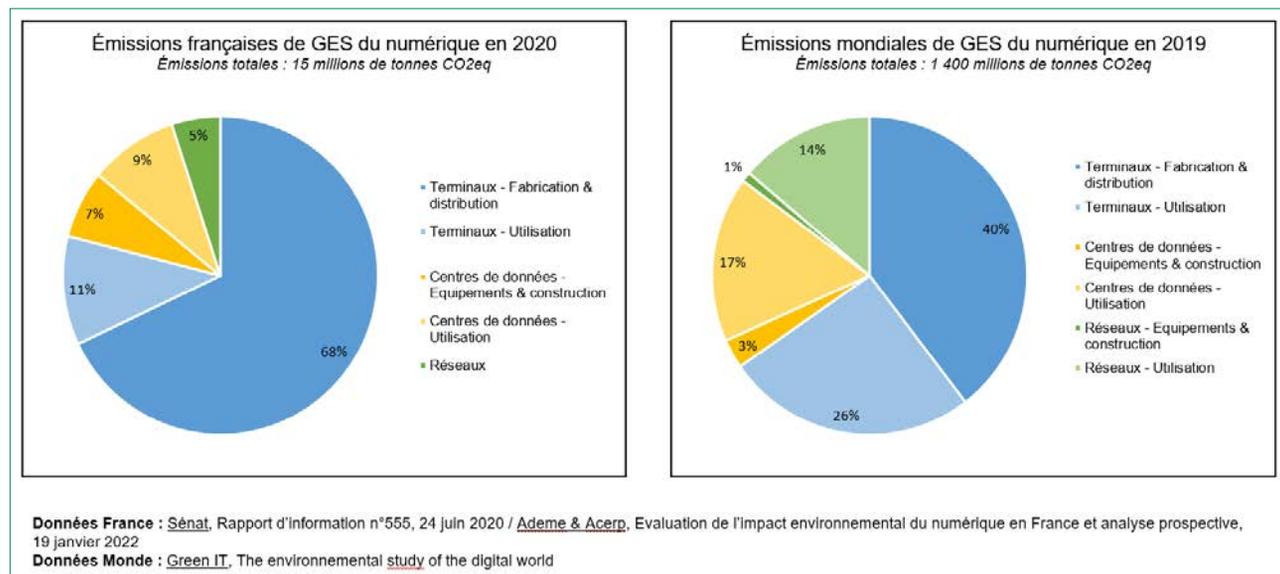


Figure 1 : Émissions françaises et mondiales de GES du secteur du numérique, par poste et étape du cycle de vie des produits et services.

⁴ SANDVINE, 2019.

³ Sénat, Rapport d’information n°555, 24 juin 2020, <https://www.senat.fr/rap/r19-555/r19-555.html>

⁵ La durée de vie moyenne d’un *smartphone* est de 23 mois en France, d’après le rapport d’information n°555 du Sénat, 24 juin 2020.

sation, les consommateurs pourraient diminuer l'impact environnemental de leur usage du numérique. Le recyclage des appareils en fin de vie se développe, un procédé encouragé par les réglementations sur l'économie circulaire. Il limite l'impact de ces équipements sur le plan des déchets et de l'extraction de nouveaux matériaux. Stimuler l'amélioration de la qualité des architectures et des codes informatiques contribue à limiter le transport de données, le nombre des requêtes et, *in fine*, la consommation énergétique.

Le numérique est un grand consommateur d'électricité. La décarbonation de la production de l'électricité est un levier majeur de réduction de l'impact environnemental du numérique tant dans son utilisation que pour la production des équipements associés. La Figure 1 de la page précédente traduit l'avantage dont bénéficie la France, avec son électricité peu carbonée : l'utilisation des terminaux et des infrastructures du numérique a en France une empreinte carbone plus faible que la moyenne mondiale. Les géants de la *Tech* se sont engagés en 2020 à décarboner leurs *data centers* d'ici à 2030 et investissent désormais massivement dans la production d'énergie renouvelable.

L'investissement dans les trois leviers, que sont la recherche, le changement des comportements et une électricité décarbonée, s'accélère sous la pression croissante des consommateurs-citoyens, des actionnaires et des pouvoirs publics. Jusqu'à présent, l'Europe a joué un rôle moteur dans la définition des objectifs et engagements internationaux, tout en développant un système de contraintes et d'incitations. En 1997, elle s'est engagée à diminuer ses émissions de GES de 8 % en signant les Accords de Kyoto. En 2005, elle a été la première région à mettre en place un marché du carbone. En 2019, elle formalisait son ambition d'être le premier continent neutre en carbone, à travers le paquet « Fit for 55 ».

Pour atteindre les objectifs ambitieux que l'Union européenne s'est fixés en matière de décarbonation et peser dans les négociations climatiques internationales, l'Europe doit retrouver une souveraineté à la fois numérique et énergétique

Pourquoi est-il d'une importance stratégique pour l'Europe de reconquérir son indépendance numérique et énergétique ?

Le numérique et l'énergie constituant des leviers essentiels pour conduire la révolution environnementale au niveau de l'Europe et constituer à cette même échelle une industrie bas-carbone, ils doivent dès lors être érigés en priorités stratégiques. Tenter de regagner une souveraineté économique devient une impérieuse obligation pour une Europe confrontée à un allié

américain devenu moins prévisible, à une Chine plus conquérante, et alors que planent au-dessus de nos têtes diverses menaces sécuritaires.

Voté en août 2022, l'Inflation Reduction Act (IRA), doté de 400 milliards de dollars pour soutenir l'industrie américaine de la transition énergétique, subventionne les achats de voitures électriques, d'éoliennes et de panneaux solaires à la condition qu'ils soient produits sur le sol américain. Le Président Joe Biden a également signé dans le même temps le Chips and Science Act, qui apporte à l'industrie américaine 280 milliards de dollars de subventions, dont 53 milliards pour rapatrier sur le sol américain la production de semi-conducteurs, une production nationale qui, aujourd'hui, ne représente plus que 10 % de la production mondiale, contre 40 % en 1990.

La Chine a développé en quelques années une véritable industrie compétitive de la *Tech*. Parties de zéro en 1990, les entreprises chinoises (Huawei, Tik Tok, Alibaba...) sont devenues des concurrentes en passe de menacer l'hégémonie américaine, ce qui a suscité de vives réactions politiques aux États-Unis depuis 2017, qui se sont traduites par l'adoption de mesures protectionnistes : interdiction pour certains acteurs chinois de commercer aux États-Unis, interdiction pour les acteurs américains d'exporter vers la Chine certaines technologies sensibles... Ces mesures viennent renforcer l'arsenal protectionniste américain, dont les Européens sont également victimes. Nos entreprises sont assujetties à la législation américaine au travers des règles extraterritoriales qui ne cessent de se renforcer, et ce quelle que soient les majorités politiques successives au pouvoir à Washington. Toute entreprise utilisant une technologie électronique américaine doit se conformer strictement à l'EAR (Export Administration Regulation), et, dans ce cadre, peut être amenée à donner aux autorités américaines un accès à ses locaux et à l'ensemble des *data* relatives à l'utilisation de cette technologie.

L'Europe a longtemps privilégié la concurrence et l'intérêt à court terme du consommateur en encourageant les différents acteurs économiques à se tourner vers les fabricants, fournisseurs et opérateurs les moins chers, et ce quelle que soit leur nationalité. La France n'a pas échappé à cette tendance. Cette politique a conduit à des transferts de compétences hors d'Europe, à une désindustrialisation, laquelle s'est accompagnée d'une baisse de l'attractivité des filières techniques et scientifiques et d'un tarissement des investissements dans la recherche. Elle a également réduit notre capacité à lutter contre le réchauffement climatique. On ne peut réellement se réjouir d'avoir vu les émissions de GES par habitant liées à la demande intérieure française chuter de 30 % entre 1995 et 2018, alors que, sur cette même période, les émissions par habitant liées aux importations ont crû de 78 %⁶.

Fort heureusement, l'Europe a pris conscience de l'impasse dans laquelle nous nous étions engagés. La nécessité de sa réindustrialisation est devenue pour elle une évidence stratégique face aux difficultés ren-

⁶ Haut Conseil pour le climat.

contrées à la suite des fermetures des frontières liées à la pandémie de Covid : des ruptures permanentes dans la fourniture de certains composants électroniques, des difficultés d'approvisionnement en panneaux solaires ou, plus généralement, des interrogations sur la sécurisation d'approvisionnements stratégiques pour notre industrie dans un contexte d'augmentation importante de la demande mondiale, notamment en énergie et métaux, et des tensions géopolitiques.

Comment reconquérir notre souveraineté ?

Il serait illusoire de penser que nous pouvons rapidement recouvrer notre souveraineté dans tous les secteurs économiques. Il nous faut donc sélectionner les « filières de souveraineté » et nous donner les moyens stratégiques et financiers de les reconstituer. Il n'y aura pas de reconquête industrielle sans maîtrise du numérique, ni sans énergie compétitive, décarbonée et sécurisée.

Pour autant, l'autarcie n'est ni souhaitable ni possible. L'ouverture réciproque des marchés reste une nécessité. Elle contribue aux avancées technologiques et à la baisse des prix des produits et des services proposés aux consommateurs. Au-delà, l'Europe a besoin de partenaires, car elle ne pourra jamais à elle seule répondre à l'ensemble de ses besoins. Il faudra bien qu'elle consente à certaines dépendances, mais en évaluant les risques dans le but de les minimiser. Elle devra aussi choisir et contrôler certaines interdépendances. Mais, avant tout, l'Europe doit veiller à établir des relations de commerce international équitables.

La recherche de souveraineté doit désormais reposer sur des stratégies visant à maintenir l'accès aux ressources nécessaires pour y parvenir, tout en favorisant un lien avec la demande européenne.

Il est donc important de sécuriser l'approvisionnement en composants électroniques, en métaux et, plus généralement, en intrants, quels qu'ils soient. Dans ce domaine, nous ne bénéficions pas des mêmes atouts que la Chine qui dispose d'un avantage stratégique majeur en contrôlant une partie significative des ressources minérales dont ses entreprises nationales bénéficient en priorité et à un coût préférentiel. L'intégration des grands groupes pétroliers internationaux, du puits à la pompe, a permis à l'Europe de trouver plus facilement des sources d'approvisionnement alternatives au gaz naturel et aux produits pétroliers traditionnellement importés de Russie. En Chine, BYD est devenu en moins de dix ans un leader mondial du véhicule électrique en adoptant un modèle de groupe intégré sur l'ensemble de la chaîne, allant de l'extraction à la production du véhicule. À défaut d'intégration verticale, la coopération au sein des filières entre les *gigafactories* et des acheteurs qui s'engagent sur des contrats de long terme (*off-take*) est essentielle pour réduire le risque lié à ces investissements.

Le succès de cette politique reposera sur notre capacité à disposer d'options géographiques et technologiques multiples, à structurer une stratégie efficiente et à la

financer massivement, afin que l'Europe puisse commercer équitablement avec la Chine et les États-Unis.

Comment l'Europe et la France opèrent-elles ?

L'objectif de souveraineté numérique a été reconnu par le Conseil européen en 2019 et celui de « souveraineté énergétique » en 2022.

Dès 2013, dans le secteur de l'électronique, l'UE a concédé, au travers des IPCEI – Important Project of Common Interest –, une certaine souplesse aux États européens dans leur soutien à l'industrialisation des produits ; une décision en rupture avec sa doctrine habituelle d'un soutien se focalisant uniquement sur l'innovation. Depuis, les IPCEI portant sur les secteurs stratégiques se sont multipliés (que ceux-ci concernent les batteries en 2018, l'hydrogène en 2022 ou encore le *cloud* (un IPCEI en cours de préparation)). L'Innovation Fund s'inscrit dans la même logique et favorise la mise sur le marché de technologies innovantes à faible intensité carbonique.

En 2022, sous l'impulsion de la France, l'UE a adopté le Chip Act et a lancé le premier IPCEI dans le domaine de l'électronique en réponse aux initiatives américaines et chinoises. L'objectif est de parvenir à produire sur le sol européen 20 % du marché mondial des semi-conducteurs en 2030 ; un marché qui devrait doubler à cet horizon pour atteindre 1 000 milliards d'euros. La France a, pour sa part, injecté 5 milliards d'euros dans le cadre du plan « France 2030 » pour assurer le développement et l'industrialisation de technologies électroniques dans le but de doubler ses capacités en la matière d'ici 2026-2027. Cette politique conjointe vise la production en Europe à la fois de technologies matures et de technologies d'avenir, comme les micro-puces d'une taille inférieure à 5 nanomètres. Ce plan « Électronique » s'inscrit dans une approche européenne plus large de reconquête de sa souveraineté numérique, qui inclut la cybersécurité, la maîtrise de ses données et le développement d'un *cloud* souverain, et qui pourrait s'étendre aux logiciels.

En ce qui concerne l'énergie, l'Europe doit disposer d'une électricité largement décarbonée et compétitive, et veiller à la sécurisation de la production des équipements associés (panneaux solaires, éoliennes, centrales nucléaires...). Au-delà des IPCEI, l'Europe doit travailler à un « IRA européen ».

Pour sa part, la France, grâce au nucléaire, a bénéficié durant plusieurs décennies d'un avantage compétitif. Comme le Président de la République l'a souligné dans son discours de Belfort, et dans la perspective d'une forte croissance de l'électrification des usages (mobilité, industrie), la France doit investir pour développer un mix électrique combinant EnR et production nucléaire, seul moyen de sortir des énergies fossiles d'ici à 2050. Dès lors, les énergéticiens doivent fournir, dans les délais, de nouveaux moyens de production compétitifs, dont la chaîne de valeur soit de plus en plus sécurisée au niveau européen. Ne renouvelons pas l'erreur commise dans le photovoltaïque, où l'Europe, alors leader sur le marché mondial, n'a pas réagi

au *dumping* des industriels chinois, qui ont inondé le marché européen de panneaux à bas coûts, concurrençant les fabricants européens qui ont progressivement disparu.

Une réindustrialisation responsable exige également la mobilisation des ressources du sous-sol européen, dont l'exploitation et la transformation ont été abandonnées en Europe, en particulier pour des raisons écologiques, ainsi que la mise en place d'une véritable politique d'économie circulaire (réparabilité, prolongement de la durée de vie et recyclage des équipements). L'UE en a pris conscience et s'organise en conséquence. En France, le rapport demandé par l'État à Philippe Varin ouvre des perspectives sur les politiques à conduire pour disposer en Europe d'un approvisionnement en ressources minérales à faible impact environnemental à travers l'exploitation minière et le recyclage.

Points de vigilance :
un équilibre des relations commerciales ;
des carrières et des formations attractives ;
une démarche structurée et financée ;
une volonté politique partagée

Qu'il s'agisse du numérique, de l'électronique, de la production d'énergie ou des métaux, la réindustrialisation de l'Europe ne pourra s'opérer que si le secteur de l'industrie bénéficie à plein des économies d'échelle qu'un marché domestique solvable de 450 millions de consommateurs permet d'activer. Tous les grands pays protègent leur marché intérieur. Nous devons donc veiller à l'équilibre de nos relations commerciales, sans nous interdire de favoriser l'industrie communautaire à travers la commande publique et de protéger nos *data* et nos entreprises contre les comportements prédateurs, qui conduisent certains de nos fleurons technologiques à passer sous contrôle étranger. Il serait également utile de repenser notre politique européenne de la concurrence, qui au nom de la protection du consommateur, sanctionne les intégrations verticales, alors qu'elles facilitent le contrôle de l'ensemble de la chaîne de valeur et donc la résilience de tout le système.

Un investissement soutenu dans la formation scientifique et technique de haut niveau est primordial pour mener à bien la réindustrialisation de l'Europe, qui ne pourra se faire sans disposer d'une armée de chercheurs, d'ingénieurs et de techniciens à même de développer, d'industrialiser et de maintenir les nouvelles technologies. Le principal défi est celui de l'attractivité de l'industrie et des sciences, notamment pour attirer les talents justifiant des meilleurs niveaux de qualification. Cela ne peut se faire sans réinvestir dans l'enseignement – du primaire à l'enseignement supérieur – pour accompagner et former les enseignants, donner accès aux plateformes technologiques... et, plus généralement, rebâtir l'attractivité de notre recherche publique.

Les États-Unis semblent avoir pris toute la mesure de cet enjeu, notamment en conditionnant leur soutien public à la formation et à l'emploi direct de leurs ressortissants, dans le cadre de l'IRA. Ils ont pris conscience de la faiblesse que représente le fait que seuls 7 % des jeunes Américains font des études d'ingénieur.

L'économie américaine pour concurrencer la Chine ne saurait dépendre uniquement des cerveaux chinois venant travailler aux États-Unis.

La réussite d'une telle politique au sein de l'Europe suppose que les pouvoirs publics se dotent des moyens humains et financiers capables de la mettre en œuvre. La mise en place d'un fonds souverain européen semble à ce titre stratégique. Mais, plus que tout, il faut qu'elle bénéficie d'un consensus de l'ensemble des pays européens et de coopérations industrielles renforcées et équilibrées entre les États membres.

Tel n'est pas encore forcément le cas. Ainsi, Arno Pons, qui dirige le *think tank* Digital New Deal, soulignait récemment : « [...] Les différences de vision sur ce sujet entre la France et l'Allemagne sont de plus en plus visibles et dessinent une ligne de fracture dangereuse pour l'unité de l'Union européenne. La France définit la souveraineté numérique par les infrastructures, quand les Allemands préfèrent parler de souveraineté des données (*Datenhoheit*). Pour l'Allemagne, la souveraineté est un frein à l'exportation de ses biens, quand la France pense qu'elle est une digue de protection pour ses valeurs. En France, cette dépendance aux infrastructures numériques est vécue comme une menace pour nos industries, tandis qu'en Allemagne, le choix des centres de données américains (les *hyperscalers*, comme Amazon-AWS, Microsoft Azure, Google-Cloud), est vécu comme une garantie de pouvoir pénétrer le marché américain »⁷. Cette différence d'approche entre les deux pays les plus puissants d'Europe n'est ni récente ni spécifique au numérique. On l'a observée dans le domaine de l'énergie, où l'Allemagne privilégiait les fournitures de gaz russe moins chères et favorisant donc la compétitivité de son industrie, alors que la France a toujours diversifié son mix et ses fournisseurs pour garantir sa sécurité d'approvisionnement. Il en a toujours été de même en matière de Défense, où Berlin s'est toujours rangé derrière le bouclier américain, lorsque Paris cherchait à promouvoir une Défense européenne. Il ne faut pourtant pas voir ces divergences comme un obstacle rédhibitoire. Il appartient aux responsables politiques, au niveau communautaire comme au plan national, de trouver des convergences.

Conclusion

Face aux profondes modifications géopolitiques en cours, l'Europe doit réagir et travailler à la sauvegarde de sa puissance industrielle, en particulier en matière numérique et énergétique, pour continuer à peser dans les négociations internationales et porter ses valeurs environnementales, en intégrant pleinement un objectif de développement de l'industrie de la transition énergétique en Europe.

⁷ « Souveraineté numérique : pour un Plan Schuman de la donnée », *Questions d'Europe*, Fondation Robert Schuman, n°652, 16 janvier 2023, <https://www.robert-schuman.eu/fr/doc/questions-d-europe/qe-652-fr.pdf>

L'Europe dispose d'atouts considérables : un marché intérieur solvable, des infrastructures développées, des entreprises internationales, des laboratoires de recherche et des régimes politiques propices à l'innovation. Ces atouts sont menacés tant par l'IRA que par l'inflation qui touche l'Europe de manière ciblée ; il est urgent de les protéger. La volonté politique européenne de se repositionner sur les filières stratégiques (le numérique, l'électronique, l'énergie, les matériaux...) doit s'accompagner de la mise en place d'un écosystème cohérent pour développer son industrie : réciprocity des relations commerciales internationales, en particulier avec les grands pôles industriels que sont les États-Unis, la Chine, la Russie et l'Inde ; soutien cohérent du continuum recherche-innovation-industrialisation, comme cela a été enclenché avec les IPCEI ; politiques adaptées de concurrence sur le marché intérieur ; protection des entreprises stratégiques et des *datas* ; investissement public massif dans la formation scientifique et technique, et ce dès le plus jeune âge.

Comment concilier décarbonation et compétitivité de l'industrie ?

Par Romain BONENFANT

Chef du service de l'Industrie à la direction générale des Entreprises

La maîtrise du changement climatique impose de décarboner notre industrie. Cette transformation structurelle nécessite un cadre réglementaire adapté pour assurer une concurrence équitable entre l'industrie européenne et celle des pays tiers, et créer les conditions propices à l'investissement privé dans des projets de décarbonation. Des ruptures technologiques sont toutefois nécessaires pour atteindre les objectifs compatibles avec les enjeux climatiques. Le secteur privé ne pourra entièrement les financer compte-tenu des risques associés. Dans ce contexte, la décarbonation de l'industrie doit être planifiée pour en optimiser les coûts et permettre de concentrer le soutien public là où il est le plus nécessaire.

Décarboner l'industrie relève d'un impératif écologique qui ne fait pas débat au regard de l'enjeu de maîtrise du changement climatique. La trajectoire, le cadre et les moyens permettant d'atteindre cet objectif sont déterminants pour la compétitivité de notre industrie. Il s'agit, d'une part, dans un contexte de concurrence internationale, de rendre possible cette décarbonation pour la plupart des marchés industriels et, d'autre part, d'en faire un levier de réindustrialisation, alors que les innovations « vertes » redistribuent les cartes sur des marchés établis. Dans le cadre des orientations fixées par le gouvernement, la direction générale des Entreprises accompagne cette nécessaire transformation structurelle de notre tissu industriel.

Réindustrialisation et décarbonation vont de pair

En 2021, l'industrie était à l'origine de 18 % des émissions totales de gaz à effet de serre en France, soit 74,1 MtCO₂e/an. Peut-être à rebours de l'image associée à l'industrie dans l'opinion publique, ces émissions sont d'un ordre de grandeur comparable à celles du secteur de l'agriculture ou encore de celui du bâtiment et sont d'un tiers inférieures à celles du secteur des transports. Elles ont par ailleurs été réduites de 47 % depuis 1990 (139,3 MtCO₂e/an), ce qui constitue la baisse la plus forte parmi les grands secteurs émetteurs. S'il est difficile de quantifier précisément les causes de cette baisse marquée, les gains d'efficacité dans les processus industriels, permis par le progrès technique, apparaissent comme le facteur prépondérant, devant l'impact mécanique du phénomène tendanciel de la désindustrialisation. L'industrie chimique a notamment

réduit ses émissions de protoxyde d'azote (N₂O), un gaz à effet de serre très puissant, dont le potentiel de réchauffement est 298 fois supérieur à celui du CO₂. Le développement du recyclage de l'acier et d'autres métaux non ferreux a également été un levier important de réduction des émissions de l'industrie.

Au demeurant, l'enjeu associé à la maîtrise du réchauffement climatique porte bien évidemment sur l'empreinte carbone de la France, c'est-à-dire les émissions associées aux produits et services répondant à la demande française, indépendamment de leur lieu de production. À cette aune, la désindustrialisation, qui a fait parfois disparaître les usines de nos paysages, n'a pas pour autant eu pour conséquence de réduire à due proportion les émissions. Au contraire, l'intensité carbone de la production manufacturière française est en moyenne inférieure à celle des produits importés. Les importations françaises représentent désormais 50 % de son empreinte carbone¹. Par ailleurs, l'industrie est indispensable pour produire les solutions qui permettront de décarboner l'économie : véhicules électriques, bâtiments à faible empreinte carbone, équipements pour les énergies renouvelables... La politique de réindustrialisation, engagée notamment par le biais de France Relance, puis de France 2030, s'inscrit donc en cohérence avec l'objectif de maîtrise du changement climatique.

¹ Sources : SDES/MTE, « L'empreinte carbone de la France de 1995 à 2021 », *Données et études statistiques*, <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/l'empreinte-carbone-de-la-france-de-1995-2021> ; OCDE : *Input-Output Tables (IOTs)*, <https://www.oecd.org/sti/ind/input-outputtables.htm>

Le plan de relance a permis de renforcer la trajectoire de décarbonation de l'industrie, mais une accélération est encore nécessaire pour atteindre les objectifs fixés au niveau européen

Dans le cadre de l'Accord de Paris sur le climat, la France s'est engagée à la neutralité carbone à l'horizon 2050. En cohérence avec cet objectif de neutralité climatique, les chefs d'État ou de gouvernement européens se sont engagés à réduire les émissions de gaz à effet de serre de l'Union européenne d'au moins 55 % entre 1990 et 2030, ce que la Commission européenne a décliné dans sa proposition de paquet législatif « Fit for 55 ».

Au niveau national, la deuxième stratégie nationale bas-carbone (SNBC) adoptée en 2018 fixait jusqu'alors un objectif ambitieux de réduction des émissions de l'industrie de - 35 % sur la période 2015 à 2030. Pour y parvenir, l'État a apporté, dans le cadre de France Relance, un soutien massif et sans précédent aux actions de décarbonation des industriels : 1,2 Md€ de soutien public a ainsi bénéficié à 244 projets et a généré près de 5 Mds€ d'investissement. Cela a permis d'éviter 4,7 MtCO₂e/an, soit 5 % des émissions de l'industrie rapportées à l'année 2015. L'État a ainsi rendu possibles de nombreux investissements relatifs à :

- l'efficacité énergétique : par exemple, en réduisant les émissions carbone des équipements de cuisson des légumes dans une conserverie de la Somme (Bonduelle, à Estrées-Mons) ;
- la décarbonation des procédés : par exemple, en installant une ligne de chauffage électrique par induction dans l'usine d'un fabricant d'alliages de nickel et d'acier dans la Nièvre, afin de limiter le recours à des fours à gaz (Entreprise Aperam Alloys Imphy, à Imphy) ;
- la chaleur renouvelable : par exemple, un projet de chaufferie biomasse valorisant des bois en fin de vie dans l'industrie papier-carton, dans le Finistère (PDM Industries, à Quimperlé).

Le renforcement des objectifs au niveau européen doit désormais se décliner à l'échelle française dans le cadre de la troisième stratégie nationale bas-carbone en cours d'élaboration. Le Président de la République a réuni le 8 novembre 2022 les filières et les 50 sites industriels les plus émetteurs et engagé, à cet effet, une démarche de planification de la décarbonation de l'industrie, appelant les industriels à doubler leurs efforts dans les dix prochaines années.

L'Union européenne est l'échelon pertinent pour concilier les objectifs de décarbonation avec une concurrence équitable entre l'industrie européenne et celle des pays tiers

Pour déployer à grande échelle cette dynamique de décarbonation, le système européen de quotas d'émissions, dont l'exigence se renforce à ce niveau dans le cadre du paquet « Fit for 55 », constitue un levier puissant, permettant d'envoyer un signal-prix aux entreprises les incitant à la décarbonation de leurs procédés. 78 % des émissions de l'industrie sont concernées par ce mécanisme, qui s'avère efficace pour viabiliser l'équation économique de nombreux projets d'amélioration de l'efficacité énergétique des chaînes de production : par exemple à travers l'électrification, l'isolation et le calorifugeage des équipements ou la récupération de chaleur.

Mais ces incitations financières ne sont efficaces que si elles ne remettent pas en cause la compétitivité relative des entreprises européennes par rapport à leurs concurrentes internationales. À cette fin, la France a soutenu, notamment à l'occasion de la présidence française de l'Union européenne, la mise en place d'un mécanisme d'ajustement carbone aux frontières (MACF). En introduisant une tarification carbone d'une sélection de produits importés intensifs en émissions (acier, ciment, aluminium, engrais...), le MACF permettra de rétablir une concurrence équitable entre l'industrie européenne, qui est soumise à un prix du carbone, et les producteurs extra-européens, même si des points d'attention demeurent dans la mise en œuvre de ce dispositif, notamment sur les effets du périmètre restreint des produits concernés sur la compétitivité des secteurs en aval et sur celle des exportateurs. Ce mécanisme marque, dans son principe, une rupture par rapport à l'approche européenne de réduction des émissions, résultant d'une prise en compte affirmée des enjeux de compétitivité de l'industrie.

La réglementation sectorielle est également un instrument pertinent pour maintenir la compétitivité de notre industrie, tout en la soumettant à des exigences fortes en matière écologique. Le règlement européen sur les batteries permettra ainsi d'interdire, en 2027, les batteries importées dont le contenu carbone est trop élevé. Le règlement Écoconception, en cours de négociation et de portée plus large, pourrait également être un vecteur efficace de l'introduction de normes sectorielles favorisant les produits les plus vertueux sur le plan écologique. Par son marché intérieur et la réglementation associée, l'Union européenne dispose des leviers pour mettre en cohérence le niveau d'exigence imposé à l'industrie européenne avec le comportement des consommateurs.

La décarbonation de l'industrie passe pour partie par des sauts technologiques nécessitant le soutien financier de l'État

Ce cadre réglementaire incitatif à la décarbonation doit permettre de mobiliser en premier rang le financement privé pour réaliser les projets rentables des industriels en la matière. Néanmoins, les travaux menés par la direction générale des Entreprises avec les filières industrielles montrent que des ruptures technologiques majeures sont requises pour atteindre les objectifs ambitieux fixés aux niveaux européen et français. Il s'agit notamment de repenser des procédés industriels historiques qui sont intrinsèquement générateurs d'émissions, en s'engageant dans de nouvelles voies de production plus vertueuses : par exemple, produire de l'acier sans charbon, en utilisant de l'hydrogène ; réduire la proportion de clinker dans le ciment ; électrifier les fours verriers ; ou encore, développer la production d'aluminium sans générer d'émissions, grâce à l'anode inerte.

Pour ces projets de rupture nécessitant des innovations technologiques majeures, un soutien public peut s'avérer nécessaire dans une proportion permettant de réduire à un niveau acceptable le risque que représentent les investissements correspondants pour les industriels. Le programme France 2030 prévoit ainsi de consacrer 5,6 Mds€ pour faire émerger ces nouvelles technologies. Dans le cadre d'un projet important d'intérêt européen commun (PIIEC), c'est-à-dire d'un ensemble structuré de projets au niveau européen, la France a également fait le choix de financer des projets de décarbonation de l'industrie ayant recours à de l'hydrogène.

Certaines technologies de rupture sont identifiées comme étant d'un grand intérêt pour réduire les émissions les plus coûteuses, notamment la production d'hydrogène par électrolyse ou la capture et le stockage du carbone. Mais il ne faut pas négliger pour autant d'autres technologies qui pourraient proposer des solutions plus efficaces sur certains procédés, en s'appuyant sur différents vecteurs énergétiques : biomasse, électricité et hydrogène, mais aussi chaleur renouvelable/solaire thermique, ou encore énergies carbonées avec captage pendant une période de transition. L'industrie fait partie des secteurs difficiles à décarboner, car une grande partie de ses activités repose sur des procédés chimiques ayant une efficacité limitée sous l'effet de la thermodynamique, ainsi que sur des apports de chaleur haute température, pour laquelle la combustion reste une solution de référence.

Sans exclure *a priori* de solutions, une approche de neutralité technologique absolue par l'État ne serait pas optimale : il convient de tenir compte de l'utilité future pressentie de ces technologies au regard de leur trajectoire prévisible de coûts par rapport aux autres solutions comparables, ainsi que de leur champ d'application.

Enfin, la logique de coproduction et d'économie circulaire sont des leviers présentant des maturités hété-

rogènes. Elles nécessitent en outre un changement profond des chaînes de valeur industrielles et des logiques de conception, un changement qui doit être accompagné par l'État.

Au-delà de la dynamique individuelle des projets, une planification à différents niveaux apparaît nécessaire pour orchestrer la décarbonation des sites industriels sur le territoire

Il convient de relever plusieurs niveaux de concentration dans les émissions des sites industriels. Quatre secteurs regroupent 85 % des émissions de l'industrie française : la chimie, la métallurgie, la production de matériaux de construction (comme le ciment et le verre) et les industries agroalimentaires. Par ailleurs, 50 sites industriels sont responsables de 54 % de ces émissions. Enfin, des bassins industriels majeurs concentrent une large partie de ces sites les plus émetteurs, notamment Dunkerque, Fos-sur-Mer ou encore l'axe Seine.

Cette inégale répartition des émissions appelle une approche différenciée pour maximiser l'impact de l'accompagnement de l'État sur la décarbonation. Le Président de la République a ainsi annoncé la mise en place d'une planification de la décarbonation de l'industrie.

Tout d'abord, au niveau des filières industrielles, où, depuis 2019, celles qui sont les plus émettrices ont produit, en lien avec la direction générale des Entreprises, des feuilles de route de décarbonation. Ces feuilles de route vont être approfondies pour atteindre un niveau d'ambition compatible avec les objectifs européens. Elles permettent notamment de dresser un état des lieux des gisements de décarbonation accessibles, des technologies disponibles pour les exploiter et des ruptures technologiques à opérer.

Ensuite, au niveau des sites industriels, le Président de la République a souhaité que les 50 sites les plus émetteurs s'engagent au travers de contrats de transition écologique sur leur trajectoire de décarbonation, en identifiant les conditions.

Ces éléments permettront de dégager une vision plus fine des technologies à développer ou à déployer largement dans la perspective de décarboner notre industrie, en particulier s'agissant de l'utilisation de l'hydrogène ou du recours au captage, au stockage et/ou à la réutilisation du carbone.

Enfin, cette planification de la décarbonation doit se décliner au niveau local, notamment afin de programmer au mieux les besoins en infrastructures nécessaires à la décarbonation : production et distribution d'hydrogène bas-carbone, infrastructures de captage du CO₂, réseaux électriques... Cet effort d'organisation

est indispensable pour créer les conditions propices aux investissements de décarbonation des industriels, et ce en mutualisant et en dimensionnant au mieux les infrastructures associées.

Les 26 000 TPE/PME industrielles doivent faire l'objet en parallèle d'une attention particulière. Les dispositifs proposés dans le cadre du plan de relance aux industriels pour soutenir leur décarbonation ont eu un moindre succès pour cette catégorie d'entreprises que pour celles de plus grande taille. Un effort de conviction semble donc encore nécessaire pour s'assurer que toutes s'engagent dans une démarche de transition écologique. À cette fin, le Président de la République a annoncé un plan de sensibilisation et d'accompagnement les visant spécifiquement.

Conclusion

La maîtrise du changement climatique impose de revoir en profondeur nos modes de production. Cette transformation structurelle doit être organisée pour en optimiser les coûts et assurer le soutien financier public le plus efficace. Elle doit également se faire dans un cadre de concurrence équitable, notamment entre l'Union européenne et les pays tiers, pour devenir un atout en termes de compétitivité. C'est à ces conditions que décarbonation et réindustrialisation pourront se conjuguier efficacement.

Le numérique, allié ou ennemi de la transition écologique ?

Par Claire TUTENUIT

Déléguée générale d'Entreprises pour l'Environnement (EpE)

Et Benoît GALAUP

Responsable Numérique et Environnement d'EpE

Caractérisée par un rythme d'innovation extrêmement rapide, la révolution numérique en cours transforme nos notions du temps et de l'espace et modifie profondément nos façons d'accéder à la connaissance, aux autres et à la consommation. Utilisées à bon escient, ces technologies peuvent apporter de nombreux bénéfices. Mais, aujourd'hui, elles sont surtout à l'origine de répercussions importantes sur l'environnement. L'enjeu nouveau pour les entreprises est donc de réduire leur empreinte, tout en poursuivant leur transformation numérique. Au sein de la commission Numérique et Environnement d'EpE, près de soixante grandes entreprises ont analysé les conditions d'une adoption accélérée d'un numérique à plus faible empreinte et utile à la mise en œuvre de leur transition écologique et celle de la société. La publication « Le numérique, allié ou ennemi de la transition écologique ? », qui est la synthèse de ces travaux, fait état de résultats encourageants et suggère l'adoption de comportements plus sobres pour conduire simultanément la transition écologique et la transition numérique.

La révolution numérique bouleverse le fonctionnement de nos sociétés

« La révolution numérique en cours aura des effets au moins aussi considérables qu'en leur temps, l'invention de l'écriture, puis celle de l'imprimerie » (Michel Serres, 2015)¹. Cette révolution se caractérise par un rythme d'innovation extrêmement rapide et marque l'entrée dans une ère où l'application des technologies numériques offre de très nombreuses possibilités et redéfinit notre quotidien. Ces technologies transforment nos notions du temps et de l'espace et modifient profondément nos façons d'accéder à la connaissance, aux autres et à la consommation. Elles déterminent aujourd'hui nos modes de vie, conditionnent et bouleversent le fonctionnement de nos sociétés et celui des acteurs économiques.

Bien que la valeur créée par l'économie numérique soit difficile à mesurer du fait du manque d'une définition consensuelle, la Conférence des Nations unies sur le

commerce et le développement² l'évalue néanmoins entre 4 et 15,5 % du PIB mondial de 2019.

En France, les dépenses liées au numérique auraient représenté près de 6 % du PIB de 2019³. Depuis, la crise sanitaire a nettement renforcé le recours au numérique. Le nombre de personnes dotées d'équipements numériques a continué de croître en 2020⁴ : le *smartphone* a poursuivi son ascension (84 % des personnes en sont équipées, soit 7 % de plus qu'en 2019), pour une durée de vie de ces appareils estimée à 23 mois seulement⁵. En parallèle, les usages des équipements numériques

² Rapport sur l'économie numérique 2019, « Création et captation de valeur : incidences sur les pays en développement », Nations unies, 2019, https://unctad.org/fr/system/files/official-document/der2019_overview_fr.pdf

³ Étude Markess, <https://comarketing-news.fr/infographie-le-poids-du-numerique-en-france/>

⁴ CREDOC, *Baromètre du numérique*, édition 2021, <https://www.credoc.fr/publications/barometre-du-numerique-edition-2021>

⁵ Sénat, rapport d'information fait au nom de la commission de l'aménagement du territoire et du développement durable par la mission d'information sur l'empreinte environnementale du numérique. Rapporteurs : MM. Hervé Maurey, président de la commission, Patrick Chaize, président de la mission d'information, Guillaume Chevrollier et Jean-Michel Houllégatte. Enregistré à la Présidence du Sénat, le 24 juin 2020, <https://www.senat.fr/rap/r19-555/r19-555.html>

¹ « L'innovation et le numérique par Michel Serres », France Culture, 18 mai 2015, <https://www.radiofrance.fr/franceculture/l-innovation-et-le-numerique-par-michel-serres-1777489>

ont également augmenté : le nombre des internautes (92 %) et la part des individus achetant en ligne (76 %) ont aussi connu une croissance importante, respectivement de 4 et 14 % en 2020. Le volume de données mobiles consommées a augmenté de 36 % en 2020 et de 21,5 % en 2021⁶.

Les entreprises sont donc directement concernées par cette transformation profonde, qui leur impose de s'y adapter, au risque de perdre en compétitivité, et leur offre de nombreuses opportunités : automatisation et accompagnement de certains procédés, renforcement de la sécurité, exploitation de nouvelles capacités de collecte, de stockage et de traitement de l'information qui permettent de mieux informer la prise de décision ou de l'automatiser. Pour les saisir pleinement, les entreprises investissent dans des technologies à usage social, dans des applications mobiles, des technologies d'analyse et de traitement de données, dans la sécurité et, de façon plus importante, dans le *cloud*. En conséquence, les entreprises dont le numérique est le cœur de métier connaissent une forte croissance en France : entre 2009 et 2020, le chiffre d'affaires du secteur du numérique⁷ a ainsi augmenté de 20 %⁸.

Le numérique est à l'origine d'externalités positives et d'impacts environnementaux

Utilisées à bon escient, les technologies numériques peuvent contribuer à la préservation de l'environnement : les innovations digitales peuvent en effet être utilisées pour faciliter les efforts d'atténuation et d'adaptation aux effets du changement climatique, par exemple en optimisant la génération et la distribution d'énergies renouvelables, en accompagnant le développement de systèmes de transport intelligents, de modes de production et de consommation plus durables, ou encore pour améliorer la gestion de l'utilisation des sols et le développement des villes intelligentes⁹.

Mais, aujourd'hui, elles sont surtout à l'origine d'atteintes considérables à l'environnement : le bilan carbone du numérique français s'élève à 2,5 % des émissions du territoire et pourrait augmenter de 60 % d'ici à 2040 si rien n'est fait pour le limiter. Il représenterait alors 6,7 %

de l'empreinte nationale¹⁰ et menacerait directement la capacité de la France à respecter ses engagements pris dans le cadre de l'Accord de Paris.

En outre, le numérique français aurait entraîné en 2020 la consommation de 59 millions de mètres cubes d'eau douce, soit 2,2 % de la consommation annuelle française, et aurait été responsable de l'excavation de 4 milliards de tonnes de terre dans le monde. Enfin, 62,5 millions de tonnes de ressources sont consommées chaque année pour produire des équipements numériques utilisés en France, qui, en fin de vie, sont à l'origine de la production annuelle de 20 millions de tonnes de déchets.

L'enjeu nouveau pour les entreprises est donc de réduire leur empreinte, tout en poursuivant leur transformation numérique. Au sein de la commission Numérique et Environnement d'EpE, des dirigeants et experts des directions du développement durable et des directions des systèmes d'information de près de soixante grandes entreprises ont analysé les conditions d'une adoption accélérée d'un numérique à plus faible empreinte (Green IT) et utile à la mise en œuvre de leur transition écologique et celle de la société (IT for Green). Les pratiques d'entreprise présentées dans la toute récente publication « Le numérique, allié ou ennemi de la transition écologique ? »¹¹ montrent des résultats encourageants sur ces chantiers.

Les pratiques des entreprises pour réduire l'impact des activités numériques (Green IT)

L'historique et les motivations des stratégies Numérique responsable des entreprises et les conditions dans lesquelles ces dernières les construisent et les mettent en œuvre varient en fonction de leurs contextes respectifs : alors que certaines structurent leur démarche sous l'impulsion de leurs dirigeants, d'autres ont capitalisé sur le dynamisme et le travail réalisé par des collectifs de collaborateurs pour ensuite développer une stratégie plus globale. D'autres encore exploitent les modèles d'affaires de l'économie circulaire, que les collaborations et les partenariats facilitent¹². Beaucoup d'actions visant à réduire l'empreinte du numérique reposent sur l'allongement de la durée de vie des équipements qui permet d'éviter la fabrication d'équipements neufs, lesquels sont à l'origine de la grande majorité des impacts environnementaux du secteur. En effet, cette étape

⁶ *Enquêtes annuelles 1998 à 2020 et Enquêtes trimestrielles 2021*, ARCEP, <https://www.data.gouv.fr/fr/datasets/observatoire-des-communications-electroniques/>

⁷ Le secteur du numérique comprend : les entreprises de services numériques (ESN), les éditeurs de logiciels et les sociétés de conseil en technologies.

⁸ Numeum, « Chiffres et datas du secteur numérique. Tendances, analyses et zooms du secteur », juin 2021, https://numeum.fr/sites/default/files/Documents/NUMEUM_-_Chiffres_et_datas_2021_def.pdf

⁹ "Innovation for the Earth. Harnessing technological breakthroughs for people and the planet", PwC, World Economic Forum Davos, January 2017, <https://www.pwc.com/ee/et/publications/pub/innovation-for-the-earth.pdf>

¹⁰ SÉNAT, rapport d'information fait au nom de la commission de l'aménagement du territoire et du développement durable par la mission d'information sur l'empreinte environnementale du numérique. Rapporteurs : MM. Hervé Maurey, président de la commission, Patrick Chaize, président de la mission d'information, Guillaume Chevrollier et Jean-Michel Houllégatte. Enregistré à la Présidence du Sénat le 24 juin 2020.

¹¹ <https://www.epe-asso.org/publication-numerique-2022/>

¹² « Les partenariats, socle de l'économie circulaire », EpE – ESCP, 2021, <https://www.epe-asso.org/les-partenariats-socle-de-leconomie-circulaire/>

représente 78 % des émissions de gaz à effet de serre de l'ensemble de la chaîne de valeur¹³.

Les objectifs de ces stratégies sont également pluriels : certaines entreprises utilisent principalement le numérique responsable comme un levier supplémentaire pour atteindre leurs objectifs de décarbonation, alors que d'autres l'appréhendent comme une opportunité économique leur permettant de réduire leurs coûts, de conquérir de nouvelles parts de marché, voire même d'en créer un nouveau. Les bénéfices de ces démarches ne se limitent donc pas à la préservation de l'environnement : en effet, la définition et la mise en œuvre d'une stratégie Numérique responsable sont souvent l'occasion d'identifier et d'activer des leviers d'optimisation permettant de réduire leurs consommations et leurs coûts. L'adoption précoce de ces principes permet aussi d'anticiper le renforcement en cours du cadre réglementaire français et international, de réduire l'exposition de l'entreprise au risque de transition et d'attirer et de retenir les talents grâce à l'amélioration de leur image.

Une question se pose cependant à la lecture de certaines réalisations concrètes : comment se fait-il que malgré ces progrès technologiques et cette efficacité croissante, les émissions du secteur continuent à augmenter aussi rapidement ? Les effets rebond sont en fait massifs, et beaucoup de solutions d'efficacité entraînent une multiplication des usages qui en réduisent, voire en inversent les bénéfices. C'est pour objectiver ce paradoxe que les entreprises travaillent au développement de méthodologies de mesure de l'empreinte environnementale du numérique.

Mesurer les impacts environnementaux du numérique

Le rythme d'innovation rapide du secteur et l'attention relativement récente portée au numérique responsable ont limité le développement de ces méthodes, encore évolutives et peu standardisées, et des bases de données sur lesquelles elles reposent. Bien que les besoins en recherche soient importants, l'état actuel des connaissances permet déjà à plusieurs entreprises de mesurer, puis de réduire l'empreinte environnementale de leurs activités numériques. Les résultats fournis par ces méthodes, encore approximatifs, sont utilisés par les entreprises pour estimer la matérialité du sujet, et cibler et suivre les effets des actions prioritaires de réduction. Les méthodologies et outils de mesure permettent aussi de mieux orienter la prise de décision, par exemple en simulant l'empreinte environnementale de différents scénarios de création ou de développement d'un projet ou en comparant les coûts d'abattement¹⁴ de différentes solutions. Ces résultats aident à sensibiliser les équipes en interne, et leur publication contribue à la

transparence de l'entreprise et fluidifie le dialogue avec ses parties prenantes autour de l'environnement (investisseurs, ONG, etc.). La mesure de cette empreinte se heurte toutefois à la réalité du *cloud* : il n'est pas possible pour l'entreprise de savoir dans quels serveurs ses données sont traitées, les facteurs d'émission sont donc toujours approximatifs. De plus en plus d'opérateurs de *data centers* essaient d'acheter de l'électricité décarbonée, ou du moins des garanties d'origine. Mais la mesure reste assez conventionnelle.

L'émergence de l'IT for Green

L'utilisation de technologies numériques pour accompagner la transition écologique, l'IT for Green, désigne un ensemble diversifié de technologies et de pratiques : accès à l'information en temps réel grâce à des capteurs ou à l'imagerie satellite, modélisation, intelligence artificielle, outils d'aide à la décision, automatisation et dématérialisation de certains procédés, traçabilité, télétravail, etc. Les travaux d'EpE révèlent qu'au sein des entreprises, l'IT for Green se traduit principalement par le développement d'outils permettant de généraliser la mesure des impacts environnementaux. Certaines entreprises développent ou font évoluer leurs systèmes d'information de façon à ce qu'ils permettent de mieux répondre aux enjeux de développement durable des entreprises et des métiers : par exemple, les marchés de l'économie circulaire fonctionnent mieux lorsqu'existent des places de marché virtuelles bien organisées. De même, les sites de covoiturage ont permis, dans une certaine mesure, un usage plus sobre des véhicules individuels. D'autres usages permettent d'améliorer le suivi et la traçabilité des données environnementales : le caractère vertueux des solutions IT for Green repose presque exclusivement sur leur capacité à fournir plus rapidement, parfois en temps réel, des informations détaillées et mieux tracées qui permettent d'informer et d'orienter efficacement les décisions favorables à l'environnement. Il reste partout difficile de mesurer l'apport positif du numérique à la réduction des émissions, tant les effets sont complexes, variables et, parfois, imprévus.

La sobriété, une nécessité ?

Deux nouvelles limites planétaires¹⁵ liées, d'une part, à l'introduction de nouvelles entités dans l'environnement et, d'autre part, à l'utilisation de l'eau douce ont été dépassées en 2022, en plus des quatre autres ayant déjà été franchies : le changement climatique, l'érosion de la biodiversité, la perturbation des cycles de l'azote et du phosphore et le changement d'utilisation des sols. Les premiers travaux de mesure de l'empreinte environnementale du numérique en France et dans d'autres

¹³ ARCEP – ADEME (2022), « Évaluation de l'impact environnemental du numérique en France et analyse prospective ».

¹⁴ Le coût d'abattement d'une solution de décarbonation se définit comme son coût rapporté aux émissions évitées.

¹⁵ "The nine planetary boundaries", Stockholm Resilience Centre, Stockholm University, <https://www.stockholmresilience.org/research/planetary-boundaries/the-nine-planetary-boundaries.html>

pays suggèrent que le secteur contribue au dépassement de chacune d'entre elles.

Contenir la hausse de la température mondiale aux alentours de 1,5°C, limiter l'érosion de la biodiversité et préserver les ressources naturelles requièrent des entreprises qu'elles réduisent rapidement et profondément toutes les pressions qu'elles exercent sur l'environnement, y compris celles de leurs activités numériques directes et indirectes.

Alors que le numérique représente une part pour l'instant faible de l'empreinte environnementale totale de la plupart des entreprises, nombre d'entre elles y dédient des plans d'action témoignant d'une prise de conscience et d'un engagement environnemental transversal : même dans les entreprises fortement émettrices, où les émissions du numérique sont particulièrement faibles par comparaison aux autres activités, les équipes prennent l'initiative de plans de réduction. Pour celles dont le numérique est le cœur d'activité, des engagements ambitieux de réduction de leur impact apparaissent.

L'ampleur des transformations à conduire semble cependant faire appel à des évolutions bien plus profondes que les seules optimisations et réductions permises par les technologies numériques (IT for Green).

L'urgence de la situation environnementale suggère peut-être de transformer notre rapport au numérique en réduisant drastiquement la fabrication d'équipements neufs et les nouveaux usages qu'ils induisent ou accompagnent, et en conditionnant la mise sur le marché des innovations à leur utilité sociétale et environnementale. Une meilleure utilisation du numérique pour préserver l'environnement semble avant tout résider dans l'adoption rapide de comportements plus sobres dans toutes les composantes de notre vie, ce qui inclut la sobriété numérique.

De plus, certains effets rebond sont déjà observés : l'adoption de certaines technologies numériques, comme le commerce sur Internet et la publicité digitale, aggrave parfois certains effets sociétaux indésirables et facilite la consommation de masse. En introduisant des intermédiaires techniques entre les personnes et le monde extérieur, ces technologies peuvent affecter et parfois même dégrader notre perception et nos relations avec la nature, elles influencent déjà la construction de nouveaux modes de vie. La civilisation digitale que nous construisons pourra-t-elle être une civilisation environnementale ?

L'apport du numérique dans la décarbonation des mobilités : le cas de l'automobile

Par Christophe MIDLER

Directeur de recherche émérite, Centre de recherche en gestion de l'École polytechnique-i3, CNRS-IPP, membre de l'Académie des technologies

Et Patrick PÉLATA

Ancien directeur général délégué de Renault, ancien Chief Automotive Officer de Salesforce, membre de l'Académie des technologies

Les technologies numériques ont fortement impacté les automobiles sur le plan de leurs émissions de CO₂, essentiellement à travers l'amélioration de la gestion des moteurs, et ce depuis le début des années 1990. L'effet cumulé de ces trente années d'innovation est de l'ordre de 200 MtCO₂ par an pour l'Europe.

Mais, en dehors des véhicules électriques, où, pour l'essentiel, les innovations viennent de la chimie et de l'électronique de puissance, celles que nous connaissons aujourd'hui et qui s'appuient sur le numérique (télétravail, e-commerce, auto-partage, VTC, mobilités partagées, douces ou pas) sont d'un bien moindre impact sur la décarbonation des mobilités.

Ce que le futur nous réservera est encore bien incertain. Mais la conduite autonome, en particulier appliquée à des robotaxis partagés, pourrait contribuer significativement et même accélérer la mutation majeure que constituent l'électrification et la réduction du parc automobile.

Alors que les technologies numériques impactent notre vie de tous les jours, la question se pose sur ce qu'elles ont fait, font et feront en matière de décarbonation des mobilités. Ce secteur est le plus gros émetteur de gaz à effet de serre en France, essentiellement à travers le CO₂ émis par les moteurs à combustion ou les turbines des avions. Dans cet article, nous nous contenterons d'en examiner et d'en quantifier les effets (lorsque cela est possible) sur les mobilités aujourd'hui assurées par l'automobile en revenant sur le passé récent, sur ce qui est en cours et sur ce que l'on peut percevoir pour demain.

Le passé récent, la période 1990-2020

Avec la crise du pétrole des années 1970, puis l'arrivée des réglementations anti-pollution, les moteurs à combustion ont fortement évolué, passant des carburateurs (moteurs à essence) à des injections mécaniques dans l'admission d'air, puis directes dans la chambre de combustion et, enfin, à des injections électroniques

directes et à très haute pression, et donc pilotées par un calculateur numérique (Engine Control Unit – ECU) prenant en compte de nombreux paramètres, comme l'enfoncement de la pédale d'accélérateur, la température de l'air admis, celle du moteur, le taux d'oxygène, les mesures en sortie moteur (sonde lambda), etc. Cette numérisation du contrôle moteur s'est peu à peu complexifiée avec de multiples injections en cours de combustion, en particulier pour les moteurs diesel (plus de dix injections par compression). Plus récemment encore, d'autres acteurs ont été ajoutés dans le moteur (soupape de décharge du turbo, ouverture variable des soupapes...), qui nécessitent une optimisation en temps réel par le calculateur.

Enfin, certaines de ces améliorations n'auraient pas été possibles sans des simulations très sophistiquées portant sur l'arrivée d'air, sur le jet d'injection et la propagation du front de flamme dans la chambre de combustion et réalisées dans des conditions de charge moteur, de pression et de température très différentes. Mais, finalement, quel a été l'effet réel de toutes ces innovations permises par la numérisation ?



Figure 1 : Éclaté de la partie Motorisation et transmission de l'e-Tech hybride de Renault – Source : Renault.

Pour les moteurs diesel, les améliorations ont été fulgurantes : une réduction de 33 % de la consommation entre une Renault Megane de 1998 à moteur diesel turbo et à injection indirecte mécanique et la Megane 3 de 2009, à injection directe, et en dépit d'un poids plus important (plus lourde de 140 kg). Des gains plus conséquents ont encore été constatés si l'on compare la Golf 2 GTD de 1984, avec son moteur diesel de 1,6 l turbo à injection mécanique qui développait 51 kW et 130 N.m et consommait 5,7 l/100 km en mode combiné, avec une Polo V 1,2 TDI de 2010, qui pesait, malgré tout, 210 kg de plus, mais affichait une consommation inférieure de 40 % grâce à son moteur turbo diesel à injection électronique et à une rampe d'alimentation à très haute pression (*common rail*)¹.

Pour les moteurs essence, le passage du carburateur à l'injection et l'ajout quasi systématique du turbo, puis plus récemment de l'injection directe ont produit des résultats du même ordre, mais sur une période plus longue : un peu plus de 30 % de réduction, par exemple, entre une Clio 1 de 1990 et une Clio 5 de 2019, là encore malgré une masse qui est passée de 850 kg à 1 080 kg pour le modèle le moins équipé.

Une nouvelle vague de réduction de la consommation est arrivée dans les années 2010, avec les transmissions CVT (Continuously Variable Transmissions) et DSG (Direct Shift Gearbox) qui ont remplacé les anciennes boîtes automatiques, puis les motorisations hybrides et leur couplage intelligent avec les moteurs. Là aussi, un pilotage fin du moteur et des rapports de transmission, guidé par la recherche des meilleurs points de fonctionnement du moteur, permet des gains importants, en particulier en roulage urbain et péri-urbain. Un exemple particulièrement sophistiqué et efficace en est l'e-Tech hybride de Renault qui permet

au calculateur de choisir et d'enchaîner quinze combinaisons sans aucune rupture de couple afin d'optimiser en toutes circonstances la consommation de la voiture (voir la Figure 1 ci-dessus). Le gain est significatif : - 20 % pour les émissions de CO₂ par rapport à un moteur de cylindrée moindre, à injection directe essence et à transmission manuelle, et ce pour une même voiture, une Clio 5 de 2021. C'est aussi 9 % de mieux qu'un petit moteur diesel particulièrement abouti équipant la même voiture.

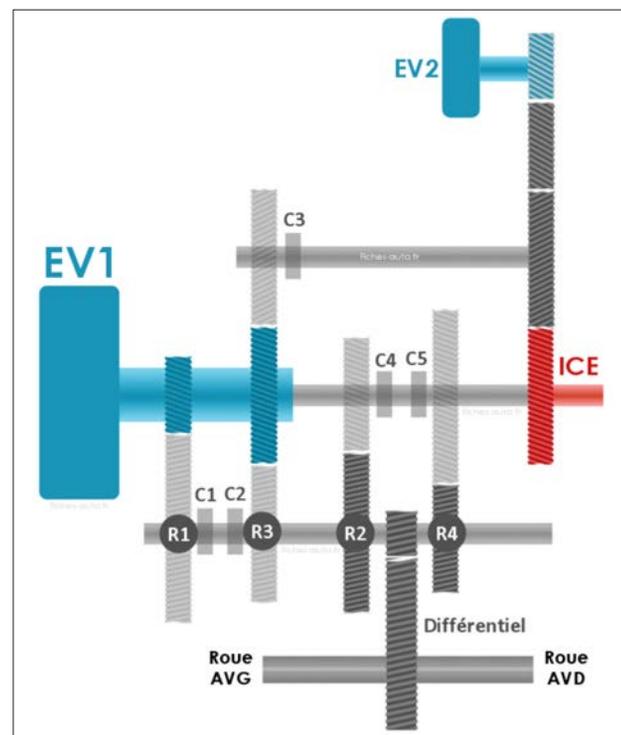


Figure 2 : Schéma conceptuel de l'e-Tech de Renault : EV1, EV2 : moteurs électriques ; C1 à C5 : crabots ; R1 à R4 : rapports ; ICE : arbre moteur – Source : Fiches-auto.fr.

¹ Pour être comparables, toutes ces données concernent des voitures avec des transmissions manuelles.

Mais, l'on sait, par ailleurs, que les standards de mesure des consommations et des émissions de CO₂ se sont peu à peu éloignés des conditions réelles d'usage des voitures. Pour recouper ces progrès, il faut donc revenir à l'impact global de cette évolution, en Europe par exemple. C'est ce qu'a fait l'Agence européenne de l'environnement² dans une étude ayant pour périmètre l'Europe des 27, plus le Royaume-Uni. Voici les résultats de cette étude au regard de l'évolution des grands agrégats du parc automobile européen sur la période 1990-2015 :

- le nombre des voitures particulières a augmenté : + 62 % ;
- la distance totale parcourue par ce parc a progressé : + 45 % ;
- ainsi que les émissions totales de CO₂ : + 11 %³. Mais ces émissions rapportées aux kilomètres parcourus ont baissé de 23 %.

Quels effets au regard de différents paramètres ?

Le parc automobile, sur la période précitée, est passé d'un mix intégrant 11 % de diesel à 41 %. Cela a bien sûr eu un impact, mais seulement après l'arrivée en masse des moteurs diesel à injection directe, qui sont plus efficaces (de l'ordre de 15 %) en termes d'émissions de CO₂ que les moteurs essence..., et plus encore avec l'arrivée, beaucoup plus tardive, des moteurs essence turbo à injection directe. Cette substitution a aussi été associée à l'arrivée de calculateurs capables de gérer cette injection directe.

Inversement, les voitures neuves ont pris du poids jusqu'en 2007 (en France), pour baisser, puis se stabiliser ensuite aux environs de 2004⁴. Mais cette augmentation de leur poids est de près de 300 kg au-dessus de la masse moyenne des voitures vendues en 1990, soit 950 kg. On peut donc estimer la prise de poids du parc véhicules de 2015 à + 30 %, ce qui suppose une hausse induite de la consommation de l'ordre de 15 %, toutes choses étant égales par ailleurs.

Au-delà de cette prise de poids, les taux accrus d'équipement en climatisation (air conditionné) ou en boîtes de vitesses automatiques ont aussi significativement poussé à la hausse les consommations. L'amélioration des frottements (des pneus, des moteurs, des liaisons au sol), voire celle de l'aérodynamique ont aussi joué un rôle, mais qui est beaucoup plus limité que les avancées réalisées en matière de gestion des moteurs et des transmissions. Elles sont néanmoins suffisantes pour contrebalancer l'accroissement du nombre des équipements et peut-être une partie de l'augmentation induite de la masse des voitures.

Au total, l'on peut estimer que l'amélioration de la gestion moteur, qui est intimement liée à l'injection directe et aux turbos tant pour les véhicules essence que diesel, a permis une réduction d'au moins 20 à 25 % des émissions CO₂ des voitures particulières en circulation en Europe, de 1990 jusqu'à 2015-2020, soit avant l'arrivée massive des véhicules hybrides et électriques. Puisque ces technologies se sont développées de la même façon pour les camions et véhicules utilitaires légers, nous pouvons affirmer que le chiffre vraisemblablement très conservateur de 20 % est aussi valable pour l'ensemble du trafic routier en Europe.

Une économie de 200 millions de tonnes de CO₂ par an

Rapporté aux émissions de CO₂ de l'ensemble du trafic routier en Europe, cela représente une économie de 200 Mt de CO₂ par an, alors que ce secteur émettait 800 Mt de gaz à effet de serre en 2019, soit 22 % des émissions brutes de l'Europe des 27⁵.

On peut donc dire, dans le cadre de cet article portant sur la numérisation, que la capacité à utiliser en temps réel des algorithmes complexes d'optimisation de la gestion des moteurs et des transmissions automobiles a eu un impact très significatif sur les émissions de gaz à effet de serre de ce secteur.

Le présent

Le champ d'influence de la numérisation dans les mobilités s'est plus récemment élargi : impact du télétravail, autopartage, VTC, flottes de vélos, de trottinettes, de scooters électriques connectés et partagés, livraisons après un e-achat, etc. Mais quel en est l'impact réel en matière de décarbonation ?

Le télétravail a enregistré une forte accélération en France sous la contrainte Covid, avec, sans doute, un effet structurel, puisqu'« en 2021, en moyenne, chaque semaine, un salarié sur cinq a télétravaillé »⁶. En moyenne, pour l'ensemble des salariés, cela a représenté 15 jours de télétravail sur l'année, soit environ 6 à 7 % de trajets domicile/travail en moins. Mais si l'on en cherche la trace au niveau du trafic automobile, on constate que celui-ci est remonté plus vite que le trafic des transports en commun. C'est flagrant aux États-Unis, où ces données sont publiées chaque semaine : le trafic routier est revenu, dès mai-juin 2021, à son niveau pré-Covid, alors que les transports en commun à la fin 2021 et encore en 2022 sont restés très en deçà : - 40 % à New York (MTA), - 50 % à Washington DC (WMATA) et - 55 % à San Francisco (BART)⁷. En France, nous savons que les transports en commun du quotidien ne sont pas encore revenus à leur niveau de 2019, mais l'on peut constater que la consommation

² EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY (2019), "Fuel efficiency and fuel consumption in private cars, 1990-2015", December.

³ Une autre donnée de l'EEA donne + 18 % pour les émissions de gaz à effet de serre (GES) des voitures sur la période 1990 à 2015, dans l'EU 27.

⁴ Source : Ademe, Car Labelling, Chiffres clés.

⁵ Émissions brutes et donc hors utilisation des terres, changement d'affectation des terres et foresterie (UTCATF) – Source : *Chiffres clés du climat, France, Europe et Monde*, ministère de la Transition écologique, édition 2022.

⁶ JAUNEAU Yves, *INSEE Focus*, mars 2022.

⁷ "Latest weekly Covid-19 – Transportation Statistics", Bureau of Transportation Statistics, DOT.

d'essence – un proxy du trafic des voitures particulières⁸ –, avait reculé de 13 % en 2020, mais a remonté dès 2021, pour se situer au-dessus de son niveau de 2019 (+ 5 %), et a continué sa progression sur les dix premiers mois de 2022 (+ 16 %). De nombreux changements se sont produits en parallèle durant cette période : une hausse donc du télétravail, mais aussi des installations hors des très grandes villes, et donc un recours moindre aux transports en commun, mais un trafic voiture accru. Dès lors, il est difficile de conclure que le télétravail a eu, *in fine*, un effet positif sur la circulation automobile, et donc sur le climat.

Il est aussi difficile de conclure sur l'impact du e-commerce, qui représente 13 % des achats en France. Une étude a conclu à un effet très positif : la tournée d'un livreur étant moins émettrice que n clients se rendant dans un magasin, en particulier hors des villes centres⁹. D'autres études, par exemple celle de Carbone 4¹⁰, contestent cette incidence positive, arguant des achats groupés réalisés par les consommateurs qui prennent leur voiture pour se rendre dans un commerce physique et de la forte proportion d'acheteurs se déplaçant autrement qu'en voiture pour faire leurs courses. Mais aucune de ces études ne mesure des cas réels.

L'autopartage facilité par les applications numériques est-il pour sa part plus impactant ? Le taux d'occupation des voitures pour des déplacements en local (< 80 km) a baissé entre 2008 et 2019. Il a par contre augmenté pour les déplacements longs, 2 % des trajets se faisant en covoiturage avec le recours à des applications pour un tiers d'entre eux¹¹. En supposant que le trajet correspondant ait été fait avec une voiture âgée de quelques années, on peut calculer un impact de l'ordre de 0,1 MtCO₂ par an en France¹². Quant aux trajets domicile-travail, l'autosolisme représente quasiment 90 % de ces déplacements. Il est vrai que la distance moyenne parcourue entre le domicile et le lieu de travail est passée de 3 à 13 km depuis le début des années 1960. Une étude détaillée portant sur l'aire urbaine de Lyon en décortique les raisons¹³.

Les mobilités partagées grâce aux diverses applications existantes (Uber, Velib, DriveNow) soit ne déplacent pas l'usage de l'automobile vers un moyen de transport moins décarboné, soit ne pèsent que très peu dans la

décarbonation des transports. Les trottinettes ou les vélos partagés cannibalisent la marche, les transports en commun et – plus marginalement – l'usage de la voiture. L'exemple le plus significatif est sans doute le service Velib, avec 20 000 vélos disponibles et 116 millions de kilomètres parcourus en 2021. En supposant une cannibalisation de la voiture, on peut calculer un impact de 0,02 MtCO₂ par an¹⁴.

On voit donc qu'au-delà de l'extension des transports en commun et de l'arrivée sur le marché des véhicules électriques pour lesquels la numérisation n'est pas un facteur déclenchant, les changements actuellement permis par la numérisation sont finalement peu impactants en matière de décarbonation, au stade où ils en sont aujourd'hui.

Le futur

Alors, quel impact peut-on envisager dans un futur visible ?

L'impact sur l'électrification, déjà évoqué en ce qui concerne les véhicules hybrides, va se poursuivre avec la croissance de cette motorisation. L'incidence sur les véhicules électriques est moindre, puisque l'essentiel du progrès provient et proviendra de la chimie des batteries et de la décarbonation de la production d'électricité. Certes, le Battery Management System (BMS) est indispensable à la bonne gestion des batteries et joue un rôle important dans leur durabilité et leur sécurité.

Les Google Maps et autres applications, qui permettent d'emprunter les routes les moins encombrées ou bien de limiter un détour pour trouver une borne de recharge, jouent sans aucun doute un rôle dans la décarbonation, mais selon un ordre de grandeur moindre que ce qui a été évoqué jusqu'ici.

Les aides à la conduite automatisées (Automated Driving Assistance Systems – ADAS) jouent déjà et joueront de plus en plus un rôle important dans la réduction de la fréquence des accidents. Autant la valeur sociale en sera donc élevée, autant son impact sur la décarbonation sera limité tant que l'on en restera aux niveaux 2 et 3 de la conduite automatisée (voir le Tableau 1 de la page suivante). Le niveau 3 pourrait néanmoins permettre des vitesses régulées sur des portions d'auto-route très chargées, évitant ainsi des bouchons par un réduction des à-coups accélération-freinage. Ou bien, pour les camions, il permettrait le roulage en peloton (*platooning*), deux camions ou plus se suivant de très près et consommant ainsi de 10 à 15 % de carburant en moins.

Il en ira différemment lorsque les développements de niveau 4 de la conduite autonome par Google-Waymo, Cruise (General Motors-Honda-Microsoft-Softbank), Zoox (Amazon), Motional (Hyundai-Aptiv et Uber) ou Aurora aux États-Unis ou bien encore Baidu (le Google chinois) ou Pony.ai (toujours en Chine) permettront de faire massivement ce qu'ils font déjà dans plusieurs grandes villes, à savoir faire rouler des robotaxis avec

⁸ "Gross inland deliveries – observed – of motor gasoline France", Eurostats.

⁹ WYMAN O. and Institute of Supply Chain Management (2020), "Is e-commerce good for Europe Economic and environmental impact", An independent study commissioned by Amazon, University of S' Gallen, p. 64.

¹⁰ SORRET J. (2021), « Le e-commerce est-il vraiment un élément clé de la décarbonation du transport de marchandises ? », Carbone 4, juin.

¹¹ BRAHMI Laura (ENSAE Paris), FUMAT Victoria (SDES) & TREVIEN Corentin (SDES) (2022), « Se déplacer en voiture : seul, à plusieurs ou en covoiturage ? », ministère de la Transition écologique, juillet.

¹² $89,5 \times 10^9 \text{ km} \times 2 \% \times 1/3 \times 150 \text{ gCO}_2/\text{km} = 0,60 \times 10^9 \text{ km} \times 150 \times 10^{-6} \text{ tCO}_2/\text{km} = 90 \times 10^3 \text{ tCO}_2$.

¹³ COLDEFY J., PAPET L. & CHEVREUIL M. (2021), « Décarboner la mobilité : quelles solutions, quels financements ? », ATEC ITS France, janvier.

¹⁴ $116 \times 10^6 \text{ km} \times 150 \text{ g/km} = 116 \times 10^6 \text{ km} \times 150 \times 10^{-6} \text{ t/km} = 17 400 \text{ t}$.

Niveaux	Tâches de conduite		Rattrapage en cas de situation de conduite difficile	Operational Design Domains (ODD)
	Contrôle latéral et longitudinal continu du véhicule	Détection d'objet ou d'évènement et réaction		
1 Assistance Conducteur	Conducteur et Système	Conducteur	Conducteur	Limités
2 Automatisation Partielle	Système	Conducteur	Conducteur	Limités
3 Automatisation Sous Conditions	Système	Système	Le Conducteur doit reprendre la main	Limités
4 Automatisation de Haut Niveau	Système	Système	Système	Limités
5 Automatisation Complète	Système	Système	Système	Sans Limites

Tableau 1 : Définition des niveaux de conduite automatisée selon la Société internationale des ingénieurs de l'automobile.

et sans chauffeur de sécurité et, pour certains, avec des clients.

En effet, dans ces zones péri-urbaines souvent très étendues, où les transports publics sont inexistantes ou peu efficaces, et où la voiture, souvent sans passager, est la seule solution de mobilité, des robotaxis partagés (niveau 4) pourraient profondément améliorer le coût de la mobilité, tout en réduisant à la fois le nombre des voitures et les kilomètres parcourus par celles-ci. Les simulations sur ce thème laissent pantois. Elles décrivent ainsi un monde où les voitures individuelles sont en partie remplacées par des robotaxis partagés, qui vont chercher un ou plusieurs clients, pour, dans ce dernier cas, opérer des transports groupés en particulier vers les gares des transports publics lourds, vers les établissements scolaires, les centres commerciaux, de santé, de loisirs et autres pôles d'attraction, vers les sites sportifs et autres aéroports. Le parc automobile serait diminué de 30 à 40 % selon certaines études et les kilomètres-véhicules diminueraient également, mais dans des proportions moindres. Cela permettrait une décongestion des infrastructures routières et une réduction des surfaces dédiées au stationnement. Ces robotaxis seraient 100 % électriques et la réduction des émissions carbone qui s'en suivrait serait d'un tout autre ordre de grandeur que ce que nous venons de décrire. Le fait que les véhicules concernés pourraient rapidement être 100 % électriques, que le parc total de véhicules et donc la production pourraient diminuer et le fait que cette solution concernerait les plus faibles distances (véhicules.km) parcourues constituent trois facteurs majeurs de réduction des émissions de CO₂ dans l'automobile.

La zone de prédilection des robotaxis serait les aires d'attraction au sens de l'Insee¹⁵ : c'est-à-dire autour des grandes villes, en excluant les villes centres, dans des zones déjà bien desservies par les transports et où la navigation pour un véhicule autonome est compli-

¹⁵ L'aire d'attraction d'une ville désigne un ensemble de communes, d'un seul tenant et sans enclave, constitué d'un pôle de population et d'emploi, et d'une couronne qui regroupe les communes dont au moins 15 % des actifs travaillent dans le pôle. La commune la plus peuplée du pôle est appelée commune-centre (<https://www.insee.fr/fr/statistiques/5039879?sommaire=5040030>).

quée. C'est dans ces zones que s'effectuent 50 % des 334 milliards de kilomètres de trajets locaux (< 80 km) réalisés en voiture en France. C'est aussi là que l'on trouve 63 % du parc automobile français¹⁶. Pour évaluer l'impact potentiel, nous faisons l'hypothèse que des flottes de robotaxis arriveraient à capturer 30 % de ce trafic et à réduire de 20 % le parc automobile précité, dès 2035. Deux effets se cumuleraient : d'une part, moins de nouvelles voitures seraient produites et, d'autre part, moins de déplacements seraient assurés par des véhicules non encore électrifiés composant pour partie ce parc automobile péri-urbain au sens large. En assumant l'idée que ce parc ne serait électrifié qu'à environ 40 % en 2035, on peut évaluer l'impact annuel potentiel cumulé à une économie d'environ 6 MtCO₂/an pour la France¹⁷, ce qui, étendu à l'Europe, correspondrait à environ 30 à 35 MtCO₂/an. Ce qui est significatif et serait une victoire majeure des technologies numériques concernées, encore en devenir...

Est-ce vraiment un rêve ? Les développements sur les véhicules autonomes mobilisent aujourd'hui, grâce à d'énormes moyens, une foule de technologies du numérique : *Big Data*, *machine learning*, intelligence artificielle dite de confiance, simulations complexes, y compris le recours à du *hardware in the loop*, à des capteurs, etc. Nous sommes encore loin du compte et les avis sont très partagés sur l'horizon auquel ces technologies seront assez sûres et matures pour permettre le passage à grande échelle de cette automatisation de la conduite, dont nous venons d'évoquer une toute petite partie du potentiel, notamment en matière de décarbonation des mobilités.

¹⁶ <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/enquete-sur-la-mobilite-des-personnes-2018-2019>

¹⁷ Une réduction de 20 % du parc se traduirait par un gain en termes d'émissions de CO₂ correspondant à : - 20 % x 63 % des ventes annuelles en France (2 M), soit 6 tCO₂ pour produire une voiture (250 000 x 6 t = 1,5 MtCO₂/an). Pour le trafic capturé (30 % dans les zones considérées), il remplacerait 60 % des trajets réalisés avec des voitures thermiques (nous assumons l'hypothèse que le parc automobile des aires d'attraction des villes hors communes centres sera composé à 40 % de véhicules électriques à l'horizon de 2035), soit un gain de 4,5 MtCO₂ (= 334 Mds/km x 50 % x 30 % x 60 % x 150 gCO₂/km).

L'apport du numérique en matière de décarbonation du bâtiment

Par François BERTIÈRE

Président de la Foncière Fiminco Reim

L'industrie du bâtiment et de l'immobilier connaît une profonde évolution sous l'effet de la transition énergétique. En la matière, les outils numériques constituent de puissants atouts pour relever les défis afférents par un secteur qui connaissait un retard certain dans ce domaine du numérique par rapport à l'industrie.

Dans cet article, nous présentons les avancées actuelles permises par le numérique dans les domaines de la construction neuve, de la rénovation et de l'exploitation des immeubles ainsi que celle des quartiers, en donnant des exemples de solutions innovantes. Il met en lumière l'importance de la réglementation et les perspectives ouvertes par le Building Information Model, l'analyse du cycle de vie et le jumeau numérique. Il conclut à la nécessité d'accompagner la contrainte réglementaire par une politique de formation, de soutien et d'incitation.

Le bâtiment constitue l'un des enjeux essentiels de la trajectoire de l'atteinte du « Zéro carbone » d'ici à 2050 : il représente aujourd'hui 25 % des émissions de GES et 40 % de la consommation d'énergie en France. La Stratégie nationale bas-carbone a défini le double objectif d'une réduction de 49 % des émissions en 2030 par rapport à 2015 et de l'atteinte de la neutralité carbone en 2050.

Pour concrétiser ces objectifs très ambitieux, l'utilisation d'énergies 100 % décarbonées pour le chauffage n'est pas suffisante, il faut aussi diminuer la consommation d'énergie des logements et des bâtiments tertiaires tant au niveau de la construction et de la rénovation du bâti que de l'exploitation.

Le numérique est un levier essentiel dans cette recherche d'économie que nous aborderons sous l'angle d'abord de la construction neuve, puis de la rénovation et, enfin, de l'exploitation des bâtiments.

La construction neuve : l'impact de la RE 2020 et l'apport du BIM

La dernière réglementation technique relative à la construction, la RE 2020, applicable aux nouvelles constructions depuis 2022, impose d'analyser les émissions de GES tout au long de la vie des bâtiments, durant la phase de leur construction en intégrant l'énergie provenant de la fabrication des matériaux utilisés, la phase de leur mise en œuvre, celle de leur exploi-

tation et également celle de leur déconstruction. Le BIM permet d'optimiser les choix faits et les processus mobilisés à ces différents niveaux.

Pour la construction neuve, l'impact essentiel du numérique provient du développement progressif et de la généralisation à terme du BIM, le Building Information Model. À l'origine, il y a une quarantaine d'années de cela, le développement des logiciels de conception architecturale visait à optimiser la structure des bâtiments et à faciliter la visualisation des projets. Mais assez rapidement sont apparus des logiciels permettant des simulations d'ensoleillement intégrant de fait des préoccupations environnementales. Ces pratiques ont naturellement évolué vers le BIM, qui permet de partager en temps réel l'ensemble des données d'un projet entre tous les acteurs impliqués, en phase de conception et de chantier, mais aussi désormais, en phase d'exploitation. Certains considèrent le BIM comme un système normalisé et fermé qui pourrait être imposé de manière réglementaire et donc risquerait de scléroser la créativité en termes de conception et la capacité d'innovation. Nous entendons ici le BIM comme un ensemble d'outils numériques de conception, de visualisation et de simulation permettant de mieux satisfaire les besoins des maîtres d'ouvrage et de répondre aux attentes des habitants ou des utilisateurs des immeubles.

Il est clair que, toutes choses égales par ailleurs, un ouvrage mieux conçu structurellement sera plus efficace en termes de rendement et consommera donc moins de matière et générera moins d'émissions

pour un usage équivalent. Un chantier mieux organisé, mieux coordonné et donc plus rapidement achevé consommera moins d'énergie non seulement directement sur site, mais aussi pour ses approvisionnements.

Mais, au-delà de ces effets directs, le BIM, utilisé en phase de conception, est un puissant outil de simulation du comportement futur du bâtiment à construire : la maquette numérique permet en théorie de tester le comportement thermique de différentes solutions en intégrant des données climatiques et de modéliser les apports solaires et les besoins en matière de chauffage ou de climatisation (sujet qui va prendre de plus en plus d'importance au fur et à mesure de l'accroissement du réchauffement climatique). Cette maquette numérique est d'une utilisation rapide et économique et permet d'orienter dès l'amont des choix décisifs : on sait en effet que les choix initiaux sur la géométrie et l'implantation des constructions faits au niveau des APS (les études d'avant-projet sommaire) ont un impact bien supérieur aux choix faits en aval. Le recours à ces simulations par les grandes agences d'architecture et les grosses structures d'ingénierie s'est fortement développé en France, mais il existe encore de grands gisements de progrès à travers la formation et l'équipement de tous les autres acteurs de la profession.

Parmi les différentes solutions existantes, peuvent être mentionnées : Vizcab, qui sert à mesurer le budget carbone des projets, dès l'esquisse ; Spacemaker (racheté par Autodesk), qui permet l'analyse et la planification de site ; ou encore Openenergy, une plateforme *cloud* de simulation énergétique.

La rénovation : l'analyse du cycle de vie

En matière de décarbonation du bâtiment, le sujet de la rénovation est la question majeure à traiter pour atteindre la neutralité carbone en 2050. En effet, le rythme des constructions neuves (le flux) est de l'ordre de 1 % du stock existant ; il est amené à baisser compte tenu de l'évolution négative de la démographie. Certains scénarios imaginent même un arrêt de la construction neuve d'ici à 2050, pour se concentrer sur l'optimisation de l'usage des bâtiments, en particulier les logements vides ou sous occupés.

Or, la RB 2020, dont nous avons évoqué l'impact déterminant sur la décarbonation de la construction neuve, ne s'applique pas à la rénovation. Sur le plan réglementaire, les pouvoirs publics durcissent progressivement les contraintes applicables à la location des logements, ce qui pousse à leur rénovation ; l'octroi d'aides financières incite à la réalisation de travaux. Ces nouvelles contraintes ne s'appliquent pas aux propriétaires occupants.

Sur le plan technique, le problème s'avère plus complexe que pour la construction neuve : il faut d'abord avoir une connaissance précise du bâti existant, et imaginer et comparer des solutions combinant des travaux sur l'enveloppe (fenêtres et isolation), sur les

sources d'énergie, la production et la distribution de calories. L'arbitrage entre les différentes solutions est délicat, car il faut rechercher une optimisation entre des paramètres conflictuels : l'investissement et son amortissement grâce aux économies d'exploitation, la consommation d'énergie primaire, les émissions de GES compte tenu du mix de la production nationale et des effets de pointe...

C'est là que le numérique se révèle indispensable dans la prise de décision. La recherche est active sur les sujets précités et des logiciels se développent au fur et à mesure que l'expertise progresse. Mais les avancées sont moins nettes que dans la construction neuve, qui bénéficie d'un intérêt d'une plus grande antériorité et d'un investissement plus ancien au niveau des grands groupes de construction et d'ingénierie.

L'analyse du cycle de vie est l'outil le plus performant pour évaluer l'impact global d'un produit sur l'environnement, prenant en compte l'ensemble des impacts environnementaux dudit produit depuis sa conception jusqu'à sa fin de vie et au recyclage de ses composants (*from cradle to cradle*). Cet outil a été développé dans les années 1990 pour les produits industriels et s'applique désormais au bâtiment. La RE 2020 impose d'ailleurs le recours à celui-ci pour traiter les demandes de permis de construire dans le neuf. Il s'avère être un outil précieux d'aide à la décision portant sur le choix entre rénovation et démolition et, le cas échéant, sur l'ampleur de la rénovation, et ce grâce à une analyse multicritères incluant les émissions de GES. La méthode pour apprécier l'intérêt de la rénovation part des consommations de l'immeuble existant, détermine pour chaque hypothèse les produits de construction et équipements qui sont conservés, supprimés, remplacés ou ajoutés, évalue leur impact environnemental sur la durée de vie de l'immeuble en fonction de leur propre durée de vie et de leur date de mise en œuvre pour aboutir à un classement environnemental des différentes solutions envisagées. L'utilisation de logiciels spécifiques est nécessaire pour mener à bien ces analyses, tout comme l'est le recours à une maquette numérique pour l'étude des projets. Une dizaine de logiciels commerciaux sont déjà disponibles, mais ils sont plus adaptés à la construction neuve. L'ACV recèle en elle un grand potentiel de progrès pour l'industrie de la rénovation, à condition que les outils numériques progressent en termes de finesse d'analyse et de simplicité d'utilisation pour pouvoir être adoptés par les professionnels.

Plusieurs exemples de ce type de solutions peuvent être donnés, comme Upfactor (détection à grande échelle du potentiel d'une surélévation d'un bien existant), Kocliko (réduction des consommations en collectif et amélioration du confort) ou encore Oneclick LCA, le leader du marché de l'ACV.

L'exploitation : l'intérêt du jumeau numérique

Les expérimentations menées par l'État sur le label E+C-, qui a servi de test pour l'élaboration de la RE 2020,

montrent que l'exploitation des bâtiments compte pour environ 30 % de l'ensemble des dépenses énergétiques supportées sur leur durée de vie totale. Ce pourcentage est d'ailleurs plus élevé pour les bâtiments existants présentant de faibles caractéristiques thermiques. Il y a donc un enjeu important à une optimisation de la gestion énergétique des immeubles, et ce d'autant plus que l'investissement est relativement faible et peut donc être concrétisé plus rapidement qu'une rénovation lourde, sans obérer la capacité de réaliser celle-ci plus tardivement.

L'optimisation des consommations et des émissions de GES passe par l'installation de capteurs et de dispositifs de régulation des appareils de chauffage et des équipements électriques dans chaque bâtiment, à un niveau fin soit logement par logement, voire pièce par pièce, ou poste de travail par poste de travail en tertiaire. Le pilotage de cette régulation s'opère grâce au numérique, le recours à celui-ci ayant été largement développé en particulier dans le tertiaire au travers des processus de gestion centralisée des bâtiments. Grâce à celle-ci, il est possible de gérer les consommations d'énergie, mais aussi d'optimiser les émissions de GES par un arbitrage en temps réel dans le recours entre les différentes sources d'énergies disponibles en fonction de leur niveau de carbone émis, par exemple dans le cas de la production d'énergie renouvelable directement sur site. Le numérique jouera aussi un rôle dans l'optimisation du stockage de l'énergie dans tous les cas d'autoconsommation d'énergies renouvelables.

Une rupture technologique dans ce domaine est à prévoir à travers la diffusion de jumeaux numériques des bâtiments. C'est la phase ultime du BIM, à savoir disposer d'un jumeau numérique du bâtiment construit : cela permettra d'améliorer considérablement la prévision de leur comportement en phase de conception, mais cela permettra aussi de simplifier la gestion des immeubles et de rendre plus efficace leur entretien préventif, la programmation des réparations ou des mises à niveau. En matière d'énergie, le jumeau numérique permet d'analyser, en dynamique et de manière prédictive, le comportement du bâtiment en fonction de données extérieures, météorologiques par exemple, et ainsi d'améliorer l'efficacité de la régulation. La pratique du recours à des jumeaux numériques est assez largement répandue dans l'industrie, mais elle est encore balbutiante dans le monde de la construction, et ce largement pour des questions de coût. Mais elle commence à être d'utilisation plus courante dans les grands ensembles tertiaires, dont la taille et le faible nombre d'occupants permettent de mieux en amortir le coût.

Quelques exemples de ce type de solutions peuvent être donnés : Homeys est un outil de collecte et d'analyse des données énergétiques, dont l'usage s'adresse à des professionnels ; Hxperience est une solution logicielle d'hypervision en matière d'énergie, de maintenance et de services au bénéfice des occupants de bâtiments BOS (Building Operating System) ; ou encore Spinalcom, qui est un jumeau numérique.

Le numérique au niveau des quartiers : *smart grids et smart cities*

Nous avons examiné la décarbonation au niveau des bâtiments, mais ceux-ci sont insérés dans des villes ; une source de décarbonation se trouve donc au niveau de l'urbanisme.

Nous ne traiterons pas ici du sujet de l'interaction entre la conception des villes, l'implantation des logements, des équipements et des emplois et la mobilité urbaine, qui est un facteur fondamental d'émission de GES, mais qui s'écarte du sujet abordé dans cet article.

Tous les outils et processus que nous avons décrits pour servir à la construction d'un bâtiment peuvent être adaptés à la conception de nouveaux quartiers par des collectivités locales ou des aménageurs : il est certes plus compliqué de modéliser un quartier, mais le BIM ou l'ACV sont déjà mobilisés et permettent d'analyser l'impact environnemental global d'un projet d'aménagement sur un nouveau quartier ou sur un quartier existant. Dans ce cas, l'impact direct de la réalisation et de l'exploitation du projet considéré est pris en compte pour calibrer les infrastructures et, au niveau des immeubles, pour définir les objectifs de résultat à imposer aux maîtres d'ouvrage : on peut ainsi prévoir les consommations d'énergie et les émissions de GES associées au projet.

La démarche peut s'appliquer en amont et à plus grande échelle, mais, bien sûr, avec une précision moindre au regard de l'élaboration des documents d'urbanisme (PLU ou PAE). Dans le cadre des procédures d'approbation, la capacité à créer des visualisations 3D ou en réalité virtuelle s'avère essentielle pour favoriser la concertation entre les parties prenantes ; en la matière, les progrès permanents des technologies sont un apport précieux.

En ce qui concerne l'exploitation des quartiers, les *smart grids* représentent un champ important de décarbonation : le principe repose sur la mutualisation des besoins entre des immeubles, dont les appels d'énergie sont répartis dans le temps et qui ont la capacité de produire des énergies renouvelables ou fatales : ce sont, par exemple, des immeubles de bureau ou de logement, dont les besoins et les productions sont différents au cours de la journée, de la semaine, voire même de l'année. L'idée est de connecter ces immeubles pour qu'ils puissent s'échanger de l'énergie : cela permet d'économiser globalement de l'énergie, et donc de décarboner, mais aussi de limiter l'appel de pointe généralement plus carboné au niveau de la production. Le fonctionnement de tels réseaux nécessite à la fois des capacités de stockage et des logiciels de régulation sophistiqués.

Des expérimentations ont été menées en France, par exemple à Issy-les-Moulineaux ou à Lyon : les développements en résultant sont prometteurs mais encore faibles, car ils se heurtent à des difficultés sur le plan du développement technique des logiciels de régulation, mais aussi, et surtout, à des obstacles juridiques et réglementaires liés à la distribution de l'énergie.

Le numérique et l'industrie immobilière

On ne saurait conclure ce panorama de l'impact du numérique sur la décarbonation du bâtiment sans évoquer l'industrie immobilière, qui est le donneur d'ordres dans la chaîne de production et dont l'activité et les décisions sont à l'origine des émissions de GES du secteur.

Les métiers de l'immobilier connaissent une profonde mutation liée à l'irruption de *business models* disruptifs basés sur le numérique, qui n'ont pas seulement un effet sur la consommation d'énergie, mais qui rendent aussi plus efficaces et plus fluides la production, la rénovation et l'exploitation des immeubles et contribuent à la décarbonation du secteur.

Sans entrer ici dans le détail, on assiste à une floraison de *start-ups* et d'initiatives dans des entreprises plus établies, des initiatives généralement basées sur des plateformes d'échange et d'exploitation d'informations et de données. Ainsi, ce sont, par exemple, des logiciels croisant les données du cadastre et celles des PLU dans le but d'identifier et de générer du foncier disponible, de bases de données interactives sur les consommations énergétiques des immeubles existants, des syndicats de copropriété numériques, des logiciels de gestion de parcs immobiliers, des plateformes d'achat groupé d'énergie, des logiciels de microcoupures d'énergie, etc.

En conclusion

Le bâtiment n'est pas un secteur traditionnellement très innovant, cela tient à des raisons structurelles d'organisation de la filière qui ont été bien analysées. Sa productivité a d'ailleurs baissé depuis 1995 (source OCDE). Mais l'impératif majeur pour le secteur est d'opérer sa transition énergétique en association avec une transition numérique déjà bien engagée, qui sont toutes deux un puissant moteur de transformation.

Les contraintes réglementaires imposées par les pouvoirs publics et les collectivités locales jouent un rôle déterminant dans ce secteur dont l'activité est largement administrée. Mais il ne saurait suffire sans une action efficace en matière de formation, de soutien et d'incitation.

Observations de l'auteur

Les sociétés ou *start-ups* citées dans cet article l'ont été pour illustrer notre propos. Ce sont des exemples innovants et éclairants qui ne représentent, bien entendu, pas la totalité du marché ; il en existe bien d'autres.

Les références aux différentes solutions existantes nous ont été données par Thomas Le Diouren, le dirigeant fondateur d'Impulse Partner, société de conseil en stratégie d'innovation dans les domaines de l'immobilier, de la ville durable et de l'industrie. Je l'en remercie.

Comment réduire l'impact environnemental de la microélectronique dans un domaine du semi-conducteur en pleine évolution ?

Par Sébastien DAUVÉ

Directeur du CEA-Leti

Et Léa DI CIOCCIO

Fellow et directeur de recherche au CEA-Leti

La microélectronique fait désormais partie intégrante des stratégies de nombreux pays, et l'on peut gager que le paysage mondial se recomposera dans les prochaines années pour rééquilibrer la chaîne de valeur. C'est dans ce contexte inédit que la question de l'impact environnemental de la microélectronique se pose de façon croissante à travers la production de ses composants, mais aussi à travers ses usages. Les acteurs de l'industrie et de la recherche se mobilisent pleinement pour concrétiser, au travers d'actions concrètes, l'objectif de réduction de son empreinte carbone. Ils intègrent également cette dimension dans la conception des futures technologies et composants de la microélectronique. Dans cet article, nous dressons un état des lieux des enjeux et initiatives en la matière et donnons des exemples concrets des innovations en cours, notamment au CEA.

Un domaine du semi-conducteur en pleine (r)évolution

"Semiconductors are the bedrock of human progress in the 21st century", telle est la déclaration faite par Ursula Von Der Layen, la présidente de la Commission européenne, dans le cadre de l'annonce du Chips Act européen. De fait, les trois dernières années ont été marquées par une prise de conscience sans précédent de l'importance de la microélectronique. Les problèmes d'approvisionnement en composants ont mis en exergue leur rôle essentiel, venant en support d'applications digitales, mais aussi pour l'activité dans d'autres domaines, tels que l'automobile ou l'industrie. Pour les dix prochaines années, il est annoncé une accélération de cette tendance ; le marché du semi-conducteur pourrait ainsi dépasser les 1 000 Mds\$ à l'horizon 2030, contre un peu plus de 550 Mds\$ en 2022. Les marchés traditionnels de la téléphonie (la 5G, puis la 6G) et de

l'ordinateur sont concernés par cette augmentation, tout comme le sont désormais ceux de l'automobile, de la santé et de l'Internet des objets (pour Internet of Things (IoT)) (IBS, 2022).

Le domaine de la microélectronique a ceci d'unique qu'il est régi par une loi quasi déterministe qui prédit une miniaturisation continue des composants : la fameuse loi de Moore (Moore, 1965). Toutefois, les investissements nécessaires pour produire des processeurs de plus en plus performants (qui utilisent actuellement des transistors de taille 3 nm pour les plus avancés d'entre eux) deviennent colossaux et ont conduit la chaîne de valeur mondiale à une hyper-spécialisation. Pour ces composants les plus avancés, on parle souvent du domaine « More Moore », qui englobe typiquement les processeurs pour les ordinateurs ou les *data centers*. Pour la plupart des autres composants, ils utilisent des technologies moins miniaturisées, mais beaucoup plus diversifiées en termes de matériaux, d'architect-

ture et d'applications (on parle du domaine « More Than Moore », qui compte les systèmes sur puce, les capteurs, les imageurs, etc.) (Hartmann, 2022). En valeur, le marché « More Moore » représente environ 70 % du marché mondial en termes de chiffre d'affaires, mais moins de 30 % en nombre des composants.

Aujourd'hui, la production des composants est pour près de 80 % réalisée en Asie, notamment à Taiwan (la fonderie TSMC, qui produit majoritairement des processeurs de calcul). Les États-Unis sont, quant à eux, des acteurs importants pour les outils de conception des circuits intégrés et les équipements nécessaires à la fabrication des puces ; ils peuvent, bien sûr, compter sur les acteurs « systémiers » de référence que sont les fameux GAFAM. Pour ce qui est de l'Europe, elle voit sa part diminuer continûment, représentant désormais moins de 8 % de la production mondiale, une part de production répartie entre quelques acteurs (STMicroelectronics, Infineon, Bosch...). Elle peut néanmoins s'appuyer sur un équipementier hollandais de référence, qui est le seul au monde à maîtriser les outils de lithographie avancée (ASML).

Ce paysage ultra-concurrentiel a toutefois été remis en question par trois événements majeurs : 1) la pandémie de Covid-19 a perturbé plusieurs chaînes de valeur qui ont repris conscience de l'importance des semi-conducteurs à l'instar du secteur de l'automobile (Burkacky, 2022) ; 2) l'importance croissante accordée aux enjeux environnementaux et les conséquences de la guerre en Ukraine posent de façon non équivoque la question de l'énergie, mais aussi celle de l'approvisionnement pour certains matériaux et certains gaz nécessaires pour fabriquer les puces ; et 3) les tensions entre les États-Unis et la Chine constituent une remise en cause brutale du modèle hyper-mondialisé de la microélectronique (Crawford, 2022).

En réaction à ces menaces, des plans de réindustrialisation massifs ont été lancés sur les trois continents les plus industrialisés (Amérique, Asie et Europe), notamment sur le sol européen avec le Chips Act. C'est dans ce contexte que se pose la question de l'impact environnemental du domaine de la microélectronique.

Quels sont les enjeux d'une électronique plus « soutenable » ?

Cette problématique est relativement récente et, en la matière, l'Europe joue clairement le rôle d'avant-garde du fait de sa maturité et du volontarisme de son action sur les enjeux environnementaux. C'est aussi une question complexe et multiforme, car elle porte sur une chaîne de valeur très large aux impacts environnementaux variés. En pratique, c'est d'abord l'usage de la microélectronique à travers les TIC (les technologies de l'information et de la communication) qui a été documenté : en 2020, 1,8 à 3,9 % des émissions de gaz à effet de serre (GES) seraient ainsi dues au domaine des TIC (Freitag, 2021).

En France, les analyses de l'ARCEP et de l'Ademe (2022) ont permis d'avoir une vision plus précise de la situation ; elles ont montré que dans le cycle de vie des équipements et infrastructures numériques (terminaux fixes et mobiles, réseaux, centres informatiques), c'est la phase de fabrication qui a le plus d'impact (une valeur exacerbée par le mix énergétique relativement peu carboné de la France en comparaison de ceux des pays qui produisent majoritairement ces produits).

Au niveau mondial, il est encore difficile de donner des chiffres précis, comme l'a montré, en 2020, une étude recensant les publications sur le sujet (Freitag *et al.*, 2020). En général, le domaine de l'ICT se divise en trois grandes catégories : les réseaux, les *data centers* et, enfin, les dispositifs personnels (y compris les téléphones portables et les ordinateurs). En première approche, ces trois domaines ont des impacts carbone équivalents dans leur phase d'utilisation des équipements électroniques (Marquet, 2019). Une étude menée par l'Université de Harvard (Gupta, 2020) souligne toutefois le poids croissant de la phase de fabrication pour des objets nomades tels que les téléphones portables et les ordinateurs (par exemple, elle représente de 50 à près de 86 % de l'impact carbone des téléphones portables), une part d'autant plus importante que les composants sont performants et les durées d'usage sont « limitées ». Quant aux *data centers*, le recours croissant aux énergies renouvelables dans la phase d'utilisation augmente mécaniquement l'impact relatif de leur fabrication.

Pour ce qui est des processeurs de calcul, les industriels cherchent continûment à optimiser une figure de mérite appelée PPAC (power, performance and area, cost). En ce qui les concerne, les données accessibles et/ou normalisées sur l'impact environnemental des différentes étapes de leur fabrication ne sont pas encore complètement disponibles. Pirson (Pirson, 2022) fait cependant le constat que l'impact carbone par unité de surface d'un composant électronique augmente quand la taille des nœuds (et donc la complexité de la technologie en nombre d'étapes élémentaires) décroît ; une observation qui est confirmée dans une étude de l'Imec (Bardon, 2020). Il faut toutefois se rappeler que les performances par unité de surface croissent exponentiellement.

Concernant les usages de l'électronique, le futur sera marqué par une augmentation exponentielle des données produites. La 5G et l'IoT contribuent déjà à cette augmentation significative : 64 Zo (zettaoctets) ont été produits en 2022 et le cap des 2 000 Zo devrait être franchi en 2035, selon IDC (2018). Cette profusion de données s'accompagne d'une utilisation croissante de l'intelligence artificielle (IA), ce qui pose aussi la question de son impact environnemental, que ce soit au niveau de l'inférence ou de la phase d'apprentissage, par exemple pour la reconnaissance de la parole (Strubell, 2021 ; Lannelongue, 2021), ou pour l'intégralité du cycle de vie (Luccioni, 2022). On touche ici au cœur du paradoxe de Jevons, ou effet rebond (Sorrell, 2009), qui décrit l'extension des usages de la technologie au fur et à mesure des progrès réalisés et le risque que cela implique en termes d'impact

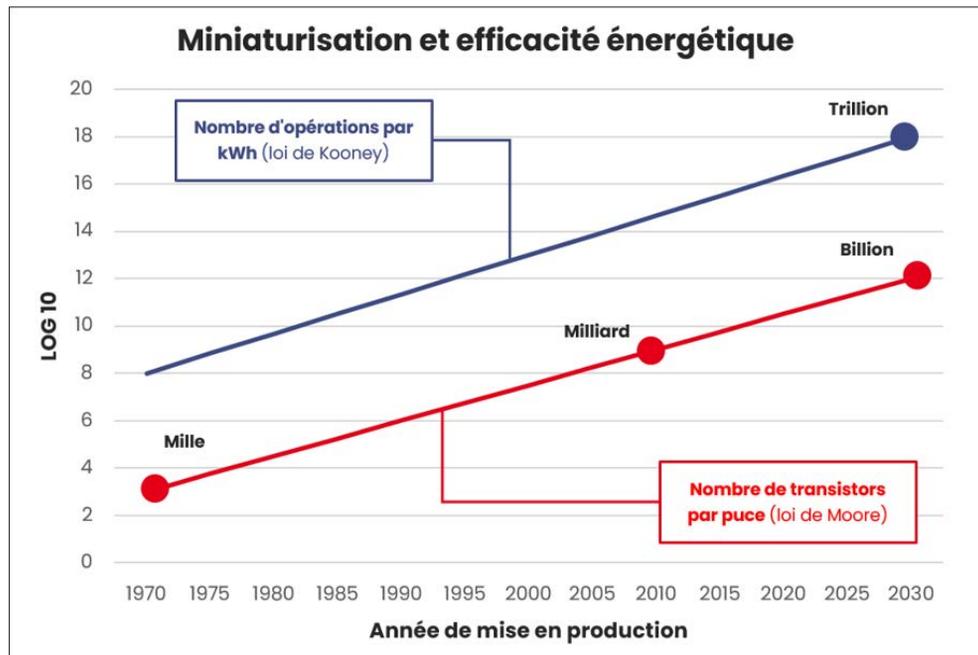


Figure 1 : Années d'introduction de nouveaux matériaux dans la conception des technologies des transistors CMOS (Complementary Metal-Oxide-Semiconductor).

environnemental. À ce titre, on peut citer deux exemples qui illustrent la complexité de cette question : durant les confinements, l'activité économique, grâce aux réseaux de communication (Internet, 4G/5G), a pu se maintenir, alors que, dans le même temps, le niveau des GES a baissé (Le Quéré, 2020). À l'opposé, il est établi que la multiplication de la *blockchain* et des fermes de calcul dédiées au minage ont entraîné une hausse sans précédent de la consommation électrique entre 2015 et 2021 (elle est passée de 4 Twh à 100-140 Twh).

Au-delà des émissions de GES, trois autres points en lien avec le domaine de la fabrication des semi-conducteurs méritent d'y porter attention : l'utilisation des matériaux, de l'eau et des gaz. Un téléphone portable intègre aujourd'hui plus de 60 matériaux différents : écran, batterie, circuits intégrés, etc. (Université de Birmingham, 2020) ; ces métaux pour un tiers ne sont pas recyclables. Les fonderies mondiales ont consommé 1 milliard de m³ d'eau en 2021 ; les trois quarts de cette consommation sont liés aux procédés de fabrication qui utilisent de l'eau ultra pure (Jones, 2022). Tous les fondeurs ont désormais bien intégré cette contrainte, notamment au travers du recours croissant au recyclage de l'eau. Pour ce qui est des gaz, les plus critiques en termes d'impact sont les gaz fluorés qui peuvent être utilisés pour les étapes de gravure sélective, de passivation et de nettoyage des chambres d'équipements, ou bien encore qui sont associés à des fluides caloporteurs. Cette préoccupation est déjà prise en compte depuis environ dix ans, avec une baisse constatée de leur utilisation d'environ 42 % selon l'ESIA (European Semiconductor Industry Association) ; les plans d'action pour le futur restent d'actualité, à l'exemple de ceux recensés par la Banque d'investissement européenne (EIB, 2022).

Les acteurs du secteur des semi-conducteurs sont désormais mobilisés

En pratique, l'amélioration continue des performances de calcul s'est toujours accompagnée d'une augmentation en parallèle des performances énergétiques des processeurs. C'est la fameuse loi de Koomey (2010), qui stipule que le nombre d'opérations par joule consommé double tous les dix-huit mois (voir la Figure 1 ci-dessus). Indubitablement, l'électronique a donc connu une très forte optimisation de sa consommation énergétique depuis quarante ans. S'y ajoute une spécialisation croissante des processeurs, qui permet, elle aussi, d'optimiser la consommation.

Plus récemment, les acteurs des semi-conducteurs se sont mobilisés sur les questions environnementales. Ils utilisent, pour la plupart, le cadre de référence proposé par le standard international du Greenhouse gaz protocol (GHG Protocol) pour déterminer leur impact (Scopes 1, 2 et 3)¹. Dans ce cadre, l'initiative Science Based Targets² est souvent citée comme une référence permettant de fixer des objectifs compatibles avec ceux de l'Accord de Paris, mais aussi de fournir des métho-

¹ Scope 1 : impact lié principalement à l'utilisation de gaz lors des étapes de réalisation des composants, du nettoyage des chambres, de la combustion, etc. ; Scope 2 : impact lié à l'électricité utilisée pour le chauffage et le refroidissement des locaux, à l'usage des équipements, aux exigences des salles blanches (climatisation, surpression, etc.) ; Scope 3 : il regroupe toutes les autres émissions indirectes de la chaîne de valeur : les émissions en amont sont celles générées par les fournisseurs ou leurs produits, tandis que les émissions en aval sont liées à l'usage de produits contenant des semi-conducteurs.

² <https://sciencebasedtargets>

dologies de mesure pour les calculs d'impact. Pour une fonderie, il reste toutefois compliqué d'évaluer correctement l'impact lié au Scope 3 du fait du manque de données relatives à l'usage des composants. La partie Fabrication, même si elle reste peu normalisée, fait en revanche l'objet de nombreuses améliorations de la part des fabricants eux-mêmes, mais aussi des équipementiers. À l'instar des GAFAM qui recourent massivement aux énergies décarbonées (IEA, 2022), on observe la même tendance au regard des objectifs de neutralité carbone annoncés pour 2030 (pour INTEL), voire même 2027 (pour STMicroelectronics). Pour preuve de la mobilisation des acteurs du domaine des semi-conducteurs, on peut citer l'initiative récente lancée par l'organisation Semi (SCC Semi Conductor Climate Consortium) qui regroupe la quasi-totalité de ces acteurs.

Ces évolutions importantes interviennent au moment où il est prévu d'augmenter la production globale de composants électroniques, avec la création de plus de 80 fonderies dans le monde (SEMI, 2022). L'Europe vise, de son côté, à produire 20 % des composants électroniques d'ici à 2030 (contre 8 % aujourd'hui). C'est dans ce cadre et celui de France 2030 que s'inscrit l'annonce faite à l'été 2022 de l'extension significative de l'activité sur le site de Crolles, avec une capacité de 1,2 million de plaques 300 nm par an, pour produire des composants dits FD-SOI³ pour STMicroelectronics et GlobalFoundries.

Quel rôle pour la R&D ?

Les semi-conducteurs constituent un domaine caractérisé historiquement par un taux de R&D important, représentant en moyenne près de 15 % du chiffre d'affaires annuel (SIA, 2022). Le CEA, au travers de son institut Leti, est considéré comme un des 6 RTO (Research Technological Organisation) de référence au niveau mondial dans le domaine de la micro-électronique (SIA, 2022). Il entend jouer un rôle moteur sur cet enjeu en apportant des innovations concrètes à ses partenaires industriels français et internationaux qu'il accompagne quotidiennement. Pour ce faire, une stratégie a été déployée. Elle s'appuie sur les trois piliers évoqués ci-après.

Innover au niveau de la fabrication et du recyclage : l'exemple des matériaux

Grâce à la généralisation des analyses de cycle de vie (ACV), il devient possible d'identifier concrètement les points critiques à traiter pour réduire l'impact carbone des produits et des technologies. On peut bénéficier aujourd'hui d'un cadre formel éprouvé aux

³ FD-SOI (Fully Depleted – Silicon On Insulator) : technologie de transistors qui est une alternative au FinFET. Inventée à Grenoble, elle présente des caractéristiques intéressantes en termes de consommation, de résilience face aux attaques électromagnétiques et de fonctionnalités radiofréquence, https://www.st.com/content/st_com/en/about/innovation---technology/FD-SOI.html

niveaux mondial et européen⁴, même si les données restent encore incomplètes tant sur la production que sur l'usage. Une ACV est encore plus pertinente quand elle concerne des technologies de type « More Than Moore », pour lesquelles les options technologiques peuvent être très variées. Le choix des matériaux est souvent un élément dimensionnant, que ce soit au niveau de leur intégration ou dans la phase de leur recyclage qui reste encore un maillon faible. Aujourd'hui, le taux de recyclage des dispositifs électroniques est estimé à moins de 15 % : c'est là un champ entier de progrès qui s'ouvre (Ernst et Raskin, 2021).

Il est également possible de réduire la quantité de matière utilisée. On peut citer ici l'exemple remarquable des substrats de carbure de silicium (SiC) en 200 mm, utilisés pour réaliser des composants de puissance destinés aux véhicules électriques. Le SiC est un matériau bien connu des électroniciens de puissance qu'ils apprécient pour ses performances à haute tension. Mais il a toujours souffert d'un handicap, tenant à la difficulté intrinsèque de réaliser des substrats « massifs » sur de grandes tailles de *wafer*⁵. En utilisant le procédé dit Smart Cut™⁶, il est possible de reporter une fine tranche de SiC actif sur un donneur (Di Cioccio, 1997). Il devrait être ainsi possible de généraliser l'utilisation du carbure de silicium et, dès lors, de réduire sensiblement l'impact carbone de la production des composants de puissance (SOITEC, 2021).

Une autre approche consiste à revisiter le choix des matériaux. Un exemple emblématique dans le domaine est celui des systèmes micro-électro-mécaniques (MEMS⁷) désormais utilisés pour produire des microphones (téléphones, écouteurs) en remplacement des solutions traditionnelles à électrets. Ces MEMS utilisent toutefois un matériau piézo-électrique qui contient du plomb, ce qui reste problématique au regard de la directive européenne ROHS⁸. Le CEA-Leti travaille donc à l'intégration industrielle d'un nouveau matériau de type potassium-sodium-niobate (KNN), qui présente des propriétés pertinentes (Shibata, 2022).

Il reste difficile d'intégrer tout le cycle de vie des technologies, cela a toutefois pu être réalisé dans le cas d'un composant d'une antenne 5G à 26 Ghz destinée à équiper les stations de base. L'étude a comparé une approche innovante à base de *switch* utilisant des matériaux à changement avec une solution classique

⁴ Standards ISO 14040 et 14044, European Product Environmental Footprint (PEF), method, L. 1410 standard for LCA of ICT goods.

⁵ *Wafer* : nom de la galette de substrat utilisé en microélectronique pour produire les composants. Souvent en silicium, elle peut également être réalisée avec d'autres matériaux, par exemple avec du carbure de silicium.

⁶ Procédé inventé par le CEA Leti et utilisé par SOITEC, <https://www.soitec.com/fr/produits/smart-cut>

⁷ MEMS : Microelectromechanical systems.

⁸ Directive 2002/95/CE du Parlement européen et du Conseil du 27 janvier 2003 relative à la limitation de l'utilisation de certaines substances dangereuses dans les équipements électriques et électroniques – ROHS (Restriction of the use of certain Hazardous Substances).

à base de diodes AsGa (Guerid, 2022) ; elle a montré des gains substantiels atteignables selon les scénarii de production et d'utilisation retenus.

Innover au niveau conjointement des futures applications et de leurs technologies

La compréhension du besoin technologique des applications futures est une tendance importante depuis plusieurs années pour anticiper et orienter au mieux les travaux sur les technologies (notamment dans le domaine du « More Than Moore ») : c'est désormais une nécessité pour répondre également aux enjeux environnementaux. À titre d'exemple, ce lien est crucial pour orienter les développements futurs de la technologie FD-SOI, qui connaît une utilisation croissante dans les domaines de l'automobile, des télécommunications ou encore de l'industrie. Comme évoqué plus haut, le site de STMicroelectronics à Crolles deviendra un centre de référence pour la production de nœuds 22 nm et 18 nm respectivement pour GlobalFoundries et STMicroelectronics. Le CEA, quant à lui, est chargé de préparer la future génération de nœuds (10 nm) : cet objectif fait partie intégrante de la stratégie France 2030 et de l'European Chips Act. Il est à cet égard prévu de proposer un référentiel cohérent ainsi que des objectifs précis en termes d'impact environnemental pour une technologie qui est d'ailleurs intrinsèquement bien adaptée aux applications à faible consommation.

Un autre exemple emblématique est celui de la préparation du standard 6G. Ce standard devrait se mettre en place d'ici dix ans, mais l'on sait d'ores et déjà qu'il nécessitera une évolution importante des technologies utilisées (par exemple, pour opérer à des fréquences très hautes (supérieures à 100 GHz et pouvant aller

jusqu'à 300 GHz) ou bien pour permettre la multiplication des stations de base et leur orchestration grâce à l'IA). L'Europe a d'ores et déjà lancé un projet de feuille de route (Hexa-X) en lien avec de nombreux acteurs français, dont le CEA-Leti qui en a explicité de façon claire la contrainte environnementale (communiqué de presse du CEA-Leti (2021)). On sait déjà que l'objectif fixé par cette feuille de route ne sera atteint que dans le cadre d'une approche globale qui rassemblera des technologies nouvelles de matériaux et de composants électroniques, mais aussi des architectures radio novatrices au niveau du téléphone portable ainsi qu'au niveau du réseau.

Créer des ruptures technologiques pour le calcul

Depuis une dizaine d'années, les processeurs de calcul connaissent une tendance à la spécialisation pour pallier aux problèmes de dissipation thermique apparus il y a dix ans avec la fin de la pertinence de la loi de Dennard (Dennard, 1974). Cette tendance a conduit, par exemple, à l'utilisation d'architectures spécialisées pour le traitement graphique ou bien pour des calculs d'apprentissage et d'inférence en matière d'IA. Une autre tendance importante est de pouvoir réaliser des calculs au niveau local, typiquement au niveau d'une maison ou d'un véhicule (on parle d'Edge Computing). Cela permet, en particulier, de baisser drastiquement l'énergie consommée en évitant le transfert de données vers le *cloud* (Zhirnov, 2014). Dans un article de référence, le CEA a listé neuf axes d'innovations technologiques qui peuvent permettre une baisse de la consommation du calcul (Lequepeys, 2021), en visant typiquement un facteur 1 000 d'amélioration de l'efficacité énergétique d'ici à 2030.

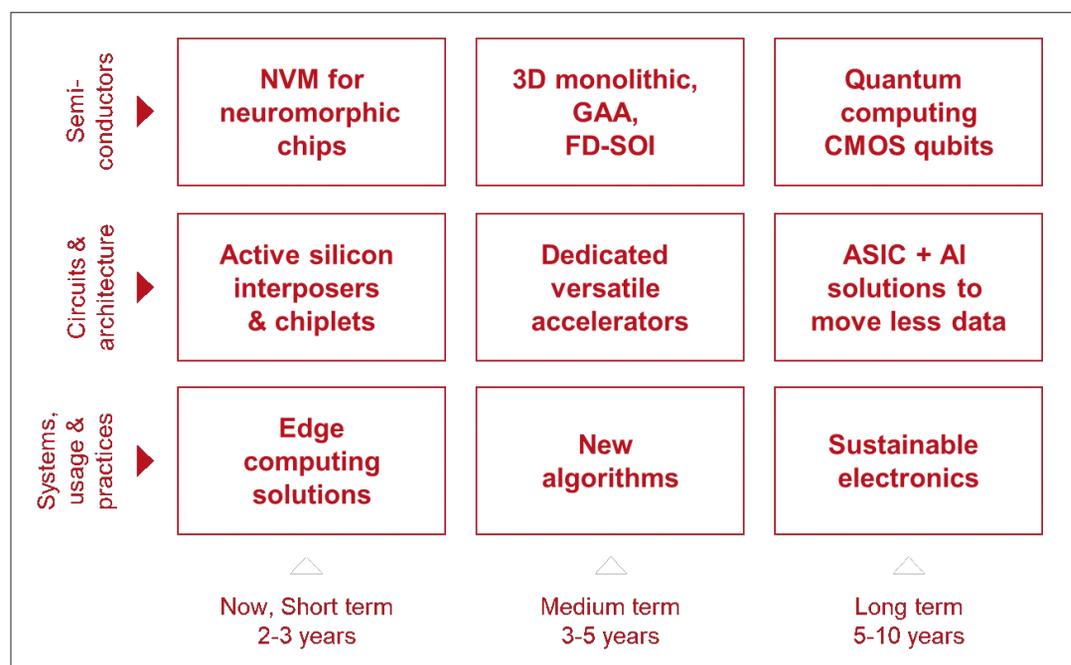


Figure 2 : Neuf façons de réduire la consommation des composants de calcul (Lequepeys, 2021).

On y trouve certaines pistes déjà citées *supra*, mais aussi des approches en rupture visant à revisiter les architectures de calcul au niveau même du matériel (*hardware*). Nous citons ici trois exemples :

- L'utilisation de mémoires non volatiles émergentes peut permettre de réaliser localement des traitements par réseaux de neurones à partir d'un faible nombre de données, éventuellement bruitées. Cette approche trouve son inspiration dans l'imitation du vivant, plus particulièrement du criquet. Ces travaux novateurs portés par E. Vianello et son équipe (CEA Leti, 2022) pourraient à terme être source d'une vraie rupture pour les applications utilisant des algorithmes temps réel, au plus proche des capteurs ou de l'application elle-même.
- En utilisant des mémoires résistives émergentes étroitement combinées à des transistors de type Gate All Around (GAA), il est théoriquement possible de revisiter l'architecture de Von Neuman utilisée massivement pour les processeurs depuis plus de soixante ans. On baisse ainsi la consommation résultant des transferts de données entre la mémoire et l'unité de calcul (Barraux, 2021). Des travaux sont en cours au CEA-Leti qui visent à étudier une telle approche, mais surtout à montrer qu'elle est viable d'un point de vue industriel. Ce projet appelé My-CUBE, retenu dans le cadre très prestigieux des bourses ERC, est dirigé par F. Andrieux. Il vise une réduction d'un facteur d'au moins 20 de la consommation électrique par rapport à une architecture classique.
- Le *quantum computing* est une rupture d'envergure qui fait l'objet de travaux importants au niveau international et dont les enjeux géopolitiques sont conséquents. Il est difficile et sans doute trop tôt aujourd'hui pour savoir quelle technologie sera la plus pertinente et à quelle échéance. Il est encore plus compliqué de statuer sur les gains atteignables en termes de consommation énergétique et d'empreinte carbone de cette future technologie. Pour autant, il est déjà temps de prendre en compte cet enjeu et de proposer un cadre adapté à cette dimension ; c'est ce que propose Alexia Auffèves (2022) de l'Institut Néel à Grenoble. On peut espérer que l'écosystème national se mobilisera rapidement dans le cadre de cette recherche.

Conclusion

La question de l'impact environnemental de l'électronique est désormais une préoccupation majeure des acteurs du secteur des semi-conducteurs : elle se pose au niveau de tout le cycle de vie des composants (fabrication, usage, recyclage) et exige d'adopter une vision holistique pour la traiter.

Les efforts importants désormais conduits dans les fonderies au niveau de leur consommation d'eau, des gaz utilisés ou de la décarbonation de l'énergie sont indispensables. De même, de nombreuses opportunités d'innovations se dessinent pour repenser les matériaux utilisés, les architectures électroniques et pour proposer de nouvelles approches en termes d'algorithmes.

Enfin, et surtout, il s'agit de concevoir dès maintenant les futures grandes évolutions des technologies de l'information (6G, Edge IA, calcul quantique...) à l'aune de la sobriété énergétique. Ce sont des évolutions sur lesquelles, heureusement, se mobilise la communauté des chercheurs et des industriels et qui devront probablement s'accompagner de la mise en place de cadres réglementaires appropriés pour éviter l'effet rebond.

Dans ce contexte, la relocalisation de la fabrication de composants sur le sol français et, plus largement, européen constitue une opportunité unique pour tous les acteurs impliqués de pouvoir prendre une part active dans la définition des réponses à ces enjeux et d'être force de proposition. C'est en tout cas l'ambition que nous pouvons nous donner au titre des prochaines années.

Références bibliographiques

- ADEME & ARCEP (2022), « Évaluation de l'impact environnemental du numérique en France et analyse prospective », *Note de synthèse réalisée par l'Ademe et l'Arcep*, 19 janvier.
- AUFFÈVES A. (2022), "Quantum Technologies Need a Quantum Energy Initiative", *PRX Quantum* 3 (2), 020101.
- BARRAUD S. *et al.* (2020), "3D RRAMs with Gate-All-Around Stacked Nanosheet Transistors for In-Memory-Computing", *IEEE IEDM conf.*
- BURKACKY O. *et al.* (2022), *The semiconductor decade: A trillion-dollar industry*, McKinsey & Company.
- BURKACKY O. *et al.* (2022), *Semiconductor shortage: How the automotive industry can succeed*, McKinsey & Company.
- CEA-LETI (2021), "6G: designing a sustainable way forward", Communiqué de presse, novembre.
- CEA-LETI (2022), "Scientist, Elisa Vianello, receives €3 million ERC Grant to develop Nanoscale Memories Inspired by Insect Nervous Systems", Communiqué de presse, mars.
- CHINA, "Country Commercial Guide", <https://www.trade.gov/country-commercial-guides/china-us-export-controls>
- CRAWFORD N. (2022), "A major leap towards decoupling in the advanced semiconductor industry", *International Institute for Strategic Studies*.
- DENNARD R. H. *et al.* (1974), "Design of ion-implanted MOSFET's with Very Small Physical Dimensions", *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 9, octobre, pp. 256-268.
- DI CIOCCIO L. *et al.* (1997), "Silicon carbide on insulator formation by the Smart-Cut® process", *Materials Science and Engineering: B*, vol. 46, Issues 1-3, pp. 349-356.
- EIB (European Investment Bank) – Project Carbon Footprint Methodologies (2022), "Methodologies for the assessment of project greenhouse gas emissions and emission variations".
- ERNST T. & RASKIN J. P. (2021), "Towards circular ICT: from materials to components", in DURANTON M. *et al.*, *HiPEAC Vision 2021*, January, pp. 122-129.
- ESIA (European Semiconductor Industry Association) (2021), "European semiconductor industry reduces its fluorinated greenhouse gas emissions by 42 percent in Europe during the last decade".
- FREITAG C. *et al.* (2020), "The climate impact of ICT: A review of estimates, trends and regulations", *Small World Consulting (SWC) Ltd*, Lancaster University.
- GARCIA BARDON M. *et al.* (2020), "DTCO including Sustainability: Power-Performance-Area-Cost-Environmental score (PPACE) Analysis for Logic Technologies", *IEEE*

- International Electron Devices Meeting (IEDM) 2020*, pp. 41.4.1-41.4.4.
- GUERID J. *et al.* (2022), "Toward Eco-Design of a 5G mmWave Transmitarray Antenna Based on Life Cycle Assessment", *2022 Joint European Conference on Networks and Communications & 6G Summit (EuCNC/6G Summit)*, Grenoble, June, pp. 440-445.
- GUPTA E. *et al.* (2020), "Chasing Carbon: The Elusive Environmental Footprint of Computing", *IEEE Micro*, vol. 42, n°4, March, pp. 37-47.
- HARTMANN J. (2022), « La loi de Moore de l'industrie des semi-conducteurs », rapport de l'Académie des technologies « Les technologies matérielles support du numérique futur ».
- IBS (International Business Strategies Inc.) (2022), "Semiconductor industry outlook", November.
- IDC (2018), "Data Age 2025", white paper.
- IEA (2022), "Data Centres and Data Transmission Networks", IEA, Paris, License CC BY 4.0, <https://www.iea.org/reports/data-centres-and-data-transmission-networks>
- JONES C. (2022), "Water Supply Challenges for the Semiconductor Industry", *semiconductor-digest*.
- KOOMEY J. G. (2010), "Outperforming Moore's Law", *IEEE Spectrum*, vol. 47, n°3, March, p. 68.
- LANNELONGUE L. *et al.* (2021), "Green Algorithms: Quantifying the Carbon Footprint of Computation", *Advanced Sciences*, vol. 8, Issue 12, June 23.
- LE QUERE C. (2020), "Temporary reduction in daily global CO₂ emissions during the Covid-19 forced confinement", *Nat. Clim. Chang.* 10, pp. 647-653.
- LEQUEPEYS J. R. *et al.* (2021), "Overcoming the Data Deluge Challenges with Greener Electronics", *ESSCIRC 2021 – IEEE 47th European Solid State Circuits Conference (ESSCIRC)*, pp. 7-14.
- LUCCIONI A. *et al.* (2022), "Estimating the Carbon Footprint of BLOOM, a 176B Parameter Language Model", 10.48550/arXiv.2211.02001.
- MARQUET K. *et al.* (2019), « Introduction aux impacts environnementaux du numérique », *Bulletin de la Société informatique de France*, 1024, pp. 85-97, fihal-02410129
- MOORE G. E. (1965), "Cramming more components onto integrated circuits", *Electronics*, vol. 38, n°8, p. 196.
- PIRSON T. *et al.* (2021), "Assessing the embodied carbon footprint of IoT edge devices with a bottom-up life-cycle approach", *Journal of Cleaner Production*, vol. 322, 1 November, 128966.
- SEMI (2022), "Global chip industry projected to invest more than \$500 billion in new factories by 2024", Reports, 12 décembre.
- SHIBATA K. *et al.* (2022), "KNN lead-free piezoelectric films grown by sputtering", *Applied Physics Letters* 121, 092901, 10.1063/5.0104583.
- SIA (Semiconductor Industry Association) (2021), "Strengthening the global semiconductor supply chain in an uncertain era".
- SIA (Semiconductor Industry Association) (2022), "American Semiconductor Research: Leadership Through Innovation".
- SOITEC (2021), "Greener SiC wafers with Smart Cut technology", *Compounds Semiconductor Issue*, vol. 27, issue VI.
- SORRELL S. (2009), "Jevons' Paradox revisited: The evidence for backfire from improved energy efficiency", *Energy Policy*, vol. 37, Issue 4.
- STRUBELL E. *et al.* (2020), "Energy and Policy Considerations for Modern Deep Learning Research", *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence*, 34(09), pp. 13693-13696.
- PISON T. *et al.* (2022), "The Environmental Footprint of IC Production: Meta-Analysis and Historical Trends", *ESSDERC 2022 – IEEE 52nd European Solid-State Device Research Conference (ESSDERC)*, pp. 352-355.
- UNIVERSITÉ DE BIRMINGHAM (2020), "Ensuring the United Kingdom's supply of strategic elements & critical materials for a clean future".
- ZHIRNOV V. *et al.* (2014), "Minimum Energy of Computing, Fundamental Considerations".

Energy and digital transitions

Preface

Gérard Roucairol, president of the digital pole of the Académie des technologies

Introduction

Olivier Appert, Académie des technologies, IFRI Energy Center, and **Richard Lavergne**, Conseil général de l'Économie

Towards increasing electricity and digital needs

Why data is vital to build a better energy future for the world

Dr Fatih Birol, Executive Director of the International Energy Agency

In this contribution, Dr. Fatih Birol, Executive Director of the International Energy Agency (IEA), highlights how data is essential to understand and map progress in clean energy transition, to bring down global greenhouse gas emissions, achieve key international Sustainable Development Goals on universal access to modern energy and ensure energy security worldwide. The article depicts how the IEA produces, maintains and continuously improves essential datasets, indicators and data-based projections to help countries navigate this challenge.

Energy consumption of digital uses in France

Michel Schmitt, Engineer General of Mines, member of the General Council of the Economy

In 2018, the Conseil général de l'Économie estimated the electricity consumption resulting from digital uses in France at 35,750 GWh, which was a clear drop from the figure in the previous 2008 study. This same report anticipated that, for similar uses, this consumption would be 31,843 GWh in 2030. In light of the last two editions (2020 and 2022) of the Digital Barometer, in this article we analyze the trends observed since 2018, compare the data anticipated at the time for 2022 with the current data, and update the 2030 forecast. In particular, containment has changed behaviors, with computers and tablets making a strong comeback during telecommuting periods.

Comparative strategic autonomy in energy and digital

Grégoire Postel-Vinay, General Economic Council

The three largest world blocs have divergent situations when it comes to energy autonomy: the United

States has become an exporter, China is dependent on energy for about 21% of its primary consumption, the European Union is dependent on energy for 57% of its primary consumption, and this figure has been rising for the past twenty years, while France is dependent on energy for 44%. A major effort is required by both the EU and France to improve these figures, which implies, among other things, a reversal of the trend for nuclear power. In the digital sector, the EU's dependence on the United States in particular is even greater. An awareness, aggravated by recent crises, is leading to major inflexions. In both cases, the order of magnitude of private and public investments required is one trillion euros over the decade. Similarly, new skills are needed, as well as long-term planning. Finally, the efforts to be made are closely linked between the two areas.

How is Europe organizing itself to ensure the convergence of efforts in favor of green and digital transitions?

Valérie Drezet-Humez, Head of the European Commission Representation in France

Achieving the twin green and digital transitions is a major challenge for the European Union. In its latest strategic foresight report on "Coupling the Green and Digital Transitions", the European Commission stresses that the implementation of the two transitions must be coordinated and coherent, in order to identify opportunities, trade-offs and compromises between the two ambitions. To this end, it identifies ten key areas of action to improve synergies while minimising the potential risks that arise from the coupling.

Making the necessary adjustments for a sustainable and digital transition will enable the emergence of a new, regenerative and climate-neutral economy. The European Commission is committed and determined to move Europe forward in this direction, while combining this twin transition with its democratic and social justice values, benefiting all citizens and territories.

Energy and digital: preparing for another battle

Jean-Pierre Huet, Chairman of the Scientific Committee of Équilibre des énergies

Today, digital technology is often singled out as an unbridled consumer of electrical energy. However, considerable progress has been made, but the extension of the services offered, the rebound effect and the excesses of a few gluttonous applications mean that consumption will probably continue to increase in the future.

It is in the general interest to contain this consumption while decarbonizing it. But we must also look at

their primary cause, i.e. the very efficiency of electronics as a means of processing bits of information. We then realize that electronics is a particularly inefficient process in terms of thermodynamics, but that there are also ways of progressing in this area that could constitute a real revolution, as was the arrival of LEDs in the field of lighting.

This is the challenge posed to spintronics, which proposes to control electrons not only by their electrical charge, but also by their spin. This is a field in which France has good assets, which must be preserved and exploited.

Digital technologies are both part of the environmental problem and solution

Patrice Geoffron, LEDa, Université Paris-Dauphine, Université PSL, IRD, CNRS

The debate on the environmental impact of digital technology is complex and cannot be approached simply by observing the increase in its weight in CO₂ emissions or electricity consumption. Recent work has made it possible to improve the understanding of induced effects, in particular by establishing the extent to which the uses of digital technology influence the emissions trajectory of States or act on the co-benefits of climate action (such as air quality). Furthermore, these analyses must be placed in the context of the health crisis (and the development of 'remote' socio-economic activities), as well as the energy crisis (which involves optimising systems that are becoming increasingly complex due to the accelerated development of renewables, efficiency efforts, etc.). This work leads to a contrasting assessment of the environmental impact of digital technology (which, however, does not invalidate the need for sobriety efforts).

What about beyond the Moore's and Koomey's laws?

Dr Vincent Mazaurec, Principal Scientist, Schneider Electric, **Alexia Auffèves**, Director of Research at the CNRS, Director of the international laboratory MajuLab of the CNRS and co-founder of the Quantum Energy Initiative, **Olivier Ezratty**, Consultant, author and co-founder of the Quantum Energy Initiative and **Sergio Ciliberto**, Director of Research at the CNRS, École normale supérieure de Lyon

For nearly fifty years, Moore's and Koomey's laws symbolized the continuous progress in the computing performance of microprocessors and accompanied – even founded – the exceptional growth of the semiconductor industry. Thus, computers have become smaller and cheaper, while being faster and more powerful; thus fueling a perpetual "rebound effect" in the information and communication technologies (ICT) sector which has still not reached "fullness"! Nevertheless for a few years, the manufacturers of microprocessors are faced the physical limits of the assumptions which had made possible to conjecture the Koomey's law; so that the future of the semiconductor industry and more generally of the ICT sector must now be considered beyond Moore's Law.

At the same time, the current massification of data has led to identify the ICT sector as being largely intensive in electrical energy, and therefore highly emissive in CO₂, but also extracting critical materials, while it was viewed as "immaterial" few years ago. To consider the role that information and communication technologies can play as a response to the sustainability challenges, it is necessary to relativize the notion of computational performance and to turn back to the link between information and energy, which has been stated, including in the digital context, long before Moore's Law. Moore's and Koomey's laws then only appear as contextual "paths" leading to thermodynamic maturity, which is measured by a tendency to reversibility. In order that the "data deluge" does not turn into an "energy wall", other paradigms will have to be considered to accompany the journey towards sustainability of the information and communication technology sector.

Decarbonization of the economy in the context of new models

Digital, an underutilized solution to power system management challenges

Étienne Beeker, Scientific advisor at France Stratégie

The Ukrainian crisis has revealed the double fragility of the European electricity system: a very high exposure to gas and to Russia, its main supplier, but also an under-capacity in controllable production means. This crisis, which only concerns Europe, can be blamed on the adventurism of European energy policy, which wanted to set up a new system based on intermittent renewable energies, leading to the overly rapid elimination of the old system and forgetting the imperatives of security of supply and competitiveness. Many controllable production facilities have been shut down, without thinking about compensating for the resulting flexibility deficit. The use of digital technology could fill this gap. However, although the corresponding technologies are mature, they are still notoriously underused, as is the case with Linky in France, which is practically deployed throughout the country and is designed to control electricity demand.

The place of digital technology in the energy transition

Gilles Guérassimoff, Professor at the Centre de mathématiques appliquées (CMA) at the École des Mines de Paris

The energy transition is on all fronts to work towards limiting the effects of climate change. Digital technology is an obvious candidate to contribute to the success of this transition, given the match between the climate emergency and the sector's dynamic development. To attempt to assess the place of digital technology in the energy transition, it is important to first define the scope of the concept of digital technology. Next, it is necessary to quantify its energy impact to evaluate the applications that will be beneficial to the transition.

Finally, the risks and limits to its deployment must not be overlooked. A few examples are given to illustrate the preferred areas of application.

The role of flexibility in today's and tomorrow's power system

Alain Burtin, Head of Energy Management activities in the EDF Group's R&D department

Electricity cannot be stored. It must be produced, transported and distributed when needed. This requires flexibility margins and levers to ensure the physical adjustment of electricity supply and demand at every moment, while respecting predefined criteria for the security and reliability of electricity networks. The decarbonization of the electricity mix with the massive development of renewable energies is profoundly changing the fundamentals of power system operation, whose flexibility needs are increasing in order to manage the variability of renewable energies, while the main sources of flexibility constituted by conventional power plants are decreasing. In this article, we discuss the rise of flexibility issues in today's power system and the levers used to meet them, the adaptations needed to meet the European objectives for 2030, and the post-2030 outlook.

Is blockchain good for the climate?

Paul Jolie, Engineer General of Mines, General Council of the Economy

The public blockchain is a recent technology that allows trust to be created without a centralized body. Blockchain is based on a peer-to-peer network. The damage or loss of one node will not affect the functioning of the whole system. With its properties of tamper-proofness, traceability and transparency, the blockchain enables the creation of notarisation services in a digital world between actors who do not a priori trust each other.

Recent applications using blockchain technology include crypto-currencies, two of which have been very successful: bitcoin and Ethereum. Yet, between 2018 and 2022, the annual amount of electricity from global crypto-assets has increased significantly. As of August 2022, published estimates of total global electricity consumption for crypto assets ranged from 120 to 240 billion kilowatt hours per year, a range that exceeds the total annual electricity consumption of countries like Argentina or Australia. This is equivalent to 0.4% to 0.9% of the world's annual electricity consumption and is comparable to the annual electricity consumption of all data centres in the world. This consumption is mainly due to mining activities (which are used to establish a consensus between players) using the so-called "Proof of Work" (PoW) method, used in particular by bitcoin.

In this sense, the blockchain, the core technology of bitcoin, is a major contributor to greenhouse gas emissions. Fortunately, there are other consensus mechanisms that consume less energy, such as the "Proof of Participation" (PoS) mechanism used by Ethereum.

On the other hand, the new services offered by blockchain are particularly attractive for combating global warming.

For example, blockchain can facilitate exchanges between energy producers that are difficult to store. It is also very suitable for helping to create decentralised and distributed infrastructures, while guaranteeing the origin of energy thanks to its traceability properties, reinforcing consumers' confidence in the real origin of the energy they consume.

Thus, through blockchain, a collaborative process between states should become possible to develop effective and evidence-based environmental performance standards.

Digital technology as a vector for the decarbonization of economic activity sectors

How can Europe's "industrial" reclamation of digital technology contribute to carbon neutrality?

Aurélie Picart, General Delegate of the Strategic Committee on New Energy Systems Industries

To ensure that the contribution of digital technology to carbon neutrality is not offset by an increase in the use of digital technology, it is necessary to take coherent action on three major levers: research, changes in behaviour and the development of decarbonised and competitive energy.

But more broadly, achieving our decarbonisation objectives and our ability to influence international climate negotiations depend on our industrial, digital and energy sovereignty.

We must therefore strengthen and decarbonise our industrial sectors and secure our supplies, while mobilising the demand of the European internal market and developing key technical skills. Europe has begun to shift its policy in this direction. A consensus must quickly be reached between the European countries to build a coherent and ambitious policy to meet the challenges posed by the American Inflation Reduction Act and inflation.

How to reconcile decarbonization and industrial competitiveness?

Romain Bonenfant, Head of the Industry Department at the Directorate General for Enterprise

Containing climate change requires decarbonizing our industry. This structural transition calls for an appropriate regulatory framework to ensure a level playing field for both EU industry and third countries', and create favorable conditions to foster private investment for decarbonization projects. Breakthrough technologies are needed to reach emission reduction targets compatible with climate objectives. The private sector will not be in a position to finance entirely these innovations, considering associated risks. In this context, industry decarbonization should be planned to optimize

transition costs and focus public funding where it is most required.

Digital, ally or enemy of the ecological transition?

Claire Tutenuit, General Delegate of Entreprises pour l'Environnement (EpE), and **Benoît Galaup**, Head of Digital and Environment at EpE

Characterised by an extremely rapid pace of innovation, the ongoing digital revolution is transforming our notions of time and space and profoundly changing our ways of accessing knowledge and consumption, and reaching others. Used wisely, these technologies can bring many benefits, but today, they are mainly at the origin of significant impacts on the environment. Therefore, the new challenge for companies is to reduce their environmental footprint while continuing their digital transformation. Within EpE's Digital and Environment Commission, nearly sixty large companies have analysed the conditions for accelerated adoption of digital technology with a reduced footprint as well as being useful for their ecological transition and that of society. The publication "The digital, ally or enemy of the ecological transition?" Summarises this work and shows encouraging results. It suggests the adoption of frugal behaviours to drive ecological and digital transition at the same time.

The contribution of digital technology to the decarbonization of mobility: the case of the automobile

Christophe Midler, Director of Research Emeritus, Management Research Center of the École Polytechnique-i3, CNRS-IPP, member of the Académie des technologies, and **Patrick Pélatà**, Former Chief Operating Officer of Renault, former Chief Automotive Officer of Salesforce, member of the Académie des technologies

Digital technologies have had a major impact on CO₂ emissions from cars, mainly through improved engine management, since the early 1990s. The cumulative effect of these 30 years of innovation is about 200 MtCO₂ per year for Europe.

However, apart from electric vehicles, where most of the innovation comes from chemistry and power electronics, the innovations we are seeing today, which are based on digital technology (telecommuting, e-commerce, car-sharing, VTC, shared mobility,

whether soft or not), have a much lesser impact on decarbonizing mobility.

What the future holds for us is still very uncertain. But autonomous driving, especially when applied to shared robot cabs, could make a significant contribution to and even accelerate the major transformation that is the electrification and reduction of the car fleet.

The contribution of digital technology to the decarbonization of buildings

François Bertièrè, President of Foncière Fiminco Reim

The building and real estate industry is undergoing a profound change as a result of the energy transition. In this respect, digital tools are powerful assets to take up the related challenges in a sector that was lagging behind the industry in the digital field.

In this article, we present the current advances made possible by digital technology in the fields of new construction, renovation and operation of buildings and neighborhoods, giving examples of innovative solutions. It highlights the importance of regulation and the perspectives opened by the Building Information Model, life cycle analysis and the digital twin. It concludes that regulatory constraints must be accompanied by a policy of training, support and incentives.

How to reduce the environmental impact of microelectronics in a rapidly changing semiconductor field?

Sébastien Dauvé, Director of CEA-Leti, and **Léa Di Cioccio**, Fellow and research director at CEA-Leti

Microelectronics is now an integral part of many countries' strategies, and the global landscape is likely to change in the coming years to rebalance the value chain. It is in this unprecedented context that the question of the environmental impact of microelectronics is increasingly being raised through the production of its components, but also through its uses. Industry and research players are fully mobilized to achieve the objective of reducing its carbon footprint through concrete actions. They are also integrating this dimension into the design of future microelectronics technologies and components. In this article, we take stock of the issues and initiatives in this area and give concrete examples of innovations underway, particularly at the CEA.

Issue editors:

Olivier Appert and Richard Lavergne

Ont contribué à ce numéro



D.R

Olivier APPERT a été président-directeur général d'IFP Énergies nouvelles de 2003 à 2015 et du Conseil français de l'énergie, le comité français du Conseil mondial de l'énergie de 2010 à 2018. Il est membre de l'Académie des technologies, président de France Brevets et conseiller du Centre Énergie de l'IFRI.

Ancien élève de l'École polytechnique, ingénieur général des Mines, il a commencé sa carrière au service des Mines de Lyon, puis a occupé différents postes au ministère de l'Industrie et au cabinet du Premier ministre. En 1987, il a pris la responsabilité de l'activité Radiocommunication mobile au sein de la société Télécommunications radioélectriques et téléphoniques (TRT). Nommé en 1989 directeur des hydrocarbures au ministère de l'Industrie, il a rejoint en 1994 la direction de l'IFP, où il a été en charge notamment de la Recherche & Développement et de sa filiale, une *holding* technologique cotée en Bourse. Il a été nommé en octobre 1999 directeur de la coopération long terme et de l'analyse des politiques énergétiques au sein de l'Agence internationale de l'énergie (AIE).

à 2009, puis, depuis 2010, intervient auprès de France Stratégie, en tant que conseiller scientifique.

Ses domaines d'expertise recouvrent la plupart des aspects liés à la prospective énergétique et aux systèmes énergétiques, en particulier à l'économie des systèmes électriques. Ses derniers articles et rapports portent sur le *market design* de l'électricité (2022), la dépendance du système électrique européen au gaz (2021), la sécurité d'approvisionnement en électricité (2021), les impacts de la crise du Covid-19 sur le système électrique (2020), le futur des réseaux de distribution (2019), la place du gaz dans la transition énergétique (2018), la transition énergétique allemande (2017)...

Il est ancien élève de l'École polytechnique (X72) et titulaire d'un DEA en systèmes d'information de Paris VI.



D.R

Alexia AUFFÈVES est directrice de recherche du CNRS, en fonction au laboratoire international MajuLab (Singapour) qu'elle dirige. Elle est spécialisée en thermodynamique quantique et en énergétique des technologies quantiques. Elle a lancé en 2022 la Quantum Energy Initiative. Ancienne élève de l'École normale supérieure de Lyon et licenciée en philosophie,

elle a effectué sa thèse en physique quantique expérimentale sur les chats de Schrödinger et la frontière classique-quantique dans le groupe de Serge Haroche au LKB de l'ENS.



© Bouygues Immobilier

François BERTIÈRE est ingénieur (X69, École nationale des Ponts et Chaussées 74) et architecte DPLG. Après un début de carrière au sein de l'administration centrale du ministère de l'Équipement et à la DDE de Haute-Corse, il a exercé les fonctions de directeur du développement urbain de la ville nouvelle de Cergy Pontoise. En 1985, il rejoint le groupe Bouygues, où, après avoir occupé diverses fonctions, il est nommé PDG de Bouygues Immobilier de 2001 à 2019. Il est aujourd'hui président de la Foncière Fimincio Reim.

Il est membre de l'Académie des technologies depuis 2016.



D.R

Étienne BEEKER, après une dizaine d'années passées dans la R&D en matière de systèmes d'information au sein d'organismes de recherche publics et privés, a rejoint EDF R&D en 1990. Il a été amené à travailler sur la modélisation et l'optimisation des systèmes électriques, puis à occuper plusieurs postes de responsabilité et d'expertise au sein de cette même entreprise. Il a ensuite collaboré avec l'Ademe de 2007



D.R

Le **Dr Fatih BIROL** (@IEABirol) est directeur exécutif de l'Agence internationale de l'énergie (AIE) depuis septembre 2015. Sous sa direction, l'AIE a entrepris son premier programme de modernisation depuis sa création en 1974, avec une ouverture aux pays émergents du recours à l'Agence en tant que référence mondiale pour les transitions énergétiques.

De même, l'Agence a vu son mandat élargi en matière de sécurité énergétique au-delà du pétrole pour englober le gaz naturel, l'électricité et les minéraux critiques.

Il a travaillé plus de vingt ans à l'AIE avant d'y assumer des fonctions exécutives. Il a notamment occupé le poste d'économiste en chef, étant responsable, entre autres, du World Energy Outlook, le rapport annuel phare de l'Agence.

Il a été désigné par les magazines *Time*, *Forbes* et le *Financial Times* comme une des personnalités les plus influentes de la scène énergétique mondiale. Il préside le Conseil de l'énergie auprès du Forum économique mondial (WEF) et participe également au Conseil consultatif placé auprès du Secrétaire général des Nations unies dans le cadre de l'initiative « Énergie durable pour tous ».

Il a reçu de nombreuses décorations, dont celles de l'ordre national de la Légion d'honneur de la France en 2022, de l'ordre du Soleil levant du Japon, de l'ordre royal de l'Étoile polaire de Suède, ainsi que les plus hautes décorations présidentielles conférées par l'Autriche, l'Allemagne, le Brésil et l'Italie.

Avant de rejoindre l'AIE, il a travaillé pour l'Organisation des pays exportateurs de pétrole (OPEP), à Vienne. Il est titulaire d'un diplôme d'ingénieur de l'Université technique d'Istanbul et d'un doctorat de l'Université technique de Vienne en économie de l'énergie. Il est également titulaire d'un Doctorat honoris causa de l'Imperial College de Londres.



D.R

Romain BONENFANT est, depuis septembre 2020, chef du service de l'Industrie au sein de la direction générale des Entreprises (DGE). Il y exerçait précédemment les fonctions de sous-directeur des réseaux et des usages numériques. Diplômé de l'École polytechnique et ingénieur des Mines, il a commencé sa carrière en 2006

dans les institutions européennes, à la DG Concurrence de la Commission européenne en tant que rapporteur d'affaires de concentrations ou d'antitrust, puis à la Représentation permanente de la France auprès de l'UE sur les dossiers liés à l'économie numérique et à la culture. Il a ensuite intégré, en 2012, l'Arcep, où il était directeur chargé de la régulation des réseaux fixes haut débit/très haut débit, avant d'être nommé, en 2016, conseiller Entreprises et affaires industrielles au sein du cabinet du Premier ministre. Il a ensuite travaillé deux ans dans le conseil en stratégie pour le compte d'entreprises industrielles, avant de rejoindre la DGE.



D.R

Alain BURTIN est directeur des programmes Management d'énergie à EDF R&D. Il est diplômé de l'École nationale des Ponts et Chaussées et possède un DEA en intelligence artificielle. Il a rejoint la R&D de EDF en 2007 après un parcours qui l'a amené à œuvrer au sein de cette entreprise dans le service Études économiques générales, à la direction internationale, au pôle Industrie et à la direction Optimisation Trading.

Dans le cadre du développement du groupe EDF et comme consultant pour des sociétés d'électricité étrangères, il a acquis une large expérience des systèmes et marchés électriques en France, en Europe et à l'international. Son expertise porte sur l'économie et la gestion des systèmes électriques. Il a notamment développé le modèle de *dispatching* national uruguayen (UTE) et le modèle de gestion du marché de gros argentin (CAMMESA). Il a réalisé des études de plans directeurs Production (Sichuan, Sénégal, Bulgarie), conduit des projets hydrauliques (Thaïlande, Costa Rica, Cameroun) et réalisé des études tarifaires et institutionnelles (Argentine, Mexique, Ukraine, Russie). Dans le cadre de l'ouverture des marchés en Europe, il a mis en place une compétence d'analyse du marché européen.

L'ambition du programme « Management d'énergie » est d'accompagner le groupe EDF dans le contexte de la transformation des systèmes énergétiques et des marchés électriques. Cette ambition se décline au travers de deux actions concrètes : anticiper les évolutions et éclairer les enjeux, et fournir les méthodes et les outils nécessaires pour cela. Le programme réalise des études et des analyses technico-économiques des systèmes énergétiques du futur, développe les méthodes et outils d'aide à la décision pour la valorisation d'un portefeuille d'actifs allant de l'investissement jusqu'à la gestion à court terme, contribue à la maîtrise des impacts du changement climatique sur les activités du groupe et renforce la capacité de gérer l'exposition de l'équilibre offre-demande aux aléas grâce à des outils avancés de prévision de la production EnR à différentes mailles.



D.R

Sergio CILIBERTO est directeur de recherche émérite au Laboratoire de physique de l'École normale supérieure de Lyon. Il a étudié à l'Université de Florence en Italie et il a été directeur de recherche au CNRS de 1991 à 2020. Il a travaillé comme chercheur invité dans plusieurs laboratoires en France et l'étranger. Il

est un expérimentateur qui s'est intéressé à plusieurs sujets de recherche, comme l'hydrodynamique, la science des matériaux, la dynamique chaotique et, dernièrement, à la thermodynamique stochastique et à la connexion entre thermodynamique et information. Il a obtenu en 2010 un ERC Advanced Grant, en 2018 un prix Académie des sciences et en 2019 le prix de physique statistique et de physique non linéaire de l'European Physical society. Il est l'auteur de 180 articles scientifiques. Il a été directeur de laboratoire et vice-président en charge de la recherche à l'ENS de Lyon. Il a été membre de plusieurs comités nationaux (CNRS, AERES) et internationaux (ERC, Minerva Foundation).

Sébastien DAUVÉ est diplômé de l'École polytechnique et de l'ENSAE (SUPAERO). Il débute sa carrière à la DGA en 1997, à Bruz dans le domaine des radars. En 2003, il rejoint l'institut Leti du CEA et travaille en



@C.Morel CEA-Leti

tant que manager sur différents projets d'innovation et de transfert à l'industrie pour les domaines de l'automobile, la sécurité ou encore la Défense. Le 1^{er} juillet 2021, il est nommé directeur du CEA-Leti.



D.R

Léa DI CIOCCIO est Fellow et directeur de recherche au CEA-Leti. Elle est actuellement directrice du programme CEA-Leti Éco-innovation. Depuis 1990, date où elle a intégré l'organisme précité, elle a mené des activités de recherche et de développement en matériaux, en épitaxie, en collage direct..., dans les domaines de l'intégration 3D et des composants

de puissance. Elle est l'auteure de plus de 180 publications et 40 brevets. Concernée par les transitions socio-écologiques en cours, elle œuvre à introduire les nouveaux paradigmes en la matière dans la stratégie de l'organisme précité et ses innovations.



D.R

Valérie DREZET-HUMEZ est cheffe de la Représentation de la Commission européenne en France depuis 2021. Justifiant de vingt-sept années d'exercice à la Commission, elle s'appuie sur sa solide expérience politique, ses compétences en matière de communication stratégique et de gestion et son expertise juridique dans les affaires européennes.

Depuis 2010, elle a occupé plusieurs postes au Secrétariat général, dont celui de cheffe d'unité chargée des Briefings à l'intention du président et des vice-présidents, touchant ainsi aux priorités stratégiques et à l'actualité politique.

Auparavant, elle dirigeait l'équipe chargée des procédures écrites, des procédures d'habilitation et de délégation au sein du Secrétariat général, où elle a acquis une connaissance approfondie du fonctionnement de la Commission, notamment de tout le processus de la prise de décision. Précédemment, elle a été assistante politique du Secrétaire général adjoint, puis du Secrétaire général, et ce après avoir quitté la direction générale de la Traduction, où elle était assistante politique du directeur général. Autant de postes qui l'ont amenée à traiter des dossiers à portée politique.

Elle a rejoint la Commission européenne en 1995, pour travailler au sein de la direction générale de l'Environnement, où elle s'est occupée des secteurs de l'Industrie et de l'Environnement, ainsi que de la Coordination stratégique, domaine essentiel dans l'agenda politique actuel.

Elle est juriste diplômée de la faculté de droit de l'Université de Lyon III, où elle a acquis une spécialisation en droit de l'Union européenne.



© Franck Disegni

Olivier EZRATTY est consultant et auteur spécialisé dans les technologies quantiques. Il a notamment produit des ouvrages de référence, comme « Comprendre l'informatique quantique » (septembre 2020) et sa version anglaise "Understanding Quantum Technologies" (septembre 2021), diffusés gratuitement au format PDF. Il anime deux séries de *podcasts* (Quantum et Decode Quantum) avec Fanny Bouton. Il est aussi enseignant et formateur sur les technologies quantiques à l'EPITA, au CEA INSTN, ainsi que pour Capgemini Institut. Il est expert pour BpiFrance et est personnalité qualifiée du plan « France 2030 ». Enfin, il est cofondateur de la Quantum Energy Initiative avec Alexia Auffèves, Robert Whitney et Janine Spettstoesser.



D.R

Benoît GALAUP est titulaire du diplôme d'ingénieur de l'École d'ingénieur de Purpan et du double diplôme de master de sciences en agro-écologie délivré par l'Institut supérieur d'agriculture Rhône-Alpes (ISARA) et l'Université norvégienne des sciences de la vie (NMBU). Il justifie d'une expérience en recherche agronomique (INRA), en gestion de projets de

restauration écologique et en conseil en développement durable, ainsi qu'en finance durable et en agriculture ; il intervient en France et à l'international.

Depuis 2021, il est responsable Biodiversité, finance et numérique de l'association Entreprises pour l'Environnement (EpE), le partenaire français du WBCSD.



D.R

Patrice GEOFFRON est Docteur en économie industrielle. Il est professeur à l'Université Paris-Dauphine, dont il a été le président intérimaire et le vice-président international. Il en a également dirigé le laboratoire d'Économie (LEDa) de 2007 à 2015. Il est, depuis plusieurs années, professeur invité à l'Université Bocconi de Milan, ainsi

que membre du Cercle des économistes. Actuellement, il dirige l'équipe Énergie-Climat du LEDa, qui anime plusieurs chaires de recherche (Économie du climat, Économie du gaz, Marchés européens de l'électricité) et un master (Énergie-Finance-Carbone). Il est membre du conseil scientifique du CEA. Auparavant, il a notamment siégé au conseil mondial de l'International Association of International Association for Energy Economics et est intervenu en tant qu'expert auprès de la Convention citoyenne pour le climat. Il est coéditeur de la revue *Economics and Policy of Energy and the Environment* et membre du comité de rédaction de l'*International Journal of Management and Network Economics*.



D.R

Gilles GUÉRASSIMOFF est professeur à l'École des mines de Paris au Centre de mathématiques appliquées (CMA), dont il assure la codirection. Il dirige le mastère spécialisé en optimisation des systèmes énergétiques, ainsi que la formation spécialisée en finance et changement climatique. Il justifie de plus de vingt-cinq années

d'expérience dans la formation et la gestion de programmes éducatifs en relation étroite avec des universitaires et des industriels. Il assure des cours et des conférences sur les systèmes énergétiques pour plusieurs institutions. Son expertise en modélisation, contrôle et prospective des systèmes énergétiques l'a amené à conduire plusieurs projets de modélisation des systèmes énergétiques afin de réaliser des études prospectives pour la prise de décision ou la conception d'algorithmes pour l'optimisation dans les villes intelligentes.



D.R

Jean-Pierre HAUET est ancien élève de l'École polytechnique et est ingénieur du corps des Mines. Il a commencé sa carrière dans l'administration en tant que chargé de mission auprès du délégué général à l'Énergie et rapporteur général de la Commission de l'énergie du Plan. Il est ensuite entré à la Compagnie générale

d'électricité (CGE), où il a occupé différentes fonctions : tout d'abord, comme président-directeur général des Laboratoires de Marcoussis, du centre de recherches d'Alcatel-Alsthom, puis comme directeur général Produits et techniques de Cegelec et, enfin, en tant que Senior Vice-President & Chief Technology Officer du groupe Alstom.

Depuis 2002, il est Associate Partner de KB Intelligence et directeur général de KB Crawl SAS. Il exerce des activités de conseil dans les domaines de l'énergie, des automatismes, des radiocommunications et de la cybersécurité.

Il est également président du Conseil scientifique, économique, environnemental et social de l'association Équilibre des énergies (EdEn), président de la section française de l'ISA (International Society of Automation) et éditeur à *Passages*.

Il est l'auteur de nombreuses publications, dont un ouvrage, « Comprendre l'énergie – Pour une transition énergétique responsable », paru aux Éditions L'Harmattan, en 2014.

Paul JOLIE est ingénieur général des Mines, diplômé de l'École polytechnique et de l'École nationale supérieure des télécommunications. Il est également titulaire du MBA Edhec.

Après une carrière passée au centre de recherche de France Télécom et dans différents services opérationnels de l'opérateur, il rejoint l'administration en 2008 pour occuper un poste de DSI adjoint au ministère des Affaires étrangères. Après un passage à l'INRIA, il occupe le poste de sous-directeur de l'informatique centrale au ministère de l'Économie et des Finances. Après deux ans en tant que conseiller pour le numérique auprès du ministre d'État de Monaco, il revient à Bercy pour occuper un poste de conseiller au SISSE. Il rejoint le Conseil général de l'Économie en 2020, en tant que référent Intelligence artificielle.



D.R

Richard LAVERGNE est ingénieur général honoraire du corps des Mines, diplômé de l'École polytechnique (promotion 1975) et de l'École supérieure de métrologie et de Télécom Paris.

Il a été membre permanent du Conseil général de l'Économie (ministère de l'Économie, des Finances et de la Relance) de

janvier 2017 à janvier 2021, où il était notamment référent Énergie et climat. Il a été également chef de projet du jumelage UE-Maroc « Appui au renforcement du secteur de l'énergie » de 2018 à 2020.

De 2008 à 2016, il a été conseiller à la fois auprès du directeur général de l'Énergie et du Climat (DGEC) et de la Commissaire générale au Développement durable (CGDD), au sein du ministère chargé de l'Environnement et de l'Énergie. À ce titre, il a assuré notamment les missions de vice-président du Comité permanent pour la coopération à long terme de l'Agence internationale de l'énergie, de président pour l'UE du groupe thématique sur les marchés et les stratégies énergétiques dans le cadre du Dialogue énergétique UE-Russie, de Secrétaire général du Comité pour l'économie verte et de Secrétaire général du Comité d'experts pour la transition énergétique.

En 2011 et 2012, il a été rapporteur général de la commission Énergies 2050 créée par le ministre Éric Besson, chargé de l'Industrie et de l'Énergie, et, en 2012 et 2013, il a été fortement impliqué à différents titres dans l'organisation du Débat national pour la transition énergétique. De 2008 à 2017, il a été membre du comité directeur de l'Association française des économistes de l'énergie.

De 1995 à 2008, il a été directeur de l'Observatoire de l'énergie et des matières premières au sein du ministère chargé de l'Énergie et, de 1990 à 1995, il a été directeur du Réseau national d'essais (RNE, actuellement COFRAC).

Il est aussi l'auteur de nombreuses publications. Il est chevalier de la Légion d'honneur et officier dans l'ordre du Ouissam Alaouite (Maroc).



D.R

Vincent MAZAURIC rejoint Schneider Electric en 1995, après avoir été successivement chercheur associé à l'Office national d'études et de recherches aérospatiales (ONERA) et au Center for Extreme Materials d'Osaka (Japon). Il est Docteur en physique du solide de l'Université Paris-Sud (Orsay) et est diplômé en génie électrique (Grenoble), physique théorique et mathématiques pures (Paris).

Il est fortement impliqué dans les questions relatives au développement durable et aux politiques climatiques et énergétiques, notamment comme *expert-reviewer* auprès du Groupe intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) et observateur de la Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques depuis 2006. Il reçoit en 2013 l'Applied Electromagnetics and Mechanics Award pour une interprétation thermodynamique des phénomènes électromagnétiques basse fréquence.



D.R

Christophe MIDLER est diplômé de l'École polytechnique et Docteur en gestion. Il est directeur de recherche émérite CNRS au Centre de recherche en gestion – I3 CNRS-Institut polytechnique de Paris. Il est professeur en management de l'innovation dans le cadre du master de l'X « Projet innovation conception », qu'il a créé en 2002.

Ses recherches portent sur les domaines des stratégies d'innovation, de l'organisation des projets, de la R&D et des coopérations inter-entreprises en conception, des méthodologies d'évaluation de la valeur et de l'ingénierie du déploiement des innovations de rupture, et du management global des processus d'innovation dans les multinationales.

Il est membre de l'Académie des technologies et de plusieurs réseaux internationaux : European Academy of Management, Gerpisa et autres portant sur l'industrie automobile, notamment.

Il a publié de nombreux ouvrages et articles sur le management des projets et l'innovation, dont le dernier, écrit en collaboration avec Marc Alochet et Christophe de Charentenay, est « l'Odyssée de Spring : histoire et leçons d'un projet impossible », paru en 2022 chez Dunod.

Patrick PÉLATA est diplômé de l'École polytechnique, de l'École nationale des Ponts et Chaussées et est titulaire d'un Doctorat en socio-économie de l'École des hautes études en sciences sociales. Il a rejoint le groupe Renault en 1984, travaillant dans le domaine de la fabrication, puis dans l'ingénierie, où il a pris part au projet Twingo et à des avant-projets de plateformes, avant de prendre en charge la direction des développements de l'ingénierie des véhicules.



D.R

En 1999, il part au Japon comme DGA de Nissan en charge des produits, du *design*, des programmes et de la stratégie. De retour chez Renault, en 2005, il en devient le DG délégué aux opérations en 2008.

Dès 2002, chez Nissan, puis plus encore en 2008 chez Renault, il s'engage en matière de développement des véhicules électriques pour décarboner les mobilités routières et impulse le programme des véhicules électriques de Renault, dont la Zoé, annoncé en 2009.

En 2012, il devient Chief Automobile Officer de Salesforce à San Francisco, où il crée Meta Strategy Consulting qui porte sur la transformation de l'écosystème automobile et des mobilités. À partir de 2018, il opère depuis Paris.

Il est administrateur de Safran (réfèrent Climat et président du comité Innovation, technologies et climat), d'Orano, de Vulog (plateforme d'autopartage) et de Mobivia (services à l'automobile et aux nouvelles mobilités).

Il est membre de l'Académie des technologies.



D.R

Aurélie PICART est déléguée générale du Comité stratégique de filière Industries des nouveaux systèmes énergétiques, initié par l'État et regroupant autour des fondateurs – EDF, Engie, TotalEnergies et Schneider Electric – les industriels et organisations professionnelles du secteur.

Elle en prend la direction à sa création en 2018 et rassemble État, industriels, collectivités territoriales et associations autour d'un projet commun : « Faire de la transition énergétique une opportunité de réindustrialiser la France ». Le deuxième contrat stratégique de filière, feuille de route stratégique de l'industrie de la transition énergétique en France, a été signé fin 2021 par les ministres chargés de l'Industrie et la Transition écologique, les industriels et les syndicats. Sa mise en œuvre s'articule étroitement avec les dynamiques européennes sur l'industrie et l'énergie.

X-Mines, après l'obtention d'un master à Cambridge, elle a été conseiller économique du préfet de la région Midi-Pyrénées et chef du service Développement industriel de la DRIRE (2008-2010), puis directrice régionale adjointe, chef du pôle Entreprises, emploi et économie de la DIRECCTE Midi-Pyrénées (2010-2012), dont elle réalise la fusion des services économiques et emploi.

En 2012, elle rejoint le comité de direction d'ACTIA, une entreprise industrielle familiale de taille intermédiaire qui conçoit et produit des solutions électroniques pour les transports. Elle exerce les fonctions de directrice d'une *business unit*, puis de directrice Innovation.

Par ailleurs, elle est administratrice indépendante du groupe Sogclair, entreprise familiale de taille intermédiaire spécialisée dans l'aéronautique et les véhicules spéciaux. Elle est également membre des conseils de l'École des mines d'Alès et de l'ENSIACET – INP Toulouse et est membre du comité d'investissement de la SATT de Toulouse.



D.R

Grégoire POSTEL-VINAY est ingénieur général des Mines, membre de l'Académie des technologies et, depuis 2022, rédacteur en chef des *Annales des Mines* au Conseil général de l'Économie. Il a été auparavant responsable de la stratégie à la direction générale des Entreprises du ministère de l'Économie et des Finances

(2009-2022).

Il est l'auteur de travaux sur les plans de relance et les réactions publiques à la crise, l'économie de l'innovation, l'investissement immatériel, les éco-industries, la prospective de l'économie numérique, les véhicules décarbonés, la stratégie nationale de recherche et d'innovation, le développement des pôles de compétitivité, la propriété intellectuelle, le programme d'investissements d'avenir, le Conseil national de l'industrie, la Commission nationale pour la croissance française, la prospective industrielle du territoire, la prospective de l'emploi à horizon 2030, l'innovation servicielle, les technologies clés, la culture scientifique, technique et industrielle, la coopération européenne, les stratégies de filières, la concurrence chinoise. Il a apporté des contributions au rapport Gallois, réalisé des travaux sur le budget européen, notamment celui de la R&D européenne. Il a été corapporteur des Assises de l'entrepreneuriat.

Il a réalisé des travaux sur l'énergie. Il a été à ce titre expert national sur l'énergie pour le programme H2020, puis Horizon Europe (jusqu'en 2022). Il est membre de nombreux *think tanks* et cofondateur de Silicon Sentier (devenu NUMA). Il a été le président du comité de rédaction de la série *Réalités industrielles des Annales des Mines*.

Il siège actuellement dans plusieurs conseils d'administration (Universcience (2000-2022) ; IHEST (depuis 2017) ; Institut Mines-Télécom (depuis 2018) ; Armines (2017-2021) ; FNEP (Fondation nationale Entreprise et performance (depuis 2014)), ainsi qu'à la Commission nationale française pour l'Unesco (depuis 2015) et au conseil d'orientation de *La Fabrique de l'industrie* (depuis 2011).

Gérard ROUCAIROL a été assistant, puis professeur d'informatique à l'Université Pierre et Marie Curie, et ensuite à l'Université Paris Sud, dont il a dirigé le laboratoire de recherche en informatique et, enfin, à l'École normale supérieure.



D.R

En 1984, sur sollicitation du président de Bull, il intègre le groupe et en deviendra par la suite le directeur de la recherche, puis sera membre de son comité exécutif. À ce titre, il est à l'origine du repositionnement de Bull sur les supercalculateurs.

Après avoir cessé d'exercer ses fonctions en 2009, il a présidé jusqu'en 2017 l'association Teratec pour le développement du calcul à haute performance. Par ailleurs, il a été président du Conseil scientifique de l'Institut Télécom, puis de l'Institut Mines-Télécom pendant quinze ans. Par ailleurs, il a été administrateur de l'INRIA à plusieurs reprises. En outre, il a dirigé de nombreuses initiatives tant nationales qu'européennes de recherche partenariales public/privé.

Il a été membre associé du Conseil général des Télécoms, puis du CGEJET. Il a été vice-président (2011-2012), puis président (2013-2014) de l'Académie des technologies, dont il est membre depuis 2005. Il assure actuellement la présidence du pôle Numérique.

Il est chevalier de la Légion d'honneur et de l'ordre national du Mérite.

Michel SCHMITT est membre du Conseil général de l'Économie, président de la section « Innovation, Compétitivité, Modernisation ». Titulaire d'un Doctorat et d'une Habilitation à diriger des recherches en morphologie mathématique, il a successivement occupé des postes dans l'industrie (Laboratoire central de recherche de Thalès) et dans l'enseignement supérieur (directeur de la recherche de Mines ParisTech, vice-président Numérique de Paris Sciences et Lettres). Ses centres d'intérêt scientifique concernent le numérique et le traitement des données au sens large – probabilités, analyse d'image, intelligence artificielle, bio-informatique. Il est à l'origine de la création de l'unité mixte INSERM U900 Cancer et génome : bio-informatique, biostatistiques et épidémiologie des systèmes complexes, ainsi que du Centre de recherche sur les risques et les crises de Mines Paris.



D.R

Claire TUTENUIT, ancienne élève de l'École normale supérieure, est agrégée de mathématiques, lauréate de l'IEP-Paris et ingénieure au corps des Mines.

Après cinq ans au ministère de l'Industrie et quinze ans en entreprise dans les secteurs de l'environnement et de l'énergie (Veolia) et des hautes technologies (Matra-Défense-Espace, devenu aujourd'hui Airbus), elle a été consultante indépendante en stratégie, organisation et environnement dans les mêmes secteurs.

Depuis 2006, elle dirige Entreprises pour l'Environnement, association de grandes entreprises qui partagent

la même vision d'un environnement comme source de progrès et d'opportunités et travaillent ensemble à mieux le prendre en compte dans leurs stratégies et leur gestion courante (www.epe-asso.org). EpE est le partenaire en France du WBCSD. À ce titre, Claire Tutenuit est l'auteurice de nombreux articles et a dirigé de nombreuses publications. Elle est membre du Conseil économique, social et environnemental depuis 2016 et est administratrice de la Fondation pour la Nature et l'Homme, de l'Ineris et de GRDF.