

Les matériaux critiques en nanoélectronique industrielle

Didier Lévy et François Martin

Didier Lévy est ingénieur de l'École Européenne de Chimie, Polymères et Matériaux de Strasbourg (ECPM). Il a rejoint en 1989 la société SGS-Thomson qui est devenue la société STMicroelectronics. Il est actuellement chargé des relations de ST avec le CEA/LETI de Grenoble.

François Martin est ingénieur de l'Institut national Polytechnique de Grenoble (ENSEEG 80). Il est expert senior au CEA/LETI et travaille sur le ressourcement technologique des composants en lien avec les problématiques de criticité des matériaux.

Ce chapitre va revenir sur quelques grandes lignes de l'évolution récente de la microélectronique à partir de l'expérience acquise par la société STMicroelectronics (**Encart : « STMicroelectronics et le top 15 des fabricants de semi-conducteurs »**), puis abordera la question des matériaux, et notamment de la législation qui règle leur gestion, en particulier celle relative à l'environnement.

1 Quelques fondamentaux de la micro/nanoélectronique

1.1. Les puces de la microélectronique

Quand un boîtier plastique d'un équipement électronique est ouvert (**Figure 1A**), une « puce » avec ses connexions métalliques apparaît (**Figure 1B**). Quand on enlève ces connexions, apparaît la « puce » (**Figure 1C**), issue elle-même du découpage de

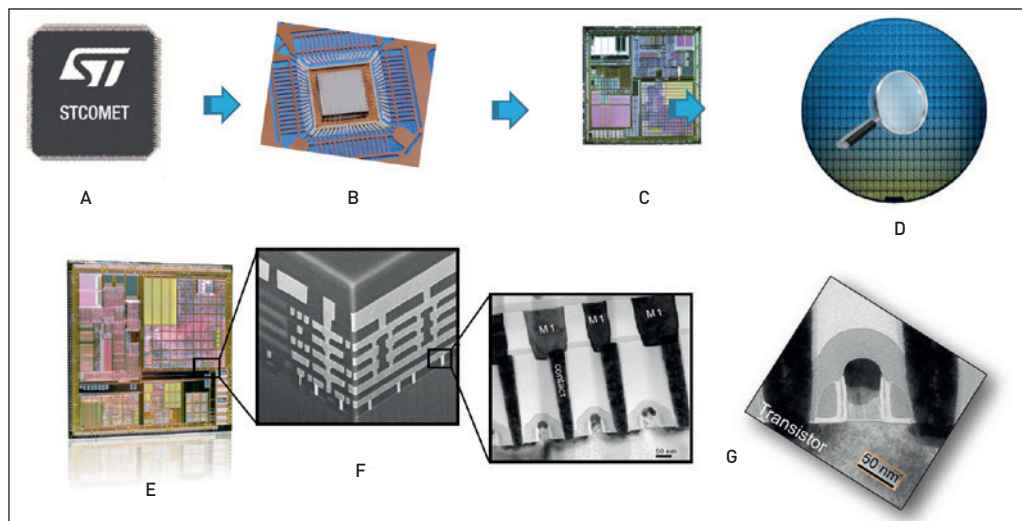


Figure 1

A) Un système électronique est composé d'un circuit en boîtier ;
 B) quand le boîtier est ouvert, on y trouve une puce avec ses nombreuses connexions ;
 C) en enlevant les connexions, on obtient une puce seule ;
 D) les puces sont fabriquées à partir de plaquettes de silicium ;
 E) les puces sont composées d'un empilement de couches métalliques de l'ordre du nanomètre.
 Au bas des couches métalliques, on trouve les transistors.

tranches de silicium de 200 ou 300 millimètres de diamètre (**Figure 1D**). Une observation au microscope d'une « puce » à l'échelle $4 \mu\text{m}$ par $4 \mu\text{m}$ permet d'observer un empilement de couches métalliques et de couches diélectriques (**Figure 1E**). Une observation plus fine permet de détecter le transistor puis la « grille » (**Figure 1F-1G**), qui en constitue le cœur. Sur la **Figure 1G**, la grille est de l'ordre de 50 nm. Le transistor est l'élément clé du circuit électronique, car sa grille, en permettant de bloquer ou de laisser passer le courant, va permettre d'élaborer les fonctions logiques qui vont être utilisées dans les circuits complexes.

1.2. La loi de Moore

La loi de Moore, illustrée sur la **Figure 4**, reflète le formidable bond en avant technologique opéré au cours des cinquante dernières années. En effet, les progrès surgis dans tous les domaines de la microélectronique, tant du point de vue des matériaux que des procédés

de lithographie, ont amené à doubler tous les dix-huit mois le nombre de transistors intégrés sur les composants par unité de surface. Cette évolution explique pourquoi les premiers ordinateurs prenaient la taille d'une pièce entière, alors que nous avons aujourd'hui toute une puissance de calcul phénoménale dans les smartphones aujourd'hui dans nos poches.

La réduction des dimensions, illustrée par la loi de Moore, a été accompagnée d'une réduction du nombre d'acteurs qui a voulu, ou pu, suivre ce rythme infernal. Ces tendances sont illustrées sur la **Figure 5**. Si plus de vingt fabricants différents offraient des technologies 130 nm, ce nombre a diminué drastiquement à 6 pour le nœud 28/32 nm. Pour les nœuds suivants, seuls trois acteurs restent et continuent la course à la dimension : Samsung, Intel et TSMC. À noter que le coût par transistor, s'il a baissé au cours de l'évolution de la loi de Moore, augmente légèrement pour les technologies 20 nm et en dessous (**Figure 6**).

LE TOP 15 DES FABRICANTS DE SEMI-CONDUCTEURS 2018

La société franco-italienne STMicroelectronics était classée numéro 11 du classement mondial en microélectronique fin 2018, avec un chiffre d'affaires supérieur à huit milliards de dollars et une croissance de 20 % par rapport à 2017. Elle emploie 45 000 personnes sur 11 sites de production, dont trois en France : à Crolles près de Grenoble, Tours et Rousset près d'Aix-en-Provence.

Le classement mondial des sociétés de fabrication de semi-conducteurs fin 2018 est rappelé sur la **Figure 2**. Le nouveau numéro un est le coréen Samsung bien connu du grand public, qui vient de passer devant l'américain Intel qui dominait le marché depuis une bonne décennie. Le troisième acteur, très influent sur le marché, s'appelle TSMC, un fondeur (entreprise spécialisée dans la fabrication) taïwanais moins connu du grand public, mais qui fournit de grands clients prestigieux. On note sur cette liste quelques sociétés « *fabless* », c'est-à-dire sans usine, mais qui conçoivent et vendent les puces et sous-traitent la fabrication.

Le site de Crolles (**Figure 3**) est constitué de deux usines, et compte fin 2018 plus de 4 000 employés, chiffre auquel il convient d'ajouter plus de 1 000 sous-traitants. Démarrée en 1992, la première usine fabrique des composants sur des tranches de silicium de 200 mm, avec des étapes de lithographie² descendant à des tailles critiques dans la gamme 0,5 μm - 0,13 μm . Dans la deuxième usine, démarrée en 2002, les composants sont fabriqués à partir de tranches de 300 millimètres, les tailles des grilles des transistors vont de 0,13 μm à 28 nanomètres.
















TOP 15 fabricants semiconducteurs 2018				
1	Samsung	Corée		Mémoires et logique
2	Intel	US		Logique et mémoires
3	Hynix	Corée		Mémoires
4	TSMC	Taiwan		Fonderie (logique)
5	Micron	US		Mémoires
6	Broadcom	US		Fabless
7	Qualcomm	US		Fabless
8	Toshiba	Japon		Logique et autre
9	Texas Instrument	US		Logique et autre
10	Nvidia	US		Fabless
11	WD/SanDisk	US		Mémoires
12	Infineon	Europe		Logique et autres
13	NXP	Europe		Logique et autres
14	STMicroelectronics	Europe		Logique et autres
15	MediaTek	Taiwan		Fabless

Figure 2

STMicroelectronics est 11^e mondial dans le classement des fabricants des semi-conducteurs ; le trio de tête est composé de Samsung, Intel et Hynix.

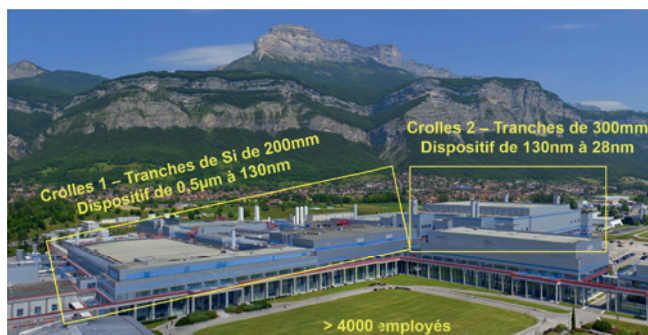


Figure 3

Le site de Crolles est composé de deux usines : l'une travaillant sur des tranches de 200 mm et des dispositifs de 0,5 à 0,13 μm , et l'autre sur des tranches 300 mm et des dispositifs de 130 à 28 nanomètres.

2. Lithographie : technique de gravure utilisant un faisceau d'électrons pour créer un motif en creux sur une surface. Elle est notamment utilisée pour la réalisation de circuits électroniques à semi-conducteurs et dans le domaine des nanotechnologies.

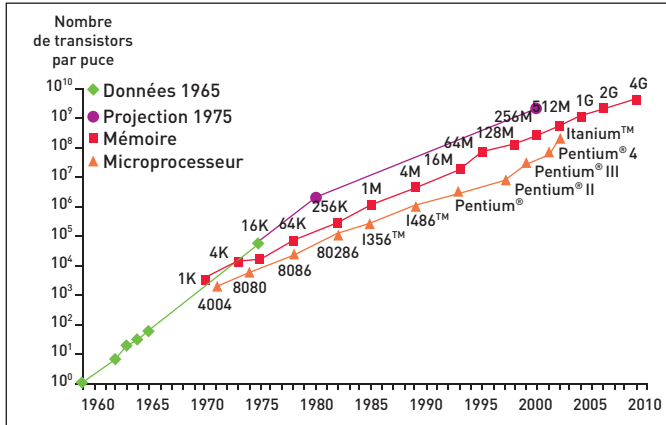


Figure 4

La loi de Moore dit que le nombre de transistors par puce double tous les dix-huit mois.

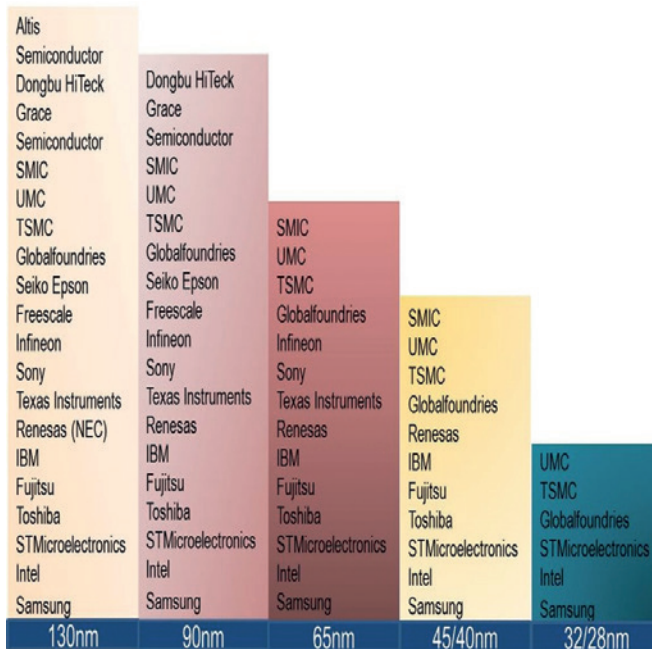


Figure 5

La réduction en dimension des transistors s'accompagne d'une réduction du nombre d'acteurs impliqués.

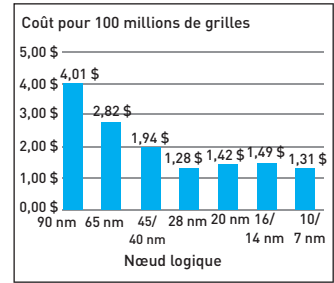


Figure 6

La réduction en dimension s'accompagne d'une réduction du coût par transistor, jusqu'à un plateau, aux alentours du 28 nm, où ce coût ré-augmente légèrement.

1.3. « More than Moore »

En parallèle de l'évolution de la loi de Moore, qui est devenue de plus en plus gourmande en investissements, notamment en lithographie avancée, s'est développé un tout autre écosystème appelé « More than Moore ». La société Sony a par exemple eu l'idée, en 2015, de superposer les puces les unes sur les autres, au lieu de les placer les unes à côté des autres. Sur l'exemple illustré avec les Figures 7 et 8, des matrices de pixels sont superposées sur une mémoire DRAM³, elle-même montée sur un circuit logique⁴. Une coupe du dispositif montre que les interconnexions, au lieu d'être externes entre deux puces, sont superposées l'une sur l'autre grâce à un via (contact électrique) traversant, encore appelé TSV (« Through Silicon Via »). Ces TSV sont en

3. Mémoire DRAM : mémoire de stockage informatique qui perd ses données lorsqu'elle n'est plus alimentée.

4. Circuit logique : ensemble de portes logiques reliées entre elles pour répondre à une expression algébrique.

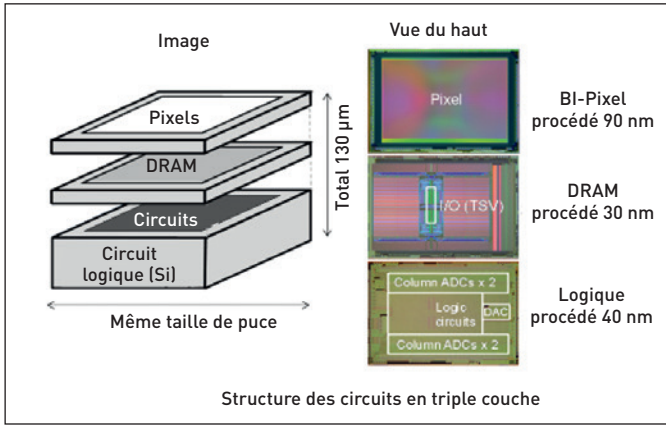


Figure 7

La société Sony a eu l'idée de superposer les puces les unes sur les autres. Cette idée fait partie des projets More than Moore.

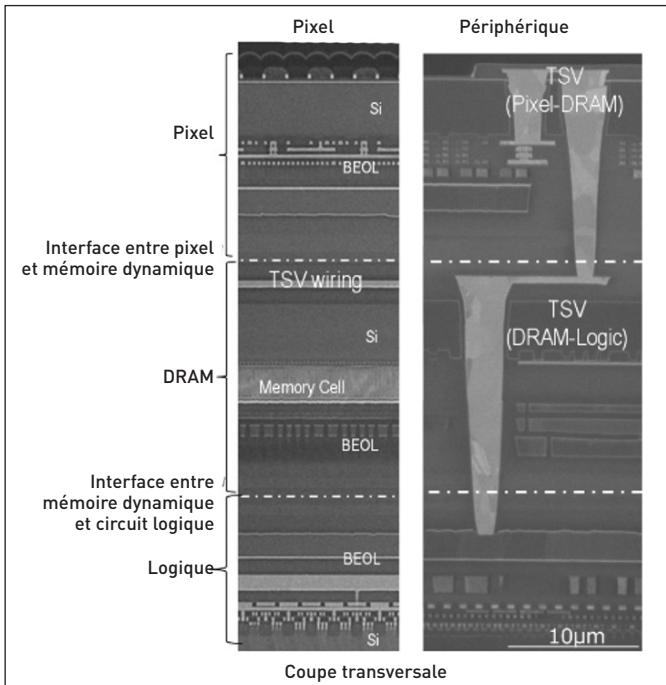


Figure 8

Les interconnexions entre les puces ne sont alors plus externes mais faites par des contacts électriques traversant chaque circuit de haut en bas.

réalité des connexions en tungstène ou en cuivre qui relient les différentes puces entre elles et constituent une évolution de rupture dans l'industrie.

Pour conclure cette partie générale sur l'industrie du semi-conducteur, on peut observer actuellement deux directions clairement établies et différentes :

– celle de la « loi de Moore », avec seulement trois acteurs : Samsung, Intel et TSMC. Les mots clés associés sont : technologie avancée, performance, densité, mémoire, microprocesseur⁵, logique, coût et gros

5. Microprocesseur : circuit intégré de très petite dimension formant une unité de traitement de l'information.

Figure 9

L'industrie va dans deux directions.

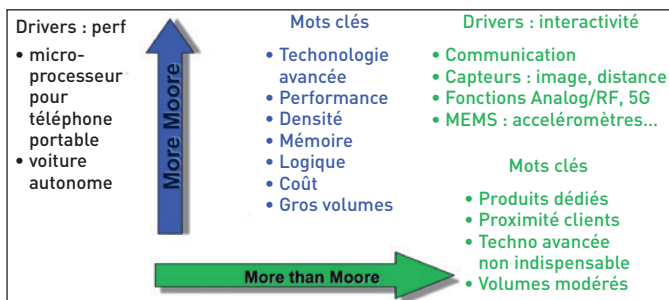


Figure 10

Les objets connectés, les maisons connectées, l'industrie connectée et les voitures intelligentes font partie du secteur de l'Internet des objets sur lequel se concentre STMicroelectronics.

volumes. Les marchés visés sont les téléphones portables et l'automobile autonome, marché en devenir qui va demander le plus de technologie pour demain, étant donné la masse des informations à traiter en temps réel ;

– celle du « *More than Moore* », pour l'interactivité, la communication, les capteurs de distance et de mouvement, les capteurs d'image, domaines pour lesquels les fabricants travaillent plus près des clients. Le marché des capteurs est lui-même en train d'exploser : on installe des capteurs d'image partout dans notre quotidien : smartphone, PC et tablettes, guidage des voitures, sécurité urbaine... Les capteurs sont aussi utilisés pour les mesures de distances,

pour les mouvements (par exemple les MEMS⁶ qui sont des accéléromètres⁷ que l'on trouve sur les montres portatives). Les mots clés sont : produits dédiés, proximité clients. Les volumes associés à ces technologies restent modérés.

C'est dans cette voie que STMicroelectronics s'est plongé depuis plusieurs années, avec deux marchés différenciant bien identifiés :

– le marché émergent de l'Internet des objets, c'est-à-dire tout ce qui concerne la connectivité (**Figures 10 et 12**), la mai-

6. MEMS : microsystème électromécanique.

7. Accéléromètre : capteur qui permet de mesurer l'accélération linéaire d'un objet.

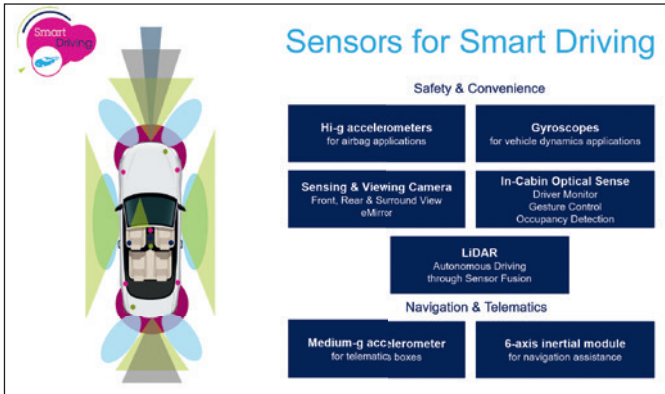


Figure 11

La société STMicroelectronics innove dans le secteur du Smart Driving (aide à la conduite), avec par exemple des capteurs pour augmenter la sécurité au volant ou pour l'assistance au conducteur.

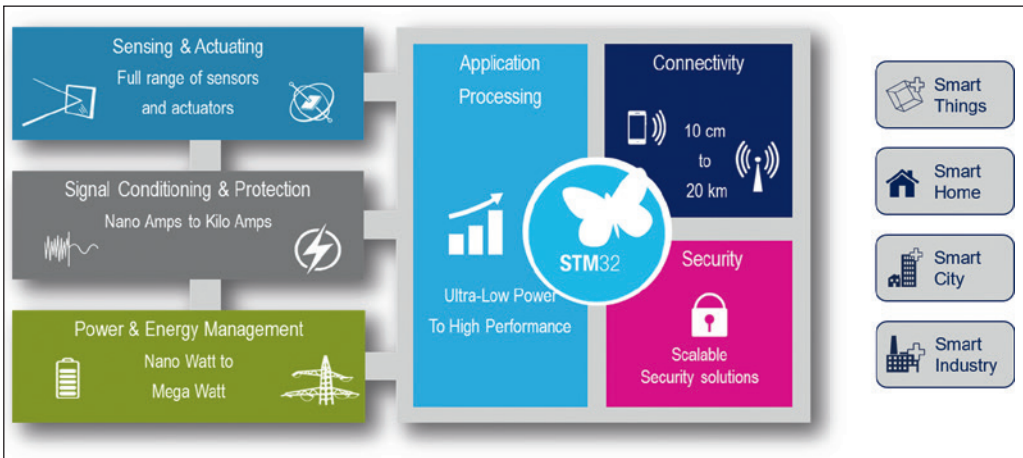


Figure 12

La société STMicroelectronics innove dans le secteur de la connectivité, que ce soit au niveau de simples objets, des maisons connectées ou même des industries.

son connectée (Figure 10B) et l'industrie (Figure 10C) ;

– l'automobile intelligente (Figure 10D et 11), où ST a des bases solides de collaboration avec de gros clients depuis plusieurs décennies.

2 Les matériaux

2.1. Les matériaux de la Loi de Moore

Sur la Figure 13, l'évolution des besoins en matériaux pour les besoins de la microélectronique qui suivent la loi de Moore a été reportée en fonction des nœuds

technologiques. Ces matériaux nouveaux peuvent être classés suivant leur application dans le composant : le canal⁸, lieu de transport des électrons, le diélectrique⁹ et la grille, éléments actifs du composant, et enfin la métallisation¹⁰. Les premiers transistors, apparus dans les

8. Canal : semi-conducteur avec un excès d'électrons ; la présence d'un champ électrique peut autoriser la conduction électrique dans ce canal.

9. Diélectrique : milieu ne conduisant pas le courant électrique.

10. Métallisation : opération qui consiste à déposer une couche métallique sur une tranche de semi-conducteur afin de réaliser des interconnexions.

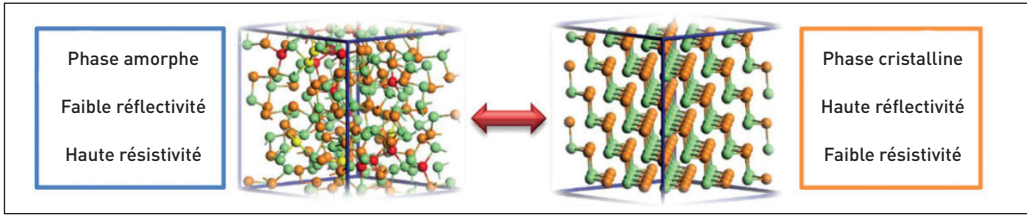


Figure 14

Le GST est un matériau à changement de phase nouvellement utilisé pour des mémoires.

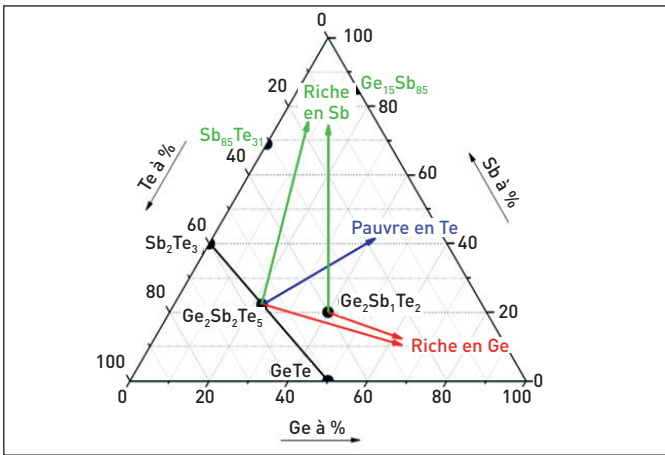


Figure 15

Le diagramme ternaire germanium (Ge)-antimoine (Sb)-tellure (Te) constitue la base technique pour trouver le meilleur compromis de composition pour obtenir les meilleures performances électriques.

peut passer de l'état amorphe¹² à l'état cristallin¹³ en fonction de la température appliquée. Cette propriété est potentiellement utile pour un fonctionnement dans une mémoire embarquée. Le travail de développement peut se résumer dans la recherche de la composition sur le diagramme ternaire Ge-Sb-Te reporté sur la **Figure 15**, pour obtenir les performances nécessaires au bon fonctionnement, notamment la consommation globale et le vieillissement du composant.

Il convient ensuite de déterminer les procédés de fabrication adaptés et notamment les meilleures conditions des étapes de préparation de surface, de dépôt, d'encapsulation¹⁴, de lithographie, de gravure et de polissage mécano-chimique. Tout cela constitue les axes de travail des équipes de recherches de développement (R&D) des usines de Milan et de Crolles, depuis une bonne quinzaine d'années.

Une liste non exhaustive d'autres matériaux que le GST, introduits dans les usines de ST d'abord en R&D puis en

12. Amorphe : solide non cristallin où les atomes et molécules sont entassés de manière désordonnée.

13. Cristallin : état solide où les atomes sont organisés selon des formes géométriques définies.

14. Encapsulation : ensemble des techniques et processus utilisés pour protéger les composants et les circuits.

Matériau	Utilisation	Site ST
PbZrTiO ₃	Tête d'impression pour imprimante capacité de découplage	Milan Tours
BaSrTi	Capacité variables pour adaptation d'antennes	Tours
GaN	Composant de puissance pour automobile	Tours
SiC	Composant de puissance pour automobile (600-1200V)	Catane
InP/InGaAs	Source laser pour la photonique (Data Center)	R&D CEA Léti

Tableau 1

De nombreux nouveaux matériaux sont utilisés pour différentes applications en microélectronique.

production, est reporté sur la **Tableau 1**. Le « PZT », mélange de plomb, zirconium et tellure (PbZrTiO₃), est utilisé dans nos usines de production de Milan et de Tours, pour les têtes d'impression pour imprimantes. Le « BST », mélange de barium, strontium et titane (BaSrTi), est utilisé pour les condensateurs à capacités variables, le GaN et le SiC pour les composants de puissance à Tours et à Catane en Sicile. Au stade de la R&D, les matériaux III/V InP et InGAs sont étudiés pour les sources laser pour les composants photoniques¹⁵, par exemple pour les data centers¹⁶ ou pour l'automobile. Cette liste n'est bien évidemment pas exhaustive.

2.3. Notion de matériaux critiques

Les nouveaux matériaux sont d'abord évalués sous l'angle de leur fonctionnalité, mais également sous celui de leur caractère stratégique appelé la

criticité¹⁷ (**Figure 17**). L'aspect législatif constitue le premier facteur pris en compte pour le développement de ces matériaux critiques. La première directive dans ce sens a été mise en place en 2010 par les États-Unis sous le nom de Directive « 3TG » pour « Titane - Tantale - Tungstène Gold ». Cette directive impose aux fabricants de semi-conducteurs¹⁸ de déclarer et de tracer toute la chaîne d'approvisionnement des métaux depuis les ressources minières, souvent situées en Afrique, jusqu'aux bâtis de couches métalliques dans nos salles blanches de fabrication. Cette législation s'est ensuite élargie au Co, Mica, Pb, Cd, Cr, Hg, PFOS, PFOA, PBB..., pour lesquels les conditions d'utilisation doivent être « appropriées ».

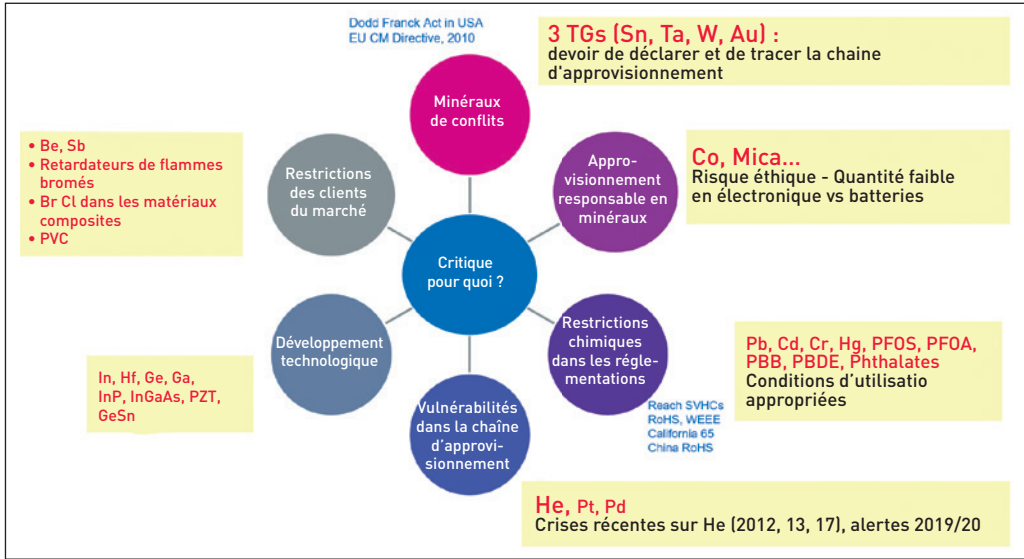
Un deuxième aspect à prendre en compte pour ces matériaux critiques vient de la considération de la « *supply chain* » (la chaîne d'approvisionnement), c'est-à-dire de l'aptitude du marché à délivrer les produits. En 2018, par exemple, le monde de la microélectronique a reçu une alerte sérieuse sur

15. Photonique : branche de la physique concernant l'étude et la fabrication de composants permettant la génération, la transmission, le traitement ou la conversion de signaux optiques.

16. Data center : lieu physique où sont rassemblées de nombreuses machines (bien souvent des serveurs) contenant des données informatiques.

17. Criticité : détermination et hiérarchisation du degré d'importance et de la disponibilité d'un système d'information.

18. Semi-conducteur : matériau présentant une conductivité intermédiaire entre les métaux conducteurs et les isolants.



l'aptitude des industriels à délivrer de l'hélium, gaz très fortement utilisé dans nos usines de fabrication, induite par un problème géopolitique entre le Qatar et l'Arabie Saoudite. Ainsi, avant de décider si les nouveaux matériaux passent en production, il convient de s'assurer auprès des différents intervenants qu'aucune restriction de « supply chain » n'interviendra dans le court mais aussi le long terme.

Le diagramme de la **Figure 17**, établi par la communauté européenne, suit de manière

très précise 27 éléments sous différents critères (**Tableau 2**) : les pays producteurs (minerais, gaz, liquides), les taux de dépendances aux exportations, l'aptitude de l'industrie à substituer ces produits, mais également à les recycler. Sur le **Tableau 2**, il apparaît par exemple que 83 % du platine mondial provient d'Afrique du Sud, le cobalt provient à 64 % de la République du Congo, le tantale à 31 % du Rwanda, l'hélium des États Unis et du Qatar.

Sur la **Figure 19**, on voit que la position de la Chine est

Figure 17

Les matériaux utilisés peuvent être critiques sous différents aspects.

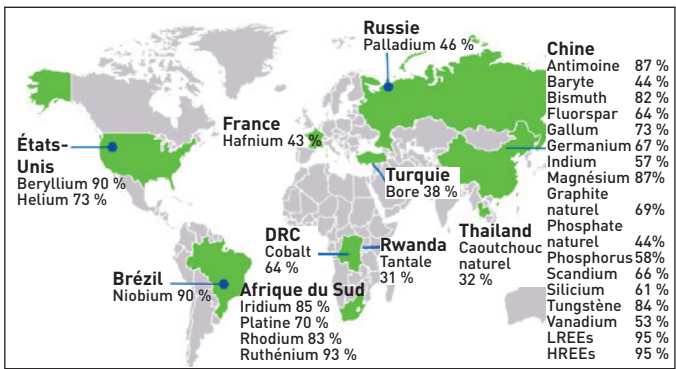


Figure 19

La Chine est le pays le plus grand contributeur de la chaîne d'approvisionnement en matériaux critiques. L'Afrique joue aussi un rôle important.

Éléments (Sélection)	Principaux producteurs (moyenne 2010-2014)	Taux de dépendance à l'importation	Taux de substitution	Taux de recyclage pour la fin de vie des matériaux	Utilisation en micro-électronique ?	Critique pour la micro-nano-électronique
W	Chine (84 %) ; Russie (4 %)	44 %	0,94/0,97	42 %	Yes – Front End CVD & ALD (Wf6 ; Targets)	Minéraux de conflit
Pt	Afrique du Sud (83 %)	99,6 %	0,93/0,98	14 %	Yes	
Hf	France (43 %) ; US (41 %) ; Ukraine (8 %) ; Russie (8 %)	9 %	0,93/0,97	1 %	Oui - Front End (ALD : HfCL4)	
Co	DRC (64 %) ; Chine (5 %) ; Canada (5 %)	32 %	1,0/1,0	0 %	Oui	Programme d'approvisionnement responsable
Ga	Chine (85 %) ; Allemagne (7 %) ; Kazakhstan (5 %)	34 %	0,95/0,97	0 %	Oui – As Ga (RF ; IOT) ; GaN/Si devices	
In	Chine (57 %) ; Corée du Sud (15 %) ; Japon (10 %)	0 %	0,94/0,97	0 %	Oui (Minéraux III/V InP, InGaAs)	
Ta	Rwanda (31 %) - DRC (19 %) ; Brésil (14 %)	100 %	0,94/0,95	1 %	Oui - FE Targets	Minéraux de conflit
He	US (73 %) ; Qatar (12 %) ; Algérie (10 %)	96 %	0,94/0,96	1 %	Oui Fe fabs	Problèmes critiques de fourniture
Ge	Chine (67 %) ; Finlande (11 %) ; Canada (9 %) ; US (9 %)	64 %	1,0/1,0	2 %	Oui - Tech node 7nm	

Tableau 2

Ce tableau récapitule les différents aspects de criticité d'éléments utilisés en microélectronique parmi les vingt-sept éléments chimiques déclarés critiques par l'Union Européenne.

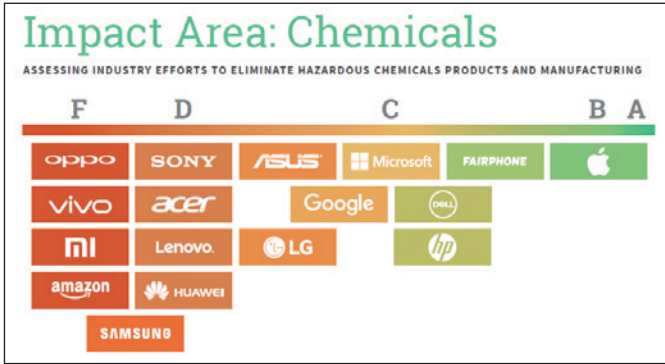


Figure 20

Les industriels sont classés en fonction de leur aspect « green » de A à F par la société Greenpeace.

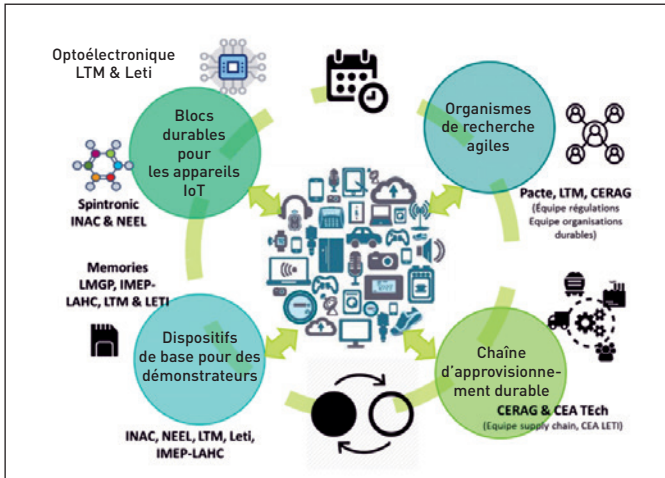


Figure 21

Le projet NEED contribue au développement durable en permettant la réalisation de diverses fonctions déjà existantes tout en utilisant des principes alternatifs (notamment suppression ou réduction drastique de matériaux critiques à partir de l'analyse de la chaîne d'approvisionnement et des évolutions sociétales).

prédominante pour de nombreux matériaux de base ; on note aussi la présence de l'Afrique, de la Russie et des Amériques.

L'impact environnemental de plusieurs compagnies a été résumé par Greenpeace (Figure 20). Il apparaît ainsi qu'Apple, Fairphone, Dell et HP se détachent des autres fabricants dans le bon sens.

Dans ce contexte, un projet de recherche visant à développer des techniques assurant la durabilité et une bonne intégration environnementale des moyens de production de la micro et nanoélectronique a été initié par l'Université Grenoble Alpes. Il s'agit du projet intitulé « NEED for IoT », décrit sur la Figure 21.

L'avenir de la microélectronique

Depuis 2015, l'industrie de la microélectronique a évolué vers deux voies bien distinctes : la continuation de la « *loi de Moore* » pour des applications comme le cœur des smartphones et certaines applications automobiles qui demandent toujours plus de performances et des grands volumes, et les applications « *More Than Moore* », plus différenciées, sans forcément la nécessité d'utiliser les technologies les plus avancées et en volumes plus modérés. Il ne reste malheureusement plus d'acteurs en Europe pouvant suivre les investissements colossaux liés à la loi de Moore, à l'exception d'un fournisseur d'équipements de lithographie, ASML, autour duquel un écosystème s'est construit en Hollande et Belgique.

Dans ce contexte, STMicroelectronics a décidé de se concentrer vers les deux secteurs d'avenir que constituent l'Internet des objets (IoT) et l'automobile intelligente. Ces domaines nécessitent des solutions innovantes utilisant de nouveaux matériaux soumis à une législation qui, après avoir été américaine puis européenne, est actuellement réellement mondiale. Cette législation est bien évidemment de plus en plus contraignante pour les industriels, mais également de plus en plus protectrice pour l'environnement.

Le temps de cycle court entre la faisabilité d'un concept et son industrialisation est une caractéristique de l'industrie de la microélectronique en perpétuel mouvement, notamment hors loi de Moore. Ce constat explique pourquoi le travail collectif effectué entre la recherche publique (CEA, CNRS, Écoles d'Ingénieur, Universités...) et l'industrie, qui constitue une des forces de la France, doit être cultivé et protégé. Pour cela, tous les acteurs doivent se retrouver autour de la table et poursuivre les efforts pour casser les

barrières entre organisations, secteurs, départements, spécialités... et casser les silos bien connus dans beaucoup d'organisations, par exemple en considérant les contraintes liées aux matériaux critiques comme des opportunités pour l'innovation et le ressourcement technologique.

La **Figure 22** présente l'intérieur de la salle blanche de Crolles (Crolles 300). On y voit les lots de plaquettes de silicium transportés par des robots, des opérateurs déguisés en homme-grenouille... Les développements et perspectives nourrissent une grande demande de la part de l'entreprise pour le recrutement de jeunes ingénieurs et docteurs.



Figure 22

Dans la salle blanche de l'usine de Crolles, les plaquettes de silicium sont transportées dans des cassettes en plastiques, elles même transportées d'un équipement à l'autre à l'aide de robots au plafond.