

# L'INDUSTRIE DES SEMI-CONDUCTEURS ET SON FUTUR

Gérard Roucairol

Membre de l'Académie des technologies

Séance du 11 mai 2022

## Résumé

L'industrie des semi-conducteurs est la cheville ouvrière de l'immense diffusion du numérique et de la dissémination de ses usages. Ce marché devrait doubler d'ici 2030 en raison du doublement du trafic Internet chaque année, de la progression régulière du marché des *personal electronics* (smartphones, tablettes, liseuses, montres, drones), mais aussi du basculement de l'industrie automobile vers le véhicule électrique, ou encore de l'émergence de l'industrie 4.0. Longtemps caractérisée par la loi de Moore, la poursuite des performances des semi-conducteurs passe par une miniaturisation de plus en plus ardue vers des nœuds de 3 nanomètres, voire 1 nanomètre, mais aussi par de nombreuses transformations, liées par ailleurs à la nécessité de réduire la consommation d'énergie : émergence de technologies alternatives dites *More than Moore*, nouvelles architectures, « silicium personnalisé », imbrication croissante et co-optimisation entre le soft et le hard, fragmentation de l'industrie des composants électroniques, multiplication des acteurs *fabless* passant commande à des fondeurs. A ceci s'ajoutent de nouveaux enjeux de souveraineté liés à la pénurie de composants apparue pendant la crise sanitaire et à un contexte géopolitique évoluant rapidement. C'est pourquoi, à l'instar des autres régions du monde, l'Europe a décidé d'investir dans la relance de la conception et de la fabrication des composants semi-conducteurs sur son territoire, en particulier dans le domaine stratégique des supercalculateurs, à travers la startup SiPearl notamment.

## Intervenants

**Alain Pouyat**

Membre de l'Académie des technologies

**Joël Hartmann**

Membre de l'Académie des technologies et de STMicroelectronics

**Philippe Notton**

CEO de SiPearl

**Sébastien Dauvé**

Directeur du LETI

**Thomas Ernst**

Directeur scientifique du LETI

## Sommaire

Le point de vue des utilisateurs : l'exemple de Tesla	2
Évolution mondiale de l'industrie des semi-conducteurs	4
Un exemple de microprocesseur spécifique dédié à la haute performance	5
Le futur des technologies du silicium et technologies alternatives	6
Débats	8

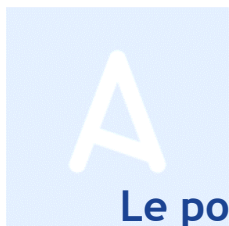
## Introduction par Gérard Roucairol

Compte tenu de la place que prend le numérique dans nos activités personnelles, professionnelles, sociétales, l'état actuel et l'avenir de l'industrie des semi-conducteurs est une question majeure pour nos économies. Il y a quinze ans, Intel et IBM se partageaient quasiment la totalité du marché. Aujourd'hui, on assiste à l'émergence de nombreux fabricants, dont certains, comme Tesla ou Amazon, ne sont pas issus du monde de la microélectronique.

Le développement de l'industrie des semi-conducteurs a longtemps suivi la loi de Moore, selon laquelle le nombre de transistors présents sur une puce de microprocesseur double tous les deux ans. Des limites physiques commencent toutefois à freiner cette progression, par exemple à travers des phénomènes de courants de fuite ou en raison de difficultés à mettre en relation les milliards de transistors rassemblés sur de très faibles surfaces.

Malgré le dynamisme de l'industrie des semi-conducteurs, l'industrie automobile est confrontée, depuis la crise sanitaire, à une pénurie de composants. Cette situation, jointe à l'embargo imposé à la Russie en raison de la guerre que celle-ci mène en Ukraine, a mis au premier plan les questions de souveraineté industrielle.

La séance d'aujourd'hui va nous permettre d'aborder ces différentes questions, sur lesquelles les idées ne sont pas toujours très claires, même chez des personnes averties.



### Le point de vue des utilisateurs : l'exemple de Tesla

Alain Pouyat

*Alain Pouyat est membre de l'Académie des technologies.*

Alors que la miniaturisation des processeurs se poursuit, avec désormais des tailles de 3 nanomètres, voire 1 nanomètre, on voit apparaître des technologies alternatives, dites *More than Moore*, permettant, pour de nombreuses applications, de se dispenser de cette miniaturisation à outrance. Il s'agit, par exemple, des

SoC (*System on a Chip*) qui équipent les smartphones, ou des SiP (*System in Package*), que l'on trouve dans les Apple Watch. Les architectures évoluent également, avec le parallélisme, le neuromorphisme, le quantique, voire la spintronique.

Mais surtout, l'industrie des composants électroniques connaît actuellement une transformation radicale, celle du *Custom Silicium*, ou silicium personnalisé. Des fonderies de silicium, comme celles de TSMC ou Samsung, permettent désormais, aux industriels, de concevoir et de faire fabriquer des composants sans avoir à investir des milliards dans une usine. Ceci permet à de nouveaux acteurs *fabless* d'émerger, comme Qualcomm ou NVIDIA, mais également à des grands de l'informatique tels que Google, Apple, Amazon, de faire fabriquer leurs propres composants afin d'optimiser leurs produits, de les rendre plus compétitifs et de se démarquer ainsi de leurs concurrents.

Plus étonnant, le constructeur automobile Tesla s'est également inscrit dans ce mouvement.

En 2012, Tesla met sur le marché ses premières voitures et, dès 2014, décide de les doter du système d'assistance à la conduite développé par la startup israélienne Mobileye. En 2016, un accident mortel met fin à cette collaboration et Tesla décide de concevoir son propre logiciel, tout en s'appuyant sur les microprocesseurs de NVIDIA. Constatant que ces processeurs ne sont pas optimisés pour ses besoins, l'entreprise travaille alors à un projet de microprocesseur en interne et, dès 2019, équipe toutes ses voitures du système FSD (*Full Self Driving*), qui comprend à la fois le hardware et le logiciel. La puce de Tesla s'avère être 20 fois plus rapide que celle de NVIDIA et coûter 20 % moins cher.

Le système FSD repose sur trois paris de Tesla.

- Premièrement, la voiture n'est pas équipée de radars ni de lidars mais seulement de 8 caméras, à la fois pour des raisons de coût et parce que l'intégration de données hétérogènes est trop complexe.
- Deuxièmement, le système est capable de reconstituer en temps réel l'espace tridimensionnel vectorisé dans lequel se situe la voiture.
- Troisièmement, l'intelligence artificielle permet au véhicule, sur la base de ce qu'il « voit » et des paramètres chargés dans ses réseaux neuronaux, de déterminer la meilleure trajectoire pour suivre le GPS en évitant les obstacles et en assurant le confort des passagers.

Pour cela, toutes les données de la flotte de plus d'un million de Tesla en circulation remontent vers un ordinateur unique qui, ainsi, « apprend, à conduire » et, périodiquement, celui-ci met à jour, par téléchargement,

ment, le paramétrage des réseaux de neurones des 100.000 voitures actuellement en test.

Ce système est censé pouvoir fonctionner n'importe où dans le monde, alors que les systèmes concurrents, comme celui de Google, ne fonctionnent que dans des zones « géo-clôturées ». Une très longue phase d'apprentissage est cependant nécessaire pour le système Tesla. En Europe, par exemple, il doit prendre en compte les signalisations et les langues des différents pays. Par ailleurs, de même que, pour qu'un réseau neuronal reconnaisse une photo de chat, il faut lui avoir préalablement montré des dizaines, voire des centaines de milliers de photos de chats, de même, pour parvenir à une conduite autonome fiable, il faut avoir montré au système des milliards de « kilomètres conduits », ce qui est impensable. Donc, aux masses de données remontant de la flotte de véhicules s'ajoutent des données issues de simulations qui testent les différentes trajectoires optimales dans chaque situation, par exemple pour prendre un virage en conjuguant efficacité et confort. Pour traiter l'ensemble de ces données, Tesla a annoncé la construction de son propre superordinateur baptisé Dojo, qui devrait être le plus puissant au monde pour les applications de l'IA avec 1,1 ExaFlops.

Pour Tesla, concevoir ses propres composants et systèmes, est une nécessité pour développer sa stratégie exclusive en matière de conduite autonome, et offre, aussi, beaucoup d'avantages, en termes de différenciation, d'indépendance vis-à-vis des fournisseurs, d'intégration verticale et donc d'optimisation du véhicule, de résilience en cas de pénurie des composants (pendant que certains constructeurs étaient obligés de réduire leur production de 20 à 40 %, Tesla a doublé la sienne), de développement de nouvelles compétences et, finalement, d'opportunités de nouvelles activités. Ainsi, Elon Musk envisage d'utiliser les compétences acquises en intelligence artificielle, ainsi que les équipements spécifiques des voitures, pour développer un robot humanoïde (Tesla Bot) capable d'accomplir des tâches fastidieuses ou dangereuses.

En résumé, pour Tesla, le Custom Silicium est une arme stratégique puissante pour se différencier des acteurs du secteur et développer plus librement ses propres stratégies.

D'ailleurs dans la foulée de Tesla, Volkswagen a entamé une démarche analogue en 2021.

Pour l'industrie des composants, le phénomène du silicium personnalisé provoque deux mouvements simultanés.

D'une part, une fragmentation de l'industrie des composants. En effet, chaque étape majeure de la fabrication de puces peut-être maintenant gérée par une entreprise distincte :

- La conception et l'architecture : ARM, MIPS ;
- L'automatisation de la conception électronique : Cadence, Synopsis ;
- La fabrication des machines qui gravent les chips : ASML ;
- La conception de puces par des entreprises *fabless* : Apple, Qualcomm, NVIDIA ;
- Les fonderies de silicium : TSMC, Samsung ;
- Les sociétés de packaging (fabrication des SIP) : ASE, AMKOR, JCT.

D'autre part, le monde numérique actuel qui se caractérise par une totale indépendance du logiciel et du matériel, a conduit au développement séparé des industries du logiciel et du matériel (Intel & Microsoft, par exemple).

A l'inverse, l'exemple de Tesla nous montre que cette tendance pour des technologies numériques plus spécialisées nécessite **une forte imbrication du logiciel et du matériel**, indispensable pour construire des systèmes numériques performants et va, sans doute, entraîner une transformation profonde du marché mondial, avec une nouvelle répartition des rôles entre les différents acteurs, ainsi qu'une remise en cause des modèles économiques existants.

Dans tous les cas, cette nouvelle répartition entre logiciel et matériel au profit de systèmes numériques performants va créer de nombreuses opportunités d'innovation, à la portée des pays Européens, pour redynamiser l'industrie du numérique.

Toutefois, il faut que les industriels concernés et les Etats prennent en compte rapidement et avec l'ampleur nécessaire ces changements de paradigmes.



## Évolution mondiale de l'industrie des semi-conducteurs

Joël Hartmann

Joël Hartmann est membre de l'Académie des technologies et de STMicroelectronics.

Le marché mondial des semi-conducteurs est estimé entre 550 et 586 milliards de dollars en 2021, soit 20 % de plus qu'en 2020, et cette augmentation fait suite à une croissance de 14 % entre 2019 et 2020. Alors que ce secteur connaissait une évolution cyclique, plusieurs facteurs se conjuguent aujourd'hui pour contribuer à une croissance continue.

### Les facteurs de croissance du marché

Parmi eux, on peut citer l'explosion de l'utilisation des semi-conducteurs dans l'industrie automobile. Après la baisse liée à la crise sanitaire, la construction automobile a retrouvé son niveau d'avant la crise, autour de 80 à 95 millions de véhicules par an, mais elle connaît un basculement spectaculaire des véhicules thermiques vers les véhicules électriques. À l'horizon 2030, ces derniers devraient représenter 40 % de la production. Cette évolution, jointe à la multiplication des systèmes d'assistance à la conduite ou d'*infotainment*, se traduit par une invasion de semi-conducteurs dans les véhicules. Le secteur automobile, qui représentait 8,3 % du marché global des semi-conducteurs en 2021, devrait connaître une augmentation de 50 % dans les deux ans qui viennent. Ce phénomène explique la pénurie de composants qui a frappé le secteur au moment du déconfinement. Lorsque les usines automobiles ont été remises en route, la quasi-totalité des usines de semi-conducteurs dans le monde étaient déjà saturées, compte tenu de la croissance de la demande dans les autres domaines.

Un phénomène moins souvent cité est celui qui touche le marché de l'industrie, c'est-à-dire des machines-outils et équipements associés, qui représentait 7,3 % du

marché des semi-conducteurs en 2021. Ce secteur est en train de faire sa révolution vers l'industrie 4.0 (robotisation, intelligence artificielle, pilotage automatique des lignes de production, etc.), ce qui entraîne également une très forte progression, évaluée à 50 % d'ici trois ou quatre ans.

Pendant ce temps, le marché des *personal electronics* (smartphones, tablettes, liseuses, montres, drones, etc.) continue à progresser de 10 % par an et mobilise des composants de plus en plus sophistiqués. Le nombre de smartphones vendus dans le monde devrait passer de 1,5 ou 1,7 milliard en 2022 à plus de 2 milliards en 2023, et la 5G devrait représenter 80 à 90 % du marché, sachant que l'on commence déjà à parler de la 6G.

Enfin, le trafic Internet double chaque année et nécessite de plus en plus de mémoire, à la fois sous la forme de DRAM (17 % du marché en 2021) et de NAND (12,7 %), mais aussi des processeurs très avancés qui tirent les technologies vers des nœuds de plus en plus réduits (5 nanomètres, 3 nanomètres et au-delà).

Au total, on s'attend à un doublement de la taille du marché des semi-conducteurs d'ici 2030.

### Les acteurs

Les différentes utilisations des semi-conducteurs peuvent être réparties en deux grandes catégories. D'un côté, tout ce qui recouvre le *computer*, les mémoires et la communication ; de l'autre, l'électronique embarquée, qui est très diversifiée, avec des microcontrôleurs, de l'électronique de puissance, des capteurs, etc. Dans cette deuxième catégorie, on trouve des sociétés *fabless*, d'autres complètement intégrées comme Samsung ou Intel, et entre les deux, des sociétés comme STMicroelectronics, Texas Instrument ou Infineon, qui détiennent des portefeuilles de produits assez larges. STMicroelectronics est, par exemple, le leader mondial des microcontrôleurs de type MCU, qui connaissent une très forte progression car on en trouve un peu partout (objets communicants, Internet des objets, industrie, etc.)

Parmi les fondeurs, on trouve TSMC, SMIC (le plus gros fondeur purement chinois), Samsung, GlobalFoundries, UMC, et de nombreux autres plus petits. Les trois principaux acteurs dans les outils de conception de circuits intégrés sont ARM, Synopsys et Cadence. Le plus important équipementier est ASML, qui fabrique des outils pour imprimer les motifs sur les plaquettes de silicium, mais il en existe d'autres comme Lam Research, Tokyo Electron ou KLA Tencor. Pour la partie *computer*, la finesse de la gravure va jusqu'à 5 nanomètres (le 3 nanomètres est en développement), alors que chez STMicroelectronics, on se situe plutôt autour de 18 nanomètres. Enfin, certains produits ne nécessitent que des nœuds de 130, voire 180 nanomètres.

## Les investissements

Les acteurs de l'industrie des semi-conducteurs sont en train d'investir dans le monde entier pour répondre à l'augmentation de la demande. La construction d'une centaine d'usines est annoncée d'ici 2025, ce qui représentera une augmentation de 45 % de la capacité en quatre ans, répartie entre les Etats-Unis, l'Europe, Taiwan, la Corée et la Chine.

Ces investissements bénéficient d'incitations de la part des pouvoirs publics, désireux de voir construire des usines sur leur territoire. La Chine a prévu de financer à hauteur de 150 milliards de dollars la construction d'usines de semi-conducteurs d'ici dix ans, dont 100 milliards dans les trois années à venir. La Corée va investir entre 55 et 65 milliards de dollars au cours des trois prochaines années. Aux Etats-Unis, le CHIPS for America Act prévoit un budget de 52 milliards de dollars d'aides pour des fabricants américains, comme Intel, mais également pour Samsung ou TSMC qui, en contrepartie, s'engagent à construire des usines sur le sol américain. De son côté, la Commission européenne annonce un budget de 35 milliards de dollars sur dix ans pour son Digital Compass Plan, qui vise à couvrir 20 % du marché d'ici 2030, contre 10 % actuellement. Dans la mesure où le marché va doubler sur cette période, cela revient à multiplier par quatre les capacités de production, ce qui est, pour le moins, ambitieux. Quant à la France, elle va consacrer 6 milliards d'euros à l'industrie des semi-conducteurs dans le cadre de son plan France 2030, et des projets sont d'ores et déjà en cours d'étude.

Au total, les investissements mondiaux dans l'industrie des semi-conducteurs dépasseront les 100 milliards de dollars en 2022, dont 43 pour Samsung, 42 pour TSMC et 27 pour Intel. En ce qui concerne STMicroelectronics, nous sommes passés d'un investissement annuel de 500 millions de dollars à 1 milliard en 2018 et 2019, près de 2 milliards en 2021, et 3,5 milliards pour 2022. Les sociétés équivalentes, comme Texas Instrument ou Infineon, suivent la même progression.

Ces montants colossaux s'expliquent aussi par l'augmentation des coûts. Il y a quelques années, construire une tranche produisant 50 000 plaquettes de silicium en 90 nanomètres par mois coûtait 2 milliards de dollars. Aujourd'hui, pour la même quantité de plaquettes mais, cette fois, en 7 nanomètres, il faut investir 10 milliards de dollars, car les étapes de fabrication sont beaucoup plus nombreuses.



## Un exemple de microprocesseur spécifique dédié à la haute performance

Philippe Notton

*Philippe Notton est CEO de SiPearl.*

Après avoir géré la division de STMicroelectronics chargée des produits digitaux puis avoir travaillé neuf ans pour MStar Semiconductor, une société taiwanaise qui a figuré parmi les dix premiers fabricants mondiaux de semi-conducteurs, j'ai pris la direction de SiPearl, une startup qui développe un microprocesseur haute performance et basse consommation destiné aux supercalculateurs européens.

Un supercalculateur se présente comme une grande armoire dans laquelle sont empilés des lames équipées de plusieurs dizaines de milliers de microprocesseurs. Les supercalculateurs sont utilisés dans de nombreux domaines, comme l'intelligence artificielle, la gestion d'essais cliniques, les prévisions météorologiques, l'optimisation de parcs éoliens, la conception de véhicules aériens, les prévisions de tremblements de terre, etc.

L'Europe dispose d'un fabricant de supercalculateurs, Atos. En revanche, les trois principaux fournisseurs des microprocesseurs qui constituent le cœur des supercalculateurs - Intel (91 % du marché), AMD (6 %) et IMB (3 %) - sont américains, ce qui met les pays européens à la merci d'éventuels embargos ou pénuries. Or les microprocesseurs représentent 50 % de la valeur d'un supercalculateur.

Par ailleurs, l'Europe est à la traîne dans son équipement en supercalculateurs. Alors qu'elle utilise un tiers des ressources mondiales de supercalcul, elle ne détient qu'un vingtième des équipements mondiaux. Sachant que le prix d'un microprocesseur destiné à un supercalculateur est d'environ 5 000 euros, le budget d'investissement et de fonctionnement d'un supercalculateur sur trois ans est d'environ 600 millions d'euros.



En 2015, l'Europe a annoncé sa volonté de se doter de supercalculateurs de niveau exascale, c'est-à-dire capables de réaliser un milliard de milliards de calculs par seconde. Une entreprise commune, EuroHPC, a été créée et dotée de 8 milliards d'euros afin de déployer un écosystème en Europe. Dans ce cadre, un appel à projet a été lancé pour développer des microprocesseurs européens, avec un budget de 150 millions d'euros sur la période 2019-2024. C'est le consortium European Processor Initiative (EPI), coordonné par Atos et regroupant 28 membres (centres de recherche et industriels) qui l'a remporté.

La startup SiPearl, fondée en 2019, est une émanation de ce consortium. Nous avons eu la chance d'être amorcés directement par des fonds structurels Horizon 2020, alors que les startups doivent généralement démarrer avec des business-angels ou des fonds régionaux ou nationaux de type Bpifrance. En l'occurrence, la Commission européenne nous a octroyé près de 9 millions d'euros pour notre démarrage, au motif que nous étions le seul acteur à nous risquer dans cette opération. En décembre 2021, SiPearl a été lauréate du programme European Innovation Council Accelerator, avec une dotation de 17,5 M€, et nous avons obtenu un prêt de 25 M€ de la Banque européenne d'investissement.

SiPearl est une entreprise *fabless* : nous concevons les microprocesseurs et nous les faisons fabriquer chez TSMC. Nos 6 centres de R&D sont répartis en France, en Allemagne et en Espagne, essentiellement pour des raisons de recrutement. Notre effectif est actuellement de 103 personnes (dont 78 Français) et devra être porté à 1 000 d'ici 2025, pour nous permettre de développer plusieurs composants en parallèle. Les ingénieurs en semi-conducteurs sont difficiles à trouver et les deux tiers des CV que nous recevons proviennent de l'étranger (Maghreb, Amérique du sud, Inde, Sri Lanka...). Pour le moment, plus de 25 % de nos effectifs ont plus de 55 ans. Ces vétérans viennent, pour la plupart, d'Atos ou du CEA.

Notre technologie, le microprocesseur Rhea, se veut à terme souveraine mais a été conçue sous architecture ARM Neoverse V1. Pour le démarrage, il n'était pas possible de partir d'une feuille complètement blanche et l'architecture ARM a déjà largement fait ses preuves. Notre microprocesseur est l'un des rares à utiliser le cœur V1 de ARM, le plus avancé de cette marque dans le monde des *data centers*. Nous partageons la licence de V1 avec Amazon aux Etats-Unis et deux centres de recherche, l'un en Corée et l'autre en Inde.

Nous utilisons, par ailleurs, l'outil de design de Mentor Graphics, une société américaine devenue européenne depuis son rachat par Siemens, avec lequel nous avons des accords stratégiques. Pour l'outil de CAO nécessaire à la phase finale de conception, nous n'avons pas d'autre choix que de recourir à une société américaine,

Synopsis. Nous avons également signé un accord stratégique avec Intel pour offrir à nos grands clients européens la possibilité de combiner le microprocesseur Rhea avec l'accélérateur graphique Ponte Vecchio. Il nous paraît préférable de fabriquer nos produits dans une usine américaine en Europe que dans une usine de Taiwan qui, à terme, risque de devenir chinoise.

Pour la fabrication, nous avons choisi de démarrer avec TSMC, comme 95 % des startups, plutôt qu'avec Samsung. Notre produit sera conçu en 6 nanomètres pour la première génération, et en 4 nanomètres ensuite. Négligeable pour Amazon ou Apple le coût de la production par photolithographie est cependant très lourd pour une startup...

Par rapport à nos concurrents tels que Intel ou AMD, qui disposent de moyens cent fois supérieurs aux nôtres, nos atouts sont une puissance de calcul supérieure à celle de deux millions d'ordinateurs portables, grâce à l'architecture ARM ; une consommation d'énergie divisée par deux, à puissance égale ; une sécurité sans faille liée au fait que même si une partie du code est licenciée chez ARM, nous avons accès à la totalité du code source ; et, bien sûr, un niveau supérieur de souveraineté pour ce qui est de la conception, mais aussi de la fabrication, lorsque Intel aura ouvert son usine en Allemagne.

Nous prévoyons de mettre au point notre processeur HPC (calcul haute performance) d'ici 2023 ; puis un cloud souverain, public et privé, en 2025 ; et enfin des *data centers-Edge*, c'est-à-dire de petite taille et incluant l'infrastructure 6G, d'ici 2027.



## Le futur des technologies du silicium et technologies alternatives

Sébastien Dauvé et Thomas Ernst

*Sébastien Dauvé est directeur du LETI.*

*Thomas Ernst est directeur scientifique du LETI.*

Le CEA-Leti, qui a été fondé en 1967 et comprend 1 900 personnes, fait partie de la direction de la recherche

technologique du CEA, une branche dédiée au soutien à l'industrie. En ce qui concerne le Leti, spécialisé dans les métiers de la microélectronique, ce soutien passe par une politique très active de brevets et par plus de 200 partenariats industriels chaque année, mais aussi par l'essaimage, avec 71 startups essayées depuis la création du Leti ans, dont 75 % sont encore en activité, comme Sofradir (devenue Lynred), Soitec, Asygn, Aledia, Exagan ou Diabeloop. La France a également la chance de bénéficier d'un tissu académique de recherche et de formation dynamique sur les technologies de diversification et le dessin de circuits intégrés (design) avec le CNRS et les universités.

Les semi-conducteurs ne représentent qu'une faible part du marché du numérique, mais ils sont comme la pointe d'une pyramide inversée, qui soutiendrait tout le reste, d'autant que la tendance du *More than Moore*, qui consiste à proposer des solutions diversifiées (capteurs, imageurs, puissance, etc.) couplées à des microcontrôleurs permet d'adresser une grande diversité d'applications (automobile, santé, industrie...). L'objectif de l'Europe est de passer de 10 à 20 % de la production mondiale de semi-conducteurs d'ici 2030. Elle peut s'appuyer pour cela sur des RTO (*Research and Technology organizations*) de renom, le CEA-Leti, l'IMEC (Institut de micro-électronique et composants) en Belgique et l'Alliance micro-électronique des instituts Fraunhofer en Allemagne. Tous trois ont contribué à la préparation de l'European Chips Act et ont suggéré la création de lignes pilotes capables de supporter des programmes importants de recherche mais avec une vocation industrielle.

En ce qui concerne la France, nous avons proposé une stratégie en deux étapes : poursuivre la roadmap de la technologie FD-SOI, complètement européenne et largement française, qui consiste à produire des transistors adaptés à l'embarqué et faiblement consommateurs d'énergie, en passant de 28 ou 22 nanomètres (actuellement produits par ST et GF respectivement) à 10 nanomètres ; dans un deuxième temps, préparer la décennie 2030-2040 en descendant à des nœuds de 5 nanomètres. En parallèle, nous continuerons à enrichir l'écosystème avec la création de nouvelles startups.

Comme cela a été indiqué, il existe un décalage entre l'Europe et l'Asie du point de vue de la taille des nœuds. L'Europe est spécialisée dans l'automotive, l'Internet des objets, la basse puissance, l'électronique de puissance, et ces secteurs ne nécessitent pas des nœuds inférieurs à 22 nanomètres, alors que la société taiwanaise TSMC a commencé à produire en 3 nanomètres dès cette année. Si l'Europe veut avoir encore une place dans l'industrie des semi-conducteurs en 2030, elle devra rattraper son retard ou a minima conserver un « écart » constant.

Il y a une quinzaine d'années, il est apparu impossible de maintenir sans refroidissement une consommation

d'énergie inférieure à 100 watts par centimètre carré, sauf à engendrer des fuites statiques. C'est ce qui a conduit le Leti à développer de nouvelles géométries de composants CMOS (*Complementary Metal Oxide Semiconductor*). Ainsi les architectures SOI sont développées depuis plus de 30 ans au CEA-Leti, à SOITEC et à STMicroelectronics, et dédiées à certains marchés de la très basse consommation en plein développement comme les microcontrôleurs ou la RF, que l'on trouve désormais dans tous les smartphones. L'architecture nanofils en 3D démontrée expérimentalement en 2006 par le CEA-Leti, STMicroelectronics et le CNRS, permet quant à elle de contrôler l'électrostatique de la structure des nœuds sub-3nm.

A côté de la loi de Moore, qui continue de s'appliquer, même si c'est de plus en plus difficilement, existe une autre loi très homogène dans le temps, la loi de Koomey, selon laquelle le nombre de calculs par joule dépensé double tous les dix-huit mois environ. De fait, l'efficacité énergétique ne cesse de s'améliorer grâce à la miniaturisation, à de meilleures interconnexions liées à la 3D (en local ou en global), aux nouveaux composants (nanofils, mémoires émergentes, électronique de spin) qui permettent de limiter les fuites ou de supporter davantage de courant, à de nouvelles architectures intégrées dédiées à un type de calcul spécifique, et enfin aux nouveaux paradigmes de calcul (neuromorphiques, quantiques, calcul dans la mémoire...).

La question de la mémoire est également au centre des enjeux d'efficacité énergétique car l'essentiel de la dépense énergétique est lié au déplacement des données entre la mémoire cache, qui est à l'intérieur du processeur, et la mémoire externe : il faut aller chercher les données dans la mémoire externe, réaliser l'opération, renvoyer les données. L'une des pistes explorées consiste à réaliser les calculs (en particulier les calculs vectoriels) à l'intérieur même de la mémoire.

La recherche sur les différents types de mémoire se poursuit (changement de phase, filament conducteur, orientation magnétique, polarisation ferroélectrique). L'enjeu de ces différentes technologies est de réduire la consommation, en passant de 15 à 20 volts pour la mémoire flash, à environ un volt pour ces nouveaux types de mémoires. Globalement, les mémoires très rapides, placées à proximité du processeur, sont les plus chères, tandis que les mémoires externes sont moins chères mais entraînent des coûts importants de transfert.

Le Leti fait partie de consortiums basés aux Etats-Unis et en Europe visant à interconnecter de façon très dense différentes puces (dont certaines sont développées par le Leti), toujours dans le but de réduire le coût énergétique de transfert des données.

De même, nous travaillons sur des concepts de 3D à l'échelle du composant lui-même, sous forme de cubes comprenant plusieurs centaines de couches. Ce

dispositif n'existe, à l'heure actuelle, que pour la mémoire flash, qui fonctionne avec de fortes tensions. Son adaptation va nécessiter de nouvelles recherches sur les matériaux, la réduction du coût par transistor et la défektivité.

Enfin, 50 % des efforts de miniaturisation reposent sur la co-optimisation entre la technologie et le design, aussi bien dans l'industrie que dans la recherche. Notre spécialisation dans la microélectronique embarquée nous impose de fortes contraintes en matière de puissance et nous incite à cette co-optimisation.



### *L'intégration entre soft et hard*

L'une des raisons de remettre en cause la séparation entre logiciel et matériel est la volonté de maîtriser la consommation d'énergie, forcément plus importante lorsque le logiciel est conçu indépendamment du hardware.

L'intégration du logiciel et du matériel signifie-t-elle qu'ils redeviennent propriétaires, ce qui poserait de nouveaux problèmes ?

**Alain Pouyat :** Ils deviennent effectivement beaucoup plus spécifiques, mais peuvent être conçus en grande partie, à partir de modules, hardware & software, modulaires et standardisés.

### *La production de silicium*

Où est produit le silicium ?

**Joël Hartmann :** Principalement en Corée, au Japon, à Taiwan et aux Etats-Unis. Il y a une dizaine d'années, la société allemande Siltronic couvrait jusqu'à 30 % des besoins européens, mais sa production a fortement décliné depuis. La Chine, qui a l'ambition de se rendre totalement autonome sur l'ensemble de l'industrie des semi-conducteurs, commence à structurer son industrie dans ce domaine également.

### *Les coûts d'investissement*

Les coûts d'investissement que vous indiquez couvrent-ils la R&D ?

**Joël Hartmann :** Il s'agit seulement des investissements de production. L'augmentation des coûts de R&D est plus linéaire.

### *Quels goulets d'étranglement en Europe ?*

Quels sont les principaux goulets d'étranglement auxquels nous allons être confrontés en Europe ?

**Joël Hartmann :** L'European Chips Act a été dévoilé il y a peu de temps, et nous sommes en train de l'analyser. La grande nouveauté est que, contrairement à sa doctrine passée, la Commission européenne va autoriser les aides publiques non plus seulement pour la R&D ou les premiers prototypes, mais également pour les capacités de production. Cela pourrait s'appliquer à la fois aux industriels européens et à des firmes étrangères comme Intel ou TSMC, à l'instar de ce qui est prévu dans le CHIPS for America Act.

### *L'autofinancement chez STMicroelectronics*

Quelle est la capacité d'autofinancement de STMicroelectronics sur l'investissement prévu de 3,5 milliards de dollars ?

**Joël Hartmann :** Tous nos investissements sont autofinancés à 100 %.

### *Pourquoi ne pas viser le 3 nanomètres en Europe ?*

Pourquoi l'Europe a-t-elle besoin de faire appel à Intel ou TSMC ? Est-ce parce que nous ne sommes pas capables de développer des technologies à 3 nanomètres ?

**Joël Hartmann :** Tous les acteurs européens ont « décroché » à partir de 20 nanomètres. Ceci s'explique, en partie, par la gamme des produits fabriqués, qui ne nécessitent pas de faire appel aux technologies les plus sophistiquées. Le développement de ces dernières étant très coûteux, il n'est envisageable que lorsqu'il existe des débouchés commerciaux. STMicroelectronics est néanmoins capable de designer des produits en 3 nanomètres, mais les fait fabriquer par des fonderies, notamment celles de Samsung et de TSMC.



## S'assurer de la qualité de la production

**Compte tenu du coût de production, quel est votre niveau de confiance sur le fait que vous obtiendrez les performances que vous attendez de votre microprocesseur ? Avez-vous droit à des essais-erreurs, comme dans l'aéronautique ?**

**Philippe Notton :** Les risques ne concernent pas vraiment la production, car nous nous inscrivons dans ce que l'on appelle le « flot TSMC », c'est-à-dire un processus de production qui a déjà été débogué par Apple et NVIDIA avant nous. A condition de ne pas être trop créatifs et de « rester dans les clous », nous n'avons pas à craindre de mauvaises surprises.

Les problèmes pourraient venir d'une erreur de calcul de notre part mais, avant d'envoyer le microprocesseur en production, nous procédons à une phase de simulation pour le pousser dans ses limites. Nous ne pouvons cependant pas y passer trop de temps car, pour faire travailler 200 personnes sur ces simulations, le coût mensuel de la licence des outils de CAO deviendra excessif...

En définitive, le principal risque que nous encourons est de subir une limitation de la capacité du microprocesseur. Par exemple, sur 80 cœurs, il se pourrait que seulement 60 fonctionnent, ou que le microprocesseur ne puisse pas tourner à pleine puissance. Même dans ce cas, nous pourrions commencer à le commercialiser, et ainsi financer la deuxième version.

## Motiver les jeunes ingénieurs

**Il y a quelques années encore, les projets de ce genre étaient très rares. Cela devrait inciter les jeunes ingénieurs à se précipiter chez vous.**

**Philippe Notton :** Oui, pour ceux qui sont passionnés par le sujet, mais il n'y en pas beaucoup. J'ai récemment présenté le projet devant des ingénieurs de deuxième année de Supélec et j'ai dû leur expliquer que développer un microprocesseur ne signifiait pas travailler avec un fer à souder...

**C'est un vrai problème ! Notre pays ne peut pas, d'un côté, vouloir assurer sa souveraineté dans les supercalculateurs et, de l'autre, négliger de se doter des compétences nécessaires.**

**Philippe Notton :** Beaucoup de jeunes ingénieurs préfèrent se faire recruter par Google ou d'autres entreprises qui les rémunèrent mieux que nous.

Nous allons faire évoluer notre communication lors de nos prochaines campagnes de recrutement et,

notamment, mettre en avant le fait que Siemens met à notre disposition un émulateur qui permet de projeter les micro-processeurs dans l'univers FPGA (*Field Programmable Gate Arrays*). Ce genre d'équipement est encore rare, il pourrait cependant contribuer à attirer des ingénieurs...

## Architecture et efficacité énergétique

**De quelle ampleur sont les gains d'efficacité énergétique liés à l'architecture des microprocesseurs ?**

**Thomas Ernst :** Une architecture dédiée permet d'économiser jusqu'à un facteur 1 000 par rapport à un microprocesseur générique.

## Se répartir le travail à l'échelle européenne ?

**Pour éviter une concurrence intra-européenne, serait-il envisageable de répartir le travail entre le Leti, l'IMEC et l'alliance Fraunhofer ?**

**Sébastien Dauvé :** Nos parcours historiques, nos positionnements et nos modèles de valorisation sont en pratique assez différents surtout avec l'Imec qui a un modèle de programmes affiliés très tourné vers l'international y compris vers l'Asie.

**Thomas Ernst :** De plus l'IMEC est plus tournée vers le *More Moore* et le Leti vers le *More than Moore*.

**Sébastien Dauvé :** Il existe, cela dit, des complémentarités entre nos travaux et nous sommes en train d'étudier de quelle façon mettre en place des collaborations. Sur l'un de nos projets à venir, nous allons par exemple faire circuler des *wafer* entre les trois laboratoires afin que chacun réalise différentes étapes du processus.

## Conclusion par Gérard Roucairol

En guise de conclusion, je voudrais souligner un point amusant. Un grand fabricant de semi-conducteurs dans sa communication grand public, change opportunément d'unité de mesure en parlant de 3 nanomètres, puis de 2 nanomètres, avant de passer aux ångström (un nanomètre valant 10 ångström) pour tenter de convaincre que le mouvement de miniaturisation continue de s'appliquer, sachant que s'il apparaissait largement que ce n'était plus le cas, sa valorisation boursière en souffrirait probablement...

Plus sérieusement, cette séance a montré que, contrairement à ce que prétendaient les *venture capitalists* il y a quelques années, l'industrie des semi-conducteurs n'a pas disparu d'Europe. Elle est en train de se diversifier fortement en fonction des applications à réaliser, ce qui permet de la relancer dans différents pays européens mais nécessite des investissements massifs. Cette relance pose également le problème préoccupant des compétences, sur lequel l'Académie va se mobiliser.

**Mots clés :** composants, Europe, industrie, loi de Moore, *More than Moore*, semi-conducteurs, souveraineté, supercalculateurs

**Citation :** Gérard Roucairol, Alain Pouyat, Joël Hartmann, Philippe Notton, Sébastien Dauvé & Thomas Ernst. (2022). *L'industrie des semi-conducteurs et son futur*. Les séances thématiques de l'Académie des technologies. @

Retrouvez les autres parutions des séances thématiques de l'Académie des technologies sur notre site

Académie des technologies. Le Ponant, 19 rue Leblanc, 75015 Paris. 01 53 85 44 44. [academie-technologies.fr](http://academie-technologies.fr)

Production du comité des travaux. Directeur de la publication : Denis Ranque. Rédacteur en chef de la série : Hélène Louvel. Auteur : Élisabeth Bourguinat. N°ISSN : 2826-6196.

Les propos retranscrits ici ne constituent pas une position de l'Académie des technologies et ils ne relèvent pas, à sa connaissance, de liens d'intérêts. Chaque intervenant a validé la transcription de sa contribution, les autres participants (questions posées) ne sont pas cités nominativement pour favoriser la liberté des échanges.