

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

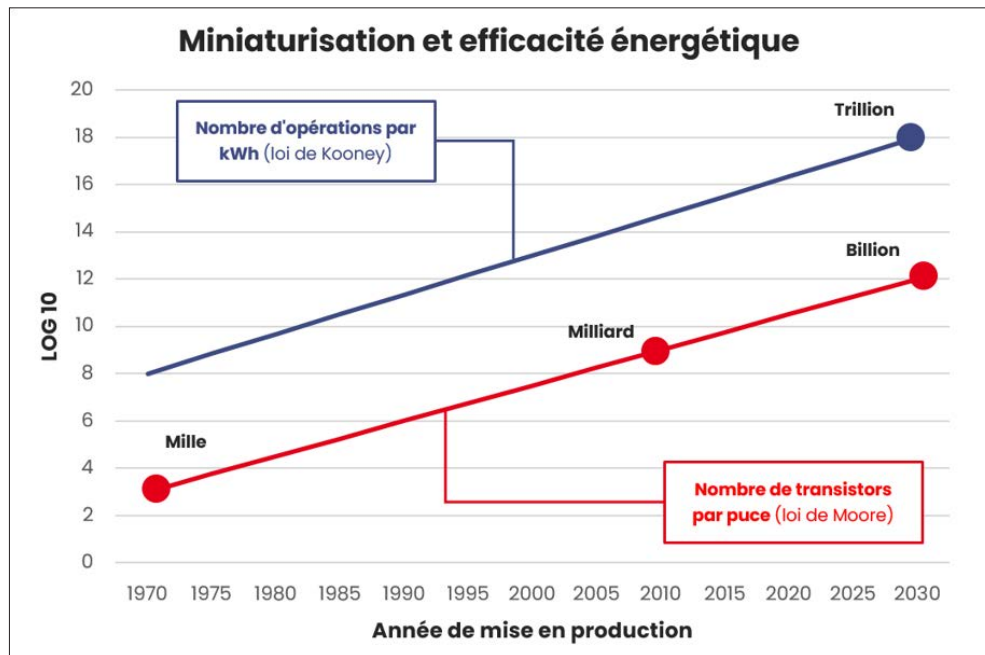


Figure 1 : Années d'introduction de nouveaux matériaux dans la conception des technologies des transistors CMOS (Complementary Metal-Oxide-Semiconductor).

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

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 CutTM⁶, 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

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

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.

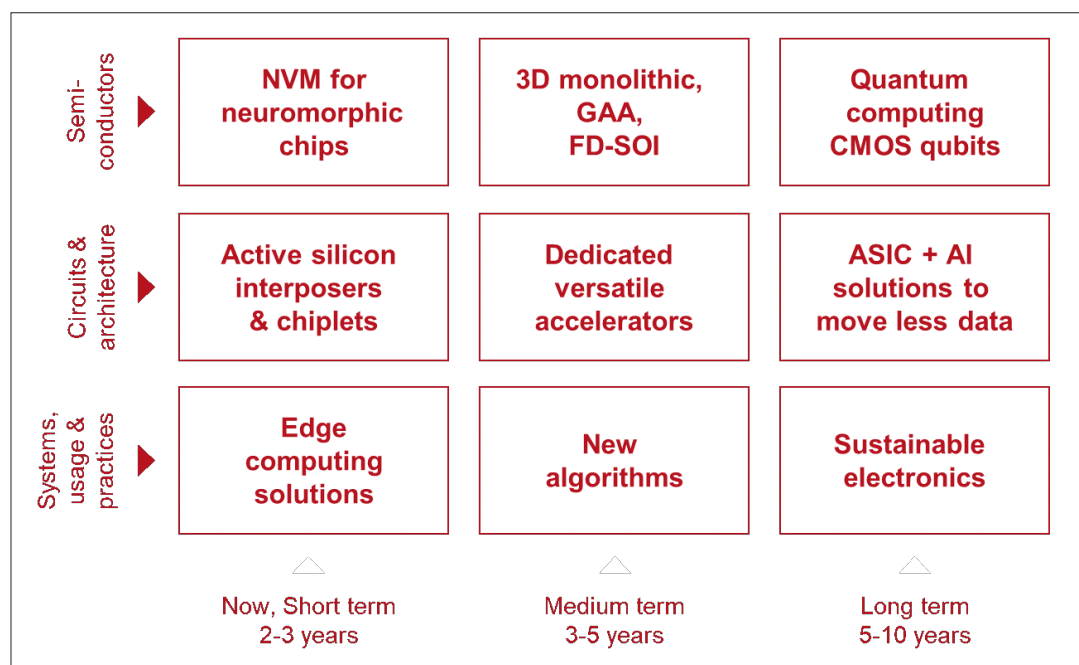


Figure 2 : Neuf façons de réduire la consommation des composants de calcul (Lequepeys, 2021).

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".