
**OFFICE PARLEMENTAIRE D'ÉVALUATION
DES CHOIX SCIENTIFIQUES ET
TECHNOLOGIQUES**

RAPPORT

sur

« L'évolution du secteur de la micro/nanoélectronique »

par

M. Claude SAUNIER, sénateur

Déposé sur le Bureau de l'Assemblée nationale
par M. Claude BIRRAUX
Président de l'Office

Déposé sur le Bureau du Sénat
par M. Henri REVOL
Premier Vice-président de l'Office

SOMMAIRE

Pages

INTRODUCTION	7
I. UN SECTEUR CLÉ DE L'ÉCONOMIE EN PLEINE MUTATION	11
A. UN SECTEUR CLÉ DE L'ÉCONOMIE	11
1. <i>Une omniprésence dans la vie quotidienne.....</i>	<i>11</i>
2. <i>Un poids économique croissant dans l'économie mondiale.....</i>	<i>12</i>
3. <i>Un effet de levier formidable.....</i>	<i>14</i>
4. <i>Un secteur stratégique pour la compétitivité des entreprises et l'indépendance nationale.....</i>	<i>16</i>
B. UNE INDUSTRIE CONFRONTÉE À UN TRIPLE DÉFI	20
1. <i>L'explosion des coûts de l'industrie de la microélectronique</i>	<i>20</i>
2. <i>Le raccourcissement du cycle de vie des produits</i>	<i>22</i>
3. <i>Un marché qui approche de la maturité</i>	<i>22</i>
C. UNE INDUSTRIE EN PLEINE MUTATION.....	24
1. <i>Une hiérarchie mondiale mouvante.....</i>	<i>24</i>
2. <i>La poursuite de la « déverticalisation » du secteur des semiconducteurs</i>	<i>26</i>
3. <i>Le développement des alliances, une réponse à l'augmentation des coûts.....</i>	<i>27</i>
4. <i>La coexistence de trois modèles industriels avec leurs contraintes particulières.....</i>	<i>29</i>
II. DES PERSPECTIVES SCIENTIFIQUES PROMETTEUSES MALGRÉ LES DÉFIS TECHNOLOGIQUES À RELEVER	37
A. LES TROIS AXES DE DÉVELOPPEMENT DU SECTEUR DE LA MICROÉLECTRONIQUE	37
1. <i>Le « more Moore » ou la poursuite de la miniaturisation.....</i>	<i>38</i>
2. <i>Le « more than Moore » ou l'intégration de plusieurs fonctions sur une puce</i>	<i>42</i>
3. <i>Le « beyond CMOS » ou les recherches sur les technologies alternatives au CMOS.....</i>	<i>47</i>
B. LES OBSTACLES À SURMONTER	53
1. <i>La poursuite de la miniaturisation par la lithographie.....</i>	<i>54</i>
2. <i>La perturbation des performances des transistors</i>	<i>55</i>
a) <i>Les interconnexions</i>	<i>55</i>
b) <i>Les courants de fuite.....</i>	<i>56</i>
c) <i>La consommation d'énergie</i>	<i>57</i>
d) <i>La sensibilité aux variations du procédé de fabrication.....</i>	<i>58</i>
e) <i>La sensibilité des circuits intégrés à la radioactivité</i>	<i>58</i>
3. <i>La complexité croissante des architectures</i>	<i>58</i>
III. UN SECTEUR SOUMIS AUX ENJEUX DE LA SOCIÉTÉ.....	60
A. UN SECTEUR POTENTIELLEMENT CRUCIAL POUR SURMONTER LES DÉFIS SOCIÉTAUX DU XXIÈME SIÈCLE.....	60
1. <i>L'explosion des dépenses de santé</i>	<i>61</i>
2. <i>Les coûts liés au vieillissement de la population</i>	<i>62</i>
3. <i>L'amélioration de l'efficacité énergétique</i>	<i>64</i>
4. <i>La gestion du trafic routier</i>	<i>66</i>
5. <i>Les enjeux de sécurité</i>	<i>68</i>

B. UN SECTEUR QUI SOULÈVE CERTAINES INTERROGATIONS	69
1. <i>Le coût écologique de l'industrie de la microélectronique</i>	69
a) Une industrie très consommatrice en ressources naturelles	69
b) Une industrie fortement productrice de déchets	71
c) Le développement de l'électronique verte.....	73
d) Une industrie concernée par les risques sanitaires et environnementaux liés au développement des nanomatériaux	74
2. <i>La protection des données à caractère personnel</i>	77
a) Le principe du développement de l'informatique dans le respect de la vie privée et des libertés individuelles	77
b) Un principe de plus en plus fragilisé par l'amélioration et la diffusion des technologies de marquage et de traçabilité.....	80
 IV. L'INDUSTRIE DE LA MICROÉLECTRONIQUE EUROPÉENNE : UNE INDUSTRIE EN PÉRIL ?	83
A. LES DONNÉES DU MARCHÉ MONDIAL.....	84
1. <i>Une demande tirée par les pays asiatiques</i>	84
2. <i>Une production localisée principalement en Asie</i>	87
B. LE VOLONTARISME ASIATIQUE : TROIS EXEMPLES	88
1. <i>Singapour</i>	88
a) Les chiffres clés.....	88
b) La stratégie de Singapour	88
2. <i>Taiwan</i>	90
a) Les chiffres clés.....	90
b) La stratégie de Taiwan.....	90
3. <i>La Chine continentale</i>	94
a) Les chiffres clés.....	94
b) La stratégie de la Chine	94
C. LE POIDS DES ETATS-UNIS	95
1. <i>Un acteur majeur dans le secteur des semiconducteurs</i>	95
2. <i>Un important programme de soutien à la microélectronique</i>	96
D. LA MICROÉLECTRONIQUE EN EUROPE : UN SECTEUR INDUSTRIEL À LA CROISÉE DES CHEMINS	98
1. <i>Des atouts non négligeables</i>	98
a) Des leaders industriels européens	98
b) Des centres de recherche européens reconnus mondialement.....	99
c) Des clusters dans la microélectronique ayant une vraie taille critique	101
d) Des programmes européens variés.....	103
2. <i>Des insuffisances inquiétantes</i>	105
a) Une industrie européenne dont le poids reste marginal par rapport à ses concurrents asiatiques et américains	105
b) La compétitivité des entreprises européennes remise en cause par un dollar faible	106
c) Une industrie européenne pénalisée par des règles de concurrences trop strictes au regard de la pratique mondiale.....	107
d) Un désintérêt politique relatif pour le secteur de la microélectronique qui empêche l'instauration d'une stratégie industrielle efficace	110
e) Une coopération scientifique entre les grands instituts de recherche européens encore perfectible	110
E. L'INDUSTRIE DE LA MICROÉLECTRONIQUE EN FRANCE : UNE SITUATION INCERTAINE.....	111
1. <i>L'adoption de mesures permettant un soutien indirect mais efficace à l'industrie des semiconducteurs</i>	112
a) La création d'écosystèmes à travers les pôles de compétitivité	112

b) La réforme du crédit impôt recherche	113
2. <i>Des faiblesses à surmonter</i>	114
a) L'absence de stratégie industrielle	114
b) Une lisibilité de la recherche publique encore insuffisante	115
c) L'avenir de Crolles	116
 CONCLUSION	
LE SECTEUR DE LA MICROÉLECTRONIQUE : UN CAS D'ÉCOLE DE LA PROBLÉMATIQUE GLOBALISATION -INNOVATION- DÉSINDUSTRIALISATION	117
 LES PROPOSITIONS	121
 I. SOUTENIR LE SECTEUR DE LA MICROÉLECTRONIQUE	125
A. LES PROPOSITIONS AU NIVEAU COMMUNAUTAIRE	125
1. <i>Mettre un terme à la surévaluation de l'euro par rapport au dollar</i>	125
2. <i>Assurer le respect de règles minimales de concurrence</i>	126
3. <i>Adapter les règles du droit de la concurrence européen à la pratique mondiale</i>	127
4. <i>Influencer la création de marchés porteurs pour l'industrie européenne de la</i> <i>microélectronique</i>	128
B. LES PROPOSITIONS AU NIVEAU NATIONAL	131
1. <i>S'engager dans l'élaboration de programmes structurants nationaux</i>	131
2. <i>Améliorer les performances de la recherche publique</i>	132
a) Renforcer la lisibilité de la recherche publique	132
b) Rapprocher les chercheurs en science fondamentale des experts de l'industrie	133
c) Professionnaliser les dispositifs de valorisation	134
d) Encourager l'emploi des chercheurs dans l'industrie	135
e) Inciter la coopération entre les Instituts Carnot et les centres de recherche <i>européens</i>	135
3. <i>Renforcer les crédits de formation en microélectronique</i>	136
4. <i>Créer un environnement fiscal plus favorable pour les entreprises implantées en</i> <i>France</i>	138
 II. CONCILIER L'ESSOR DE LA MICROÉLECTRONIQUE AVEC LE RESPECT DES DONNÉES PRIVÉES ET DE L'ENVIRONNEMENT	140
A. CONCILIER ÉTHIQUE ET MICROÉLECTRONIQUE	140
1. <i>Renforcer les moyens de la CNIL afin qu'elle puisse remplir l'ensemble de ses</i> <i>missions correctement</i>	140
2. <i>Intégrer dans la technologie la protection des données personnelles</i>	141
3. <i>Encourager la signature d'une convention internationale sur la protection des</i> <i>données personnelles</i>	141
B. ENCOURAGER LE DÉVELOPPEMENT D'UNE « ÉLECTRONIQUE VERTE »	142
1. <i>Utiliser les leviers d'intervention de la puissance publique pour développer</i> <i>« l'électronique verte »</i>	142
2. <i>Sensibiliser les utilisateurs à la consommation des appareils électroniques</i>	143
3. <i>Multiplier les programmes de recherche pour anticiper et prévenir les éventuels</i> <i>risques en matière de santé et d'environnement liés aux nanoparticules</i>	144
 ANNEXE I - LISTE DES PERSONNES AUDITIONNÉES	147
 ANNEXE II - LISTE DES ABRÉVIATIONS	161

INTRODUCTION

Mesdames, Messieurs,

L'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques a été saisi le 19 décembre 2006 par le Bureau du Sénat, en application de l'article 6 ter de l'ordonnance n° 58-1100 du 17 novembre 1958, sur l'actualisation du rapport établi le 8 avril 2003 relatif à l'évolution du secteur des semiconducteurs et ses liens avec les micro et nanotechnologies.

Il convient de rappeler que très rapidement après son début d'activité, l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques s'est intéressé au secteur des semiconducteurs. Trois rapports ont déjà été publiés sur le sujet.

Ainsi, le cinquième rapport approuvé par l'Office en 1989 et présenté par notre collègue Louis Mexandeau étudiait « *l'évolution de l'industrie des semiconducteurs et de la microélectronique* ».

De même, en 1994, l'Office a approuvé une étude de notre collègue Charles Descours sur « *l'évolution du secteur des semiconducteurs et de la microélectronique* ».

Puis en 2002, votre rapporteur a eu l'occasion de présenter son rapport sur « *l'évolution des semiconducteurs et ses liens avec les micro et nanotechnologies* ».

Le secteur des semiconducteurs est en effet stratégique : avec 265 milliards de dollars de chiffre d'affaires au niveau mondial (environ 3 millions d'emplois), le secteur des semiconducteurs contribue à générer plus de 1.300 milliards de dollars de chiffre d'affaires dans les industries électroniques (environ 18 millions d'emplois) et 5.000 milliards de dollars dans le secteur des services (100 millions d'emplois).

En outre, il détermine la compétitivité des entreprises dans la mesure où la microélectronique s'est répandue dans tous les secteurs d'activité et qu'elle est le principal moteur de l'innovation technologique et industrielle.

Or, depuis le dernier rapport sur ce sujet il y a cinq ans, le monde des semiconducteurs a connu des bouleversements importants. En octobre 2007, l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques a donc chargé votre rapporteur d'actualiser son étude en s'intéressant aux évolutions à la fois au niveau scientifique, économique du secteur ainsi qu'à son impact sur la société.

Il apparaît ainsi que **la poursuite de la miniaturisation et le basculement de la microélectronique dans la nanoélectronique** depuis le passage de l'épaisseur du trait de gravure à 90 nm en 2003 s'accompagnent d'une **explosion des coûts de R&D, de conception et de production liés aux avancées technologiques.**

Pour affronter ces coûts, l'industrie des semiconducteurs est contrainte à de profondes mutations. La déverticalisation du secteur des semiconducteurs avec la création d'entreprises dédiées à la fonderie en sous-traitance conduit à la coexistence de trois modèles : les sociétés intégrées; les « fabless », c'est-à-dire les sociétés sans capacités de production et les fonderies. En outre, les entreprises de semiconducteurs s'efforcent toutes de monter dans la chaîne de la valeur afin d'augmenter leurs marges.

Par ailleurs, **le rôle croissant joué par le « More than Moore », à savoir l'intégration de plusieurs fonctions sur une puce,** présente non seulement de nouveaux défis technologiques, mais également une opportunité majeure pour l'industrie européenne des semiconducteurs. En effet, les applications liées au « More than Moore » sont très nombreuses et constituent autant de nouveaux marchés porteurs dans les domaines de l'énergie, de la santé et des transports. En outre, l'investissement capitaliste pour les technologies dérivées est bien moindre que pour la poursuite de la miniaturisation.

Au-delà des évolutions scientifiques et économiques liées au secteur des semiconducteurs, **leur omniprésence dans la vie quotidienne et les espoirs ou phantasmes qu'ils suscitent impliquent une réflexion éthique sur leur place dans la société.**

L'industrie de la microélectronique apparaît comme **un secteur potentiellement crucial pour surmonter les défis sociétaux du XXIème siècle** tels que l'explosion des dépenses de santé, les coûts liés au vieillissement de la population, la maîtrise de la consommation d'énergie ou encore la gestion du trafic routier.

Néanmoins, la « pervasion » de la microélectronique présente deux inconvénients.

D'une part, son **coût écologique est non négligeable** : la microélectronique est **une industrie très consommatrice en ressources naturelles** (électricité, eau, matériaux rares) **et fortement productrice de déchets.** Le développement d'une « électronique verte » plus respectueuse de l'environnement est donc indispensable.

D'autre part, la **protection des données à caractère privé apparaît de plus en plus difficile à mettre en œuvre.** La loi du 6 janvier 1978 modifiée le 6 août 2004 relative à l'informatique, aux fichiers et aux libertés et la création d'une commission nationale de l'informatique et des libertés avaient instauré **le principe du développement de l'informatique dans le respect de la vie privée et des libertés individuelles.** Néanmoins, ce

principe apparaît de plus en plus fragilisé par l'amélioration et la diffusion des technologies de marquage et de traçabilité quasi-invisibles.

Enfin, face au volontarisme politique fort des Etats-Unis et de l'Asie visant à soutenir massivement le secteur des semiconducteurs jugé comme stratégique, la France et l'Europe apparaissent handicapées.

Certes, elles disposent de leaders industriels à la fois dans la microélectronique (SOITEC, ASML) et dans leurs principaux domaines d'application (l'automobile, l'éclairage, le photovoltaïque). En outre, l'Europe bénéficie de centres de recherche reconnus mondialement (LETI, IMEC) et s'est lancée avec succès dans la création de clusters ayant une vraie masse critique.

Néanmoins, l'industrie de la microélectronique aussi bien en France qu'en Europe est menacée par une méconnaissance de la part de nos dirigeants des enjeux stratégiques liés à la microélectronique et l'absence de stratégie industrielle pour maintenir l'emploi dans ce secteur très capitalistique.

L'industrie de la microélectronique en Europe serait-elle condamnée ?

Une telle évolution serait dramatique lorsqu'on sait que la microélectronique est responsable, avec l'industrie du logiciel, de 90 % des innovations réalisées dans des marchés aussi porteurs que l'automobile, la médecine, la logistique et l'énergie. **Sans une industrie de la microélectronique française et européenne forte et indépendante, la compétitivité de secteurs entiers de l'économie serait remise en cause et durablement affaiblie au profit de nos concurrents asiatiques et américains.**

* *

*

Il apparaît donc que l'analyse du secteur de la microélectronique conduit à une réflexion plus globale sur les ressorts de l'innovation et les conséquences de la globalisation sur l'économie européenne, avec une tendance lourde à la désindustrialisation.

Elle est également l'occasion de se pencher sur le fonctionnement de l'économie mondiale et sur le respect très varié des règles définies par l'Organisation Mondiale du Commerce.

Au-delà de l'état des lieux dressé par ce rapport, plusieurs suggestions sont formulées afin de renforcer l'industrie de la microélectronique française et européenne et de concilier l'essor de la microélectronique avec le respect des données privées et de l'environnement.

Il convient enfin de préciser que cette étude se limite délibérément au secteur des semiconducteurs. Les nanosciences et les nanotechnologies ne sont donc évoquées qu'en rapport avec la micro/nanoélectronique. C'est la raison pour laquelle les questions éthiques relatives à l'utilisation des nanotechnologies dans le domaine médical ne sont pas abordées. De même, sans méconnaître la légitimité des interrogations soulevées par l'utilisation croissante de nanomatériaux qui peuvent s'avérer toxiques pour l'homme et l'environnement, ce sujet n'occupe pas une place centrale dans ce rapport dans la mesure où le secteur des semiconducteurs est aujourd'hui relativement peu exposé aux risques liés aux nanoparticules.

I. UN SECTEUR CLÉ DE L'ÉCONOMIE EN PLEINE MUTATION

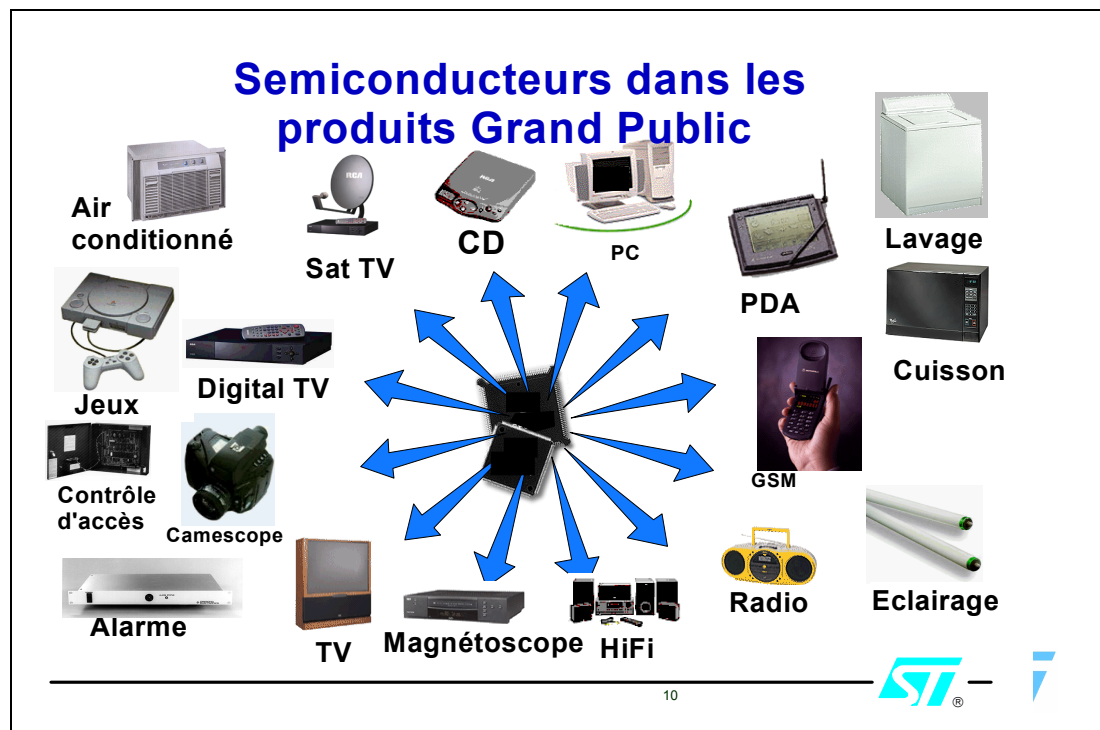
A. UN SECTEUR CLÉ DE L'ÉCONOMIE

Le paradoxe de l'industrie des semiconducteurs est qu'elle irrigue profondément la vie économique et les comportements sociaux tout en restant relativement confidentielle, à la différence, par exemple, de l'aéronautique. Ainsi, on s'intéressera plus aux applications de l'ordinateur personnel et des téléphones portables qu'aux composants qui permettent de les faire fonctionner. Pourtant, les semiconducteurs sont omniprésents dans la vie quotidienne et ont un poids économique décisif dans la mesure où leur diffusion technologique est en progression constante.

1. Une omniprésence dans la vie quotidienne

Depuis notre réveil jusqu'à l'extinction des lumières, nous sommes environnés d'objets qui fonctionnent grâce aux composants électroniques.

Le tableau suivant en donne quelques illustrations :



Cette « pervasion » de la microélectronique dans notre quotidien s'explique par une miniaturisation poussée qui s'appuie sur un **coût de production exponentiellement décroissant**.

D'une part, des composants élémentaires toujours plus petits permettent de gagner non seulement en vitesse et en consommation, mais aussi en taille et en poids (surtout pour les systèmes portables ou embarqués), élargissant sans cesse le champ d'application de la microélectronique.

D'autre part, **la réduction de la taille des circuits intégrés entraîne une diminution du coût de production unitaire**, ouvrant ainsi de nouveaux marchés. Pour rappel, le prix d'un mégabit de mémoire électronique équivalait à 75.000 € en 1973, alors qu'il s'élève aujourd'hui à 1 centime d'euro.

En outre, **l'ajout de fonctionnalités nouvelles dans les circuits intégrés a ouvert de nouveaux champs d'application**. Désormais, un téléphone sert non seulement à téléphoner, mais il permet d'écouter de la musique, de prendre, d'envoyer et de recevoir des photos et des vidéos, de s'orienter grâce au GPS, de surfer sur internet et de regarder la télévision.

2. Un poids économique croissant dans l'économie mondiale

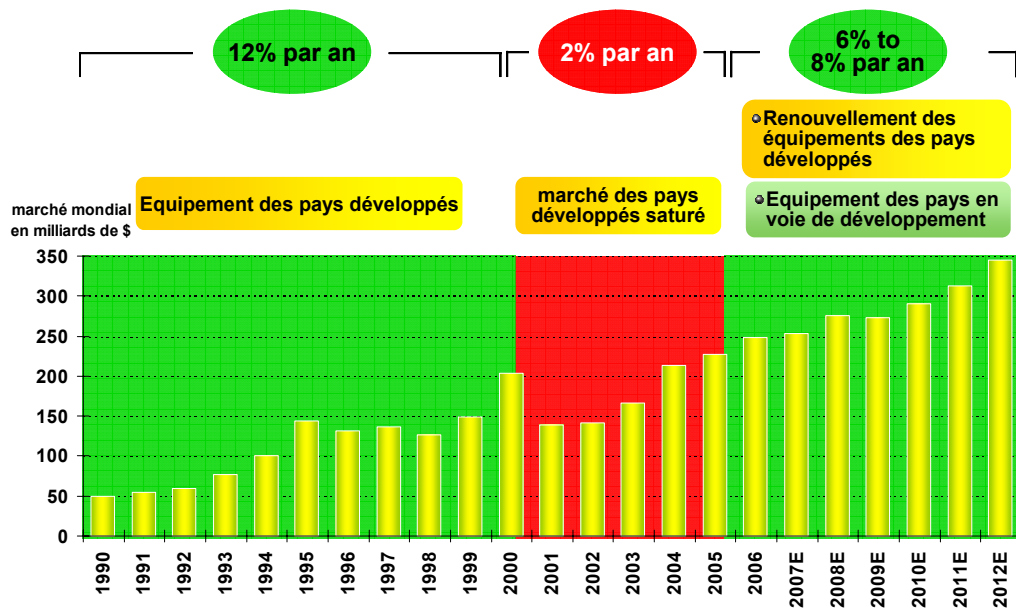
Mesurée par l'importance de son chiffre d'affaires mondial, la croissance de l'industrie électronique est spectaculaire. En 1965, elle réalisait un chiffre d'affaires de 1,5 milliard de \$, qui est passé à 25 milliards de \$ en 1985, à 144 milliards de \$ en 1995, à 200 milliards de \$ en 2000 et 265 milliards de \$ en 2006, soit plus que le chiffre d'affaires du transport aérien.

Il convient de remarquer que le taux de croissance des semiconducteurs a longtemps été deux fois supérieur à celui de l'économie mondiale.

Selon les chiffres publiés par le World Semiconductor Trade Statistics, le taux de croissance du marché des semiconducteurs a ainsi été de +18 % dans les années 70, de +16 % dans les années 80, de +14 % dans les années 90 et de +7 % entre 2000 et 2006.

En outre, les perspectives de croissance du marché des semiconducteurs pour les prochaines années sont très bonnes et ce, en dépit des difficultés économiques rencontrées par les Etats-Unis, comme le montre le tableau ci-dessous.

Les prévisions à long terme
Croissance du marché des semiconducteurs
(Long-term forecast semiconductor market growth)



Source : WSTS

Ces prévisions optimistes s'expliquent par le fait que ce marché est désormais tiré par les pays émergents.

Ces pays (au premier rang desquels figure la Chine, suivie par l'Inde, l'Indonésie, le Brésil, La Russie, le Mexique etc) se caractérisent à la fois par une population importante avec des salaires peu élevés, donc un taux d'équipement faible, mais également un taux de croissance économique fort entraînant une augmentation du pouvoir d'achat de la population et de la demande de produits liés à la microélectronique.

Les deux exemples suivants montrent le poids déterminant des deux géants asiatiques que sont la Chine et l'Inde.

Avec 370 millions de lignes fixes et 449 millions d'abonnés mobiles à la fin 2006, la Chine était le marché des télécommunications le plus important au monde. Son potentiel de croissance est néanmoins encore considérable : les taux de pénétration de la téléphonie fixe et mobile ne sont respectivement que de 27 % et 30 %. Les opérateurs chinois recrutent chaque mois 4 à 5 millions de nouveaux abonnés au téléphone portable et 2 millions d'abonnés à des lignes fixes.

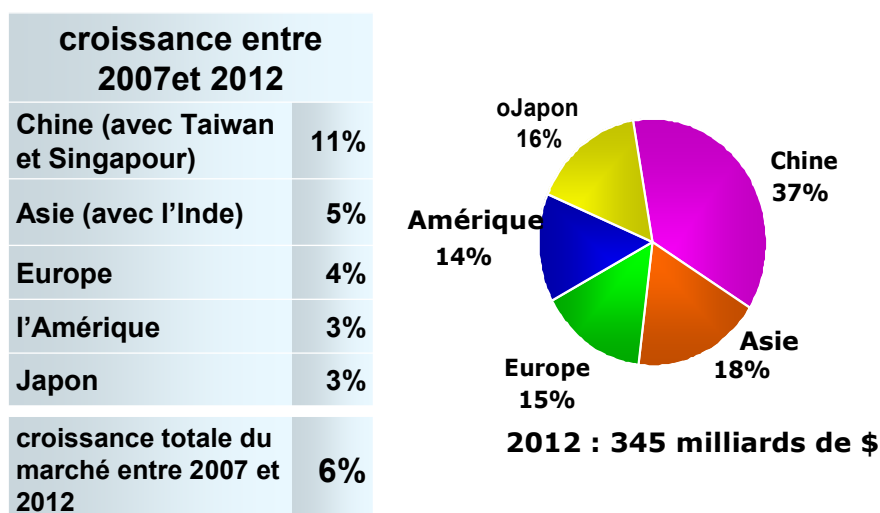
A la fin 2006, l'Inde comptait 100 millions d'abonnés mobiles, ce chiffre augmentant de 5 millions tous les mois. Il devrait atteindre 280 millions en 2010, tout en ne représentant qu'un taux de pénétration de 24 %.

En ce qui concerne les ordinateurs portables, 14,5 millions d'unités étaient recensés en Inde en 2006, soit un taux de pénétration chez les particuliers de 12 %.

A moyen terme, la Chine (en incluant Taiwan et Singapour) et l'Asie/Pacifique devraient contribuer pour 75 % à la croissance mondiale du secteur des semiconducteurs.

Les prévisions à long terme

Evolution du marché des semi-conducteurs par région entre 2007 et 2012



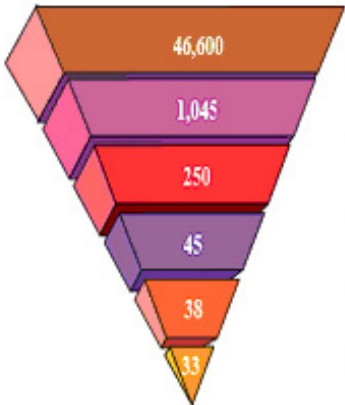
Source : STMicroelectronics

3. Un effet de levier formidable

Outre cette progression spectaculaire, il convient d'insister sur l'**effet de levier** que représentent les semiconducteurs. C'est ce que les spécialistes du secteur appellent « la pyramide inversée » de la filière silicium, et qu'illustre le tableau suivant :

Le produit intérieur brut mondial étant évalué à 46.000 milliards de \$, l'industrie des semiconducteurs contribue pour plus de 10 % de la richesse mondiale.

La croissance de la microélectronique et son effet de levier sur la croissance mondiale

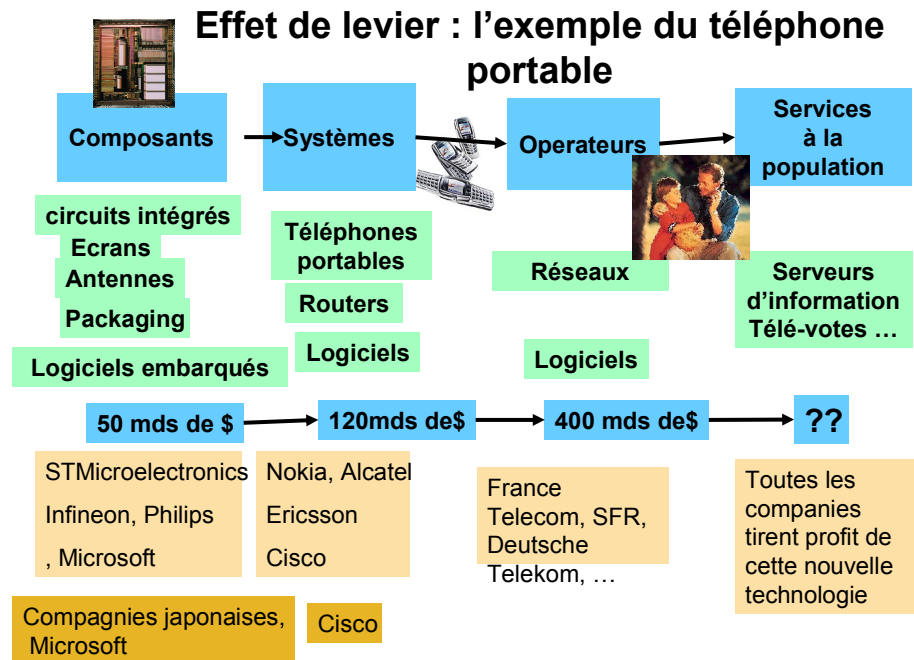
(en milliards de \$)		taux de croissance en 2006	taux de croissance pendant la dernière décennie
	Croissance mondiale	+5.1 %	+3.4 %
	Les équipements électroniques	+6.0 %	+5.0 %
	L'industrie des semi-conducteurs	+18.0 %	+10.0 %
	les dépenses en capital	+ 18.0 %	+14.0 %
	Les équipements pour les usines	+18.0 %	+14.0 %
	Les matériaux de base	+16.0 %	+10.0 %

Source : Medea +

Au niveau mondial, le secteur de la téléphonie mobile développé depuis 10 ans seulement génère un chiffre d'affaires de 400 milliards de \$ et 6 millions d'emplois.

En France, les seuls revenus de la connectivité et des services haut débit sont estimés à 80 milliards d'euros pour l'année 2006, auxquels s'ajouterait l'effet de croissance indirecte induite évaluée à près de 60 milliards d'euros par an, soit au total un point de croissance annuelle.

L'exemple de la téléphonie mobile illustre parfaitement l'effet levier du secteur des semiconducteurs.



Source : STMicroelectronics

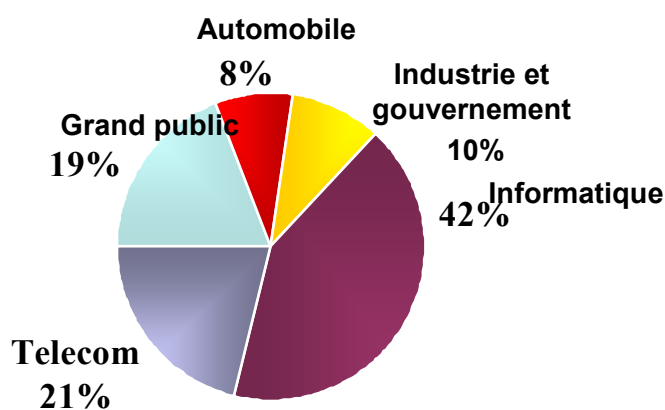
4. Un secteur stratégique pour la compétitivité des entreprises et l'indépendance nationale

Avec l'augmentation des performances, la réduction de la taille et la baisse du coût des circuits intégrés, les **semiconducteurs ont quitté leur domaine d'application d'origine** – les applications militaires et la grande informatique – pour conquérir d'autres applications telles que les télécommunications, les produits grand public, l'automobile et les systèmes de contrôle et d'automatisation industrielle comme le montre le tableau ci-dessous.

Prévisions à long terme pour le marché des semiconducteurs Applications

Taux de croissance entre 2007 et 2012 par application	
Automobile	7%
Informatique	6%
Telecom	6%
Industrie et gouvernement	6%
Grand public	6%
Taux de croissance global entre 2007 et 2012	6%

Analyse du marché en 2012



2012 : 345 milliards de \$

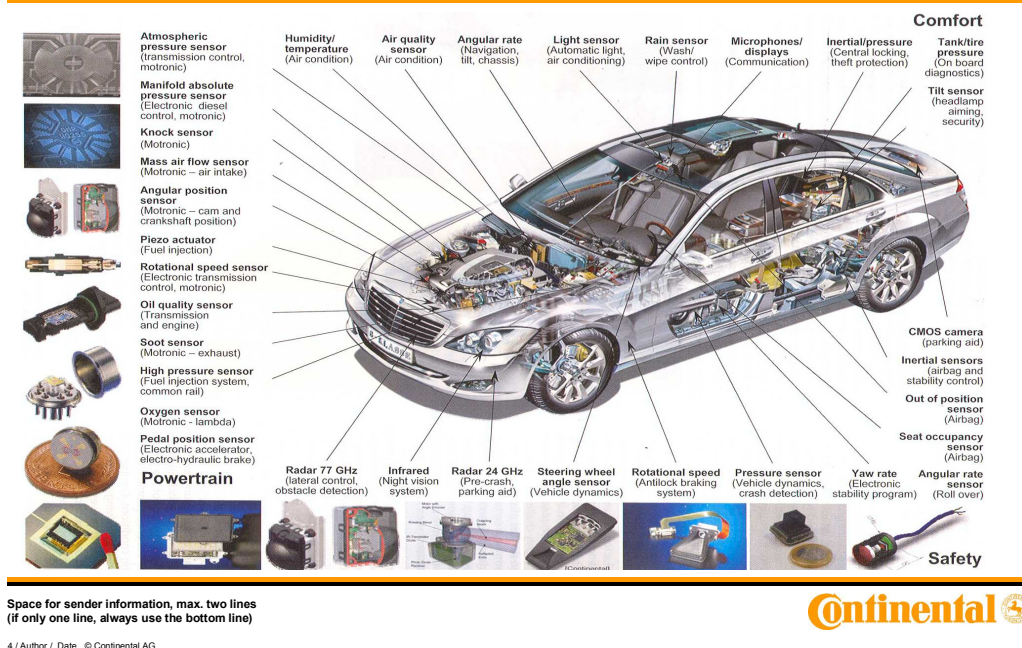
Source : STMicroelectronics

Aujourd'hui, la « pervasion » de la microélectronique dans tous les secteurs d'activité oblige les entreprises à maîtriser les technologies qui y sont liées si elles veulent rester compétitives.

Quelques exemples concrets permettront de mesurer les enjeux.

Dans le secteur automobile, l'électronique joue un rôle croissant : alors qu'en 2000, elle ne représentait en moyenne que 22 % du prix d'un véhicule, elle devrait s'élever respectivement à 35 % du prix en 2010 et à 40 % en 2015. L'électronique joue notamment un rôle décisif pour améliorer la performance des moteurs, renforcer la sécurité des passagers (système ABS...) et rendre les trajets plus confortables.

Capteurs intelligents pour l'automobile



Dans l'aéronautique, le développement de l'avionique, à savoir l'ensemble des équipements informatiques et électroniques facilitant le pilotage et le guidage de l'avion, **constitue un enjeu majeur pour les constructeurs et leurs fournisseurs**. On peut ainsi citer le rôle des radios et des systèmes de télécommunication, des radars, du pilotage automatique, du système d'atterrissage aux instruments en cas de mauvais temps ou encore des commandes de vol électriques dans les modèles les plus récents.

Il convient de remarquer que dans les deux secteurs mentionnés précédemment, s'ajoutent aux soucis de performances techniques et économiques des décennies précédentes de nouvelles exigences environnementales et sociétales. Concrètement, les voitures et avions du futur devront polluer moins et être plus sûrs.

Ainsi, l'industrie aéronautique européenne s'est fixée pour 2020 des objectifs ambitieux :

- réduction du niveau du bruit de 50 % ;
- réduction des émissions de CO₂ de 50 % et de NO_x de 80 % ;
- coût moyen du transport aérien réduit de 30 % ;
- amélioration de la disponibilité des avions ;
- voyage convivial et confortable avec accès à de nouveaux services ;
- taux d'accident d'avion réduit d'un facteur 5.

Or, la satisfaction de ces objectifs exigera la mise en place de technologies de rupture car les solutions techniques actuelles sont déjà proches de leur rendement maximum.

Par ailleurs, seules les entreprises ayant une avance technologique dans le domaine de la microélectronique pourront prétendre à un leadership dans les nouveaux marchés liés au développement des communications, à la réduction de la consommation d'énergie, à la santé, aux divertissements et à la sécurité.

Il apparaît ainsi que l'industrie des semiconducteurs structure l'ensemble de l'économie dans la mesure où elle sert de brique de base dans la plupart des secteurs d'activité : sans industrie des semiconducteurs performante, les autres secteurs ne peuvent pas être compétitifs.

A cet égard, la plupart des industriels interrogés sur ce sujet ont souligné les limites du libre échange pour certaines technologies clés en faisant remarquer que les « *entreprises japonaises de semiconducteurs travaillaient d'abord pour les grands groupes japonais* » et que « *les entreprises américaines servaient avant tout les Etats-Unis* ». Cette préférence nationale peut se traduire de deux manières.

D'une part les performances de certaines technologies exportées peuvent être bridées.

Un représentant du ministère de la défense entendu par votre rapporteur a cité l'exemple suivant : le programme d'armement FELIN vise à doter les fantassins (de l'armée de terre) en équipements et liaisons intégrés : il comporte des capacités de vision de nuit et de communication. Or, des problèmes de bridage des performances sont rencontrés sur l'intensificateur de lumière issu de la société américaine INTEVAC.

D'autre part, l'incorporation de ces technologies dans des systèmes plus complexes peut donner un droit de regard sur l'utilisation de ces derniers à l'Etat de l'entreprise pourvoyeuse de ladite technologie. Ainsi, dans des secteurs sensibles et très concurrentiels comme les équipements militaires et le spatial, des entreprises européennes ont rencontré des difficultés pour l'exportation de leurs produits parce qu'elles étaient soumises à l'aval des autorités américaines.

Au-delà de la compétitivité des entreprises, l'industrie des semiconducteurs joue donc un rôle primordial dans le maintien de l'indépendance nationale.

B. UNE INDUSTRIE CONFRONTÉE À UN TRIPLE DÉFI

Si l'industrie des semiconducteurs constitue un secteur clé de l'économie et contribue depuis plus de trois décennies à la croissance mondiale, elle est confrontée à un triple défi, à savoir l'explosion de ses coûts, le raccourcissement des cycles de vie des produits et enfin l'évolution de son marché vers la maturité.

1. L'explosion des coûts de l'industrie de la microélectronique

La multiplication des défis technologiques se traduit par une explosion des coûts de R&D, de design, de logiciels et de production. Les chiffres suivants donnent un ordre de grandeur.

Selon les informations recueillies par votre rapporteur, le développement de la technologie de résolution¹ en 90 nm a coûté 500 millions de \$. Aujourd'hui, le coût de la technologie de résolution en 45 nm est évalué à 750 millions de \$ et celui de la technologie de résolution en 32 nm à 1 milliard de \$. Concrètement, les coûts progressent de 30 % par saut technologique.

Par ailleurs, les coûts liés à la conception architecturale des circuits intégrés augmentent de 50 % pour chaque nouvelle génération technologique.

D'après le directeur de la recherche et de la technologie du groupe Thalès, l'évolution du coût de développement des circuits est la suivante.

Finesse de la gravure	Nombre de portes du circuit	Coût de développement du circuit	Part du coût des logiciels dans le développement
130 nm	9 millions	9 millions €	30 %
90 nm	16 millions	18 million €	50 %
65 nm	30 millions	46 millions €	66 %

Source : Thalès

Il apparaît ainsi que les coûts liés aux logiciels embarqués occupent une part croissante dans le coût global de développement du circuit. Ce phénomène s'explique de la manière suivante : alors que la puissance des logiciels embarqués double tous les dix mois, la productivité des logiciels servant à concevoir lesdits logiciels embarqués ne double que tous les cinq ans. Par conséquent, il faut des équipes de plus en plus nombreuses pour respecter ce rythme.

¹ Il s'agit de la largeur de la grille du transistor.

Enfin, le coût des unités de production est en augmentation constante. Il a ainsi doublé depuis 2002, passant de 1,5 à 3 milliards de \$. Plusieurs facteurs expliquent cette tendance.

D'abord, la fabrication de circuits intégrés exige des environnements de production extrêmement propres pour éviter des contaminations fatales aux circuits. Or, les exigences de propreté des salles blanches ne cessent d'augmenter. L'air est ainsi filtré et entièrement renouvelé 10 fois par minute. Il contient 100.000 à 1 million de fois moins de poussières que l'air extérieur. Les opérateurs portent en permanence une combinaison qui les couvre des pieds à la tête et retient les particules organiques et les poussières qu'ils génèrent naturellement.

Ensuite, la poursuite de la miniaturisation implique l'utilisation de machines de production précises, fiables, difficiles à mettre au point et à entretenir. En outre, elles ne sont fabriquées qu'en petites séries. Leur prix a donc tendance à augmenter : **aujourd'hui, une machine de lithographie coûte 22 millions de \$ par unité et un masque de gravure 1 million de \$ par unité.** Les scientifiques travaillent depuis plusieurs années sur le développement de la lithographie extrême UV pour affiner le trait de gravure. Le leader mondial de la lithographie, la société néerlandaise ASML a développé deux prototypes installés l'un au centre technologique à Albany (Etats-Unis), l'autre à l'IMEC à Louvain. Chacun de ses appareils coûte 60 millions de \$. Le passage à un nouveau nœud technologique environ tous les deux ans implique également le changement d'une partie des équipements au profit de machines plus modernes, mais également plus chères.

Par ailleurs, le recours à des matériaux spéciaux et à des solutions techniques complexes ainsi que la multiplication des étapes de fabrication (plus de 700 par circuit) pèsent sur le coût de production.

L'explosion du coût des unités de production s'explique enfin par leur gigantisme. Afin de baisser les coûts unitaires de production, les circuits intégrés sont fabriqués en série, sur des plaquettes de silicium, dans des volumes de plus en plus importants.

En 1965, ladite plaquette mesurait 25 mm de diamètre. Aujourd'hui, les usines les plus modernes utilisent des plaquettes de 300 mm de diamètre et le développement de plaquettes de 450 mm est évoqué pour la production de mémoires.

Le coût d'une usine varie en fonction du nombre des équipements, mais une usine standard fabriquant environ 30.000 plaquettes par mois coûte entre 3 et 5 milliards de dollars. Récemment, la société taïwanaise TSMC a investi dans deux usines gigantesques, capables de produire 135.000 plaquettes par mois. Chaque usine coûte 8 milliards de \$!

2. Le raccourcissement du cycle de vie des produits

Longtemps, le secteur de la microélectronique a été exclusivement tiré par la technologie : l'amélioration des performances des circuits intégrés combinée à la diminution de leur coût a ainsi permis de multiplier leurs applications dans les télécommunications, dans le secteur industriel et dans les produits grand public.

Désormais, la technologie n'est plus le seul facteur de croissance.

Dans certains domaines, le goût des consommateurs est devenu prépondérant pour des objets qui se distinguent moins par leurs technologies que par leur design ou les services qu'ils offrent. C'est le cas des ordinateurs et des téléphones portables, des baladeurs MP3, des appareils photos numériques ou encore des lecteurs de DVD.

En conséquence, le cycle de vie des produits se raccourcit. Ainsi, les gammes de téléphones portables changent tous les six mois. Les fabricants de semiconducteurs sont donc soumis à des pressions très fortes en matière de délai. Pour un téléphone dont la vente est prévue en décembre, ils reçoivent le cahier des charges entre avril et mai et doivent livrer leurs produits dès septembre.

En outre, les nouvelles applications sont très vite absorbées par le marché. Alors qu'il a fallu près d'une décennie pour saturer le marché des téléphones portables, le marché des MP3 par exemple a atteint sa maturité en moins de deux ans. Cela implique pour les industriels de la microélectronique non seulement d'être les premiers à sortir le produit¹ adéquat, mais également d'être capables d'augmenter très rapidement les volumes de production.

Enfin, les contraintes sur les prix sont énormes. Comme faisait remarquer le directeur du site de STMicroelectronics à Crolles : *« on vend 1 mm² de silicium, quelles que soient les technologies contenues »*. Les fabricants de semiconducteurs doivent donc apporter sans arrêt de nouvelles innovations sans augmenter le prix de leurs produits. La moindre marge par unité de produit doit être impérativement compensée par un fort volume de production.

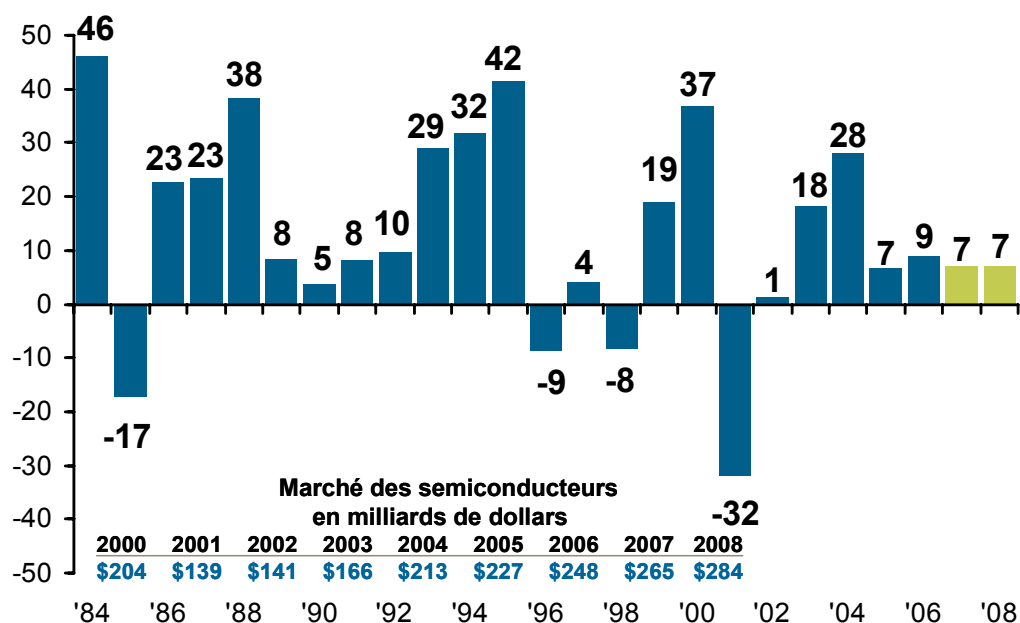
3. Un marché qui approche de la maturité

Comme il a été indiqué précédemment, le taux de croissance de l'industrie microélectronique augmente depuis plus de trois décennies et à un rythme deux fois plus rapide que celui de la croissance mondiale. Néanmoins, il s'agit d'un secteur très cyclique comme le montre le tableau ci-dessous.

¹ Plusieurs interlocuteurs ont résumé cette tendance de la manière suivante : « le premier rafle la mise, le second couvre à peine ses frais de développement, le troisième perd de l'argent ».

Ainsi, entre 1984 et 2006, si l'industrie microélectronique affiche un taux de croissance de 10 % en moyenne, elle a connu des périodes de très forte croissance (+ 46 % en 1984, + 38 % en 1988, + 42 % en 1994), mais également de fortes baisses : - 17 % en 1985, - 9 % en 1996, - 8 % en 1998, - 31 % en 2001.

Prévisions de croissance du marché des semiconducteurs



Source : Freescale

Selon les informations obtenues par votre rapporteur, la croissance du marché des semiconducteurs s'est élevée à + 8,9 % en 2006. Elle a ralenti en 2007 (+ 3,1 %) et les perspectives pour 2008 ont été revues à la baisse à + 5,2 %. Pour 2009, une croissance de + 8,5 % est attendue.

De nombreux spécialistes du secteur estiment que ce marché serait en train d'atteindre sa maturité, ce qui engendrerait des taux de croissance plus faibles (entre 6 et 8 % contre plus de 15 % entre les années 70 et 90), mais également une moindre cyclicité de cette activité.

Deux raisons sont invoquées.

Premièrement, il n'existerait pas actuellement de « killer application », à savoir un ou plusieurs produits phare à l'instar de l'ordinateur portable ou encore du téléphone mobile, qui relancerait durablement la consommation de semiconducteurs.

En outre, même si les marchés émergents connaissent des potentiels de croissance énormes, ils ne compensent pas le ralentissement de la consommation dans les pays développés lié à la saturation des marchés.

C. UNE INDUSTRIE EN PLEINE MUTATION

Le secteur de la microélectronique est en perpétuel mouvement, comme en témoigne les changements incessants dans le classement des principales entreprises de semiconducteurs.

En outre, l'explosion des coûts du secteur de la microélectronique a remis en cause le modèle de l'intégration verticale et fait apparaître deux nouveaux types d'industrie : les fabless et les fondeurs.

1. Une hiérarchie mondiale mouvante

Lorsque l'on examine sur une longue période l'évolution du secteur, on s'aperçoit qu'aucune situation n'est acquise à terme.

- Par grandes régions géographiques

Ainsi, les États-Unis, qui assuraient 55 % de la production mondiale de transistors en 1978, n'en fournissaient plus que 22 % en 2000 et 18 % en 2007.

Quant au Japon, il assurait 30 % de cette production en 1978, 50 % dix ans plus tard, puis 34 % en 2000 et 25 % en 2007.

En ce qui concerne l'Europe, sa part dans la production mondiale est passée de 15 % en 2000 à 11 % en 2007.

Mais de façon assez surprenante – compte tenu des coûts d'accès technologique au secteur – celui-ci est perméable à l'intrusion de nouveaux arrivants. La zone asiatique (hors Japon) qui était quasiment absente du marché en 1985, produit désormais 48 % des transistors en 2007. Entre 2000 et 2007, la part de la Chine continentale dans la fabrication de semiconducteurs est passée de 2 % à 7 %.

- Par entreprises

Les fluctuations de situation entre les grandes zones géographiques sont doublées d'allées et venues du même ordre entre entreprises.

Alors qu'en 1990, parmi les 10 principales entreprises de semiconducteurs, 6 étaient japonaises, 3 américaines et 1 européenne, en 2007, il n'y a plus que 3 japonaises et 2 américaines contre 3 européennes et 2 coréennes.

Classement et revenus des 20 principales entreprises de semiconducteurs

(en milliards de dollars)

En 2001

En 2007

Rang	Entreprise	Ventes
1	Intel	24,927
2	Toshiba	6,783
3	STMicroelectronics	6,360
4	Samsung	5,303
5	Texas Instruments	6,060
6	NEC	5,389
7	Motorola	4,828
8	Hitachi	4,724
9	Infineon Technologies	4,512
10	PhilipsSemiconductor	4,402

Source : Gartner Dataquest 2002

Rang	Entreprise	Ventes
1	Intel	33,973
2	Samsung	20,137
3	Toshiba	12,590
4	Texas Instruments	12,172
5	STMicroelectronics	9,991
6	Hynix	9,614
7	Renesas	8,137
8	Sony	8,040
9	Nxp	6,038
10	Infineon	5,864

Source : Isuppli

Dans le domaine des mémoires DRAM¹, le tableau ci-dessous montre **la difficulté pour les entreprises à s'imposer durablement dans ce secteur et le renouvellement incessant de la concurrence.**

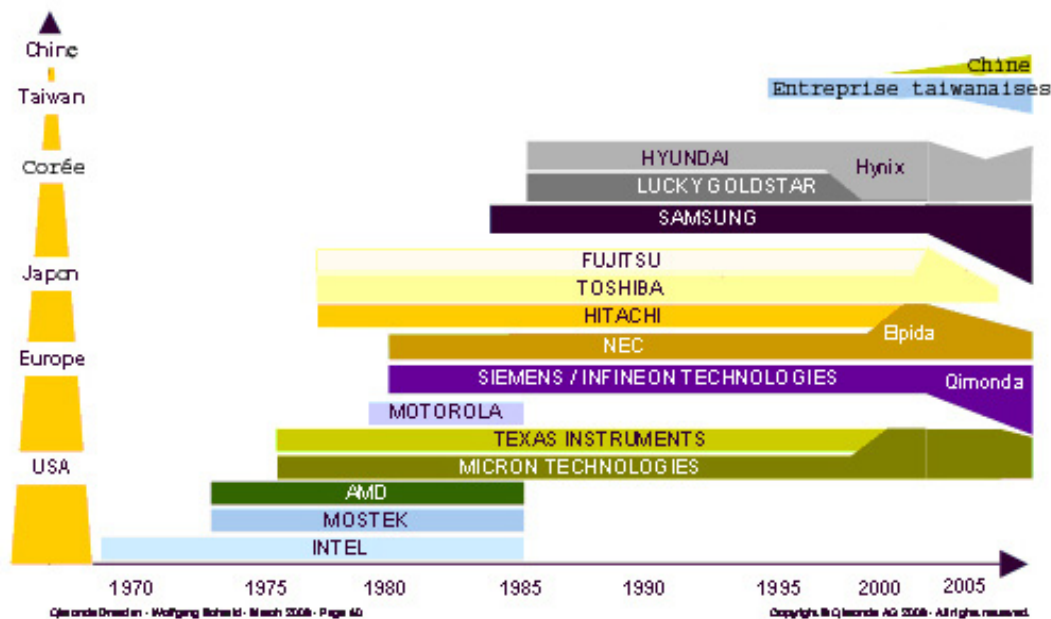
Ainsi, le marché des mémoires DRAM a d'abord été dominé par des sociétés américaines de 1970 à 1980. A la suite de la montée de la concurrence des entreprises japonaises, seule une entreprise américaine sur six a réussi à se maintenir. Dans les années 80, une entreprise européenne, Siemens, s'est également lancée dans ce marché. En 1993, elle a externalisé ses activités de semiconducteurs en créant la société Infineon, qui a elle-même regroupé les activités « mémoire » dans une société spécialement créée à cet effet, Qimonda.

Dans les années 90, l'arrivée sur le marché de sociétés coréennes a contraint Fujitsu et Toshiba à jeter l'éponge tandis que pour survivre, Hitachi et NEC regroupaient leurs activités « mémoire » dans une société distincte, Elpida.

¹ Mémoire dynamique à accès direct.

Enfin, les Taïwanais sont désormais des concurrents sérieux pour les Coréens puisqu'ils sont les deuxièmes fabricants de mémoire DRAM au monde et souhaitent augmenter leur part de marché pour les mémoires Flash.

Nouveaux acteurs entrant sur le marché des mémoires dynamiques à accès direct



Source : Qimonda

2. La poursuite de la « déverticalisation » du secteur des semiconducteurs

Dans les années soixante, l'industrie des semiconducteurs s'est développée conformément au modèle d'une intégration verticale totale.

Une société comme Motorola assurait alors en R&D la fabrication des équipements, le design complet des architectures, les tests, la production et l'encapsulation.

Depuis longtemps, pour répondre à la complexification du secteur, beaucoup de ces fonctions ont été externalisées : la conception et la fabrication des équipements, les logiciels de conception assistée par ordinateur ne sont pas, en majeure partie, assurés par les fabricants de composants.

Depuis quelques années, la structure elle-même des sociétés de fabrication de semiconducteurs a fait l'objet d'évolutions divergentes.

Compte tenu de la hausse des coûts décrite antérieurement, de moins en moins d'acteurs sont en mesure d'assurer l'ensemble des opérations de recherche, de développement technologique et d'industrialisation.

Dès lors, à côté des sociétés intégrées (IDM - Integrated Devices Manufacturer) se développent deux autres catégories d'intervenants :

➤ Les « fabless », c'est-à-dire les sociétés sans capacités de production : elles se concentrent sur les activités les plus rentables et les moins mobilisatrices en capitaux et lancent sur le marché de nouvelles applications en ne développant que la conception du système global dont les couches logicielles, les composants étant fournis par les fonderies ou les sociétés intégrées.

➤ Les fonderies qui sont spécialisées dans la fabrication en volume de semiconducteurs, tirant profit du caractère capitalistique de cette industrie. Ces fonderies, extrêmement robotisées, sont principalement installées à Taïwan où ce concept a été inventé à la fin des années 80. Il s'agissait alors de se positionner dans des secteurs novateurs et d'éviter la concurrence des puissants producteurs intégrés. Aujourd'hui, deux entreprises, TSMC et UMC détiennent respectivement 50 % et 19 % du marché mondial de la fabrication de circuits intégrés en sous-traitance.

3. Le développement des alliances, une réponse à l'augmentation des coûts

Les entreprises de semiconducteurs consacrent entre 15 et 20 % de leur chiffre d'affaires à la recherche et développement. Néanmoins, compte tenu du coût de développement d'une technologie (750 millions de \$ pour le 45 nm, 1 milliard de \$ pour le 32 nm), aucune, à l'exception notable d'Intel¹ n'est capable de fournir seule l'effort financier nécessaire.

Comme il a été indiqué précédemment, certaines y ont renoncé, concentrant leurs efforts sur le design et laissant les fonderies développer la technologie.

Les autres ont été obligées de créer des alliances afin de partager les coûts.

- L'alliance de Crolles 2

Telle était la finalité de **l'alliance de Crolles 2 signée en 2002 pour une durée de cinq ans entre STMicroelectronics, NXP et Freescale**. Un laboratoire-centre de recherche commun a été créé pour développer les générations CMOS² 90 nm, 65 nm et 45 nm et les options dérivées à haute valeur ajoutée (analogique, radiofréquence, mémoires embarquées). Par ailleurs, une ligne de production pilote pour des tranches de silicium de

¹ Avec un chiffre d'affaires de près de 34 milliards de dollars, Intel reste le leader incontesté dans le domaine des semiconducteurs. En outre, il a réussi à externaliser une grande partie de sa recherche la plus en amont à travers le développement de partenariats très étroits avec des universités, ce qui lui permet de limiter ses engagements financiers dans des proportions acceptables.

² CMOS : Complementary Metal Oxyde Semiconductor. Ce terme désigne une technologie de fabrication de composants électroniques.

300 nm a été réalisée dans le but d'accéder plus rapidement à la production en volume des circuits fabriqués à partir de ces nouvelles technologies.

Cette alliance a été un succès dans la mesure où elle a atteint ses objectifs.

Toutefois, elle n'a pas été prolongée à la suite de la défection successive de NXP puis de Freescale au début de l'année 2007. Selon les responsables de STMicroelectronics, le dimensionnement de l'alliance était devenu trop petit pour achever le développement des technologies 32 nm et 22 nm et il aurait fallu trouver deux partenaires supplémentaires avec qui partager les coûts.

- L'alliance IBM

Cette alliance a commencé il y a 15 ans dans le domaine des DRAM avec Toshiba et Infineon. Elle repose sur le constat suivant : alors que le chiffre d'affaires d'IBM croît de + 6,5 % par an, ses dépenses en R&D augmentent de +12 %. Pour maintenir sa rentabilité, IBM doit donc contenir ses coûts à travers le développement de coopérations.

Aujourd'hui, **l'alliance réunit 8 entreprises** (Samsung, 2^{ème} mondial ; Toshiba, 3^{ème} mondial ; STMicroelectronics, 5^{ème} mondial ; Sony, 8^{ème} mondial ; Infineon, 10^{ème} mondial ; AMD ; Freescale et IBM) **dont le chiffre cumulé s'élève à 60 milliards de \$.** Elle est la référence au niveau mondial et n'a pas d'équivalent ailleurs même si TSMC essaie de monter sa propre alliance en s'inspirant de ce modèle.

L'alliance propose quatre types de coopération :

- une coopération en matière de recherche fondamentale ;
- une coopération pour le développement des technologies CMOS bulk 32 nm et 22 nm ;
- une coopération pour le développement des technologies CMOS sur SOI (Silicium sur isolant) ;
- une plateforme commune de production.

Les objectifs de cette alliance peuvent être résumés de la manière suivante :

- **mutualiser les coûts de développement des technologies clés ;**
- **imposer les choix technologiques effectués comme des standards ;**
- **apparaître en matière de fabrication des puces comme une alternative crédible à TSMC.**

Dans l'accord entre STMicroelectronics et IBM signé en 2007, il est convenu qu'IBM rejoigne STMicroelectronics à Crolles pour le développement des technologies dérivées dans le cadre d'un cluster que STMicroelectronics essaie de constituer et dont IBM sera le premier membre extérieur. Dans ce cadre, STMicroelectronics envoie une équipe d'ingénieurs sur le site de East Fishkil. En contrepartie, IBM détache un groupe de salariés sur le site de Crolles. IBM s'engage également à aider STMicroelectronics à étendre son réseau de coopérations à Crolles.

En ce qui concerne la fabrication des produits issus de l'alliance, il est prévu que les technologies CMOS bulk 32 nm et 22 nm seront transférées à Crolles pour la fabrication en volume des circuits intégrés pour les clients de STMicroelectronics. Parallèlement, les technologies développées à Crolles seront mises en production à Crolles puis transférées à East Fishkill. STMicroelectronics pourra utiliser les capacités de production de la plateforme commune, mais reste également libre de faire appel à d'autres fondeurs.

4. La coexistence de trois modèles industriels avec leurs contraintes particulières

Comme il a été indiqué précédemment, l'explosion des coûts de recherche et de production ainsi que la nécessité d'atteindre des volumes de production importants dans des délais très brefs ont conduit certaines entreprises à renoncer à réaliser leur propre fabrication tandis que d'autres se spécialisaient dans ce secteur d'activité. Actuellement, trois modèles industriels coexistent avec leurs avantages, mais également leurs limites.

- Les fabless/fablite¹

L'augmentation générale des coûts associée à une pression croissante sur les prix conduit à une concentration des acteurs fabricants de semiconducteurs et à une migration vers un modèle « fabless » ou « fablite ».

En parallèle, les industriels cherchent à monter dans la chaîne de valeur afin de retrouver des marges dans le développement de systèmes intégrés en proposant également des services associés.

A titre d'exemple d'abandon du modèle intégré, d'anciennes entreprises intégrées comme NXP ou Texas Instrument sont en train de réduire drastiquement leurs capacités de production soit parce que le coût des nouvelles usines dépasse leurs capacités financières (une usine de fabrication pour une technologie 32 nm coûte actuellement entre 3 et 5 milliards de \$), soit parce qu'elles estiment qu'elles ne sont pas en mesure de rivaliser en

¹ Les « fabless » ne disposent d'aucun outil de production. Les « fablite » continuent de produire une petite partie de leurs composants en interne.

matière de prix et de qualité avec les fondeurs. Elles deviennent ainsi « fablite ». D'autres entreprises ont choisi cette option dès leur création comme Broadcom ou Qualcomm et ne possèdent aucun outil de production. Ce sont les « fabless ».

A court terme, les avantages sont doubles.

D'une part, **l'investissement initial est moins élevé que dans le secteur des entreprises intégrées** puisque les besoins en infrastructures sont beaucoup plus limités en l'absence d'usine.

D'autre part, à chiffre d'affaires égal, **les fabless peuvent consacrer des sommes plus importantes au développement des produits**, ce qui constitue un atout non négligeable sur un marché où les profits sont plus élevés pour les produits différenciés que pour les produits standards.

A moyen terme cependant, les entreprises fabless sont soumises à plusieurs défis.

Certains de nos interlocuteurs ont souligné **les limites d'une séparation trop distincte entre la technologie et le design**. Selon M. Bert Koopmans, représentant du centre pour les nouveaux matériaux à l'université d'Eindhoven, dans les 10 ans à venir, les designers devront connaître la technologie pour réaliser des architectures opérationnelles. En effet, un transistor a des spécificités dont il faut tenir compte lors de la conception. Les fabless devront donc disposer de designers conscients des caractéristiques de la technologie.

Cette tendance a été confirmée par un représentant du LETI qui constate une nouvelle politique chez les fabless consistant à créer de petites équipes de R&D spécialisées dans la technologie ou à rechercher des partenariats avec les centres de recherche spécialisés dans la technologie afin de rétablir le lien en amont avec cette dernière.

En outre, les fabless pourraient être menacées directement par les fondeurs. D'une part, le développement d'un quasi-monopole dans le domaine de la fabrication des puces pourrait modifier le rapport de force entre les donneurs d'ordre et les sous-traitants au bénéfice de ces derniers. Les prix des circuits intégrés pourraient donc augmenter. D'autre part, le fondeur le plus important, TSMC, manifeste sa volonté d'augmenter ses marges en montant dans la chaîne de valeur. A terme, il pourrait concevoir ses propres circuits intégrés, et devenir un concurrent direct de ses clients, dont les fabless.

- Les fondeurs

Aujourd'hui, un circuit intégré compte plusieurs centaines de millions de transistors tout en ne mesurant que quelques cm^2 . Pour réduire les coûts de fabrication, les circuits intégrés ne sont pas fabriqués à l'unité mais par centaines sur une plaquette de silicium dont la taille augmente régulièrement. En contrepartie, les erreurs de fabrication sont de plus en plus pénalisantes

puisque'il faut alors jeter toutes les plaquettes dont le coût unitaire atteint plus de 7.000 dollars.

Par ailleurs, on a vu précédemment que le raccourcissement des cycles de vie des produits exigeait une montée rapide des volumes de circuits intégrés fabriqués, ce qui nécessite une très bonne maîtrise des procédés de production. **Or, plus les volumes à fabriquer sont importants, plus les opportunités sont grandes pour les ingénieurs d'améliorer les rendements de production et d'acquérir une excellence dans ce domaine.** Telle est la stratégie des fondeurs dont les quatre plus importants captent près de 80 % de la fabrication mondiale de puces en sous-traitance et ont acquis un savoir-faire inégalable à des prix particulièrement compétitifs.

A lui seul, TSMC détient 50 % du marché de la sous-traitance. A l'exception d'une unité de production détenue conjointement avec NXP à Singapour et d'une usine en 200 mm à Shanghai, TSMC concentre sa production à Taiwan où il possède 5 usines en 200 mm et 2 usines en 300 mm. Ces deux dernières sont qualifiées de « gigafabs » puisqu'elles produisent 271.000 plaquettes par mois. **En 2006, TSMC a produit l'équivalent de 7 millions de plaquettes en 200 mm.**

UMC, deuxième sous-traitant mondial et également Taiwanais, a une capacité de production de 272.000 plaquettes par mois répartie sur 7 usines en 200 mm. Il dispose également de deux usines de 300 mm à Taiwan et à Singapour.

Les capacités de fabrication de SMIC sont réparties sur cinq sites : Shanghai où SMIC a construit trois usines 200 mm et une usine 300 mm ; Tainjian où SMIC a racheté une usine 200 mm à Motorola ; Beijing où SMIC a construit la première usine chinoise 300 mm ; Chendu où SMIC a une usine d'assemblage et de test et Wuhan où SMIC gère une usine 300 mm en coopération avec le gouvernement local.

Chartered Semiconductor possède 5 usines de production sur le même site singapourien : 4 en 200 mm et 1 en 300 mm. Cette dernière a une capacité de 45.000 plaquettes par mois en technologie 65 nanomètres.

Le modèle des fonderies semble durablement établi et peu de sociétés intégrées sont capables de les concurrencer dans leur secteur d'activité. Il n'est pas anodin que la troisième entreprise de semiconducteurs au monde, Texas Instrument, ait renoncé à réaliser elle-même la fabrication des puces qu'elle développe. De même, à la suite de la rupture de l'alliance Crolles 2 par NXP et Freescale, STMicroelectronics a hésité entre intégrer l'alliance IBM ou se lier au fondeur taiwanais TSMC et devenir fabless.

Lorsque votre rapporteur a rencontré les responsables de TSMC, ces derniers ont indiqué que 66 % de leurs clients étaient des fabless et 34 % des sociétés intégrées, mais que la part de ces derniers avait vocation à augmenter.

Pour autant, tous les fondeurs sont loin d'être optimistes sur leurs chances de survie à long terme.

Selon le PDG de Chartered Semiconductor, **les fonderies souffrent d'une baisse des prix constante (- 26 % pour 2006) qui résulte de capacités de production excédentaires pour les technologies de pointe et d'une guerre des prix féroce entre TSMC, UMC et Chartered Semiconductor.** En outre, pour la fabrication de produits moins avancés technologiquement, la concurrence est accrue par le nombre d'acteurs et d'usines de 150 mm et 200 mm essentiellement.

Il convient de noter que toutes les fonderies mentionnées auparavant bénéficient du soutien fort, à la fois financier et fiscal, de la part de leurs gouvernements respectifs.

Une consolidation du secteur apparaît donc inévitable même si elle sera insuffisante pour améliorer les marges des fondeurs.

En effet, en 2007, le marché de la production en sous-traitance a crû de 2,6 % seulement par rapport à 2006 avec un chiffre d'affaires total de 22,19 milliards de dollars. TSMC a réalisé un chiffre d'affaires de 9,8 milliards de dollars, en croissance de 1,2 % seulement par rapport à 2006.

Les fondeurs sont donc en train d'adapter leurs politiques industrielles afin d'améliorer leur rentabilité.

A court terme, tous ont réduit leurs investissements.

A moyen terme, leurs stratégies divergent et il convient de distinguer TSMC des autres fondeurs dans la mesure où ce dernier est le seul à continuer à faire des bénéfices (tous les autres sont déficitaires) et à avoir une taille critique suffisante lui permettant d'investir massivement en R&D.

TSMC a ainsi annoncé en mars 2008 son intention d'investir 5 milliards de dollars pour transformer l'une de ses gigafabs en centre de recherche afin de développer les générations 32, 22 et 15 nm.

En outre, compte tenu de la moindre profitabilité de l'activité de fabrication de masse, **TSMC a décidé de diversifier ses activités** et est en train de développer toute une série de services intégrés verticalement : outre la fabrication des circuits intégrés, il offre en amont des outils pour réaliser la conception des circuits et en aval des services de test et de packaging, **évoluant ainsi vers le modèle des industries intégrées**, quitte à devenir concurrent d'une partie de ses clients.

Par ailleurs, **TSMC a l'ambition de créer une alliance** regroupant des équipementiers et les grands fabricants de semiconducteurs **afin de s'imposer comme seul hub mondial pour la fabrication de circuits sur des plaquettes de 450 mm**, cette évolution se justifiant pour des applications de fort volume tel que les DRAM.

Faute d'une taille critique suffisante, les autres fondeurs envisagent leur survie en augmentant leurs capacités de fabrication sur des technologies matures (en rachetant des usines en 200 mm) ou à travers

la conclusion d'alliances leur permettant de réduire les coûts d'investissement dans les nouvelles technologies. Ainsi, Chartered Semiconductor a rejoint l'alliance IBM pour développer les technologies 32 et 22 nm tandis qu'en janvier 2008, SMIC a acheté à IBM une licence pour exploiter la technologie 45 nm, économisant ainsi d'importants frais de recherche.

- Les entreprises intégrées

Afin de rester compétitives, les industries intégrées doivent simultanément :

- améliorer l'ingénierie de production de la génération de puces en fabrication,
- assurer le développement de la génération suivante à un horizon de 3 à 4 ans,
- canaliser les efforts de recherche fondamentale pour préparer les générations ultérieures
- tout en misant sur la conception des produits et leur maîtrise des différents métiers pour continuer à générer des profits.

Par ailleurs, les entreprises intégrées doivent affronter la concurrence à la fois des fabless, qui, à chiffre d'affaires égal, investissent plus dans la conception des circuits intégrés, et des fondeurs qui produisent plus et moins chers. **Afin de limiter l'explosion de leurs coûts, certaines se sont engagées dans un réseau de coopérations précompétitives pour développer des technologies génériques comme le CMOS pour les applications numériques, tout en sous-traitant souvent une partie de leur production.**

La moindre différenciation des technologies de base du CMOS numérique conduit les sociétés intégrées à **rechercher des avantages compétitifs dans le développement de technologies dérivées à forte valeur ajoutée** permettant l'ajout de fonctionnalités nouvelles dans les circuits intégrés.

Néanmoins, les sociétés intégrées s'appuient sur les considérations à long terme suivantes pour justifier la poursuite de leur engagement dans le développement de la technologie CMOS.

La maîtrise de la technologie reste déterminante dans toutes les applications logiques. Or, c'est par le maintien de lignes de production que la technologie peut être testée et améliorée. En effet, le travail d'ingénierie sur les équipements est fondamental pour trouver les astuces techniques et les innovations qui permettent de supprimer les éventuels défauts de production et augmenter rapidement les rendements. Compte tenu des délais très brefs imposés aux entreprises de semiconducteurs pour réaliser leurs produits, une

bonne synergie entre les équipes de développement des produits et celles responsables de la production permet de gagner du temps dans la mise en production.

En outre, les technologies dérivées profitent des avancées réalisées dans les technologies CMOS.

Par ailleurs, **les entreprises intégrées souhaitent garder leurs propres lignes de production afin de conserver une certaine indépendance vis-à-vis des fondeurs.** Comme il a été indiqué précédemment, à moyen terme, ces derniers pourraient non seulement revoir leurs prix à la hausse, mais également offrir leurs propres circuits intégrés.

Enfin, **en restant dans la course à la miniaturisation, les sociétés intégrées espèrent continuer à influencer le développement de l'électronique « au-delà du CMOS »**, c'est-à-dire lorsque toutes les potentialités de cette technologie auront été épuisées. En effet, un consensus se dégage parmi les scientifiques estimant qu'aucune rupture technologique majeure ne remplacera du jour au lendemain la technologie CMOS, mais que les évolutions se feront plutôt de manière incrémentale, la technologie CMOS intégrant les progrès réalisés par les nanotechnologies.

* *

*

Il apparaît donc que si trois modèles industriels coexistent, ils ne sont pas figés et aucun ne s'est imposé comme modèle dominant. Ainsi, un nombre croissant d'entreprises intégrées devient fabless ou fablite, ce qui pourrait être considéré comme un signe avant-coureur de la fin de ce modèle.

Néanmoins, les entreprises leaders du secteur de la microélectronique restent des entreprises intégrées tandis que TSMC, symbole de la réussite des fonderies, tend à verticaliser ses activités pour augmenter sa rentabilité.

Enfin, le rapport de forces entre les trois modèles est amené à évoluer. Jusqu'à présent, des mutations profondes ont à chaque fois accompagné le passage d'un nœud technologique à l'autre. Or, au moins quatre nœuds technologiques sont prévus avant d'arriver aux limites physiques de la miniaturisation : le 32 nm, le 22 nm, le 18 nm et le 12 nm.

Le développement d'un hub mondial de production en 450 mm aurait également des conséquences non négligeables sur la stratégie des entreprises de semiconducteurs.

Compte tenu de ces incertitudes, il apparaît donc très difficile de faire des prévisions sur l'évolution des trois modèles industriels dans un secteur où les entreprises doivent s'adapter en permanence.

Une première analyse du secteur des semiconducteurs conduit aux observations suivantes :

1) ce secteur est un secteur stratégique pour la compétitivité des entreprises et l'indépendance nationale et tire la croissance mondiale depuis plus de 40 ans ;

2) alors que ce secteur a longtemps été guidé par la seule course à la miniaturisation, les considérations de rentabilité économique deviennent prépondérantes avec l'apparition de trois défis :

- l'explosion des coûts de R&D, de design, de logiciels et de production qui rend la poursuite de la miniaturisation toujours plus chère ;

- le raccourcissement du cycle de vie des produits qui limite les retours sur investissement ;

- la relative maturité du marché qui exacerbe la concurrence ;

3) l'industrie des semiconducteurs apparaît donc en pleine mutation et se caractérise par :

- une hiérarchie mondiale en perpétuel mouvement aussi bien au niveau des entreprises que des zones géographiques avec une montée en puissance de l'Asie comme lieu de production ;

- le développement d'alliances et de coopérations précompétitives pour limiter l'augmentation des coûts ;

- la poursuite de la « déverticalisation » du secteur qui se traduit par la coexistence de trois modèles économiques, à savoir les entreprises intégrées, les fabless et les fondeurs.

*

* *

Comment l'industrie de la microélectronique va-t-elle faire face aux défis technologiques des quinze prochaines années ?

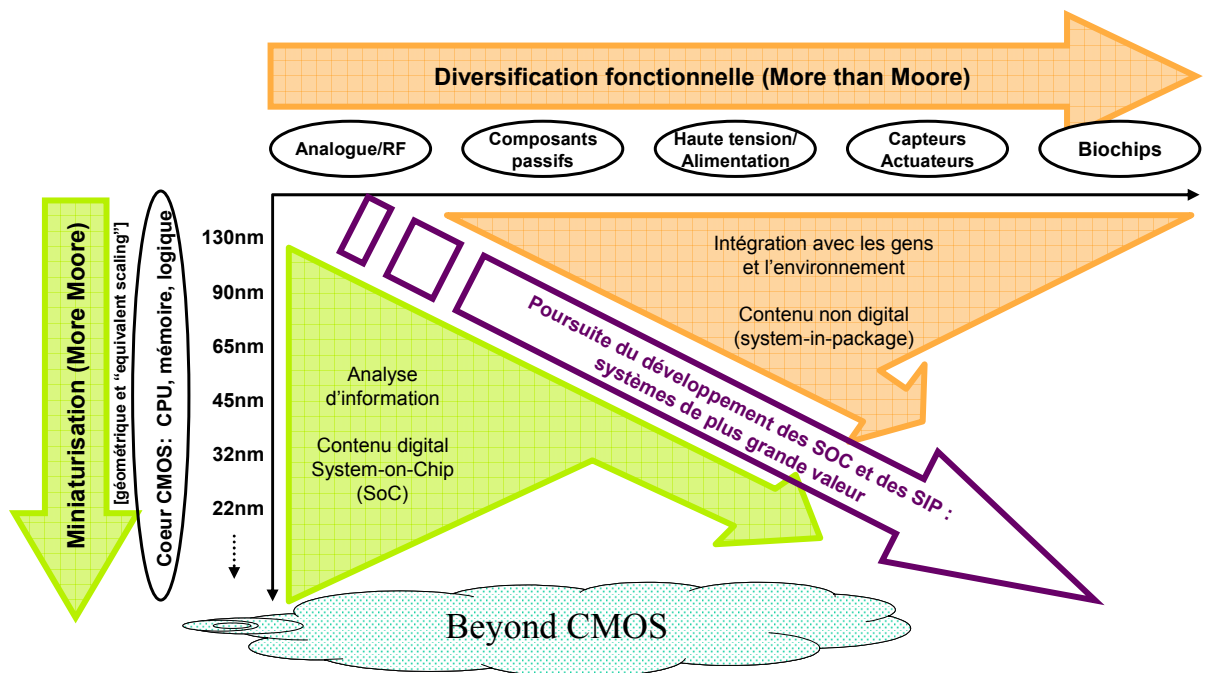
II. DES PERSPECTIVES SCIENTIFIQUES PROMETTEUSES MALGRÉ LES DÉFIS TECHNOLOGIQUES À RELEVÉ

Depuis l'invention du premier transistor en 1947, des progrès scientifiques immenses ont été réalisés, qui ont permis de diminuer le coût de ce dernier par un million tout en démultipliant sa puissance. Néanmoins, la réduction de la taille des transistors soulève des difficultés techniques croissantes et se heurtera tôt ou tard aux limites de la physique.

A. LES TROIS AXES DE DÉVELOPPEMENT DU SECTEUR DE LA MICROÉLECTRONIQUE

Depuis les années 60, les industriels se sont consacrés à la poursuite de la miniaturisation des transistors. Néanmoins, à partir de la fin des années 90, une nouvelle voie particulièrement prometteuse est apparue, qui consiste à intégrer plusieurs technologies sur une même puce. Par ailleurs, conscients que la technologie CMOS atteindrait un jour ses limites physiques, de nombreuses équipes de recherche s'intéressent à « l'après CMOS » et essaient d'inventer une nouvelle électronique.

Les trois voies de recherche dans le secteur de la microélectronique



Source : Medea+

1. Le « more Moore » ou la poursuite de la miniaturisation

En 1958, Jack Kilby réalise le premier circuit intégré composé de 5 composants de 3 types : transistor, résistance et condensateur. La course à la miniaturisation est alors lancée. En 1962, on peut intégrer 8 (= 2 puissance 3) transistors sur la même puce ; 16 (= 2 puissance 4) en 1963 ; 32 (=2 puissance 5) en 1964 ; 64 (=2 puissance 6) en 1965.

C'est alors que **Gordon Moore, cofondateur d'Intel Corporation, publia un article prévoyant le doublement du nombre de transistors sur une même surface de circuit intégré tous les ans.** Cette célèbre « loi de Moore », parfaitement empirique, n'a jamais été mise en défaut, même si le doublement du nombre de transistors se réalise désormais plutôt en deux ou trois ans.

Le transistor, composant de base des circuits intégrés

En décembre 1947, John Bardeen et Walter H. Brattain réalisaient le premier **transistor** en germanium. Avec William B. Shockley, aux Bell Laboratories, ils développaient l'année suivante le transistor à jonction et la théorie associée. Au milieu des années 1950, les transistors sont réalisés en **silicium** (Si), qui reste aujourd'hui le **semiconducteur** généralement utilisé, vu la qualité inégalée de l'interface créée par le silicium et l'oxyde de silicium (SiO₂), qui sert d'isolant.

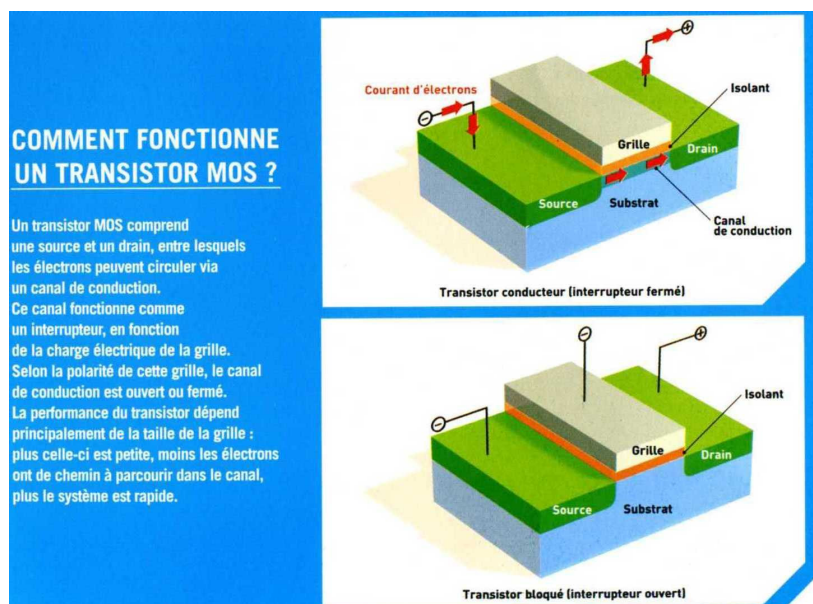
En 1958, Jack Kilby invente le **circuit intégré** en fabriquant cinq composants sur le même substrat. Les années 1970 verront le premier microprocesseur d'Intel (2.250 transistors) et les premières mémoires. La complexité des circuits intégrés ne cessera de croître exponentiellement depuis (doublement tous les deux-trois ans, selon la « loi de Moore ») grâce à la miniaturisation des transistors.

Le transistor (de l'anglais *transfer resistor*, résistance de transfert), composant de base des circuits intégrés micro-électroniques, le restera *mutatis mutandis* à l'échelle de la nanoélectronique : adapté également à l'amplification, entre autres fonctions, il assume en effet une fonction basique essentielle : laisser passer un courant ou l'interrompre à la demande, à la manière d'un commutateur. Son principe de base s'applique donc directement au traitement du langage binaire (0, le courant ne passe pas ; 1, il passe) dans des circuits logiques (inverseurs, portes, additionneurs, cellules mémoire).

Le transistor, fondé sur le transport des électrons dans un solide et non plus dans le vide comme dans les tubes électroniques des anciennes **triodes**, est composé de trois **électrodes** (*anode, cathode et grille*) dont deux servent de réservoirs à **électrons** : la **source**, équivalent du filament *émetteur* du tube électronique, le drain, équivalent de la plaque collectrice, et la grille, le « contrôleur ». Ces éléments ne fonctionnent pas de la même manière dans les deux principaux types de transistors utilisés aujourd'hui, les *transistors bipolaires à jonction*, qui ont été les premiers à être utilisés, et les *transistors à effet de champ* (en anglais FET, *Field Effect Transistor*). Les transistors bipolaires mettent en œuvre les deux types de porteurs de charge, les électrons (charges négatives) et les **trous** (charges positives), et se composent de deux parties de substrat semiconducteur identiquement **dopées** (p ou n), séparées par une mince couche de semiconducteur inversement dopée.

L'assemblage de deux semiconducteurs de types opposés (jonction p-n) permet de ne faire passer le courant que dans un sens. Qu'ils soient de type n-p-n ou p-n-p, les transistors bipolaires sont fondamentalement des amplificateurs de courant, commandés par un courant de grille ⁽¹⁾ : ainsi dans un transistor n-p-n, la tension appliquée à la partie p contrôle le passage du courant entre les deux régions n. Les circuits logiques utilisant des transistors bipolaires, appelés TTL (*Transistor Transistor Logic*), sont plus consommateurs de courant que les transistors à effet de champ, qui présentent un courant de grille nul en régime statique et sont commandés par l'application d'une tension.

Ce sont ces derniers, sous la forme **MOS** (Métal oxyde semiconducteur), qui composent aujourd'hui la plupart des circuits logiques du type CMOS (C pour complémentaire) ⁽²⁾. Sur un cristal de silicium de type p, deux régions de type n sont créées par dopage de la surface. Appelées là aussi **source** et **drain**, ces deux régions ne sont donc séparées que par un petit espace de type p, le **canal**. Sous l'effet d'une tension positive sur une électrode de commande placée au dessus du semiconducteur et qui porte tout naturellement le nom de **grille**, les trous sont repoussés de sa surface où viennent s'accumuler les quelques électrons du semiconducteur. Un petit canal de conduction peut ainsi se former entre la source et le drain. Lorsqu'une tension négative est appliquée sur la grille, isolée électriquement par une couche d'oxyde, les électrons sont repoussés hors du canal. Plus la tension positive est élevée, plus la résistance du canal diminue et plus ce dernier laisse passer de courant.



Dans un circuit intégré, les transistors et les autres composants (diodes, condensateurs, résistances) sont d'origine incorporés au sein d'une « puce » aux fonctions plus ou moins complexes. Le circuit est constitué d'un empilement de couches de matériaux conducteurs ou isolants délimitées par **lithographie**. L'exemple le plus emblématique est le microprocesseur placé au cœur des ordinateurs et qui regroupe plusieurs centaines de millions de transistors (dont la taille a été réduite par 10.000 depuis les années 1960) et bientôt un milliard, ce qui amène les industriels à fractionner le cœur des processeurs en plusieurs sous-unités travaillant en parallèle !

⁽¹⁾ Figurent dans cette catégorie les **transistors de type Schottky** ou **à barrière Schottky** qui sont des transistors à effet de champ comportant une grille de commande de type métal/semiconducteur qui améliore la mobilité des porteurs de charge et le temps de réponse au prix d'une plus grande complexité.

⁽²⁾ On parle alors de transistor **MOSFET** (*Metal-Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*).

*Source : Le nanomonde, de la science aux applications,
Clefs CEA n° 52 – été 2005*

L'intérêt de la miniaturisation est triple.

D'abord, en raccourcissant l'espace entre la source et le drain, elle accélère le passage des électrons **et augmente ainsi le nombre d'opérations réalisées par seconde tout en réduisant la consommation en énergie des transistors.**

Ensuite, la réduction de la taille des circuits permet la fabrication collective de centaines de puces sur chaque plaquette de silicium, **abaissant leur coût unitaire.**

Enfin, **la miniaturisation diminue l'encombrement des objets tout en multipliant leurs fonctions.** L'exemple ci-dessous montrant l'évolution du téléphone portable depuis 20 ans est parlant.

Evolution de la technologie du téléphone portable de 1986 à 2006

1986	1989	1996	2006
Ericsson 450 Combi 4 kg 3 heures d'autonomie	Hotline 900 pocket 630 g 1 jour d'autonomie	GH388 245 g 3 jours d'autonomie	V600i 102 g 12 jours d'autonomie
			

Source : MEDEA+

Les premiers appareils, fort encombrants, ne savaient « que » téléphoner. Les plus récents, ultra légers, proposent des jeux, des prises de vues haute définition, la connexion à internet, une grande autonomie, pour un prix équivalent ou inférieur.

La course à la miniaturisation constitue donc un enjeu fondamental pour l'industrie des semiconducteurs puisqu'elle multiplie les applications et contribue à la « pervasion » de l'électronique dans tous les secteurs d'activités.

Depuis 1998, une « road map » est publiée qui constitue un catalogue des défis technologiques que la filière doit relever pour maîtriser la nouvelle technologie avec des traits de gravure plus fins.

La International Technology Roadmap for Semiconductors (ITRS)

Cette “road map” est sponsorisée par les cinq associations des industries de semiconducteurs en Europe, au Japon, en Corée, à Taiwan et aux Etats-Unis, à savoir : the European Semiconductor Industry Association (ESIA), the Japan Electronics and Information Technology Industries Association (JEITA), the Korean Semiconductor Industry Association (KSIA), the Taiwan Semiconductor Industry Association (TSIA), and the United States Semiconductor Industry Association (SIA).

L’objectif de l’ITRS est d’encourager l’amélioration des performances des circuits intégrés à des coûts maîtrisés afin d’assurer la pérennité de l’industrie des semiconducteurs.

Des groupes de travail regroupant les entreprises de semiconducteurs, les équipementiers et la communauté scientifique sont constitués sur une vingtaine de thèmes (comme la lithographie, les interconnexions, le design, les tests et les équipements associés etc) pour identifier les difficultés à venir et proposer des solutions innovantes. Les conclusions de ces travaux sont publiées tous les deux ans.

Afin de rationaliser les efforts de R&D pour la technologie et les équipements associés, la communauté internationale a défini les dimensions des différentes étapes technologiques, appelées « nœuds ».

En 2003, la microélectronique est passée à l’échelle nanométrique en descendant sous la barre des 100 nm de la largeur de grille du transistor (nœud de 90 nm). **Depuis septembre 2006, la résolution des circuits intégrés est de 65 nm et au début de l’année 2008, elle est passée à 45 nm pour des microprocesseurs très rapides.** Parallèlement, les résolutions à 32 nm et 22 nm sont déjà en préparation, tandis qu’en laboratoire, des largeurs aussi faibles que 6 nm ont été obtenues.

Au-delà des dimensions des circuits, c’est l’ensemble de la chaîne de fabrication (pureté des produits chimiques, lithographie, techniques de dépôt et de gravure des matériaux, planarisation des surfaces, environnement de fabrication et contrôle des poussières, métrologie ...) qui devient une technique nanométrique. Ainsi, les machines de lithographie optique actuelles ont une précision mécanique de positionnement de 8 nm, et ce pour des plaquettes de silicium de 300 mm de diamètre.

La discussion des limites de la loi de Moore n’est pas nouvelle. Dans les années 80, il semblait impossible de diminuer le trait de gravure jusqu’au micron, puis on a pensé à la fin des années 90 que le seuil des 100 nm constituerait une limite. Plus récemment, le problème de la lithographie a été mis en avant comme étant un mur infranchissable. Les discussions portent actuellement sur la longueur critique de 10 nm de longueur de canal imposé par l’effet tunnel entre source et drain...

Au-delà de ces interrogations, un consensus se dégage pour reconnaître que la simple diminution des dimensions géométriques des transistors pour passer d'une génération à la suivante n'est plus possible. Selon la formule lapidaire d'un responsable d'IBM rencontré par votre rapporteur : *« on ne peut pas réduire la taille des atomes ! »*. Or, c'est l'échelle atteinte par certaines parties du transistor. Ainsi, la très fine couche de matériaux diélectrique située entre la grille et le canal a maintenant une épaisseur bien inférieure au nanomètre et atteint seulement quelques couches atomiques.

Désormais, ce sont les innovations au niveau des matériaux et des architectures qui permettront d'augmenter les performances des circuits intégrés.

2. Le « more than Moore » ou l'intégration de plusieurs fonctions sur une puce

La technologie CMOS, qui permet les fonctions de calcul et de mémoire ne suffit pas à expliquer le succès de la microélectronique. C'est l'ajout de fonctions non digitales (telle que la radiofréquence, les composants haute tension, l'électronique de l'éclairage et les chargeurs de batterie) qui a joué un rôle décisif dans la « pervasion » de la microélectronique. Elles sont connues sous le nom de technologies « more than Moore » ou technologies dérivées.

Si on les compare avec le corps humain, elles sont l'équivalent des yeux, des oreilles, des bras et des jambes et permettent au cerveau (qui calcule et mémorise) d'interagir avec le monde réel.

Un téléphone portable a ainsi un nombre significatif de fonctions non digitales comme la caméra, le système radiofréquence pour communiquer, le lecteur audio et vidéo.

Tout en bénéficiant des progrès réalisés en microélectronique, ces technologies sont issues de domaines différents de l'industrie de la microélectronique (mécanique, fluide, acoustique, optique) et ne voient pas leurs performances directement corrélées à la taille du trait de gravure.

Deux exemples permettront de mieux comprendre leur importance : les technologies en relation avec la radiofréquence et les microsystèmes.

- Les technologies en relation avec la radiofréquence

Aujourd'hui, la plupart des systèmes électriques utilisent des circuits radiofréquence pour transmettre leurs données en interne ou en externe. Parmi les applications les plus connues, on peut citer les communications mobiles sans fil (comme dans le téléphone portable), la communication par câble (comme pour l'internet large bande) ou encore les connexions à courte distance (comme pour la technologie Bluetooth).

La technologie RFID¹ (radio frequency identification) ouvre d'immenses perspectives dans le domaine des objets communicants en permettant de relier un objet (ou une personne) à un site à distance. C'est sur ce principe que repose la gestion dynamique d'objets à distance, depuis les flottes de véhicules équipés de modules GSM/GPS jusqu'au projet lancé par un consortium d'entreprises de produits grand public de remplacer les codes barres par des RFID afin d'identifier individuellement chaque objet².

D'importantes innovations viendront certainement de la généralisation des solutions dites actives (avec une autonomie en énergie), qui iront de l'étiquette RFID active à tout objet disposant de moyens de communication propres et dotés de capacités de traitement. Ces éléments actifs permettront la création de réseaux où les objets vont dialoguer entre eux. Dans le domaine de la santé par exemple, ces technologies faciliteraient le maintien à domicile de patients ou de personnes âgées avec un contrôle médical à distance non intrusif.

- Les microsystemes (MEMS - Micro Electro Mechanical Systems)

En général, ces microsystemes associent un microprocesseur traitant l'information et des dispositifs liés à l'environnement (thermique, de pression, chimique, magnétique, etc.) afin d'accomplir des fonctions complexes.

L'automobile est un de leurs domaines d'élection, du fait de l'ancienneté de leur introduction (dès le début des années 1990, les premiers microaccéléromètres – capteurs inertiels simples – ont été dédiés à l'installation des « airbags ») et **parce que ce secteur constitue un marché de masse bien adapté à la « pervasion » des microsystemes.**

On les retrouve dans :

- les capteurs de pression des pneus, des gaz de moteur, ou de l'huile ;
- les capteurs de flux d'air ou d'oxygène ;
- les capteurs de vitesse permettant de régler l'injection du véhicule ;
- les capteurs d'autocollision ;

¹ La RFID est une méthode pour stocker et récupérer des données à distance en utilisant des marqueurs appelés « radio-étiquettes » (« RFID tag » en anglais). Les radio-étiquettes sont de petits objets, tels que des étiquettes autoadhésives qui peuvent être collées ou incorporées dans des objets ou produits. Les radio-étiquettes comprennent une antenne associée à une puce électronique qui leur permettent de recevoir et de répondre aux requêtes radio émises depuis l'émetteur-récepteur.

² Ce projet est plus connu sous le nom « d'internet des objets » : un réseau d'entreprises, EPCglobal Inc. s'est constitué pour proposer le développement d'un Internet des objets, porté par l'évolution des réseaux, et notamment le passage à l'IPv6. Ce réseau propose un système mondial dans lequel chaque tag renvoie à un serveur racine Internet, qui autorise l'accès aux bases de données permettant d'identifier l'objet sur lequel il est apposé.

- les microgyroscopes de contrôle dynamique du véhicule pour des applications de suspension active ou d'ABS, etc.

Tous ces systèmes sont liés à des transpondeurs permettant de transmettre l'information, ou à des systèmes permettant de rectifier les dysfonctionnements détectés.

De plus en plus de secteurs sont également concernés comme le montrent les exemples suivants :

- les **télécommunications**, où les microsystèmes d'hyperfréquence trouvent une application aussi bien en téléphonie mobile qu'en liaisons satellitaires. De même, dans ce secteur, les microsystèmes optiques sont de plus en plus engagés dans la conversion optoélectronique ;

- l'**industrie agroalimentaire** (microcapteurs chimiques contrôlant le mûrissement des fruits, étiquettes intelligentes permettant de contrôler la fraîcheur d'un produit et le respect de la chaîne du froid) ;

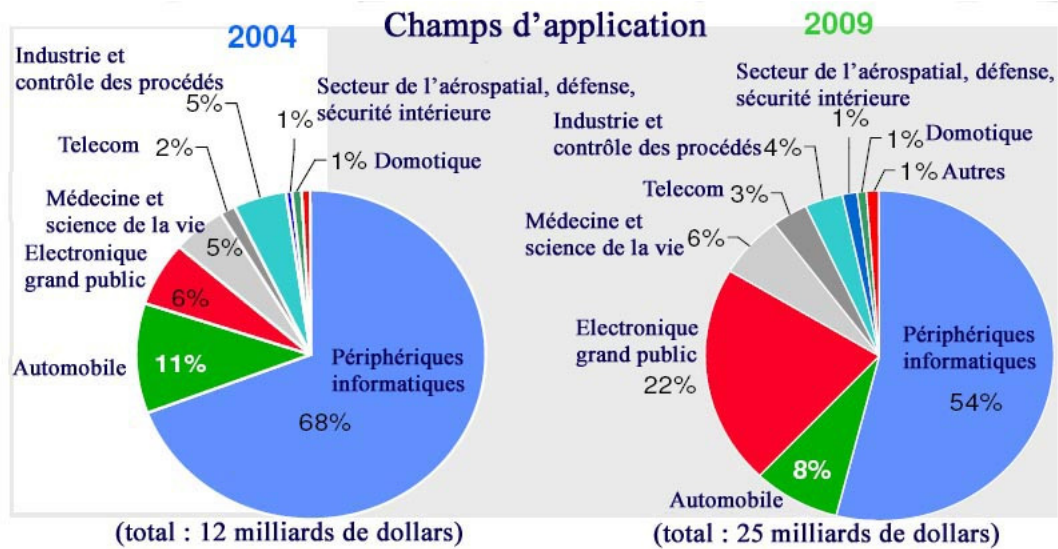
- la **médecine** (capteurs de pression, notamment cardiaque, pansements suivant le processus de guérison et vérifiant l'absence d'infection, prothèse pouvant être commandée par le cerveau) ;

- la **biologie** (laboratoires sur puces pour effectuer des tests à moindre coût).

Au-delà des microsystèmes traditionnels tels qu'ils viennent d'être présentés, sont développés **de nouveaux types de microsystèmes travaillant en réseau et assurant la collecte de données de manière décentralisée**. Dans le domaine de la sécurité par exemple, les microsystèmes sont de plus en plus utilisés pour assurer la surveillance des sites industriels et des frontières.

Le schéma ci-dessous montre les potentialités extraordinaires du marché mondial des microsystèmes et la diversité de leurs champs d'application.

Analyse du marché des microsystèmes 2004-2009



Source : Nexus

Les technologies liées au « more than Moore » incitent à l'interdisciplinarité puisqu'elle couple les sciences de l'ingénierie et les disciplines concernées (électronique, physique, chimie, biologie, etc.).

La combinaison de la technologie CMOS avec des technologies dérivées n'est pas sans poser des problèmes d'intégration de systèmes.

Deux types d'approche coexistent :

- **une approche monolithique** dans laquelle la technologie CMOS et les technologies dérivées sont réalisées sur le même substrat avec un seul procédé : on parle alors de **system on chip** (SoC) ;

- **une approche hybride**, dans laquelle les différents composants sont combinés au niveau de l'encapsulation en profitant des technologies d'interconnexion entre les différents substrats : on parle alors de **system in package** (SiP).

Le développement du system in package conduit de nombreux acteurs à se spécialiser dans **l'intégration hétérogène**. Elle peut être définie comme l'ensemble des techniques permettant à la fois l'intégration de composants basés sur des technologies et des matériaux différents dans un seul emballage et leur interaction avec le monde réel.

Les technologies « more than Moore » conduisent également à s'intéresser à **l'électronique organique** dont les performances sont certes inférieures à celle de l'électronique sur silicium, mais dont les coûts de production sont beaucoup moins élevés, ce qui permet d'élargir le champ des applications.

Les trois exemples suivants illustrent cette tendance.

Le remplacement des codes-barres par des RFID serait actuellement matériellement réalisable parce que les RFID peuvent être désormais imprimées sur du plastique.

De même, **le secteur de l'énergie photovoltaïque** pourrait connaître un essor considérable si les cellules, au lieu d'être produites sur un substrat silicium, pouvaient être fabriquées par impression sur une surface en polymère. Non seulement les coûts de production diminueraient fortement, mais la taille des panneaux pourrait être agrandie de manière considérable.

Enfin, **les diodes lumineuses organiques (OLED - Organic Light-Emitting Diode)** pourraient révolutionner les écrans et l'éclairage de demain.

Elles sont constituées d'un film organique (composé carboné) retenu entre deux autres films jouant le rôle d'électrodes. Lorsqu'un courant est appliqué, le composé organique s'illumine. C'est donc l'ensemble de la surface qui émet de la lumière.

Les diodes lumineuses organiques ont déjà conquis le marché des écrans pour tous les appareils mobiles et de petites taille tels que les téléphones portables, les agendas électroniques et les appareils photos numériques. En effet, les écrans utilisant les OLED sont plus brillants, plus contrastés, plus fins et plus légers que les écrans LCD (Liquid Crystal Display), tout en nécessitant moins d'énergie et en coûtant moins cher en production.

Jusqu'à présent, la production d'écrans de plus grande taille soulève d'importants problèmes techniques, mais ces derniers devraient être surmontés dans les 5 années à venir, ce qui permettrait aux OLED de s'implanter dans le marché des écrans de télévision et de l'affichage publicitaire. En outre, le fait que ces écrans soient souples devrait donner naissance à de nouvelles applications ou à de nouvelles générations de machines portables. **Les OLED devraient favoriser l'essor du livre et du journal électroniques, mais aussi la banalisation d'écrans dans les vêtements on encore dans les emballages de produits de grande consommation, qu'il s'agisse de boîtes de conserve ou de bouteilles.**

Les diodes lumineuses organiques devraient également jouer un rôle majeur dans l'éclairage. A terme, les halogènes et néons très consommateurs d'énergie pourraient être remplacés tandis que de nouveaux éclairages d'ambiance pourraient être créés par l'utilisation des murs, des plafonds, des rideaux, des fenêtres ou de toute autre surface capable d'intégrer les OLED.

Le développement des technologies dérivées entraîne des changements non négligeables au niveau économique.

D'une part, **le marché des semiconducteurs a vocation à se diversifier**. Non seulement de nouvelles filières vont se juxtaposer à la filière silicium classique, comme l'électronique organique par exemple, mais des marchés de niches vont également apparaître. Comme il a été indiqué précédemment, le marché des microsystèmes est tiré par les applications. Or, chaque application mène à une technologie dédiée : il n'existe pas dans ce domaine l'équivalent de la technologie générique CMOS. Les productions de microsystèmes n'obéiront donc pas forcément à une logique de volume mais plutôt à une logique de valeur ajoutée suivant l'application.

D'autre part, le marché des semiconducteurs pourrait s'ouvrir à de nouveaux entrants dans la mesure où l'investissement capitaliste pour les technologies dérivées est bien moindre que pour le développement des technologies « more Moore ». En revanche, l'existence de leaders industriels dans les domaines d'application envisagés et une politique étatique volontariste de soutien à ces nouveaux marchés peuvent être des critères déterminants. A cet égard, il n'est pas anodin que l'engagement précoce et massif de l'Allemagne en faveur de l'énergie solaire ait permis de créer une industrie nationale forte dans ce secteur qui utilise les technologies dérivées.

3. Le « beyond CMOS » ou les recherches sur les technologies alternatives au CMOS

L'association du « more Moore » et du « more than Moore » offre à la microélectronique de nombreuses opportunités de croissance. Néanmoins, la technologie CMOS se heurtera tôt ou tard à une double limite :

- **une limite physique** déjà évoquée précédemment et qui est envisagée autour de 2020 : actuellement, dans un circuit intégré, la barrière isolante qui sépare la grille du transistor et le canal n'est que de quelques atomes. En poursuivant la miniaturisation, elle devient si fine que l'effet tunnel quantique commence à se manifester, créant une fuite de courant lorsque le commutateur est en position fermée, fuite qui constitue une fraction significative du courant du canal quand le dispositif est en position ouverte, ce qui réduit la fiabilité des transistors ;

- **une limite économique**, qui pourrait intervenir plus rapidement que la limite physique : le coût de développement d'une technologie augmente de 30 % par nœud technologique. Actuellement, seuls Intel, l'alliance IBM et TSMC sont capables de financer la recherche et développement pour les générations logiques 32 et 22 nm. Qu'en sera-t-il pour les générations futures ?

Lors de ses entretiens avec les grands acteurs de l'industrie de la microélectronique, votre rapporteur a eu le sentiment que si ces derniers étaient confiants dans leurs capacités technologiques à aller jusqu'au bout de la roadmap tracée par l'ITRS, ils se montraient plus réservés sur les perspectives de financement. En effet, depuis l'explosion de la bulle internet,

le rapport de force entre le directeur technique et le directeur financier des entreprises de semiconducteurs a évolué au profit de ce dernier et la question de la justification économique des investissements dans la technologie se pose de manière accrue.

En réponse à ces deux limites, les industriels du secteur et la communauté scientifique internationale, avec le large soutien des Etats, se sont lancés depuis plusieurs années dans l'exploration de pistes nouvelles et qui devraient s'avérer moins coûteuses grâce à l'introduction de nouveaux concepts n'utilisant pas l'architecture classique du transistor CMOS et les techniques de fabrication de la microélectronique silicium.

La feuille de route de l'ITRS leur consacre tout un chapitre sous le nom d' « Emerging Research Devices ».

Sans prétendre à l'exhaustivité, votre rapporteur présentera brièvement quatre champs de recherche : la spintronique, la photonique, l'électronique moléculaire et l'électronique quantique.

- La spintronique

L'électronique s'est jusqu'à présent construite sur la manipulation de la seule charge des électrons. Par exemple, dans les mémoires vives des ordinateurs, l'information est stockée sous la forme de charges électriques localement piégées dans de petites capacités. Mais cette approche commence à poser d'énormes problèmes de miniaturisation. Or, les électrons, en plus de leur masse et de leur charge, possèdent une autre caractéristique : le spin. Il s'agit d'une grandeur fondamentalement quantique mais dont on peut donner une image en se représentant l'électron comme une petite sphère chargée tournant sur elle-même dans un sens ou dans l'autre. Cette rotation de charge peut être assimilée à une boucle de courant et donc à un moment magnétique orienté suivant le sens de rotation de l'électron. Le spin de l'électron est la source du « magnétisme » de certains matériaux, utilisé en particulier dans l'enregistrement magnétique (disque dur, bande magnétique) qui aujourd'hui domine très largement l'enregistrement de masse non volatile. L'« électronique de spin » ou « spintronique » vise à introduire le spin de l'électron aussi en électronique.

Le premier pas dans cette direction a été la découverte en 1988 de la magnétorésistance géante (Albert Fert et Peter Grünberg ont reçu le prix Nobel de physique en 2007 pour cette découverte), qui a montré comment contrôler la conduction électrique par le magnétisme. C'est d'ailleurs dans le domaine des disques durs que la spintronique a eu ses premières applications commerciales, permettant d'améliorer considérablement les performances de stockage (on est passé de 1 à 600 Gigabits par pouce carré en moins de 10 ans) et d'ouvrir ainsi le disque dur aux applications nouvelles telles que l'électronique nomade et l'enregistrement vidéo. On sait désormais agir sur le magnétisme des nanostructures par des courants électriques, ce qui promet une intégration complète de l'enregistrement magnétique dans les circuits « mémoires » de l'électronique.

De manière générale, la spintronique présente de nombreux atouts liés essentiellement à la possibilité de mémoriser de façon non volatile (et insensible aux radiations) une information dans des nanostructures magnétiques distribuées dans un circuit, avec une rapidité de commutation magnétique potentiellement sub-nanoseconde et donc en concordance avec les circuits les plus rapides de l'électronique.

A court terme, les applications de la spintronique touchent :

- les capteurs magnétiques à base de « vannes de spin¹ », déjà au cœur de l'enregistrement magnétique classique et qui devraient trouver des applications dans les microsystèmes (automobile, médical) et la santé (biopuces, magnétoencéphalographie).

- les nouvelles mémoires magnétiques à accès aléatoire (MRAM), apparues fin 2006. Les MRAM associent non volatilité et densité avec un fort potentiel de vitesse et une intégration pratique en technologie CMOS, ce qui en fait une solution intéressante pour une prochaine génération de mémoires embarquées non volatiles dites « universelles » dans les « system on chip ». Elles sont aussi faiblement sensibles aux radiations, ce qui les rend attractives pour les applications « durcies » (espace, transports, militaire), c'est-à-dire qui doivent faire preuve d'une robustesse et d'une fiabilité importantes.

- au-delà de l'utilisation « mémoire », l'intégration de cellules magnétiques dans des circuits logiques pourrait permettre d'obtenir de nouvelles fonctionnalités telles que rendre ces circuits non volatiles, ce qui entraînerait une réduction conséquente de la consommation en énergie. On parle de « logique magnétique » pour décrire cette approche.

D'autres applications commencent à apparaître dans le domaine de la communication radiofréquence (transducteurs et sources intégrables miniatures).

A long terme, le potentiel de développement est considérable, avec l'arrivée prévisible de nouveaux matériaux (semiconducteurs et oxydes magnétiques, multiferroïques) et d'architectures de circuits plus performantes, jusqu'à l'intégration de fonctions logiques complexes dans un même nano-dispositif. *In fine*, on peut envisager une électronique sans courant de charge promettant une très faible dissipation d'énergie et une rapidité proche du Terahertz. La manipulation de spins uniques en interaction est aussi une voie prometteuse de l'information quantique.

- La photonique

Cette science étudie les potentialités de la lumière qui apporte des avantages uniques en raison de sa vitesse (300.000 km/s), la possibilité de la

¹ Le nom « vanne de spin » s'explique par analogie : en tournant l'aimantation d'une couche magnétique, comme on actionne une vanne, la diminution ou l'accroissement de la résistance électrique permet de laisser passer plus ou moins le courant électrique.

diviser en plusieurs longueurs d'onde, son interaction avec certains matériaux, la précision de son débit d'énergie et sa capacité d'éclairer. La photonique connaît de très nombreuses applications telles que les lasers, les diodes, les écrans plats, les CD/DVD, l'optique quantique et la cryptographie, les fibres optiques etc.

A plus long terme, la photonique pourrait améliorer la performance des ordinateurs à travers la réalisation de circuits optiques capables de traiter les données sous forme optique. Un large champ de recherche est exploré : composants optoélectroniques, nanostructures photoniques, liaisons optiques intrapuces.

A cet égard, votre rapporteur souhaite se reporter à l'étude réalisée par la mission pour la science et la technologie aux Etats-Unis sur « la nanophotonique aux Etats-Unis » en février 2007.

« De très nombreux groupes de recherche aux Etats-Unis travaillent actuellement sur les interconnexions optiques car elles représentent potentiellement le futur de l'industrie des télécommunications et de l'industrie informatique. »

En raison du besoin sans cesse croissant en vitesses de traitement élevées suscité par l'explosion des applications Internet (voix sur IP, vidéo conférence, transfert de données, etc...) et plus généralement du monde numérique, des bandes passantes de 10 Gb/s et plus sont nécessaires. Ce besoin d'échanger plus vite plus de données requiert un changement de technologie.

En effet, les données traitées par les circuits qui équipent nos appareils du quotidien (ordinateurs, téléphones mobiles, PDA, etc...) circulent via des fils métalliques généralement en cuivre. A de telles fréquences (>10 GHz), ces derniers engendrent des pertes de puissance trop importantes. Si l'on compare l'évolution des bandes passantes CPU¹ avec celles des bus² périphériques, au cours des deux dernières décennies, on constate que le débit des bus est un ordre de grandeur inférieur à celui des processeurs.

Autrement dit, ce n'est plus l'horloge du processeur qui détermine la rapidité d'un ordinateur mais plutôt la vitesse avec laquelle les données sont échangées entre les différents composants. La vitesse de ces flux de données devient de plus en plus difficile à augmenter en raison des limites physiques imposées par les interconnexions métalliques.

La nanophotonique sur silicium vise donc à offrir de nouvelles solutions pour surmonter ces barrières technologiques, on parle de convergence entre électronique et photonique. Cependant encoder un signal de lumière n'est pas aussi simple qu'encoder un signal électrique et de

¹ CPU : central processing unit ; Il s'agit d'un processeur

² un bus correspond à l'ensemble des lignes de communications connectant les différents composants d'un ordinateur

nombreuses années de recherche seront nécessaires pour développer l'ensemble de fonctions optiques sur silicium qui manquent aujourd'hui. ».

En ce qui concerne le stockage de l'information, la photonique apporte également des solutions intéressantes.

A l'heure actuelle, les CD et DVD permettent de stocker respectivement 700 mégaoctets et 6 gigaoctets d'informations. Le stockage optique utilise une source lumière de type laser pour écrire et lire les données. Les bits sont stockés de manière permanente sous la forme de creux moulés physiquement dans une couche d'enregistrement en polycarbonate. Ces supports sont durables car aucun élément du lecteur optique ne touche la surface du disque, les données étant lues à travers celui-ci.

Le successeur du DVD devrait être le Blu-ray, un support de stockage optique contenant jusqu'à 25 ou 50 gigaoctets (simple ou double couche). La tête de lecture utilise un laser bleu, d'une longueur d'onde réduite par rapport à celui du DVD ou du CD, ce qui permet une densité d'informations plus élevée.

Néanmoins, la véritable révolution dans le stockage optique de l'information est attendue du HVD (Holographic Versatil Disc) qui, avec une capacité théorique de stockage de 3,9 téraoctets, devrait être destiné à servir de mémoire de masse. Outre sa densité élevée, la vitesse de transfert est estimée à 1 Gbit/s, ce qui permet de lire et d'écrire des millions de pixels d'un seul flash de lumière.

- L'électronique moléculaire

L'idée de base a été formulée en 1974. Elle a pour but de concevoir et de réaliser des circuits électroniques mettant en œuvre des molécules fonctionnalisées, des nanotubes de carbone ou des nanofils comme composants.

Les technologies n'ont pas permis pendant longtemps d'explorer ce concept, jusqu'à l'invention du microscope à effet de tunnel, en 1981.

En 1995, a été réalisé un premier contact électrique sur une molécule.

L'engouement pour l'électronique moléculaire s'explique parce qu'elle laisse espérer des méthodes de fabrication à bas coûts fondées sur l'autoassemblage de composants. Elle offrirait également des possibilités de mieux gérer la complexité, de réduire le coût énergétique du calcul et d'introduire de nouvelles fonctions, à base de systèmes électromécaniques par exemple.

Les nano-objets principalement utilisés comme briques de base de l'électronique moléculaire sont les molécules, les nanofils et les nanotubes de carbone.

L'utilisation de ces composants moléculaires au sein de circuits peut être envisagée de deux manières :

- dans l'électronique moléculaire hybride, une molécule incarne un composant électronique. Le circuit électronique complexe est réalisé par l'interconnexion d'une multitude de ces composants par un réseau de fils électriques métalliques d'une section la plus fine possible ;

- dans l'électronique moléculaire intégrée, la molécule incarne la fonction électronique complexe en entier. Dans ce cas, il n'est pas nécessaire que les groupements chimiques entrant dans la composition de cette molécule monumentale remplissent des fonctions standard comme celle d'un transistor, une capacité, une résistance... Cette voie est considérée comme étant à long terme.

Au cours des 10 dernières années, des progrès remarquables ont été faits tels que le développement de composants individuels à base de nanotubes de carbone ou de nanofils semiconducteurs dont les performances dépassent largement celles des meilleurs composants silicium.

Cependant l'utilisation de ces composants pour des applications relevant des filières de la nanoélectronique silicium bute actuellement sur la compatibilité des technologies de fabrication de ces nouveaux composants avec celles de la nanoélectronique.

Les études les plus avancées d'hybridation de composants à base de molécules, nanotubes ou nanofils sur silicium concernent : les transistors à nanotubes ou nanofils, les dispositifs optoélectroniques à nanofils, les interconnexions à base de nanotubes et les mémoires moléculaires.

Enfin, il faut noter que les développements faits sur les composants utilisant des nanotubes ou nanofils ouvrent des perspectives très prometteuses, complétant celles de l'électronique organique, dans le domaine de l'électronique souple ou de l'électronique grande surface pour lesquelles des techniques innovantes de mise en œuvre sont en cours de développement.

- L'électronique quantique

Il est sans doute nécessaire de rappeler quelques repères avant d'esquisser une réflexion sur ces perspectives radicalement nouvelles.

En physique classique, on peut connaître à la fois la position et la vitesse des objets étudiés (comme, par exemple, une planète).

En mécanique quantique¹, on peut ne pas préciser simultanément la vitesse et la position d'un électron (à cause de l'indétermination qu'introduit l'observation), mais uniquement poser une fonction de probabilité de ses états.

¹ *de quantum : combien ?*

Or ces états peuvent se superposer et ces superpositions s'intégrer les unes aux autres. De ce fait, les systèmes qu'ils constituent offrent des possibilités de calculs exponentiels par rapport à celles alternatives de l'électronique classique binaire.

La théorie estime que l'on peut assembler jusqu'à 40 électrons ou qbits (au-delà de ce nombre le système quantique se lie à son environnement microscopique et perd ses propriétés), ce qui donne une possibilité de calcul de 2^{40} par système.

On perçoit l'intérêt d'utiliser ces propriétés pour les appliquer aux ordinateurs, dont la puissance de calcul serait augmentée dans des proportions considérables, au-delà de l'imaginable.

* *
*

Si toutes ces voies apparaissent prometteuses, elles restent pour l'instant du domaine de la recherche fondamentale : aucune ne s'est encore imposée comme une solution alternative crédible au silicium, ni en terme de performance, ni en terme de coût.

Par ailleurs, la plupart des personnes entendues s'accordent à estimer qu'il n'y aura pas de rupture brutale entre la filière silicium et le « beyond CMOS », mais plutôt des changements incrémentaux. Ainsi, ces nouvelles technologies pourraient côtoyer le silicium et non le remplacer, aboutissant à un croisement technologique progressif.

En effet, il ne faut pas minimiser les perspectives d'adaptation d'une filière très capitaliste et dont les moyens de recherche-développement sont considérables.

B. LES OBSTACLES À SURMONTER

Les avancées dans les voies de recherche évoquées précédemment exigent néanmoins de surmonter de nombreux obstacles.

Ainsi, la miniaturisation géométrique des transistors à travers la lithographie exige de véritables prouesses techniques.

En outre, au fur et à mesure que la taille des transistors se rapproche de l'échelle quantique, de nouvelles difficultés apparaissent qui limitent la performance des circuits intégrés.

Sans prétendre être exhaustif, votre rapporteur abordera les principaux obstacles rencontrés par la microélectronique liés :

- à la poursuite de la miniaturisation par la lithographie ;

- à la dissipation thermique ;
- à la sensibilité des transistors aux variations du procédé de fabrication ;
- à la perturbation des performances des transistors en raison des effets quantiques et de la complexité des architectures.

1. La poursuite de la miniaturisation par la lithographie

La miniaturisation a longtemps consisté à réduire le trait de gravure des transistors grâce aux progrès réalisés en lithographie optique, qui reste le procédé traditionnel de fabrication des circuits intégrés. La résolution étant proportionnelle à la longueur d'onde, la finesse des motifs a d'abord progressé avec la diminution, qui s'est effectuée par sauts, de la longueur d'onde λ du rayonnement utilisé.

Dans les années 80, l'industrie de la microélectronique utilisait des lampes à mercure délivrant dans l'UV proche, à travers des optiques en quartz, un rayonnement d'une longueur d'onde de 436 nm. Elle gravait ainsi des structures d'une longueur de trait de 3 microns. Employées jusqu'au milieu des années 90, ces lampes ont été remplacées par des lasers à excimères émettant dans l'UV lointain (krypton-fluor à 248 nm, puis argon-fluor à 193 nm), permettant d'atteindre des résolutions de 110 nm et même inférieures à 90 nm.

Il faut souligner que la résolution recherchée aujourd'hui est très inférieure à la longueur d'onde d'exposition, ce qui apparaît comme un défi aux lois de la physique. En fait, deux facteurs ont contribué à cette prouesse technique :

- la mise au point de résines photosensibles basées sur des matrices de polymères peu absorbantes aux longueurs d'onde utilisées et mettant en œuvre des mécanismes de propagation de l'énergie reçue toujours plus innovants ;
- l'amélioration des optiques, notamment par l'augmentation de l'ouverture numérique de l'optique de projection. A ainsi été développée la lithographie en immersion, qui introduit un liquide entre la lentille et la plaque de silicium et permet d'atteindre des tailles de gravure de 32 nm pour une longueur d'onde de 193 nm.

Pour l'avenir, de nombreux chercheurs parient sur l'introduction de l'extrême ultra-violet, dont la longueur d'onde est de 13,5 nm. Il s'agirait à la fois d'une réelle continuité et d'une rupture technologique majeure.

D'un côté, il s'agit d'une lithographie optique, ce qui permettrait d'appliquer, comme dans le passé, une panoplie d'astuces déjà connues afin de réduire progressivement la taille des motifs.

De l'autre, il s'agit d'une technologie totalement nouvelle : le procédé doit se réaliser intégralement sous vide, car pratiquement tous les matériaux, même sous forme gazeuse, absorbent la lumière à 13,5 nm. Cela impose l'abandon des optiques réfractives des anciens photorépétiteurs et l'utilisation, notamment, d'un masque et d'optiques réflectifs, miroirs extrêmement précis.

En outre, la source de lumière ne sera plus un laser mais un plasma chaud créé à partir d'un minuscule volume de matière. Même si elle apparaît très prometteuse, la lithographie dans l'extrême UV soulève des difficultés technologiques qui restent actuellement encore insurmontables.

Enfin, **l'utilisation de technique de lithographie dite « maskless »** basée sur le principe d'une écriture directe sur tranche de silicium via un faisceau d'électrons représente une opportunité décisive pour les générations en deçà de 22 nm. L'utilisation de cette technique est limitée aujourd'hui à des petites séries ou à des prototypes en raison de son trop faible débit. Mais de nouveaux concepts sont à l'étude pour multiplier le nombre des faisceaux d'électrons et accroître ainsi le rendement.

2. La perturbation des performances des transistors

En théorie, la miniaturisation de la taille des composants devrait permettre d'augmenter la vitesse de commutation des transistors et de réduire leur consommation en énergie. Or, le passage de la microélectronique à l'échelle nanométrique s'accompagne de nombreux effets qui perturbent la performance des transistors.

a) Les interconnexions

L'un des problèmes majeurs dans la réalisation de circuits intégrés complexes réside dans le système d'interconnexion des blocs de circuits. Actuellement, la longueur moyenne des connexions sur une puce s'élève à 8 km !

La complexité d'interconnecter des milliards de transistors s'est d'abord traduite par le besoin d'augmenter le nombre de couches métalliques et à les spécialiser pour transférer des signaux à courte et longue distance : on parle maintenant facilement de 7 à 10, voire 12 niveaux de métallisation.

Par ailleurs, contrairement au transistor, **la vitesse de propagation d'un signal dans une interconnexion ne s'améliore pas avec la miniaturisation, la résistivité de la ligne métallique ayant tendance à se détériorer avec la réduction des dimensions.**

Pour contrer cette tendance, l'aluminium a été remplacé par du cuivre, plus conducteur.

Dans le même temps, les pertes capacitatives dues aux capacités parasites engendrées par le croisement des lignes d'interconnexion ont pris de

l'importance. La silice ou les mélanges silice et nitrure de silicium, les matériaux diélectriques traditionnels d'isolement entre les divers niveaux métalliques ont été remplacés par des matériaux organiques polymères à faible permittivité appelés matériaux « low k ».

Récemment, IBM a développé des microprocesseurs qui utilisent de l'air pour isoler les fils qui relient les centaines de millions de transistors entre eux (technologie de l'« air gap »). Cette innovation réduit les interférences électriques, augmente les performances du processeur et diminue la consommation d'énergie.

A plus long terme, le remplacement d'une interconnexion de cuivre par une interconnexion à base de carbone (nanotubes de carbone, graphène etc) permettrait de lever les verrous actuels.

b) Les courants de fuite

Comme il a été indiqué précédemment, l'épaisseur de l'oxyde de silice de la grille est désormais réduite à quelques couches atomiques, l'ordre de grandeur de la longueur d'onde des électrons dans le transistor. En conséquence, un flux d'électrons, courant parasite de grille dont l'intensité est exponentiellement proportionnelle à l'inverse de l'épaisseur de la grille, quitte le canal pour rejoindre la grille par l'effet tunnel à travers la fine couche d'oxyde qui demeure isolante. **Ce courant parasite consomme de l'énergie même lorsque le transistor est au repos, chauffe et ralentit le composant.** C'est une limitation intrinsèque à la réduction de la taille des transistors.

Pour lever ce verrou technologique, les chercheurs s'orientent d'une part vers le remplacement de la couche d'oxyde de silice par un matériau diélectrique de plus forte permittivité dit « high k »¹ et, d'autre part, par le remplacement du matériau actuellement utilisé pour la grille (le polysilicium dopé) par un métal qui a une résistivité plus faible et permet donc un déplacement plus rapide des électrons et une dissipation moindre d'énergie.

Selon les responsables d'IBM rencontrés par votre rapporteur sur ce sujet, la technologie développée par IBM combinant *high k et metal gate* permet de réduire les courants de fuite par 100. En outre, les performances des transistors seraient améliorées de 35 % tandis que la consommation d'énergie en état actif serait réduite de 45 %.

Le dernier processeur sorti sur le marché par Intel Corporation intègre ce type de matériaux dans le procédé de fabrication.

¹ L'alliance IBM utilise l'oxyde d'hafnium.

c) La consommation d'énergie

Schématiquement, on distingue deux types de consommation d'énergie par les circuits intégrés : la consommation dynamique et la consommation statique.

La consommation dynamique correspond à la consommation d'énergie lorsque le circuit est activé : consomment alors non seulement les transistors, mais également les interconnexions.

Les mémoires et les microprocesseurs sont des composants particulièrement consommateurs d'énergie. Or, la vitesse de fonctionnement des microprocesseurs est liée à leur fréquence (mesurée en Hertz). Aussi, **pour augmenter la puissance de calcul des microprocesseurs, les concepteurs se sont longtemps contentés de faire travailler ces derniers à une fréquence plus élevée** (des mégahertz puis des gigahertz).

Néanmoins, l'augmentation de la vitesse d'horloge présente des inconvénients : plus le microprocesseur tourne vite, plus la chaleur dissipée par le circuit intégré augmente, chaque transistor consommant et dégageant une certaine quantité d'énergie à chaque cycle d'horloge, ce qui engendre des problèmes de refroidissement. Pour contrôler l'élévation de la température, plusieurs solutions ont été élaborées visant à introduire des ventilateurs d'extraction de chaleur, à instaurer un circuit de refroidissement dévolu au processeur ou encore à affiner le trait de gravure.

Toutefois, l'innovation majeure pour améliorer la puissance des microprocesseurs sans augmenter la quantité d'énergie consommée a été d'arrêter la course à la fréquence et de **multiplier les coeurs des processeurs**. En utilisant plusieurs coeurs au lieu d'un, un processeur peut traiter plus de données simultanément.

La consommation statique du transistor (c'est-à-dire hors fonctionnement) est liée au courant de fuite exposé précédemment. Pour limiter la fuite des électrons par effet tunnel, les concepteurs des circuits ont introduit de nouveaux isolants de grille.

A cet égard, on peut citer le SOI développé par SOITEC : ce matériau silicium de nouvelle génération permet d'insérer un isolant entre la couche de silicium actif sur laquelle est gravé le circuit intégré et le substrat servant de support mécanique. **Grâce à cet isolant, les circuits intégrés consomment bien moins d'énergie que lorsqu'ils sont conçus et fabriqués sur du silicium conventionnel.**

Afin de limiter la dissipation de chaleur, il est également envisagé d'enrouler la grille autour du canal plutôt que de la laisser agir uniquement « par-dessus ». La limite de la miniaturisation pourrait donc être un empilement de nanofils de silicium enserrés dans des grilles indépendantes pour cumuler le bénéfice d'un meilleur contrôle électrostatique et d'un gain en courant électrique.

d) La sensibilité aux variations du procédé de fabrication

La miniaturisation extrême des transistors accentue leur sensibilité aux variations du procédé de fabrication (appelée « variabilité ») : lorsque l'épaisseur d'une couche ne comporte que quelques atomes, une variation d'un seul atome a une influence forte sur les performances. Pourtant, les transistors sont fabriqués selon les mêmes procédés.

Pour maîtriser la fluctuation des performances, les fabricants développent de nouvelles architectures (parallèles, asynchrones) et de nouvelles méthodes de conception (redondance des transistors, auto détection des pannes, méthodes de récupération d'erreur matérielles et logicielles).

e) La sensibilité des circuits intégrés à la radioactivité

Deux sources de radioactivité viennent perturber la performance des transistors :

- **les rayons cosmiques** qui peuvent entraver le bon fonctionnement des circuits intégrés contenus dans les satellites ;

- **la radioactivité naturelle** liée aux matériaux des boîtiers des circuits intégrés.

Il existe certes des codes de correcteurs d'erreurs qui permettent de corriger les erreurs mais ils ne sont efficaces que jusqu'à un certain taux d'erreur.

Or, si la miniaturisation réduit le taux d'erreurs par transistor dans la mesure où la diminution du volume du transistor limite ses interactions avec les particules énergétiques dues à la radioactivité, le nombre total d'erreurs par circuit croît en raison de l'augmentation régulière du nombre total de transistors sur une même surface de silicium (cf la loi de Moore).

Les composants sur SOI sont moins sensibles à ce type d'erreur, d'où leur diffusion historique dans les applications militaires et l'intérêt que suscite leur intégration dans les technologies avancées.

3. La complexité croissante des architectures

La poursuite de la miniaturisation des circuits entraîne des taux d'intégration vertigineux : actuellement, un circuit peut contenir plus d'un milliard de transistors. A ce stade, le circuit devient « système » puisqu'il est capable d'absorber une application complète, prenant en compte les aspects logiciels et matériels.

La complexité croissante des architectures soulève de nombreux défis au niveau de la modélisation du circuit, de l'optimisation de ses performances etc. Des solutions innovantes doivent donc être trouvées pour concevoir, tester et réaliser les systèmes intégrés du futur.

En outre, comme il a été indiqué précédemment, à ce stade de miniaturisation, la technologie ne garantit plus la stabilité des paramètres physiques. Les architectures de calcul embarquées doivent donc être repensées afin d'assurer la robustesse et la fiabilité des futurs systèmes sur puces.

Une réponse possible est **le développement des architectures parallèles** comprenant des briques élémentaires toutes capables d'effectuer des fonctions demandées par l'application et interconnectées sous forme matricielle par l'intermédiaire d'interconnexions sur silicium¹.

A plus long terme, la recherche s'oriente vers **des architectures autoadaptatives**, c'est-à-dire capables de réagir et de s'adapter à leur environnement et à leur état interne sans intervention extérieure. Ainsi, chaque puce contiendra une série de processeurs capables de renvoyer certaines opérations vers d'autres processeurs en cas de surchauffe ou de dupliquer les opérations sur plusieurs processeurs.

Les avantages attendus de ces nouvelles architectures sont nombreux :

- une augmentation de la flexibilité matérielle/logicielle ;
- une augmentation de la tolérance aux fautes puisque suite à un diagnostic, il sera possible de remplacer une brique de base par une autre ;
- une amélioration de la gestion d'énergie du circuit à travers le contrôle naturel des tensions d'alimentation et des fréquences de fonctionnement ;
- la possibilité d'adapter l'application aux usages.

¹ Ce réseau d'interconnexions permet globalement d'être asynchrone (s'affranchissant donc de processus de synchronisation global très complexe) mais localement synchrone (c'est-à-dire que chaque cœur de calcul du réseau matriciel peut fonctionner à sa propre fréquence).

III. UN SECTEUR SOUMIS AUX ENJEUX DE LA SOCIÉTÉ

Non seulement la microélectronique a envahi notre vie quotidienne, mais elle influence de manière croissante notre façon de vivre, en bien ou en mal.

Ainsi, grâce à la microélectronique, la sécurité des voitures a été améliorée et la consommation en carburant réduite. En revanche, l'incorporation de dispositifs électroniques « intelligents » et communiquant entre eux dans la plupart de nos objets quotidiens (téléphones, cartes bancaires, passes pour les transports en commun etc) n'est pas sans soulever de réels problèmes quant à la traçabilité des individus et la protection des données personnelles.

Parfois, une même application peut susciter des réactions ambivalentes. L'explosion du marché de la vidéo-surveillance¹ liée à la miniaturisation des caméras et à la chute de leur prix est justifiée par ses protagonistes par la nécessité d'assurer la sécurité des biens et des personnes alors que ses pourfendeurs l'accusent de porter atteinte à la vie privée.

Compte tenu de l'importance prise par la microélectronique dans notre environnement et des nouvelles opportunités que la poursuite des progrès technologiques dans ce secteur laisse entrevoir, la réflexion sur les finalités de ces technologies ne peut pas être laissée aux seuls scientifiques et industriels de la microélectronique, mais doit faire l'objet d'un débat public sur les potentialités et les risques liés au secteur des semiconducteurs.

A. UN SECTEUR POTENTIELLEMENT CRUCIAL POUR SURMONTER LES DÉFIS SOCIÉTAUX DU XXIÈME SIÈCLE

L'idée selon laquelle le secteur de la microélectronique est amené à jouer un rôle crucial pour surmonter les défis sociétaux du XXIème siècle semble recueillir un large consensus auprès non seulement des industriels concernés, mais également des autorités politiques européennes et nationales.

Cinq enjeux sont régulièrement cités : l'explosion des dépenses de santé ; les coûts liés au vieillissement de la population ; la maîtrise de la consommation d'énergie ; la gestion du trafic routier afin de limiter les embouteillages et les accidents de la route ; enfin toutes les mesures visant à améliorer la sécurité des biens et des personnes.

¹ Aux Royaume-Uni, on dénombre pas moins de 4,2 millions de caméras de surveillance, soit une pour 15 habitants.

1. L'explosion des dépenses de santé

Actuellement les dépenses de santé au niveau européen représentent déjà plus de 600 milliards d'euros par an, soit 9 % du PIB européen. Or, elles ont vocation à augmenter sous la double pression de l'évolution technologique et du vieillissement de la population.

Selon les informations fournies par le livre blanc du programme EUREKA CATRENE (Cluster for Application and Technology Research in Europe on NanoElectronics), en 2030, plus de 25 % de la population européenne aura plus de 60 ans. Comme les plus de 65 ans sont responsables de 60 % des dépenses de santé, les tensions observées sur les budgets européens de sécurité sociale ne peuvent qu'amplifier.

Pour contrer cette tendance à la hausse, les gouvernements sont amenés à prendre des mesures d'économie qui reportent la charge des dépenses sur les patients, ce qui pose des problèmes de solidarité nationale compte tenu de la concentration des dépenses de santé : en Belgique, 15 % de la population concentrent 80 % des remboursements.

Maîtriser les dépenses de santé tout en assurant à la population une offre de santé qui intègre les derniers progrès scientifiques exige donc de rendre le système de santé plus efficace. Dans ce cadre, la microélectronique peut jouer un rôle non négligeable.

D'abord, elle peut contribuer à **développer la prévention** en la rendant moins chère et donc abordable pour une large partie de la population, mais également plus fiable par une détection très précoce des maladies. Or, il est reconnu qu'une bonne prévention permet d'éviter des traitements curatifs coûteux. Dans son livre¹, Ted Sargent explique que les techniques d'imagerie telles que le scanner et l'imagerie par résonance magnétique (IRM) permettent de détecter des tumeurs de la taille d'un petit grain de raisin. Arrivées à ce stade, elles contiennent un milliard de cellules qui se sont divisées en plus de trente générations et ont largement eu l'occasion de se disséminer dans l'organisme. En utilisant des quantum dots² qui ne se fixent que sur les cellules humaines cancéreuses, il deviendrait possible de détecter cette maladie à partir de 10 à 100 cellules.

Le développement de la pharmacogénétique prépare ainsi la prochaine avancée majeure, à savoir le dépistage chez des sujets sains de prédispositions génétiques à certains cancers, à des maladies cardiovasculaires ou encore à d'autres affections héréditaires.

Par ailleurs, **l'utilisation de méthodes de diagnostic et de traitement peu invasives permettra de réduire les durées des séjours à l'hôpital**, ce qui constituera une source d'économie non négligeable puisque le coût d'une journée d'hospitalisation est estimé à 1.000 euros. Ainsi, le

¹ Ted Sargent : « Bienvenue dans le nanomonde », édition Quai des sciences, Dunod.

² Les quantum dots sont des nanocristaux semiconducteurs fluorescents.

traitement du cancer par ultrasons¹ associé à l'illumination des cellules cancéreuses évoquée précédemment pourrait remplacer avantageusement dans certains cas la chirurgie.

Une autre voie d'économie réside dans le développement des soins à domicile et du suivi du patient à distance. Des chercheurs ont ainsi récemment démontré que l'on pouvait stimuler la libération de médicaments par des signaux électriques issus de micropuces implantées dans le corps du patient. L'idée est de prévoir plusieurs réservoirs sur une puce contenant chacun un certain nombre de médicaments. Le contrôle de la libération peut être externe (médecin ou pharmacien), mais également interne : on peut imaginer pour les patients diabétiques, par exemple, un système de libération d'insuline autorégulé capable de détecter les concentrations de sucre dans le sang, leur changement au cours du temps et d'y réagir automatiquement par de minuscules largages d'insuline.

De même, le maintien de patients âgés dans des maisons de retraite non médicalisées serait facilité par la généralisation de la télémédecine qui permet d'éviter la présence permanente d'un médecin.

Enfin, **d'énormes gains de productivité restent à réaliser dans la gestion administrative des dossiers des patients.** Actuellement, la plupart des actes médicaux sont transcrits sous forme papier, ce qui rend leur manipulation compliquée et freine la coordination et les échanges d'informations entre les professionnels de santé, sans parler des risques de perte des dossiers non négligeables. Grâce à la microélectronique et à l'informatique, la gestion des dossiers pourrait être rationalisée, ce qui entraînerait non seulement une réduction importante des coûts administratifs, mais également une plus grande efficacité et une meilleure offre de soins.

2. Les coûts liés au vieillissement de la population

La population des 60 ans et plus représente actuellement plus de 12 millions de personnes en France, soit un peu plus de 20 % de la population totale. En 2050, elle devrait représenter 33 % de la population. Cette situation pose le **problème de la dépendance**, même s'il faut différencier l'espérance de vie dans l'absolu et l'espérance de vie en pleine santé, les gens vivant de plus en plus vieux en bonne santé. L'augmentation du nombre de personnes âgées n'entraîne ainsi pas forcément un accroissement mécanique de la proportion de personnes susceptibles de devenir dépendantes.

En outre, la dépendance reste une notion floue, ce qui implique des variations importantes dans la détermination du nombre de personnes concernées en fonction des critères retenus.

¹ Le traitement du cancer par ultrasons consiste à émettre des ultrasons convergents de haute intensité par impulsions de quelques secondes. L'énergie absorbée par les tissus provoque une élévation intense et soudaine de la température, provoquant une destruction tissulaire localisée.

Néanmoins, le nombre de personnes dépendantes, en France, est estimé entre 1,2 et 1,4 million, avec des degrés de dépendance variables allant de l'aide ponctuelle pour sortir de chez soi au besoin d'aide pour la toilette et l'habillage, jusqu'au confinement au lit ou au fauteuil.

Les personnes souffrant de dépendance lourde sont estimées entre 650.000 et 800.000 en France.

Compte tenu des coûts exorbitants liés à l'hébergement dans des établissements spécialisés et de son impact psychologique négatif sur les patients, **les acteurs publics s'efforcent de développer des solutions permettant le maintien à domicile le plus longtemps possible.** A cet égard, la microélectronique peut jouer un rôle prépondérant. Deux exemples permettront d'envisager quelques pistes, à savoir la surveillance à distance et les robots.

Beaucoup de personnes âgées quittent leur domicile sous la pression de la famille qui redoute leur isolement en cas de chute ou d'actes inconsidérés qui peuvent s'avérer dangereux pour la personne (notamment en cas de maladie d'Alzheimer ou de démence sénile). La surveillance à distance de la personne âgée encore relativement valide peut donc retarder l'entrée en établissement spécialisé. De nombreuses solutions peuvent être envisagées.

Le LETI a par exemple développé un capteur de mouvements qui consiste à utiliser des microsystèmes disposés sur le corps (qui pourraient également être installés dans des vêtements) dont on souhaite capter le mouvement. En cas de chute, ces capteurs détectent la position allongée et une alarme peut être déclenchée sur le téléphone portable d'un membre de la famille ou de l'infirmier en charge de la personne.

Afin de prendre en charge une population vieillissante, **les Japonais misent depuis plusieurs années sur le développement de robots humanoïdes d'assistance à domicile.** Même s'il n'existe pas encore aujourd'hui de vrai robot humanoïde grand public, doté de capacités cognitives et abordable financièrement, des progrès gigantesques ont été réalisés dans ce secteur.

Ainsi, le robot HRP-2 réalisé par l'Institut national pour la science et les technologies industrielles avancées (AIST) est le premier robot capable d'exécuter des mouvements complexes tels que s'allonger, se lever et chuter.

De même, une équipe du CNRS à Lyon a développé un robot qui, à partir d'un ordre donné en langage naturel, est capable de récupérer une balle, de la saisir avec sa main en se baissant, donc en donnant lui-même un ordre à ses jambes.

Les robots peuvent également intégrer des fonctions de surveillance : l'Industrial Technology Research Institute (ITRI) de Taiwan a développé des robots intelligents qui, grâce à une vision 360 degrés, peuvent détecter tout type de cas d'urgence comme de la fumée ou un début d'incendie. Une fois

ces problèmes localisés, ils émettent une alerte et envoient des images en direct au centre de contrôle.

3. L'amélioration de l'efficacité énergétique

D'ici 20 ans, la consommation d'électricité mondiale devrait doubler, renforçant davantage les tensions sur les prix. En outre, la production d'électricité contribue pour moitié aux émissions de dioxyde de carbone qui devraient croître de 55 % d'ici 2030 si aucune mesure n'est prise. Si la construction de nouvelles centrales électriques sera inévitable, la microélectronique peut apporter des solutions afin d'accroître l'efficacité énergétique sans remettre en cause le mode de vie des consommateurs.

Trois secteurs sont particulièrement concernés : l'éclairage public, le tertiaire résidentiel et les transports.

- L'éclairage public

13 % de l'électricité mondiale sont consacrés à l'éclairage des villes. En France, selon une étude du Centre d'études sur les réseaux de transport et l'urbanisme (CERTU) auprès de 800 villes françaises, 40 % des lampes pourraient être remplacées par des lampes consommant deux fois moins d'énergie pour un service identique.

Ainsi, **l'utilisation de luminaires à diodes électroluminescentes (LED)** présente des avantages non négligeables par rapport aux lampes à incandescence classiques ou fluorescentes :

- les LED consomment 6 fois moins d'énergie que les lampes à incandescence ;
- elles ont une durée de vie supérieure : 60.000 heures contre 1.000 heures ;
- elles possèdent une efficacité lumineuse 10 fois plus importante. En outre, le flux direct éclaire mieux le sol et évite la pollution lumineuse vers le ciel.

La microélectronique contribue également à mieux gérer la durée d'éclairage : les calculateurs astronomiques radio synchronisés, insensibles aux salissures, peuvent commander avec précision l'allumage et l'extinction des luminaires. Couplés à des systèmes de variation du flux lumineux permettant de baisser le niveau d'éclairage pendant la nuit, les économies réalisées peuvent s'élever à 25 %.

L'utilisation de diodes électroluminescentes pour les feux de circulation permet également de limiter la consommation d'énergie. Selon les informations obtenues par votre rapporteur, si toutes les lampes des feux

tricolores des Etats-Unis étaient remplacées par des diodes électroluminescentes, l'énergie économisée représenterait deux tranches de centrale nucléaire.

A une plus petite échelle, la ville de Grenoble s'est lancée dans le remplacement des lampes de tous ses feux de circulation par des diodes électroluminescentes. Pour un temps de retour sur investissement de 3 ans, la diminution de la puissance appelée atteint 105 kW et la ville économise annuellement 1.250 kwh d'électricité.

- Le tertiaire résidentiel

Les gaspillages d'énergie dans les bâtiments collectifs et individuels pourraient également être facilement surmontés par **l'installation de capteurs qui éteignent automatiquement les lumières, la climatisation ou le chauffage** lorsque la ou les personnes quittent la pièce.

Par ailleurs, l'utilisation de diodes électroluminescentes, voire l'introduction de diodes lumineuses organiques dans les fenêtres, les rideaux ou les murs pour illuminer les pièces contribuerait à renforcer l'efficacité énergétique pour l'éclairage des habitations.

Il convient également de rappeler que l'alimentation de la plupart des appareils électroniques pourrait se faire en basse tension alors que les réseaux d'alimentation fonctionnent actuellement en 220 ou 110 volts.

- Les transports

Les transports génèrent près d'un tiers des émissions de CO2. En outre, ils dépendent à 98 % du pétrole dont le prix est en train d'exploser (plus de 135 dollars le baril en mai 2008) et dont les réserves ne sont pas inépuisables. Une pression très forte est donc exercée sur les fabricants automobiles afin qu'ils réduisent la consommation des véhicules. Grâce à la microélectronique, des progrès énormes ont été réalisés pour améliorer l'efficacité des moteurs et selon nos collègues Christian Cabal et Claude Gatignol¹, les performances des moteurs devraient encore connaître des avancées significatives à l'avenir.

« Les progrès futurs reposent sur deux voies principales : l'amélioration des techniques actuelles et la mise au point d'un nouveau mode de combustion dit homogène.

¹ Christian Cabal et Claude Gatignol : « La voiture du futur : moins polluante et plus économe », Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques, rapport n° 125 du Sénat, pages 145 et suivantes.

L'amélioration de l'injection directe est l'une des voies privilégiées. Elle permet d'optimiser le mélange air/carburant. Elle est d'autant plus efficace que le carburant est sous pression, injecté de la manière la plus précise possible en termes de quantités et de moment.

Pendant de nombreuses années l'injection était assurée par un système mécanique lié à chaque cylindre qui assurait en même temps la mise sous pression, les quantités et le moment de l'injection n'étaient pas modulables.

Une évolution sensible a été effectuée par les systèmes d'injection électronique qui ont permis de séparer la mise sous pression de l'injection [...].

De nouveaux progrès sont attendus par une évolution importante du mode de combustion. Il s'agit de la combustion homogène HCCI (Homogeneous Charge Compression Ignition). Cette combustion consiste à la fois à réduire la consommation et à réduire les polluants, notamment les NOx. Le défi consiste à contrôler le temps d'auto-allumage, la vitesse et la température pour optimiser le mélange et la combustion. »

4. La gestion du trafic routier

Selon une étude commandée par le fabricant d'automobiles allemand BMW en 1994, le coût de la congestion du trafic en Allemagne s'élèverait à 100 milliards d'euros par an tandis que 12 milliards de litres d'essence seraient utilisés inutilement. Pour la France, ce coût est estimé actuellement à 30 milliards d'euros, soit environ 3 % du PIB.

Par ailleurs, le coût économique des accidents de la route est évalué à 200 milliards d'euros pour l'Europe et 20 milliards d'euros pour la France.

A l'avenir, le poids croissant de l'électronique dans les véhicules devrait contribuer à l'amélioration globale du trafic et de la sécurité.

- L'amélioration du trafic

Le développement de la voiture et de la route intelligentes vise à construire des réseaux de transmission de données permettant d'optimiser les déplacements. Ce dernier repose sur deux axes :

- une modélisation dynamique du réseau routier qui tient compte de l'évolution du trafic, signale les embouteillages et les travaux, avertit les automobilistes en cas d'accident ;

- une interaction permanente et directe entre le réseau et les véhicules afin d'optimiser la circulation et les trajets. Si un accident survient, par exemple, les automobilistes en amont recevront en temps réel, le cas échéant, un ordre de limitation de vitesse ainsi qu'une proposition de trajet alternatif.

Selon les industriels ayant participé à l'élaboration du livre blanc EUREKA CATRENE, 50 % des embouteillages pourraient être évités par l'introduction d'une régulation électronique du trafic.

- Le renforcement de la sécurité des véhicules

93 % des accidents sont dus à une erreur humaine. L'accroissement du trafic combiné au vieillissement de la population dont les réflexes se ralentissent sont autant de facteurs aggravants que seul un renforcement de l'automatisation de la conduite pourrait contrer.

De nombreux programmes de recherche sont lancés sur la voiture entièrement automatisée. Compte tenu de la révolution des mentalités qu'exige sa diffusion, la voiture automatisée concernera en premier lieu les transports en commun et les camions pour leurs trajets sur les autoroutes, tandis que son introduction dans les voitures individuelles se fera progressivement.

La multiplication des véhicules à conduite automatisée offrirait de nombreux avantages.

En ce qui concerne les transports en commun, les économies considérables réalisées en personnels conducteurs permettraient de développer ce type de transport dans des zones peu denses et d'accroître les horaires de fonctionnement.

En ce qui concerne les camions et les voitures, la conduite automatisée permettrait de réduire le nombre d'accidents de la route. Pour faciliter son acceptation sociale, elle pourrait être introduite progressivement et sur option du conducteur. Par exemple, elle concernerait d'abord la conduite sur autoroute et se limiterait dans un premier temps à appliquer certains paramètres de sécurité (distance de sécurité obligatoire entre deux véhicules, freinage automatique en cas de réduction de la vitesse du véhicule de devant, etc).

Selon les experts du secteur interrogé, l'automatisation de la conduite constitue certes un défi technologique considérable dans la mesure où le processus de conduite est très complexe et intègre de nombreuses capacités intellectuelles et motrices. Néanmoins, les éléments technologiques de base sont déjà réalisés ou en cours de développement tels que le GPS, les micro caméras, les protocoles de communication entre la route et le véhicule. En outre, des prototypes simplifiés ont déjà réalisé des kilométrages impressionnants sur autoroute et il existe déjà des machines de vision capables

de lire les panneaux sur la route ou encore des voitures effectuant des créneaux toutes seules.

5. Les enjeux de sécurité

L'une des premières missions de l'Etat est de garantir la sécurité de ses citoyens. Même si objectivement, nous vivons dans un monde plus sûr qu'il y a un siècle, le besoin de sécurité va croissant et ses manifestations sont multiples : il va de la sécurité élémentaire concernant l'intégrité des personnes (à savoir ne pas se faire agresser dans la rue) et des biens (comme ne pas se faire cambrioler sa maison) à la sécurité des réseaux, qu'ils soient aériens, ferroviaires, téléphoniques ou informatiques pour la transmission des données.

Compte tenu des enjeux économiques considérables mis en jeu, des sommes toujours plus colossales sont investies pour assurer la sécurité des biens, des personnes et des réseaux. La microélectronique joue un rôle prépondérant dans le développement des caméras de surveillance, des dispositifs d'accès par badge ou par biométrie, de la cryptographie, mais également des passeports et des cartes d'identité à lecture optique.

La mise en place de l'Internet des objets devrait également améliorer la sécurité.

En effet, ce dernier consiste à pourvoir chaque objet à la fois d'un identifiant unique grâce à la technologie RFID (qui remplacerait donc les codes-barres) et d'une adresse Internet¹ dans le but de permettre la communication de tous les objets entre eux. Ainsi, la machine à laver choisirait le programme le plus adapté en fonction des vêtements placés dans son tambour tandis que l'aspirateur signalerait directement au fabricant sa défaillance.

En outre, tous les objets étant identifiés individuellement, il serait possible d'assurer parfaitement leur traçabilité et notamment de suivre toute la chaîne de fabrication. Les applications envisageables sont nombreuses.

La traçabilité des biens de consommation permettrait ainsi de lutter efficacement contre la contrefaçon puisqu'il serait possible de contrôler à tout moment si l'objet en question a bien été produit par l'entreprise dont il porte la marque. Elle renforcerait également la sécurité alimentaire et faciliterait le retrait rapide de biens de consommation défectueux ou dangereux.

¹ Actuellement, c'est le protocole Internet IPv4 qui est responsable de l'interconnexion des milliers de réseaux de l'Internet mondial. Le nouveau protocole, appelé IPv6, vise à étendre l'espace d'adressage actuel devenu trop petit. Le nombre d'adresses disponibles passerait à 340 milliards puissance 4, permettant ainsi la réalisation matérielle de l'Internet des objets puisque ces derniers sont évalués à 100.000 milliards.

B. UN SECTEUR QUI SOULÈVE CERTAINES INTERROGATIONS

Les exemples précédents ont montré dans quelle mesure les technologies associées au secteur des semiconducteurs peuvent contribuer à relever les défis sociétaux des prochaines années. Néanmoins, ces mêmes technologies ne sont pas sans poser de réels problèmes en matière d'environnement et de protection des données à caractère privé.

1. Le coût écologique de l'industrie de la microélectronique

a) Une industrie très consommatrice en ressources naturelles

Non seulement la fabrication des circuits intégrés est très consommatrice en ressources naturelles, mais les applications liées à la microélectronique représentent une part non négligeable de la consommation globale d'électricité.

L'image des salles blanches aux taux d'impureté très contrôlés pourrait faire croire que l'industrie des semiconducteurs est une industrie « propre ». En réalité, les produits utilisés l'apparentent davantage à l'industrie lourde et elle s'avère très consommatrice en ressources naturelles.

Ainsi, la fab d'IBM à Fishkill qui fabrique 12.600 plaquettes par mois en 300 mm consomme 3,2 millions de m³ d'eau par an.

La fab d'Altis à Corbeil-Essonnes, qui produit 33.000 plaquettes par mois en 200 mm consomme 217 Gigawatt/h par an.

Selon la déléguée générale de l'association Vivagora¹, une puce requiert 630 fois son poids en énergie fossile et en substances chimiques tandis que la fabrication d'une clé USB exige 250 litres d'eau.

La recherche de performances toujours accrues et la multiplication des applications de la microélectronique conduisent également à utiliser un nombre croissant de matériaux, dont certains sont parfois rares.

C'est le cas de l'indium dont 50 % de la consommation est accaparée par la production d'écrans à cristaux liquides pour les écrans plats, mais également les écrans d'ordinateurs, de téléphones, d'agendas électroniques, d'appareils photos numériques, de montres, de GPS etc. La production annuelle s'élève à 480 tonnes pour des réserves mondiales estimées à 6.000 tonnes.

Par ailleurs, **les applications de la microélectronique sont très consommatrices d'énergie**. Actuellement, elles représentent 13 % de la consommation d'électricité globale, soit autant que l'éclairage des villes et les prévisions à moyen terme sont alarmantes au regard des objectifs de développement durable.

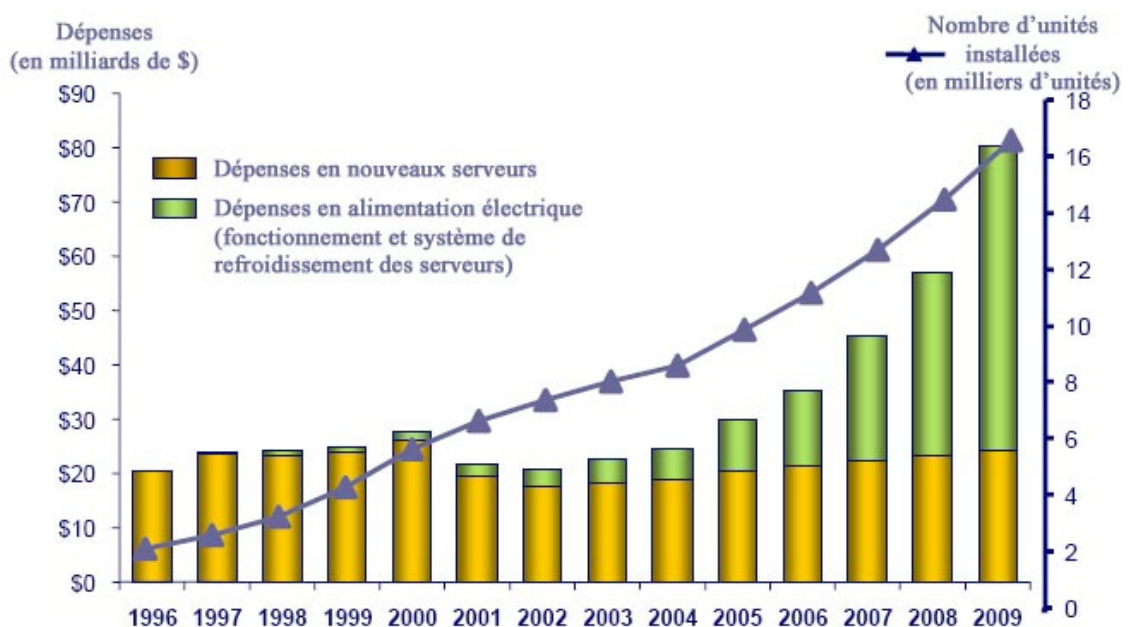
¹ Fondée en 2003, l'association Vivagora a pour but de développer une "démocratie participative" et de promouvoir une culture du débat sur les questions scientifiques et technologiques.

Le moteur de recherche Google qui gère le plus grand parc de serveurs¹ au monde avec environ 500.000 machines réparties sur plus de 32 sites de par le monde consomme 55 gigawatts/h par an, ce qui équivaut au besoin en électricité d'une ville de 45.000 habitants.

Selon les estimations d'un responsable du centre de recherche d'IBM à Almaden, la demande de stockage de données pour chaque serveur croît de 90 % par an. En outre, les fonctions des serveurs évoluent : outre la résolution d'équations différentielles, ils sont amenés à analyser une multitude de données. En conséquence, si aucune amélioration sensible n'intervenait à la fois dans le domaine des microprocesseurs, des mémoires et du stockage des données, en 2020, chaque serveur devrait posséder l'équivalent de 21 millions de disques durs pour la sauvegarde des données, occuperait une surface de près de 7.000 m² et consommerait 93 megawatts par an !

Le schéma suivant montre l'impact de l'explosion de la consommation d'énergie des serveurs (à la fois pour leur alimentation et pour leur refroidissement) dans le coût global de ces derniers. **Depuis 2008, les sommes annuelles consacrées à leur consommation électrique sont plus importantes que le coût du serveur lui-même.**

Part de la consommation énergétique dans le coût total des centres de données (marché américain)



Source : IBM

¹ Les serveurs offrent des services qui permettent, par exemple, de stocker des fichiers, transférer le courrier électronique, héberger un site Web, etc.

Une étude de Jonathan G. Kooney de l'université de Stanford de 2005 a ainsi montré que les centres de données aux Etats-Unis consommaient 45 milliards de kilowatts/h par an, soit 1,2 % de la consommation totale de l'énergie aux Etats-Unis. Cela correspond à la capacité de 5 centrales de 1.000 Megawatts.

En outre, une proportion non négligeable de l'énergie consommée par les appareils électroniques est utilisée en position de veille, ce qui constitue un gaspillage énorme. **Aux Etats-Unis, la proportion d'électricité servant à alimenter la veille des appareils est estimée à 24 % de l'électricité globale consommée par les appareils électroniques, essentiellement les télévisions, les magnétoscopes et les ordinateurs.**

Par ailleurs, le développement des mondes virtuels a un coût énergétique bien réel. Ainsi, un avatar de Second Life¹ consomme plus qu'un habitant du Brésil !

b) Une industrie fortement productrice de déchets

La « pervasion » de l'électronique pose également la question de la gestion des déchets. Selon les informations obtenues par votre rapporteur, **les déchets d'équipements électriques et électroniques atteignent entre 1,7 et 2 millions de tonnes par an pour l'ensemble des pays européens, soit 16 kg par habitant et par an.**

En outre, la quantité totale produite augmente de 4 % chaque année, soit un rythme de croissance beaucoup plus élevé que celui de l'ensemble des déchets ménagers. Or, les équipements électroniques comportent non seulement des matériaux toxiques, qui peuvent s'avérer dangereux pour l'environnement, mais également des métaux de valeur ou rares dont le recyclage constitue une véritable valeur ajoutée.

Pour limiter les dégâts provoqués par l'expansion des éléments polluants, les députés européens ont voté, en 2002, la directive 2002/95/CE sur la restriction des substances dangereuses et la directive 2002/96/ CE sur les déchets d'équipements électriques et électroniques. Elles ont été transposées tardivement dans le droit français, par un décret paru le 22 juillet 2005.

La première directive a pour objectif de limiter l'utilisation de six substances nocives dans la fabrication des équipements électroniques : le mercure, le plomb, le cadmium, le chrome hexavalent, les polybromobiphényles et les polybromodiphényléthers (des retardateurs de flamme bromés). Ainsi, chacune de ces matières ne devra représenter plus de 0,1 % de la composition d'un produit.

¹ Second Life est un monde virtuel en 3 D créé par ses résidents. Les internautes intéressés de participer à ce monde virtuel se créent un personnage (appelé avatar) dont ils organisent la vie, les rencontres etc.

La seconde directive vise à favoriser la collecte sélective des déchets électroniques, avec un objectif de récupération de 4 kg par an et par habitant. Elle oblige notamment les revendeurs à reprendre gratuitement les appareils usagés lors de l'achat d'un nouvel appareil.

**Le décret n°2005-829 du 20 juillet 2005 relatif à la composition
des équipements électriques et électroniques
et à l'élimination des déchets issus de ces équipements**

Le décret du 20 juillet 2005 fixe le cadre de la mise en place de collectes sélectives et d'un traitement adapté des déchets d'équipements électriques et électroniques et pose le principe de la responsabilité des producteurs.

Depuis le 13 août 2005, les produits mis sur le marché doivent être marqués d'un logo indiquant qu'il convient de ne pas les jeter avec les ordures ménagères.

Quatre éco-organismes ont été agréés par les pouvoirs publics suite à une large consultation des différentes parties prenantes (producteurs, distributeurs, collectivités locales, professionnels du déchet, monde associatif, représentants de l'économie sociale et solidaire). Par ailleurs, un organisme coordonnateur, la société OCAD3E, a été agréée par arrêté du 22 septembre 2006 pour assurer la compensation des coûts de la collecte sélective des déchets d'équipements électriques et électroniques supportés par les collectivités locales.

Depuis le 15 novembre 2006, les 4 éco-organismes prennent en charge, pour le compte des producteurs qui y adhèrent, l'enlèvement et le traitement des déchets d'équipements électriques et électroniques collectés sélectivement.

Les consommateurs peuvent remettre sans frais aux distributeurs un équipement usagé lors de l'achat d'un équipement neuf du même type. Des collectes sélectives se mettent également progressivement en place dans les collectivités locales.

Un an après la mise en place de la filière de collecte et de traitement des déchets d'équipements électriques et électroniques ménagers, un premier bilan a été dressé.

Le taux de collecte mensuel des déchets d'équipements électriques et électroniques a atteint 3,4 kg par an par habitant en août 2007, soit un chiffre proche de l'objectif de 4 kg fixé par la directive européenne.

Aujourd'hui, la plupart des producteurs ont adhéré à l'un des quatre éco-organismes agréés par les pouvoirs publics pour la gestion des déchets d'équipements électriques et électroniques ménagers. S'agissant de la collecte sélective de ces déchets, la reprise gratuite et obligatoire de l'ancien appareil par le distributeur lors de la vente d'un nouvel équipement représente près de 10.300 points de collecte répartis sur toute la France. En ajoutant à ces sites environ 2.000 points complémentaires de collecte sélective grâce à la contractualisation de 530 collectivités locales, **la collecte ne touche néanmoins potentiellement que 38 millions d'habitants, ce qui laisse une marge d'amélioration.**

c) Le développement de l'électronique verte

Les préoccupations des entreprises de semiconducteurs conduisent à concevoir des produits moins consommateurs d'énergie, et ce pour plusieurs raisons.

D'abord, **le développement des objets mobiles** tels que les téléphones ou les ordinateurs portables **exige une plus grande autonomie énergétique**, ce qui passe par des composants moins consommateurs d'électricité.

Ensuite, **l'augmentation de la puissance de calcul des microprocesseurs par l'élévation de leur fréquence a atteint ses limites** à cause de la chaleur dissipée par le circuit intégré qui en résulte. Intel puis ses concurrents directs ont donc dû trouver une solution permettant d'améliorer la puissance de calcul tout en limitant la consommation d'énergie : c'est ainsi que sont nés les processeurs multicœurs.

Par ailleurs, la rareté et la cherté de certains matériaux utilisés dans les équipements électriques et électroniques sont autant d'arguments convaincants pour le recyclage des déchets.

Enfin, les industriels de la microélectronique ont désormais pris conscience des potentialités énormes du marché de « l'électronique verte ».

Philips, spécialisé dans la santé, l'éclairage et les produits grande consommation, a été l'une des premières entreprises à faire du développement durable un élément clé de sa stratégie commerciale. Dans son programme « EcoVision 4 » de 2007, il s'est ainsi engagé à :

- générer 30 % de ses revenus totaux à partir de produits « verts » sur les cinq prochaines années (contre 15 % en 2006) ;
- doubler ses investissements dans les innovations « vertes » pour atteindre 1 milliard d'euros en 2012 ;
- augmenter l'efficacité énergétique de ses produits de 25 % d'ici 2012.

De même, Fujitsu Siemens insiste sur le fait que les serveurs qu'il produit consomment globalement 21 % d'énergie en moins que ceux de ses concurrents américains.

Par ailleurs, il n'est pas anodin que le Cebit, qui est le plus grand salon de l'industrie numérique au monde, ait consacré en 2008 un hall d'exposition à « l'électronique verte ». Etaient ainsi présentés les produits à faible teneur en produits toxiques, ceux particulièrement peu consommateurs d'énergie lors de leur fonctionnement et en standby ainsi que la manière dont les technologies de l'information pourront contribuer à économiser l'énergie dans les autres branches.

Au niveau de la fabrication des circuits intégrés, d'importants efforts sont réalisés pour réduire la quantité des consommables utilisés. Le tableau suivant illustre cette tendance qui permet de réduire l'impact de l'industrie de la microélectronique sur l'environnement tout en réduisant les coûts de production.

**Evolution en quantités des consommables pour
la fabrication de circuits intégrés sur le site de Corbeil-Essonnes d'Altis**

		consommation annuelle 2007	efforts réalisés	efforts planifiés pour 2008	moyens mis en œuvre
consommation de type "utilities"	electricité	217 GWh (unité de fabrication)	réduction moyenne de 2,5% par an de 2002 à 2007	objectif : 5%	optimisation des cycles de traitements de l'air (salles blanches), productivité des procédés de fabrication
	eau	2 millions de m3	réduction moyenne de 10% par an de 2002 à 2007	objectif : 10%	ségrégation des rejets pour recyclage et productivité des outils de fabrication
	azote	40 millions de Nm3	réduction moyenne de 5% par an, et réduction de la part de gaz ultra pur de 2002 à 2007	objectif : 5%	productivité des proc de fabrication, assainissement des réseaux
produits chimiques pour la désionisation de l'eau et le traitement des rejets)	CaO (chaux)	840 t	réduction moyenne de 4% par an de 2000 à 2007	objectif : 5%	productivité des procédés de fabrication
	HCl	570 t	réduction moyenne de 12% par an de 2003 à 2007	objectif : 10%	productivité des procédés de fabrication
principaux produits pour le procédé de fabrication (>100 t/an)	H2SO4	540 t	forte dépendance du type de produits fabriqués, productivité à l'unité de 5% par an	mis en œuvre au travers des programmes de réduction des coûts de fabrication (10 à 20% par an selon les procédés)	productivité des procédés de fabrication
	H2O2	410 t	3% en 2007		productivité des procédés de fabrication
	PGMEA (solvant organique)	310 t	réduction moyenne de 6% par an de 2003 à 2007		productivité des outils et des procédés de fabrication

Source : Altis

*d) Une industrie concernée par les risques sanitaires et
environnementaux liés au développement des nanomatériaux*

Depuis toujours, les hommes vivent en permanence dans une atmosphère chargée de nanoparticules : nanoparticules d'origine naturelle (poussières de sable, poussières émises lors d'incendies ou d'éruptions volcaniques) ou nanoparticules liées à des activités humaines (feux de bois, condensation de gaz d'échappement des véhicules à moteur). Ainsi, que ce soit en milieu rural ou en milieu urbain, chaque litre d'air que nous inspirons comprend plusieurs millions de nanoparticules.

On connaît depuis longtemps les maladies pulmonaires provoquées par l'inhalation de poussières de taille micrométrique, notamment en milieu professionnel : pneumoconioses, cancers bronco-pulmonaires ou de la plèvre. Certaines poussières ont ainsi une toxicité bien démontrée : poussières de fer, de béryllium, de charbon, de silice ou d'amiante.

Depuis une dizaine d'années, les données issues de l'épidémiologie environnementale et de la toxicologie expérimentale permettent de penser que les particules ultrafines (de taille nanométrique), pourraient, en raison même de leur dimension nanométrique, avoir une toxicité spécifique et qu'il pourrait en être de même pour les nanoparticules manufacturées.

Les prévisions, pour les années à venir, d'une forte croissance de la recherche et des applications industrielles dans le domaine des nanomatériaux, s'accompagnent ainsi d'une **crainte que ces matériaux puissent se révéler dangereux pour la santé, en premier lieu pour les travailleurs employés dans ces activités, mais également pour la population générale.**

Outre leurs conséquences néfastes sur la population en cas d'exposition, **les nanomatériaux peuvent s'avérer toxiques pour l'environnement.**

Le 7 novembre 2006, l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques avait organisé une journée d'auditions publiques sur « les nanotechnologies : risques potentiels, enjeux éthiques ».

Il était alors apparu que le secteur des semiconducteurs est relativement peu exposé aux risques liés aux nanoparticules.

Les technologies de la microélectronique les plus avancées utilisent des nanomatériaux sous forme de nanoparticules, de nanofils et de nanotubes. Néanmoins, ces nanomatériaux, contrairement à ceux qui figurent dans les produits cosmétiques, les pneumatiques ou les revêtements de béton, ne sont pas en contact direct avec la population ou l'environnement dans la mesure où ils sont « attachés » à une surface ou encapsulés dans d'autres couches de métal. En outre, les composants microélectroniques sont *in fine* conditionnés dans des boîtiers.

Seules les opérations de dépôt, de maintenance des équipements de dépôt et certaines opérations de caractérisation en cours de fabrication peuvent comporter un risque pour les opérateurs.

Le secteur le plus concerné est aujourd'hui celui de la recherche car très peu de matériaux sont utilisés par l'industrie des semiconducteurs pour la fabrication des dispositifs.

Néanmoins, l'utilisation des nanomatériaux dans la microélectronique ayant vocation à se diffuser, il faut s'interroger dès maintenant sur les moyens pour protéger les salariés susceptibles d'être en contact avec les nanoparticules et s'intéresser au devenir de ces

matériaux dans les produits électroniques arrivant en fin de vie dans la mesure où leur recyclage est encore très partiel.

Lors de sa visite du laboratoire de physique des solides à Orsay, une chercheuse a ainsi attiré l'attention de votre rapporteur sur les mesures de précaution prises récemment par le laboratoire. Dans la mesure où ce dernier propose à des étudiants une série de travaux pratiques permettant de fabriquer des nanotubes de carbone, le laboratoire a fait installer une cabine en verre pour isoler l'appareil utilisé et éviter la dissémination de nanoparticules lors des expérimentations.

Si l'initiative mérite d'être saluée, elle apparaît relativement artisanale. Une réflexion plus globale est indispensable, qui viserait à protéger de manière efficace l'ensemble des chercheurs, des étudiants et des salariés travaillant sur les nanomatériaux.

Dans le courant du mois de juin 2008, l'AFSSET¹ devrait rendre un rapport sur les nanomatériaux et la sécurité au travail dans lequel elle propose un guide de bonne conduite et dresse un bilan des pratiques des autres pays. Dans ce rapport, elle dresse également un bilan très détaillé des personnels potentiellement exposés en France tant pour l'industrie que pour la recherche.

Il convient cependant de noter que de nombreuses initiatives existent déjà, que ce soit au niveau national ou au niveau européen, pour d'une part mesurer les risques de toxicologie des nanoparticules, et, d'autre part, prendre des mesures de protection afin de protéger les salariés soumis à une exposition directe.

Dans le domaine de la recherche sur la toxicité des nanoparticules, les exemples suivants témoignent de la diversité des initiatives prises.

Ainsi, l'Institut National de l'Environnement industriel et des Risques (INERIS) mène différents travaux pour évaluer la toxicité et le devenir dans l'organisme de nanotubes de carbone et de nanoparticules diverses.

Par ailleurs, l'Agence nationale de la Recherche (ANR) finance plusieurs programmes visant à analyser la toxicité des nanoparticules. Par exemple, le programme RespiNtox vise à mettre au point un système d'inhalation des nanotubes de carbone destiné à se placer au plus près des conditions réelles d'exposition. Quant au programme Nanotox, il vise à mesurer l'impact d'une exposition à des nanoparticules carbonées sur des animaux présentant une pathologie respiratoire de type allergique.

Au niveau européen, le programme Nanosafe sur l'évaluation et la prévention des risques associés aux nanomatériaux est piloté par le CEA depuis 2005 et rassemble 25 partenaires pour un budget total de 12 millions d'euros.

¹ AFSSET : agence française de sécurité sanitaire de l'environnement et du travail

Plusieurs mesures sont également prises en matière de prévention et de formation du personnel aux risques liés aux nanomatériaux.

Au LETI et au LITEN par exemple, le personnel en contact avec les nanomatériaux a été identifié et bénéficie d'un suivi médical particulier. Par ailleurs, les équipements de dépôt ont été répertoriés et placés sous des hottes aspirantes.

De son côté, la Commission européenne a émis une recommandation le 7 février dernier concernant un code de bonne conduite pour une recherche responsable en nanosciences et nanotechnologies.

Globalement, les chercheurs paraissent sensibilisés au risque potentiel des nanomatériaux. Il convient désormais de s'assurer que suffisamment de crédits sont débloqués pour réaliser des études toxicologiques de qualité afin d'évaluer les risques liés aux nanoparticules, pour soutenir les actions de prévention et de formation autour de ces risques et pour encourager une information responsable de la population.

2. La protection des données à caractère personnel

Parce que l'informatique permet un traitement massif des données et leur recoupement, elle est susceptible de porter atteinte au respect de la vie privée et de violer les libertés individuelles.

a) Le principe du développement de l'informatique dans le respect de la vie privée et des libertés individuelles

En France, la révélation par la presse, dans les années 70, d'un projet gouvernemental tendant à identifier chaque citoyen par un numéro et d'interconnecter, via ce numéro, tous les fichiers de l'administration créa une vive émotion dans l'opinion publique.

Ce projet, connu sous le nom de SAFARI, soulignait les dangers de certaines utilisations de l'informatique et faisait craindre un fichage général de la population.

Cette inquiétude conduisit au vote de la loi du 6 janvier 1978 modifiée le 6 août 2004 relative à l'informatique, aux fichiers et aux libertés : **la commission nationale de l'informatique et des libertés (CNIL) fut créée visant à s'assurer que le traitement des données à caractère personnel se faisait dans le respect de la vie privée ainsi que des libertés individuelles et publiques.**

L'article 2 de la loi définit précisément les données à caractère personnel et la façon dont il convient de procéder pour décider du caractère identifiable ou non d'une personne.

Il dispose que *« constitue une donnée à caractère personnel toute information relative à une personne physique identifiée ou qui peut être identifiée, directement ou indirectement, par référence à un numéro d'identification ou à un ou plusieurs éléments qui lui sont propres. Pour déterminer si une personne est identifiable, il convient de considérer l'ensemble des moyens en vue de permettre son identification dont dispose ou auxquels peut avoir accès le responsable du traitement ou tout autre personne. »*.

Par ailleurs, les articles 6 et suivants fixent les principes que doit respecter tout traitement de données à caractère personnel pour être licite.

D'abord, **les données doivent être collectées et traitées de manière loyale et licite**. Concrètement, cela signifie que sauf pour des raisons explicites mentionnées par la loi, le recueil des données personnelles doit se faire avec le consentement de la personne concernée.

Dans son rapport d'activité de 2006, la commission nationale de l'informatique et des libertés rappelle que la presse américaine a révélé le 23 juin 2006 l'existence d'un programme de surveillance de la finance internationale mis en place par la CIA depuis les attentats du 11 septembre 2001. **Ces révélations ont notamment porté sur le fait que la CIA et le département du Trésor américain bénéficiaient d'un accès, depuis des années, à des millions de données transitant par SWIFT¹** (Society for Worldwide Interbank Telecommunication), principal réseau international de messagerie utilisé dans le domaine bancaire.

Cette surveillance, que les autorités américaines et SWIFT déclarent ne viser que la poursuite d'objectifs liés à la lutte contre le financement du terrorisme, concerne non seulement des transferts financiers vers les États-Unis, mais également tous les autres types de transactions réalisés par SWIFT, y compris à l'intérieur de l'Union européenne.

Cette surveillance a été réalisée sans information préalable des autorités publiques européennes ou nationales et hors du cadre légal de coopération normalement établi à ces fins, alors que les craintes d'utilisation à d'autres fins, moins sécuritaires et plus économiques, ne peuvent être éludées.

Le Groupe de l'article 29 (Groupe de coordination des CNIL européennes) dans son avis de novembre 2006, a jugé que la société SWIFT n'avait pas respecté les règles européennes de protection des données, notamment en prêtant son concours à la mise en œuvre du programme de surveillance des données bancaires et financières par les autorités américaines.

¹ SWIFT est une société coopérative de droit belge fondée en 1973, qui offre à ses clients des services bancaires et financiers un ensemble de services, dont un système de messagerie sécurisée et standardisée assorti d'une palette de services financiers. Une grande partie des transferts bancaires internationaux transite aujourd'hui par cette société, dont les services sont devenus incontournables pour les milieux concernés.

Depuis, la Commission européenne et le Conseil ont négocié avec le gouvernement américain un certain nombre de garanties afin de définir les règles d'usage des données stockées aux États-Unis dans la base SWIFT par les autorités américaines. Ces garanties concernent la limitation des usages à la lutte contre le terrorisme, le respect du principe de nécessité, des durées de conservation de cinq ans et la nomination d'une « personnalité européenne éminente » ayant compétence pour vérifier le bon fonctionnement du programme de surveillance (actuellement, c'est le juge Jean-Louis Bruguière qui occupe cette fonction).

La loi du 6 août 1978 prévoit également que **les données doivent être collectées pour des finalités déterminées, explicites et légitimes**. La CNIL s'assure ainsi que les finalités d'un fichier établi ne soient pas modifiées ou étendues au fil du temps.

Par ailleurs, **les données doivent être adéquates, pertinentes et non excessives au regard des finalités pour lesquelles elles sont collectées** et de leurs traitements ultérieurs. C'est le principe de proportionnalité que l'exemple suivant permettra de mieux comprendre.

Les progrès conjugués de la microélectronique et de la médecine permettent l'utilisation massive de la technologie RFID, y compris pour le marquage des personnes, par l'utilisation de bracelets ou même d'implants. Un tel marquage des individus constitue une atteinte manifeste du respect de la vie privée.

Néanmoins, son utilisation peut s'avérer particulièrement utile dans certaines situations. Il revient donc à la CNIL d'analyser au cas par cas les demandes d'implantation et de s'assurer que l'atteinte aux libertés individuelles n'est pas démesurée par rapport aux avantages liés à l'implantation d'un RFID.

Ainsi, la CNIL pourrait adopter une position favorable lorsque le but recherché est le suivi de personnes vulnérables ayant des symptômes tels qu'on puisse être amené à avoir besoin de les localiser (utilisation d'un bracelet RFID pour le suivi de malades d'Alzheimer par exemple).

En revanche, elle rejetterait la demande d'une discothèque qui souhaitait proposer à ses clients l'implantation d'un RFID afin de pouvoir entrer plus rapidement dans le bâtiment ou pour payer leurs consommations¹.

Les données à caractère personnel doivent également être conservées pendant une durée qui n'excède par la durée nécessaire aux finalités pour lesquelles elles sont collectées et traitées.

Enfin, toute personne physique a le droit de s'opposer, pour des motifs légitimes, à ce que les données à caractère personnel le concernant

¹ La CNIL n'a pas eu à se saisir de ce cas, mais il s'agit d'un cas réel évoqué par le président de la CNIL devant votre rapporteur : ce type de dispositif a été mis en place par une discothèque en Espagne.

fassent l'objet d'un traitement¹. Elle a également un **droit d'accès aux données** contenues dans les traitements les concernant.

b) Un principe de plus en plus fragilisé par l'amélioration et la diffusion des technologies de marquage et de traçabilité

Néanmoins, les progrès techniques réalisés par la microélectronique en matière de capacités de traitement de l'information (étiquettes, lecteurs, réseaux de communication électronique, intelligence logicielle), la diffusion massive de la microélectronique dans nos objets quotidiens, la multiplication des objets communicants et le développement de technologies de traçage invisibles associés au manque de sensibilisation des citoyens rendent la défense de la vie privée de plus en plus difficile face aux capacités technologiques intrusives de la microélectronique.

- La « pervasion » de la microélectronique

La « pervasion » de la microélectronique contribue à multiplier les possibilités de traçage des individus. En effet, la plupart de nos objets quotidiens contiennent de la microélectronique, ce qui nous conduit à « laisser des traces » plus ou moins volontairement. C'est le cas lorsque nous utilisons toute carte dotée d'un « smart system » (carte bancaire, carte de fidélité, carte vitale), un passe pour les transports en commun, un badge d'accès à notre lieu de travail, mais également Internet ou notre téléphone portable même lorsqu'il est en position de veille.

- La multiplication des objets communicants

Le développement des objets « intelligents » capables de communiquer entre eux sans intervention humaine explicite peut s'avérer également très intrusif et constituer une réelle atteinte à la vie privée et à la tranquillité de l'utilisateur. La banalisation du GPS dans les téléphones portables qui permet de localiser très précisément son propriétaire et l'équipement systématique de ces derniers d'une interface « Bluetooth » qui autorise la communication avec d'autres objets et infrastructures dotés de cette interface vont faire de l'utilisateur du téléphone portable la cible privilégiée d'un grand nombre d'intervenants qui chercheront à lui offrir des services personnalisés en fonction de sa localisation.

Se posent alors non seulement la question du consentement de l'utilisateur, mais également celle du contrôle de ses allers et venues dans la mesure où sa localisation peut être mesurée très fréquemment.

¹ Sauf lorsque le traitement répond à une obligation légale ou lorsque l'application de ces dispositions a été écartée par une disposition expresse de l'acte autorisant le traitement.

- Le développement de technologies de marquage et de traçabilité invisibles

Comme il a été indiqué précédemment, les puces d'identification par radiofréquence (RFID) permettent de doter tout objet d'un code d'identification qui peut être lu par une machine. Elles ressemblent donc aux code-barres tout en présentant deux avantages supplémentaires.

D'une part, elles peuvent être lues à distance, voire effectuer des traitements de données, alors que les codes-barres doivent passer devant une fenêtre de lecture ou être scannés par un lecteur mobile.

D'autre part, leurs capacités de stockage des informations sont telles qu'elles permettent notamment d'attacher à chaque objet son numéro de série de fabrication¹ et donc de le repérer de manière singulière, ce qui n'est pas le cas pour les codes-barres.

Jusqu'à présent, les RFID servent essentiellement à la gestion des stocks des chaînes de production ou des éleveurs (marquage des animaux) ou facilitent le contrôle d'accès dans les transports ou les bâtiments.

Néanmoins, la réduction constante de leur taille entraîne une diminution des coûts qui facilite la massification du phénomène. **Les RFID devraient représenter un marché de 7,26 milliards de dollars en 2008 et atteindre, à l'horizon 2016, la somme de 26,2 milliards de dollars.**

Par ailleurs, les possibilités de communications entre puces RFID et autres composants électroniques seront multipliées quand l'Internet des objets deviendra une réalité ; plus de 100.000 milliards d'étiquettes RFID pourraient alors être déployées, si tous les objets étaient dotés d'une puce RFID.

Une telle « pervasion » des RFID associée à leur quasi-invisibilité ne sera pas sans poser la question de la traçabilité et du fichage des individus.

Comme le fait remarquer Mme Stéphanie Lacour, chargée de recherche au CNRS, *« il faut bien se garder de se fier à l'apparente insignifiance des données contenues dans les RFID et à l'apparente priorité donnée aux objets. Les étiquettes RFID permettent, par leur multitude et la densité du maillage qui entoure une personne, de tracer un profil pouvant être analysé quasiment en permanence. »*.

Au cours de son audition, l'ancien commissaire du gouvernement auprès de la CNIL, Monsieur Philippe Lemoine, a fait remarquer que chaque individu était caractérisé par environ 2.000 à 3.000 objets propres.

C'est la raison pour laquelle la CNIL considère les étiquettes RFID comme des données à caractère personnel au sens de la loi de 1978, même si elle sera amenée à nuancer les effets de cette qualification au cas par cas à l'avenir, en mettant en place des normes simplifiées de déclaration ou même

¹ ainsi que de nombreuses autres informations, selon les types d'étiquettes utilisées

des dispenses pour les traitements opérés par l'intermédiaire de système RFID qui ne risquent pas de porter atteinte aux valeurs qu'elle protège.

- L'indifférence des citoyens

Néanmoins, l'équilibre entre les progrès de la microélectronique et de l'informatique d'une part et les libertés publiques d'autre part semble de plus en plus difficile à maintenir.

D'abord, **le droit est bousculé par l'accélération constante des progrès techniques** et peut énoncer des règles parfois difficilement applicables dans les faits. En ce qui concerne les RFID, le respect de l'obligation de collecter et de traiter les données de manière loyale et licite conduit à informer les usagers que les objets qu'ils achètent sont porteurs d'une RFID. Or la communication par RFID est sans contact et peut s'effectuer à l'insu des personnes puisqu'elle ne nécessite, pour son activation, aucune participation des personnes portant les objets étiquetés.

En outre, **la globalisation tend à mettre le droit devant le fait accompli dans la mesure où les technologies sont diffusées de plus en plus rapidement et sur l'ensemble de la planète.**

En théorie, l'existence d'une technologie ne devrait pas empêcher de réfléchir à son usage. Toutefois, nos concitoyens et en particulier les jeunes générations, n'ont pas conscience d'être titulaires d'un droit fondamental à la protection des données. **La plupart des sondages montre une confusion chez les personnes interrogées entre la possibilité de cacher une attitude répréhensible et le droit au respect de sa vie privée.** Or ce n'est pas parce qu'on n'a rien à se reprocher qu'on doit accepter d'être tracé sans avoir au préalable donné son accord, voire sans même en avoir conscience.

Par ailleurs, l'indifférence des citoyens concourt à satisfaire à la fois les intérêts de l'Etat, qui tend à privilégier les préoccupations sécuritaires au détriment des libertés individuelles, et ceux des entreprises pour lesquelles les données personnelles représentent une valeur marchande considérable.

Ces dernières sont d'ailleurs capables de consacrer à leur stratégie marketing des moyens financiers énormes par rapport aux moyens d'information et de sensibilisation dont dispose la CNIL.

Elles mettent donc en avant les avantages résultant du traçage des usagers sans bien entendu utiliser ce terme. Ainsi sera vantée la possibilité de recevoir la liste des restaurants ou des cinémas du quartier dans lequel le propriétaire du téléphone portable se trouve ou encore l'opportunité de voir le coût de ses communications diminué s'il accepte de recevoir des publicités personnalisées ou d'être sollicité par des affiches « intelligentes ».

IV. L'INDUSTRIE DE LA MICROÉLECTRONIQUE EUROPÉENNE : UNE INDUSTRIE EN PÉRIL ?

L'année 2007 a été relativement maussade pour une grande partie de la microélectronique en Europe puisque **les résultats financiers de nombreuses entreprises européennes ou fortement implantées en Europe ont été décevants.**

La société allemande Qimonda a ainsi enregistré une perte de 249 millions d'euros pour l'exercice 2007, entraînant dans sa chute Infineon qui détient 77 % des actions de Qimonda. Quant à AMD, société américaine fortement implantée à Dresde, elle a subi une perte record de 1,77 milliard de dollars pour l'exercice 2007 après une perte de 574 millions de dollars en 2006. STMicroelectronics et NXP ont également essuyé une perte respectivement de 477 millions de dollars et de 495 millions de dollars.

Par ailleurs, l'industrie de la microélectronique en Europe a connu de profonds bouleversements en 2007 et au début de l'année 2008.

D'abord, **l'alliance entre STMicroelectronics, NXP et Freescale n'a pas été renouvelée**, ce qui a soulevé de nombreuses interrogations sur la pérennité du site de Crolles et a obligé STMicroelectronics et le LETI (Laboratoire d'Electronique et de Technologies de l'Information), également très engagé dans l'alliance, à complètement se repositionner en orientant davantage leur stratégie vers les applications tout en gardant une certaine maîtrise de la technologie.

Par ailleurs, **des rumeurs circulent sur l'avenir d'AMD à Dresde.** D'une part, cette entreprise rencontre d'importantes difficultés financières. D'autre part, le choix de l'implantation de sa nouvelle usine soulève des interrogations : alors que la région de Saxe ne peut plus offrir un taux de subvention de 33 % de l'investissement (comme cela avait été le cas lors de l'implantation d'AMD à Dresde en 1996), l'Etat de New-York offre une aide d'un milliard de dollars pour la construction de la nouvelle unité de production d'AMD sur son territoire.

Enfin, **NXP est devenu faibles** sous la pression de ses actionnaires tandis que de nombreuses rumeurs courent sur le rachat d'Infineon par Intel ou Samsung. Récemment, le président du conseil d'administration d'Infineon a démissionné.

Il serait abusif de chercher un lien de cause à effet entre ces différents événements. Néanmoins, ils affaiblissent concomitamment deux sites emblématiques de la microélectronique européenne : Crolles avec le départ de NXP et de Freescale ainsi que Dresde au travers des difficultés que rencontrent AMD et Qimonda, deux entreprises fondamentales dans l'écosystème saxon.

Afin de pouvoir porter un regard pertinent sur la situation de la microélectronique en Europe, il convient de s'arrêter sur les données du marché mondial de la microélectronique. Par ailleurs, il semble indispensable d'analyser en profondeur les modèles asiatique et américain afin de pouvoir les comparer au modèle européen.

A. LES DONNÉES DU MARCHÉ MONDIAL

1. Une demande tirée par les pays asiatiques

Selon les informations obtenues du SITELESC (Syndicat des Industries de Tubes ELelectroniques et SemiConducteurs), **les ventes de semiconducteurs aux Etats de l'Asie Pacifique en 2007 se sont élevées à 123,5 milliards de dollars, ce qui correspond à 48,3 % des ventes globales et à une croissance de 6 % par rapport à 2006.**

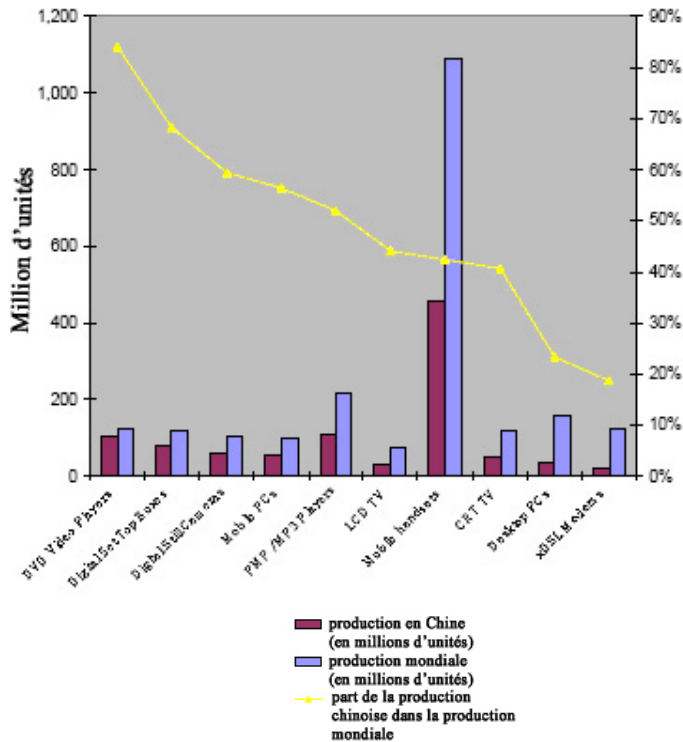
Le reste des ventes se partagent relativement équitablement entre le Japon (19 % des ventes globales), l'Amérique (16,5 %) et l'Europe (16 %).

La prépondérance de l'Asie dans l'achat de semiconducteurs s'explique par le fait qu'elle est la région principalement productrice de produits électroniques.

L'exemple de la Chine illustre ce phénomène.

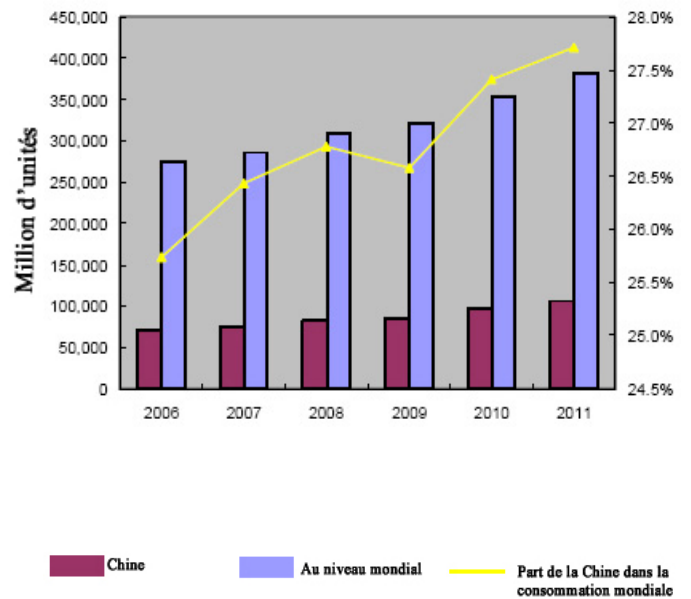
Les schémas suivants représentant d'une part la part de la production d'équipements électroniques de la Chine dans la production mondiale et, d'autre part, la part de la demande chinoise en semiconducteurs dans la demande mondiale sont révélateurs.

Production globale et chinoise des principaux produits électroniques en 2007



Source : iSuppli Corporation, Roth Capital Partners

Prévisions de consommation de produits semiconducteurs en Chine et au niveau mondial



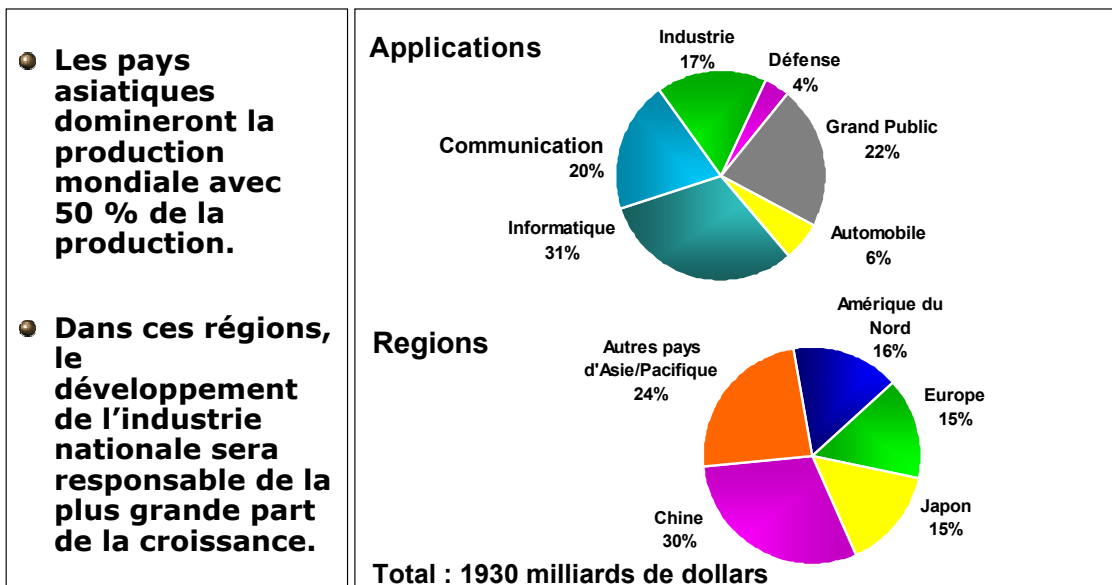
Source : iSuppli Corporation

En 2007, la Chine a produit 80 % des lecteurs de DVD, 60 % des caméras numériques, 55 % des ordinateurs portables et des lecteurs MP3 de la planète.

Parallèlement, la demande chinoise en semiconducteurs a représenté 26,4 % de la demande mondiale, en croissance de 6,9 % par rapport à 2006. Elle devrait atteindre 27,7 % en 2011.

En 2012, la Chine devrait représenter 30 % de la production en équipement électronique.

Structure de la production des équipements électroniques en 2012



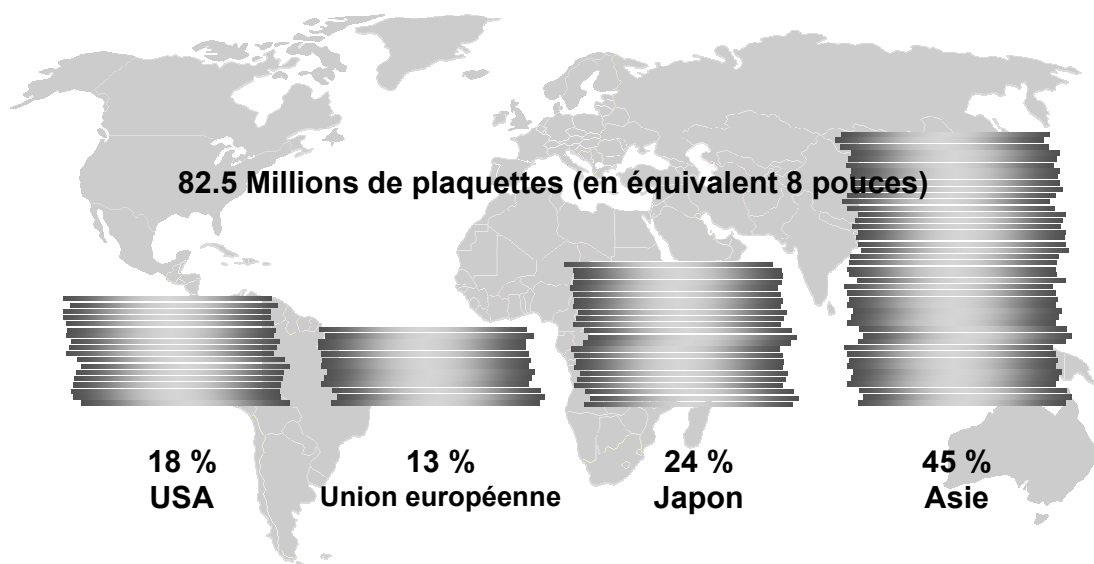
Source : STMicroelectronics

Le fait qu'une grande partie des semiconducteurs soit destinée à la production de produits électroniques destinés au marché global pose néanmoins la question de la demande finale de semiconducteurs.

Selon une étude que le CEA a faite réaliser en 2007 sur le secteur des semiconducteurs en Chine, **64 % des semiconducteurs consommés en Chine y sont assemblés et revendus en produits finis à l'export.** Pour mieux appréhender la demande finale de semiconducteurs, il serait donc intéressant de disposer de statistiques sur les ventes de produits électroniques par région. Malheureusement, il semblerait que ce genre de statistique n'existe pas.

2. Une production localisée principalement en Asie

La production de semiconducteurs



Source : ZVEI

Actuellement, **45 % de la production de semiconducteurs est effectuée en Asie du Sud-Est** contre 24 % au Japon, 18 % aux Etats-Unis et 13 % en Europe.

En 2007, 41,68 milliards de dollars ont été investis dans des capacités de production, dont 7,6 % en Europe, 16 % aux Etats-Unis et 47,2 % en Asie du Sud-Est.

A moyen terme, la domination asiatique devrait s'accroître.

Selon le World Semiconductor Trade Statistics, la construction de 74 fabs supplémentaires serait prévue en Asie pour les prochaines années, contre seulement 6 en Europe.

Lorsque votre rapporteur a rencontré le directeur général du bureau du développement industriel (Industrial Development Bureau)¹ à Taiwan, celui-ci a fait remarquer que **5 nouvelles fonderies étaient en construction et que la construction de 14 nouvelles usines de production était prévue pour les 10 prochaines années.**

¹ Ce bureau est chargé de coordonner la politique de développement industriel pour le compte du ministère de l'économie.

B. LE VOLONTARISME ASIATIQUE : TROIS EXEMPLES

Lorsque votre rapporteur s'est rendu en Asie, il a été frappé de constater qu'au-delà des diversités économiques, démographiques et politiques de ces pays, **il existe un « modèle » asiatique caractérisé par une politique industrielle volontariste assortie de moyens financiers considérables.**

1. Singapour

a) Les chiffres clés

En 2007, la croissance économique de Singapour s'est élevée à 7,5 %.

L'industrie représente 27 % du produit intérieur brut, l'électronique 29,5 % de la production industrielle globale et les semiconducteurs 48 % de la production électronique.

Le secteur des semiconducteurs compte 14 usines de production, 20 usines de test et d'assemblage et 40 centres de design regroupant 1.000 designers. Il emploie 40.000 personnes.

Avec 10 % des parts de marché mondiales pour la production de semiconducteurs, la ville-Etat de Singapour (4,5 millions d'habitants) est le **6ème pays producteur de composants électroniques.**

b) La stratégie de Singapour

Si Singapour est une place financière et portuaire de premier plan, l'industrie reste un pilier important de l'économie. D'une industrie « low-cost » dans les années 60, le gouvernement singapourien a su faire évoluer Singapour vers une industrie à forte valeur ajoutée pour que le pays reste compétitif par rapport à ses voisins du Sud-Est asiatique.

En 2005, le gouvernement a lancé un programme visant à doubler le chiffre d'affaires et la valeur ajoutée de son secteur industriel d'ici 2018.

Pour atteindre cet objectif, le gouvernement a pris des mesures concrètes visant à optimiser ses infrastructures, à augmenter la présence locale de multinationales, à promouvoir le savoir-faire et l'innovation, à porter les dépenses de R&D de 2 à 3 % du PIB et à mettre l'accent sur des secteurs niches à fort potentiel.

- Augmenter la présence locale des multinationales

L'économie singapourienne est largement dominée par la présence de multinationales. En effet, Singapour s'est très tôt positionné comme **porte d'entrée sur l'Asie du Sud-Est et la Chine pour l'Occident grâce à la langue anglaise largement utilisée.**

En outre, la ville-Etat a mis en place une politique très attractive pour l'implantation de compagnies étrangères fondée sur :

- une protection très stricte de la propriété intellectuelle ;
- des infrastructures et des services de logistiques de grande qualité ;
- une politique efficace d'incitation aux investissements gérée par le conseil du développement économique (Economic Development Board). Ainsi, le dirigeant de SOITEC a souligné l'absence de lourdeurs administratives, la disponibilité de terrains viabilisés et la rapidité avec laquelle le projet d'implantation peut être finalisé.

En outre, la qualification de l'entreprise susceptible de s'implanter comme « entreprise pionnière »¹ s'accompagne d'incitations et de subventions importantes.

D'abord, le terrain est loué pour une somme symbolique.

Ensuite, les entreprises ne sont pas soumises à l'imposition sur les bénéfices pendant une longue période².

Enfin, le projet d'investissement est financé pour une partie non négligeable par le conseil du développement économique à travers une aide correspondant à 30 % des investissements et 50 % des frais liés à la formation de la main-d'œuvre (notion très large qui recouvre tous les coûts de salaires, les voyages etc).

- Promouvoir le savoir-faire et l'innovation

Depuis une quinzaine d'années, Singapour axe sa stratégie de développement économique sur des dépenses toujours plus grandes en matière de recherche scientifique et de formation. Le nombre de chercheurs pour 10.000 habitants est passé de 55 en 1990 à 79 en 2003³.

Le dernier plan gouvernemental en matière de recherche, qui s'étend jusqu'en 2010, établit une relation claire entre la croissance économique et l'innovation d'une part et les dépenses de R&D d'autre part. Il définit **cinq priorités** :

- **augmenter les moyens consacrés à la recherche.** Ainsi, Singapour a prévu de doubler son budget de la recherche entre 2006 et 2012 (soit un budget de 7,5 milliards d'euros en 2012) ;

¹ Il semblerait que toutes les entreprises dans les secteurs de haute technologie puissent bénéficier de cette qualification.

² Si les dirigeants d'entreprise interrogés n'ont pas voulu donner de réponse précise, il semblerait que la période d'exonération atteigne au moins 15 ans, sinon plus. Ensuite, le taux d'imposition resterait très inférieur au taux d'imposition « officiel » présenté par les autorités, soit 18 %. Il s'agit de règles non écrites, qui sont fixées entre le conseil du développement économique et l'entreprise désireuse de s'implanter à Singapour.

³ En France, le ratio est de 75 chercheurs pour 10.000 habitants.

- **donner la priorité aux secteurs économiques où Singapour peut être compétitif au niveau international.** Les cinq principaux secteurs de l'industrie singapourienne sont l'électronique, la chimie/pétrochimie, les biotechnologies, l'ingénierie de transport et l'ingénierie de précision. La fondation nationale pour la recherche (National Research Foundation) a été créée en 2006 pour identifier les domaines stratégiques et établir de grands programmes de recherche. A ce jour, elle a **identifié trois secteurs prioritaires pour Singapour : les sciences biomédicales, la technologie de l'environnement et de l'eau et les médias numériques interactifs ;**

- dans les secteurs stratégiques, établir un équilibre entre la recherche finalisée et la recherche conduite à l'initiative des chercheurs ;

- encourager davantage la R&D du secteur privé ;

- **renforcer les liens et interactions entre la R&D et l'industrie.** Dans ce but, elle s'appuie sur l'agence pour la science, la technologie et la recherche (A*STAR) qui rassemble 13 instituts de recherche plutôt tournés vers les applications industrielles, soit 2.000 chercheurs et ingénieurs.

2. Taiwan

a) Les chiffres clés

En 2007, le taux de croissance de Taiwan s'est élevé à 5,5 %. Les services représentent 71,7 % du PIB et l'industrie 26,8 %.

Le secteur des semiconducteurs représente 50 % de la production industrielle, 12 % du PIB taiwanais et emploie 80.000 personnes.

En 2007, Taiwan est devenu le deuxième producteur mondial de semiconducteurs après le Japon, avec une part dans la production mondiale de 18 %.

A travers TSMC, UMC et d'autres fonderies plus petites, il détient 68,4 % des parts de marché de la fonderie.

Par ailleurs, Taiwan contrôle 54,3 % du marché mondial de l'emballage et de test.

Enfin, Taiwan se classe au **deuxième rang mondial pour la production de mémoire DRAM** (Dynamic Random Access Memory) après la Corée du Sud, avec une part de marché de 25 %, **et pour la conception des semiconducteurs** derrière les Etats-Unis (avec une part de marché de 23,5 %).

b) La stratégie de Taiwan

Elle peut se résumer à trois grands principes :

- un volontarisme politique fort ;

- l'élaboration de plans de développements nationaux fixant les grandes orientations industrielles pour l'avenir ;

- l'existence d'agences gouvernementales jouant un rôle stratégique dans la planification et la mise en œuvre des politiques économiques.

- Un volontarisme politique fort

Le succès de l'industrie des semiconducteurs à Taiwan est le fruit du volontarisme politique du gouvernement **qui avait décidé d'encourager de manière spécifique le développement des secteurs industriels jugés stratégiques dans les années 80, parmi lesquels l'industrie des semiconducteurs. Taiwan a ainsi réussi à créer un environnement très favorable pour l'investissement industriel à travers** le lancement de plans successifs cohérents reposant sur quatre piliers :

- **la création de parcs scientifiques regroupant sur un même lieu universités, industries et centres de recherche.** Ainsi, le parc de Hsinchu accueillait en 2006 194 sociétés dans le secteur de la microélectronique (dont TSMC et UMC) employant près de 68.000 personnes, pour un chiffre d'affaires de 794,8 milliards de dollars taiwanais. L'institut de recherche technologique et industrielle (ITRI) est également implanté dans le parc (voir infra) ;

- **un effort particulier en matière d'enseignement supérieur afin de disposer d'une main d'œuvre susceptible de satisfaire les besoins des futurs développements industriels ;**

- **des mesures fiscales et financières d'encouragement très importantes :** crédits d'impôt à l'investissement, exemption d'impôt pendant cinq ans pour les sociétés implantées dans les parcs, amortissement accéléré des équipements, mise en place de fonds publics au profit des sociétés innovantes et stratégiques, prêts à taux bonifiés ;

- **un soutien technologique aux entreprises avec la création de plusieurs centres de recherche travaillant en étroite collaboration avec l'industrie.** Ainsi, l'ITRI est un centre de recherche et de développement créé en 1973 par les autorités taiwanaises pour promouvoir et développer les nouvelles technologies au profit des entreprises. Il est sous la tutelle du ministère de l'économie, ce qui traduit son orientation vers la recherche appliquée à vocation industrielle.

Le budget de l'ITRI s'élève à 600 millions de dollars US, financé pour 50 % par le ministère de l'économie, pour 20 % par d'autres ministères et pour 30 % par l'industrie. Il emploie 6.000 personnes dont 1.000 docteurs et 3.000 masters. Par le passé, ce sont souvent les spin-offs de l'ITRI qui ont contribué aux succès industriels taiwanais. Ainsi, TSMC a été créé par un ancien président de l'ITRI en 1987.

Il exerce ses activités dans 6 domaines :

- * les technologies de l'information et l'optoélectronique ;
- * les MEMS
- * les matériaux et la chimie
- * le développement durable
- * les biotechnologies
- * les nanotechnologies

Les incitations fiscales offertes aux entreprises innovantes à Taiwan

1. Les incitations liées à la R&D

Les entreprises peuvent bénéficier d'un crédit d'impôt sur les sociétés de 30 % pour les dépenses en R&D pour le développement de nouveaux produits, l'amélioration des technologies de production et l'utilisation de technologies avancées pour les procédés de fabrication.

Les équipements utilisés exclusivement pour la R&D, les expérimentations et le contrôle de la qualité peuvent faire l'objet d'un amortissement intégral sur deux ans.

Lorsqu'une licence est accordée ou vendue à des entreprises sur Taiwan, 50 % seulement du montant réel de la redevance est pris en compte pour le paiement de l'impôt sur le revenu.

2. Les incitations liées à la formation du personnel

Les entreprises peuvent bénéficier d'un crédit d'impôt sur les sociétés de 30 % pour les dépenses de formation du personnel lorsqu'elles sont en relation avec l'activité de l'entreprise.

3. Les incitations liées aux équipements

Les entreprises peuvent bénéficier d'un crédit d'impôt sur les sociétés compris entre 5 et 20 % pour les dépenses liées à l'achat d'équipements automatisés et de technologies de production. Elles peuvent également bénéficier de prêts à taux bonifié pour l'achat d'équipements automatisés et de machines.

4. Les incitations pour les industries émergentes et stratégiques

Les entreprises peuvent soit bénéficier d'un crédit d'impôt sur les sociétés correspondant à 20 % de l'investissement en capital réalisé, soit choisir d'être exonérées d'impôt sur les sociétés pendant cinq ans.

5. Les incitations liées au contrôle de pollution et à la sauvegarde des ressources

Les entreprises peuvent bénéficier d'un crédit d'impôt sur les sociétés compris entre 5 et 20 % pour les dépenses en équipements et technologies permettant de limiter la pollution et de sauvegarder les ressources.

Les machines et équipements achetés pour limiter la pollution et sauvegarder les ressources ou pour utiliser une énergie nouvelle et propre peuvent faire l'objet d'un amortissement intégral sur deux ans.

Néanmoins, depuis le 1^{er} janvier 2006, les sociétés réalisant plus de 2 millions de dollars taiwanais de bénéfices sont soumises à une imposition minimale de 10 % sur leurs bénéfices afin de circonscrire les possibilités d'exemption quasi-totale.

En effet, en 2005, le taux d'imposition de TSMC, premier fondeur de semiconducteurs au monde, a été de 0,26 % de ses bénéfices. Globalement, le taux moyen d'imposition des bénéfices des entreprises installées dans le parc de Hsinchu a été de 1,3 %.

Source : Industrial Development Bureau et Institut français de Taipei

- Le plan de développement national du gouvernement sur la période 2008-2012 : « Challenge 2008 »

Le gouvernement taiwanais a lancé un plan de développement national visant à augmenter la valeur ajoutée de l'industrie et à encourager le développement d'entreprises dans des secteurs jugés stratégiques.

Ces objectifs sont réunis dans le projet Two-Trillion et Twin-Star Industries (deux mille milliards et deux étoiles) : "deux milliards" désigne l'objectif de la valeur de production à atteindre pour les secteurs des semiconducteurs et les écrans plats ; "double étoiles" se réfère à l'industrie des "biotechnologies" et des "contenus numériques" dont le développement est jugé stratégique par le gouvernement.

Afin de renforcer le leadership de Taiwan dans le domaine des semiconducteurs et pour contrer la montée en puissance de la Chine continentale, le gouvernement taiwanais a défini trois priorités :

1. Maintenir la position de leadership de Taïwan en fonderie en finançant les technologies post 45nm, en standardisant le contrôle du procédé de fabrication pour diminuer le coût de production et en créant le réseau d'unités de fabrication en 300 mm le plus dense au monde;

2. Faire de Taiwan le premier (et certainement l'unique) centre de production en 450 mm grâce à une stratégie d'alliances au niveau international ;

3. Spécialiser Taiwan dans le développement des générations futures de mémoire DRAM et dans les « systems on chip » afin de faire de Taiwan le centre de conception et de production mondial des « systems on chip » à partir de 2015 ;

- Le rôle des agences

Bras droit du gouvernement, ce sont elles qui planifient et mettent en œuvre les politiques économiques. **Le conseil pour la planification économique et le développement** (Council for Economic Planning and

Development) et le **bureau du développement industriel** (Industrial Development Bureau) sont les plus importantes.

Le conseil pour la planification économique et le développement sert à la fois **d'organe de réflexion et de planification des politiques économiques**, très en amont des décisions gouvernementales et de coordinateur au niveau interministériel. Equivalent du Commissariat au plan à sa période de plus forte influence, le conseil pour la planification économique et le développement fixe les grandes priorités du pays à court, moyen et long terme.

Le bureau du développement industriel est chargé de **coordonner la politique de développement industrielle** pour le compte du ministère de l'économie. Ce bureau a pour vocation de **promouvoir le plan de développement national appelé « Challenge 2008 »** et de **valoriser les deux grands sous-projets dénommés « deux mille milliards et deux étoiles »**.

3. La Chine continentale

a) Les chiffres clés

La montée de la Chine continentale dans le secteur des semiconducteurs est fulgurante.

Alors qu'en 2000, la part de la Chine dans la production globale s'élevait à 2 % seulement, elle représente 7 % en 2007. **Actuellement, la Chine compte une centaine d'unités de production soit en fonctionnement soit en prévision.**

Depuis 2006, trois fondeurs chinois (SMIC, Hua Hong NEC et HEJIAN) font partie des 10 premiers fondeurs mondiaux.

De même, dans le domaine de l'encapsulation et du test, la part de la Chine est passée de 5% en 1999 à 23 % en 2007.

b) La stratégie de la Chine

Le gouvernement chinois a essayé dès les années 60 de développer sa propre industrie des semiconducteurs à partir d'entreprises d'Etat. Toutefois, faute des technologies suffisantes, le gouvernement a infléchi sa politique en privilégiant l'importation d'équipements et de technologies liés aux semiconducteurs et en autorisant les sociétés intégrées étrangères à réaliser des joint ventures avec des entreprises nationales, voire à implanter leurs propres unités de production.

Jusqu'à la fin des années 90, les implantations ont essentiellement concerné les opérations d'assemblage et de tests portant sur des générations anciennes de composants.

En 2000, la société chinoise SMIC fut fondée pour développer une activité de fonderie en Chine. Fortement subventionnée par le gouvernement chinois, SMIC détient désormais 7,6 % des parts de marché dans la fonderie.

Par ailleurs, depuis 2005, la Chine s'est progressivement dotée d'entreprises couvrant toute la chaîne de valeur (équipement, matériaux, fonderies, assemblage et test, conception et sociétés intégrées).

Faute de savoir-faire suffisant, de manque d'expérience et de capital, mais aussi en raison des restrictions imposées par les Etats-Unis à l'exportation de technologies sensibles dans le secteur des semiconducteurs, **la Chine continentale reste positionnée dans le bas de gamme/moyenne gamme, que ce soit en matière de sous-traitance, de design, d'assemblage et de test.**

Ainsi, en matière de design, 97 % de la production chinoise porte sur des procédés dont la résolution est supérieure à 180 nm.

Néanmoins, il est évident que les entreprises chinoises chercheront à monter dans la chaîne de valeur afin d'augmenter leurs marges. A cet égard, elles bénéficieront du savoir faire **des industries taiwanaises** qui, conscientes de la montée inexorable de la Chine continentale dans le secteur des semiconducteurs, **investissent massivement en Chine pour augmenter leur compétitivité.** Ainsi, la fonderie chinoise CSMC a été créée par un ancien dirigeant de TSMC.

Jusqu'à présent, les Taiwanais exportaient la technologie la plus ancienne vers la Chine afin de conserver un avantage compétitif. Selon un responsable du bureau du développement industriel, il semblerait que désormais, compte tenu de la taille du marché chinois, ils souhaitent investir dans des technologies plus modernes.

C. LE POIDS DES ETATS-UNIS

Les Etats-Unis restent un acteur majeur dans le secteur des semiconducteurs. Comme dans les pays asiatiques, c'est un secteur jugé prioritaire et donc massivement soutenu non seulement par le gouvernement fédéral, mais également par certains Etats très riches comme l'Etat de New-York, le Texas ou la Californie et par des associations professionnelles puissantes.

1. Un acteur majeur dans le secteur des semiconducteurs

Les Etats-Unis restent un acteur majeur dans le secteur des semiconducteurs malgré l'érosion de leur part de marché dans la production mondiale.

En effet, le territoire américain n'accueille plus que 17 % des capacités de production, mais ce chiffre doit être relativisé car il fait des Etats-Unis le troisième producteur au monde de semiconducteurs derrière le Japon et Taiwan. En outre, 49 % de la production proviennent d'entreprises américaines, **témoignant ainsi du leadership américain.**

De même, le poids des Etats-Unis reste prépondérant dans la conception (34 % du marché mondial), contre 26 % pour le Japon, 22 % pour l'Asie du Sud-Est et 18 % pour l'Europe.

Dans le secteur des logiciels et des services liés aux technologies de l'information, les Etats-Unis exercent un quasi-monopole **avec 85,2 % des parts de marché contre 10,8 % pour l'Europe et 2,1 % pour le Japon.**

En outre, les Etats-Unis disposent de leaders mondiaux aussi bien parmi les sociétés intégrées que parmi les fabless.

Ainsi, Intel, leader mondial des semiconducteurs, est l'une des rares sociétés intégrées dont le chiffre d'affaires est suffisamment important pour lui permettre de financer de manière autonome ses développements technologiques. Quant à IBM, il représente le prototype de l'entreprise intégrée qui a choisi de nouer des alliances stratégiques afin de pouvoir rester dans la course à la miniaturisation.

Parmi les fabless, on notera Texas Instrument, troisième fabricant de semiconducteur au monde, qui a décidé de se concentrer sur la conception en sous-traitant sa production à TSMC. Enfin, Qualcomm et Broadcom sont des sociétés fabless dès leur origine classées respectivement numéro 1 et numéro 2 mondiaux dans la liste des 10 premiers concepteurs de circuits intégrés.

Il apparaît donc que si l'un des deux modèles économiques (société intégrée contre fabless) devait s'imposer, les Etats-Unis resteraient un acteur incontournable.

2. Un important programme de soutien à la microélectronique

La recherche dans le secteur de la microélectronique est financée à trois niveaux :

- au niveau fédéral : les principales agences concernées sont la **National Science Foundation (NSF) qui finance des projets de recherche fondamentale, le département de la défense à travers la Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA) et le département de l'énergie ;**

- au niveau des Etats : **afin de développer l'activité économique dans les secteurs de pointe**, de nombreux Etats américains investissent dans la construction de centres de recherche.

Ainsi, l'Etat de New-York a dépensé 2 milliards de dollars pour la création du College of Nanoscale Science and Engineering à l'université d'Albany, la contribution financière d'IBM s'élevant à 500 millions de dollars. Aujourd'hui, c'est le plus grand centre au monde associant recherche, éducation et développement dans le domaine des nanotechnologies. Avec ses 1.700 employés et ses 8.000 m² de salle blanche en 300 mm, il possède les équipements technologiques les plus modernes au niveau mondial, dont l'un des deux prototypes d'équipement lithographique en extrême ultra-violet développé par ASML. Depuis sa construction, ce centre d'excellence a attiré

plus de 100 industriels (IBM, AMD, Infineon, ASML etc) et plus de 7 milliards de dollars d'investissement.

- au niveau des associations d'industriels : **plusieurs associations allouent un budget pour la recherche et développement sur des nœuds technologiques distincts.**

Ainsi, l'association internationale SEMATECH consacre 150 millions de dollars à des programmes de recherche très proches des développements industriels à court terme sur les nœuds technologiques 45-32 nm.

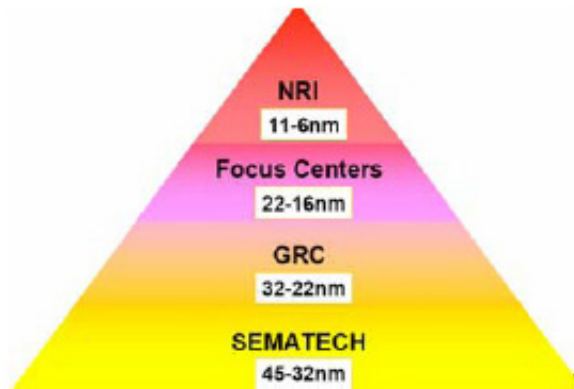
L'association internationale GRC (Global Research Corporation) finance à hauteur de **30 millions de dollars** 300 projets universitaires visant à la poursuite de la loi de Moore.

Le FCRP (Focus Center Research Program) a été établi afin de poursuivre la loi de Moore jusque dans ses ultimes retranchements, en brisant les différents « murs de briques » mentionnés dans l'ITRS. Il s'agit d'une initiative purement américaine, gouvernée par l'association MARCO (Microelectronics Advanced Research Corporation) et financée par l'industrie à travers le SIA (Semiconductor Industry Association) et le gouvernement via la DARPA.

Le FCRP finance 38 universités au travers de 5 pôles de recherche disposant chacun d'un budget d'environ 10 millions de dollars, piloté par une université leader, et se focalisant sur des recherches plus ou moins amont.

L'objectif affiché du **NRI (Nanoelectronics Research Initiative)** est d'aboutir d'ici 2020 à un premier concept éprouvé et industrialisable de composant logique capable de remplacer le transistor CMOS. Il dispose d'un budget de 50 millions de dollars, provenant à la fois de la NSF et de 6 industriels AMD (Freescale, IBM, Intel, Micron et Texas Instruments), avec lequel il finance 23 universités, dont 9 avec des fonds de la NSF au travers des NSEC (Nanoscale Science & Engineering Center).

Programmes de recherche financés par l'industrie américaine



Source : INTEL Corp.

D. LA MICROÉLECTRONIQUE EN EUROPE : UN SECTEUR INDUSTRIEL À LA CROISÉE DES CHEMINS

1. Des atouts non négligeables

a) Des leaders industriels européens

Dans un certain nombre de segments de l'industrie des semiconducteurs, l'industrie européenne détient un leadership.

C'est par exemple le cas de **l'équipement automobile** où quatre compagnies européennes figurent parmi les dix premières mondiales : Infineon, STMicroelectronics, Philips et Bosch.

De même, **plusieurs entreprises européennes se distinguent dans le domaine des télécommunications** : STMicroelectronics, NXP et Infineon se classent parmi les dix premières compagnies mondiales pour les ventes de semiconducteurs sans fils tandis que Nokia, Alcatel-Lucent et Ericsson font partie des géants de l'industrie électronique des télécommunications.

Par ailleurs, certains fournisseurs européens en équipement et en matériaux se sont imposés comme leaders mondiaux.

En 10 ans, **ASML est devenu le numéro 1 mondial dans le domaine de la lithographie** avec une part de marché de plus de 50 %.

Quant à **SOITEC**, entre 1991 et 2007, il a imposé une situation de quasi-monopole en tant que fournisseur de l'industrie microélectronique avec le développement et l'industrialisation d'un matériau innovant : le SOI (silicium sur isolant) qui entre dans la fabrication des puces.

b) Des centres de recherche européens reconnus mondialement

Dans le domaine de la microélectronique, deux centres de recherche européens sont considérés comme des pôles d'excellence au niveau mondial : le LETI, l'IMEC. Par ailleurs, le centre de recherche d'Eindhoven aux Pays-Bas et l'alliance dans le domaine de la microélectronique des Fraunhofer constituent également des pôles d'excellence de niveau international.

- Le LETI

Laboratoire du CEA implanté à Grenoble, le LETI est l'un des principaux centres européens de recherche appliquée en électronique. Son activité est consacrée à plus de 85 % à des recherches finalisées avec des partenaires extérieurs.

Avec 200 partenaires et 350 contrats par an, le LETI est un interlocuteur privilégié du monde industriel. Il a suscité la création de près de 30 start-ups de haute technologie, dont SOITEC, leader mondial du silicium sur isolant. Il dépose quelque 180 brevets par an et gère un portefeuille de 1.000 inventions protégées par des brevets.

Les principaux domaines d'activité du LETI sont les suivants :

- micro et nanotechnologies pour la microélectronique,
- technologies, conception et intégration des microsystèmes,
- technologies d'imagerie, photonique sur silicium,
- micro et nanotechnologies pour la biologie et la santé,
- technologies de communication et objets nomades.

Doté d'un **budget annuel de 174 millions d'euros**, le **LETI emploie 1.000 personnes** auxquelles s'ajoutent plus de 500 collaborateurs extérieurs (thésards, partenaires de recherche, industriels). Il dispose de 11.000 m² de salles blanches opérées en continu, d'un parc d'équipement d'une valeur de 200 M€ et investit plus de 40 M€ par an en nouvelles machines.

- L'IMEC

Créé en 1984 par le gouvernement flamand, l'IMEC est devenu l'un des meilleurs centres de recherche au niveau mondial dans le domaine de la microélectronique.

Il est chargé de faire de la recherche 3 à 10 ans en amont des besoins industriels dans les secteurs suivants :

- la nanoélectronique basée sur le CMOS et post-CMOS (lithographie avancée, recherche sur les matériaux, les

interconnexions, les mémoires, l'intégration en 3 dimensions des puces);

- l'intégration hétérogène ;
- les systèmes nomades embarqués ;
- la photovoltaïque ;
- l'électronique biomédicale ;
- l'électronique organique ;
- les transducteurs sans fil autonomes.

En 2007, l'IMEC a travaillé avec plus de **1.000 partenariats en provenance du monde entier dans le cadre de « programmes d'affiliation industrielle »** (Industrial Affiliation Program) qui réunissent plusieurs industriels sur des programmes technologiques génériques. Ainsi, son programme de recherche sur les mémoires réunit depuis 2007 les 5 plus grands fabricants mondiaux, à savoir Samsung Electronics, Hynix Semiconductor Inc, Micron Technology, Qimonda et Elpida Memory Inc.

Doté d'un **budget de 244,5 millions d'euros** et employant près de **1.600 personnes** (dont environ 250 étudiants et 350 salariés des entreprises partenaires de l'IMEC), l'IMEC dispose de locaux et d'équipements très performants. Ainsi, il accueille l'un des deux prototypes d'équipement lithographique à extrême ultra-violet.

Par ailleurs, il possède deux salles blanches fonctionnant 24h sur 24, 7 jours sur 7 : l'une, de 3.200 m², est équipée d'une ligne de production en 300 mm ; l'autre, de 5.200 m² dispose d'une ligne de production en 200 mm.

- Le Holst Centre

En 2005, l'IMEC a créé avec le centre de recherche hollandais TNO **le Holst Centre**. Ce dernier, implanté sur le centre de recherche de Philips à Eindhoven, est spécialisé dans les solutions utilisant des transducteurs sans fil autonomes et l'électronique sur support souple. 120 chercheurs y travaillent actuellement, dont le nombre devrait quasiment doubler d'ici 2010.

- Le Fraunhofer-Verbund Mikroelektronik

En 1996, dix instituts Fraunhofer ont signé une alliance Fraunhofer dans le domaine de la microélectronique (**Fraunhofer-Verbund Mikroelektronik**). **Représentant 1.600 chercheurs et disposant d'un budget de 175 millions d'euros**, cette alliance est spécialisée en recherche appliquée dans les domaines suivants :

- le « More Moore » et le « Beyond CMOS »

- l'intégration des systèmes intelligents (Smart System Integration)
- la communication et le divertissement
- les systèmes d'assistance (créer un environnement intelligent permettant d'aider les personnes dans la vie quotidienne)
- les microsystèmes et la médecine
- la lumière
- La mobilité
- La sécurité

c) Des clusters dans la microélectronique ayant une vraie taille critique

Trois clusters existent en Europe dans le secteur de la microélectronique, qui établissent un partenariat solide entre les entreprises de haute technologie, les centres de recherche et les universités. **Ils sont situés à Dresde (Allemagne), à Grenoble et à Eindhoven/Nijmegen (Pays-Bas).**

- La Silicon Saxony de Dresde

Le poids du cluster allemand peut être mesuré par les chiffres suivants.

En 2007, **243 entreprises** étaient répertoriées sur le site de Dresde, dont AMD (3.500 salariés, 5,4 milliards d'euros d'investissement depuis 1995), Infineon/ Qimonda (6.000 salariés, 5 milliards d'euros d'investissement depuis 1993), Siltronic et Toppan.

Au total, la Silicon Saxony a permis la création de **16.000 emplois directs et de 40.000 emplois indirects**. 11 milliards d'euros d'investissements privés ont été comptabilisés entre 2002 et 2007 pour 1,5 milliard d'euros d'investissements publics.

Plusieurs grands centres de recherche ont également été créés.

Ainsi, en 2002, les sociétés AMD, DuPont, Photomask et Infineon ont créé **le centre de technologie avancée pour les masques** (Advanced Mask Technology Center).

De même, **le centre Fraunhofer des technologies nanoélectroniques** (Fraunhofer – Center Nanoelektronische Technologien) associe un centre de recherche public à deux industriels (Qimonda et AMD) dans le but de développer des solutions innovatrices pour améliorer les procédés de production.

Enfin, le centre de recherche **NAMLAB** résulte d'un joint venture entre l'université technique de Dresde et Qimonda. Il concentre ses recherches

sur les matériaux pour les mémoires volatiles et non volatiles et sur l'intégration de ces matériaux dans des composants dont la résolution de gravure est inférieure à 30 nm.

- Minatec/Minalogic à Grenoble

L'écosystème développé à Grenoble s'appuie sur le pôle d'innovation en micro et nanoélectronique Minatec et le pôle de compétitivité Minalogic.

Minatec a été inauguré en 2006. Il vise à créer à Grenoble le premier centre européen pour les micro et nanotechnologies avec les caractéristiques suivantes :

- une unicité de lieu pour permettre la concentration des moyens et des compétences ;
- une masse critique suffisante pour constituer l'un des futurs pôles au niveau international. Ainsi, 3.500 ingénieurs, chercheurs et universitaires travaillent sur le site de Minatec autour des équipements et des moyens technologiques les plus avancés ;
- une pluridisciplinarité pour anticiper et accompagner la complexité des produits ;
- une synergie entre chercheurs « amont », chercheurs « appliqués » et industriels pour accélérer le processus d'innovation ;
- une complémentarité enseignement-recherche-valorisation industrielle pour couvrir l'ensemble du processus d'innovation, depuis l'idée jusqu'à la réalité industrielle.

Réparti dans 44.000 m² de nouveaux bâtiments, le pôle Minatec est composé de trois plateformes :

- une plateforme « enseignement » comprenant :

- la formation initiale avec le transfert sur le site des deux écoles d'électronique et de physique de l'INPG (Institut National Polytechnique de Grenoble) et du CIME (Centre Interuniversitaire de Microélectronique)
- la formation continue avec la création du nouveau centre de formation continue en microélectronique et microsystèmes ;

- une plate-forme « recherche » constituée de près de 40 laboratoires du CEA-LETI, du CEA- DRFMC (Direction de la Recherche Fondamentale sur la Matière Condensée), de l'Institut National Polytechnique de Grenoble, de l'université Joseph Fourier et du CNRS.

Sont ainsi dédiés à la recherche 8.500 m² de salles blanches appartenant au LETI, 14.000 m² de locaux (bureaux, laboratoires et salles blanches) pour la caractérisation des matériaux, la photonique et la conception des composants avancés et 5.000 m² de locaux pour la recherche dédiée à

l'introduction de la micro et nanoélectronique dans les objets de la vie courante ;

- **une plate-forme « valorisation »** constituée de 10.000 m² de locaux et de salles blanches pour les start-up en croissance, les laboratoires communs et les équipes de R&D des grands groupes industriels qui opèrent des transferts de technologies dans le cadre de MINATEC.

Le pôle de compétitivité Minalogic vise à renforcer les bases régionales en micro et nanotechnologies et en technologies logicielles ainsi qu'à développer des solutions miniaturisées intelligentes. Ses domaines d'activités sont divisés en deux clusters :

- **le cluster micro nanoélectronique** qui s'appuie sur le pôle d'innovation MINATEC ;

- **le cluster « system on chip » embarqué** visant à maîtriser les technologies du logiciel enfoui dans la puce.

Selon les informations recueillies par votre rapporteur, **Minalogic comprend 115 membres dont 79 entreprises** (STMicroelectronics, Schneider Electric, SOITEC, Hewlett-Packard) et 13 centres de recherche et universités. Dans les secteurs de la microélectronique et l'électronique, la région grenobloise compte 21.700 emplois directs dans l'industrie, 3.000 emplois dans la recherche et 1.200 diplômés par an.

- Point one à Eindhoven/Nijmegen

En 2006, les Pays-Bas ont créé **le pôle de compétitivité Point One dans le domaine de la nanoélectronique et des systèmes embarqués** qui réunit des grands industriels du secteur (ASML, ASM International, Philips Semiconductors etc), des centres de recherche renommés (Holst Centre et l'institut des systèmes embarqués) et des PME.

Soutenu financièrement par le ministère des affaires économiques, ce cluster a pour ambition de faire progresser le chiffre d'affaires des entreprises spécialisés dans ces deux secteurs d'activité de 30 % entre 2005 et 2011 (soit un chiffre d'affaires de 26 milliards d'euros en 2011), de créer 20.000 emplois (dont 8.000 hautement qualifiés) d'ici 2011 et de lancer 8 start-up par an.

Entre 2007 et 2011, le cluster Point One devrait attirer 1 milliard d'euros de dépenses en R&D.

d) Des programmes européens variés

Depuis près de deux décennies, plusieurs programmes au niveau européens ont été lancés pour soutenir le secteur des semiconducteurs. Il s'agit des **programmes EUREKA**, des **programmes-cadre de recherche et**

développement technologique et, plus récemment, des initiatives technologiques communes.

- **Les programmes EUREKA (JESSI, MEDEA, MEDEA+, CATRENE)** : à la fin des années 80 fut lancé par les Etats nationaux et par les industriels le programme JESSI (Joint European Submicron Silicon ; 1989-1996) qui visait à combler le retard technologique des entreprises microélectroniques européennes par rapport à leurs concurrentes américaines et japonaises.

Fort de son succès, ce programme de coopération a été poursuivi à travers MEDEA (Microelectronics Development for European Applications; 1997 - 2000) et MEDEA + (2001-2008). Ce dernier a reçu sur la période 2001-2008 1,1 milliard d'euros de la part des Etats participants.

Le nouveau programme CATRENE couvre la période 2008-2011 avec la possibilité de le prolonger jusqu'en 2016. Les industriels espèrent que 6 milliards d'euros y seront consacrés, dont 1/3 en provenance des Etats ;

- **Les programmes-cadre de recherche et développement technologique (PCRD)** : le 6ème PCRD, portant sur la période 2002-2006, a consacré 1,4 milliard d'euros au secteur de la microélectronique.

Le 7ème PCRD (2007-2013) dispose d'un budget de 50,5 milliards d'euros. Il est divisé en cinq programmes : coopération¹, idées, personnes, capacités, recherche nucléaire. **175 millions d'euros ont été consacrés à la nanoélectronique en 2007 dans le cadre du 7ème PCRD ;**

- **L'Initiative Technologique Conjointe en nanoélectronique (ENIAC)** : dans le cadre de la stratégie européenne en faveur de la croissance et de l'emploi, **31 plateformes technologiques européennes ont été retenues, censées représenter les clés technologiques pour la croissance et la compétitivité européenne.** Pour chacune d'entre elles, les parties prenantes (industries, centres de recherche, régulateurs, institutions finançant la recherche) ont dû définir un **agenda de recherche stratégique** qui établit les priorités en matière de recherche et les objectifs à atteindre. Le 7^{ème} PCRD a vocation à financer la mise en œuvre de cet agenda de recherche stratégique, notamment à travers les 9 thèmes qui structurent le volet « coopération ».

Par ailleurs, ce dernier prévoit l'instauration de **partenariats associant des crédits publics et des crédits privés sous forme d'« Initiatives Technologiques Communes »** dans six secteurs particuliers, dont l'un concerne « les technologies nanoélectroniques en 2020 ». Dans ce but, l'ENIAC a été créé (European Nanoelectronics Initiative Advisory

¹ Le programme coopération représente les 2/3 du budget total et doit financer la recherche dans neuf domaines prioritaires : l'alimentation, la santé, les transports, l'environnement, l'énergie, les nanosciences, les technologies de l'information, la sécurité-espace et les sciences économiques.

Council) afin de coordonner l'action et les financements de la Commission européenne, des Etats membres et des industriels.

Sur la période 2008/2017, la Commission européenne prévoit que **3 milliards d'euros seront consacrés à cette Initiative Technologique Conjointe** par les Etats nationaux, la Commission européenne et l'industrie : 450 millions en provenance du 7^{ème} PCRD, 800 millions d'euros de la part des Etats membres et le reste en provenance de l'industrie.

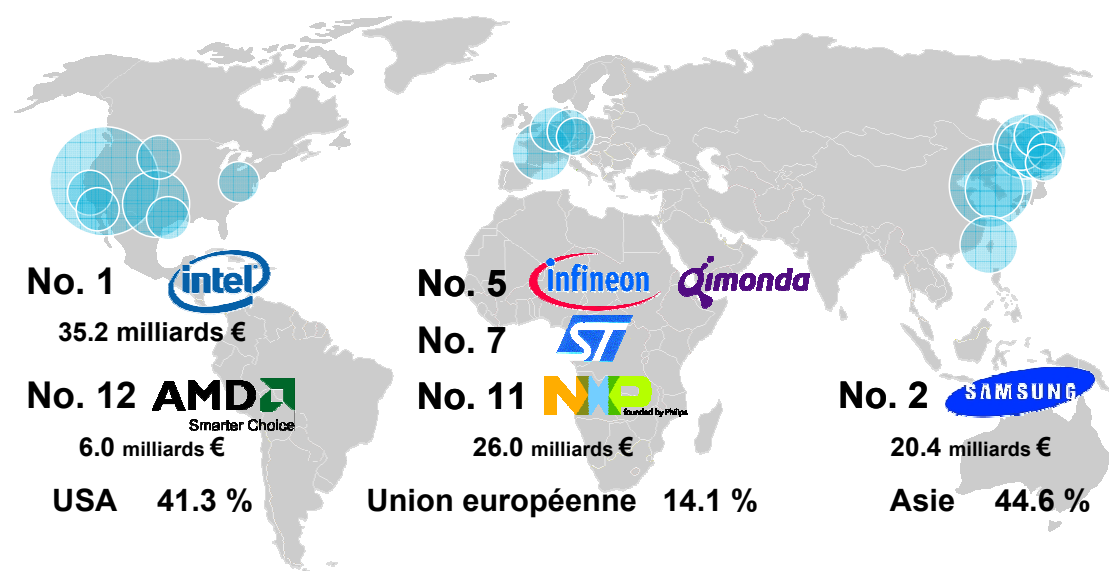
Parmi les **Initiatives Technologiques Communes retenues**, **une autre porte sur les systèmes embarqués (projet ARTEMIS)** qui devrait également être doté de 3 milliards d'euros sur 10 ans.

2. Des insuffisances inquiétantes

a) Une industrie européenne dont le poids reste marginal par rapport à ses concurrents asiatiques et américains

Le poids global de l'industrie européenne reste marginal par rapport à ses concurrents asiatiques et américains. Ainsi, 41,3 % du marché des ventes de semiconducteurs sont détenus par des entreprises américaines, 44,6 % par des entreprises asiatiques et seulement 14,1 % par des entreprises européennes.

Le poids des fabricants de semiconducteurs



Source : IC Insights 2007

Par ailleurs, **aucune société européenne n'a une taille critique suffisante pour poursuivre seule son développement technologique.** Ainsi, STMicroelectronics et Infineon ont rejoint l'alliance IBM pour partager les

coûts de développement des technologies CMOS tandis que NXP a renoncé à la course à la miniaturisation, préférant se concentrer sur les applications « More than Moore ». On peut donc s'interroger si à moyen terme, des entreprises européennes continueront à investir dans la voie « More Moore ».

La spécialisation de l'industrie européenne des semiconducteurs dans le « More than Moore » se justifie dans la mesure où cette voie de recherche est plus adaptée à ses capacités financières et que les applications qui devraient en résulter sont très prometteuses.

Néanmoins, on peut s'interroger **sur le danger qui consisterait à renoncer à la course à la miniaturisation** dans la mesure où les entreprises qui iront jusqu'au bout de la « roadmap » bénéficieront alors d'un avantage technologique décisif qu'elles pourront ensuite mettre au service des applications « More than Moore ».

b) La compétitivité des entreprises européennes remise en cause par un dollar faible

Le quasi doublement du prix de l'euro face au dollar depuis 2002 (passé de 0,81 \$/€ à 1,56 \$/€ en mai 2008) affecte fortement la compétitivité des sites français et européens.

En effet, le dollar constitue la monnaie de référence retenue pour la cotation des produits microélectroniques, y compris en Europe. Par conséquent, la différence entre les revenus perçus en dollars et les coûts en euros est immédiatement affectée par les évolutions du taux de change.

A moyen terme, la poursuite de la baisse du dollar menace le maintien en Europe non seulement des capacités de production, mais également des centres de recherche.

- Les sites de production

Afin de rester compétitives, les entreprises surveillent en permanence les écarts de prix entre les différents sites mondiaux. Or, la hausse de l'euro influence le coût des amortissements (45 % des coûts de production), des salaires (10 %), de l'énergie et des taxes. Ainsi, **l'écart de coûts se creuse entre l'Europe et les autres pays (Asie et Etats-Unis), sans qu'il puisse être compensé complètement par des gains de productivité.**

Selon les informations obtenues par votre rapporteur, entre le 1^{er} janvier 2006 et le 1^{er} janvier 2008, la hausse des coûts liée aux effets de changes est évaluée à 23 %.

Par ailleurs, **la surévaluation durable de l'euro par rapport au dollar entraîne le blocage de décisions d'investissements nécessaires à la modernisation et au renouvellement des sites de production en Europe.** Les responsables des sites français d'Atmel et de Freescale, deux entreprises américaines, ont ainsi fait part à votre rapporteur de leur inquiétude quant à la pérennité à moyen terme de ces unités de production si la parité entre l'euro et

le dollar restait aussi défavorable pour la compétitivité des entreprises implantées sur le territoire national.

- Les centres de recherche et développement

Ils sont également pénalisés puisqu'ils subissent un renchérissement relatif de leurs coûts exprimés en dollars depuis 2 ans sans que leurs performances n'augmentent dans les mêmes proportions.

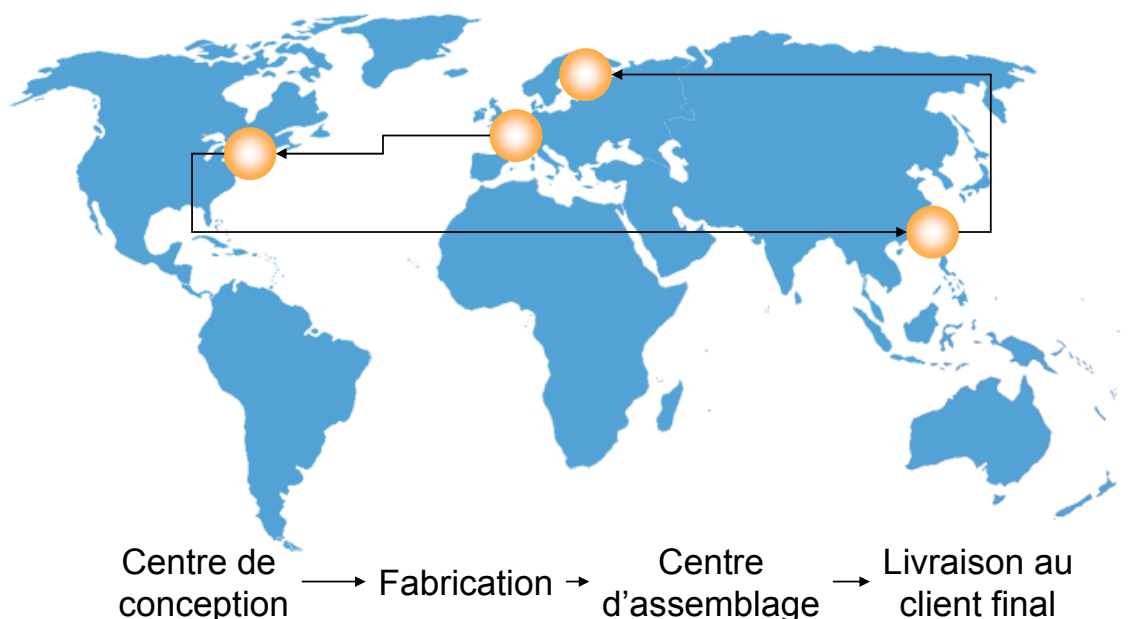
Actuellement, les conditions sont réunies pour qu'un cercle vicieux se mette en place, l'insuffisance des investissements productifs et des dépenses en R&D d'aujourd'hui entraînant une perte de compétitivité pour demain, et donc une diminution des richesses et des emplois pour notre pays.

c) Une industrie européenne pénalisée par des règles de concurrences trop strictes au regard de la pratique mondiale

Comme le montre le schéma suivant, l'industrie de la microélectronique est soumise à la concurrence mondiale. En conséquence, le choix des implantations est guidé par des considérations économiques, à savoir la proximité des marchés et la compétitivité des sites.

NXP réalise ainsi la conception de ses circuits en Europe, mais les fait fabriquer aux Etats-Unis. L'assemblage et l'encapsulage sont effectués en Asie puis le produit final revient en Europe pour être fourni au client final (Nokia dans l'exemple ci-dessous).

L'industrie des semiconducteurs : une industrie globalisée



Source : NXP

Par ailleurs, le souci de compétitivité des entreprises conduit à leur internationalisation comme en témoigne l'évolution de STMicroelectronics : né en 1987 de la fusion de la société italienne SGS Microelettronica et de la société française Thomson Semiconducteurs, STMicroelectronics emploie 52.000 personnes au niveau mondial dont 24.000 en Europe et 19.500 en Asie.

La compétitivité réelle des sites de production et des centres de recherche et développement est néanmoins largement faussée par le poids des subventions accordées par les gouvernements.

L'association de l'industrie américaine des semiconducteurs (Semiconductor Industry Association) a réalisé une étude comparative sur les coûts de construction et de fonctionnement d'une fab située aux Etats-Unis et en Asie : **sur 10 ans, l'écart serait d'un milliard de dollars au détriment des Etats-Unis, dont 70 % liés à la taxation sur les bénéfices, 20 % aux subventions à l'investissement et 10 % seulement aux coûts salariaux.**

L'étude constate ainsi que le taux de l'impôt sur les sociétés s'élève à 35 % aux Etats-Unis, auquel il faut ajouter 6 % d'impositions locales. Au contraire, la Chine exonère les entreprises d'impôts sur les sociétés pendant 5 ans puis le taux est réduit de moitié pendant encore 5 ans. A Singapour et en Malaisie, la durée d'exonération varie entre 5 et 10 ans¹. A Taiwan, le cumul

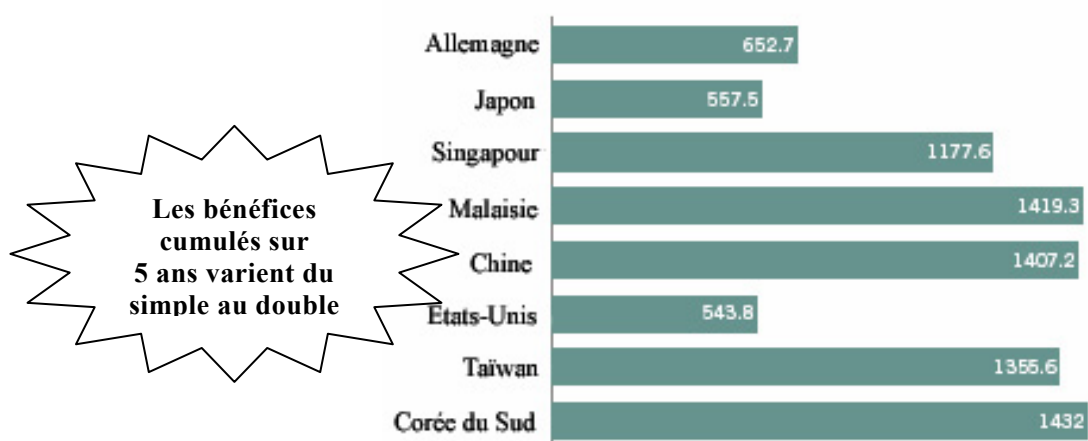
¹ A la suite du déplacement à Singapour, il semble que cette durée soit sous-estimée.

des exonérations d'impôts et des crédits d'impôt conduit à ce que la rentabilité nette de l'entreprise soit plus forte après impôt qu'avant !

De même, le rapport de 2005 sur la compétitivité de l'Europe réalisée par l'association européenne des entreprises de semiconducteurs (ESIAC) montre qu'au-delà des disparités au niveau des coûts salariaux, **ce sont les aides publiques qui ont le plus d'impact sur le niveau de bénéfices des fabs.**

Sur une période de cinq ans, la même unité de production peut engendrer des bénéfices qui vont du simple au double selon qu'elle est implantée en Allemagne ou dans des pays comme la Chine, la Corée du Sud ou la Malaisie.

Influence des subventions publiques sur les bénéfices cumulés d'une unité de production



Source : ESIAC

Or, la sévérité de la réglementation européenne en matière d'attribution des aides d'Etat pénalise les entreprises souhaitant s'installer sur le territoire européen et incite à la délocalisation des activités de production.

Ainsi, en ce qui concerne le choix du futur site d'implantation de l'unité de production d'AMD, plusieurs interlocuteurs allemands ont regretté que le taux de subvention à l'investissement autorisé par la réglementation européenne soit seulement de 13 % pour Dresde alors que dans le même temps, l'Etat de New-York n'est soumis à aucune réglementation similaire et peut proposer une aide d'un milliard de dollars en cas d'implantation d'AMD sur son territoire.

d) Un désintérêt politique relatif pour le secteur de la microélectronique qui empêche l'instauration d'une stratégie industrielle efficace

L'Union européenne finance de nombreux programmes de recherche dans le secteur des semiconducteurs, mais ils ne sont pas insérés dans une stratégie industrielle cohérente. Plusieurs raisons expliquent ce phénomène :

- une méconnaissance profonde des enjeux de ce secteur et de son impact sur la compétitivité de l'ensemble des entreprises : l'industrie des semiconducteurs est peu visible même si elle est déterminante pour toutes les secteurs de haute technologie.

En outre, le nombre d'emplois qu'elle crée est souvent sous-estimé car ne sont comptabilisés que les emplois directs. En ce qui concerne le site de Crolles par exemple, 4.500 emplois directs génèrent plus de 22.000 emplois indirects.

Par ailleurs, elle est trop souvent associée à l'industrie électronique. Comme celle-ci a fait l'objet d'importantes délocalisations vers l'Asie, l'industrie de la microélectronique n'est plus jugée stratégique. Ainsi, la direction générale de l'entreprise et de l'industrie au sein de la Commission européenne s'intéresse peu à ce secteur ;

- la concentration géographique de l'industrie de la microélectronique dans un petit nombre d'Etats européens, ce qui amoindrit son intérêt au niveau communautaire. En outre, les pays concernés directement par la microélectronique (la France, l'Allemagne, l'Italie, l'Irlande, les Pays-Bas et la Belgique) apparaissent incapables de développer une stratégie commune leur permettant de faire pression sur la Commission européenne et notamment d'infléchir la politique de la direction de la concurrence ;

- l'illusion que l'Europe peut renoncer à la production des composants électroniques et se concentrer sur les activités de R&D, alors que dans ce secteur d'activité, production et R&D sont très souvent imbriquées.

e) Une coopération scientifique entre les grands instituts de recherche européens encore perfectible

Récemment, le CEA (à travers le LETI et le LITEN), le CSEM (centre suisse d'électronique et de microélectronique), le VTT (Technical research centre of Finland) et l'alliance Fraunhofer dans le domaine de la microélectronique ont signé une **alliance sur les technologies hétérogènes** afin de mener des projets de recherche en commun et de développer des solutions et des produits innovants pour l'industrie.

Cette initiative doit être saluée et soutenue politiquement et financièrement dans la mesure où elle donne une visibilité internationale à la recherche européenne dans un secteur technologique très porteur.

En effet, les alliances, aussi bien dans le domaine de la recherche que dans l'industrie, sont une des clés du renforcement de la compétitivité européenne dans la mesure où aucun acteur ne dispose de moyens financiers suffisants pour maintenir seul son avance technologique.

Les instituts Carnot et les instituts Fraunhofer ont également développé des partenariats dans le domaine de la recherche appliquée dans une optique de transfert industriel.

Conscient de l'importance stratégique de ce type de collaboration, le ministère allemand de la recherche met à la disposition des instituts Fraunhofer un budget spécifique pour les partenariats transfrontaliers.

En revanche, les instituts Carnot doivent financer leurs actions partenariales avec d'autres centres de recherche européens sur leurs fonds propres, ce qui limite fortement le nombre des projets.

Afin d'encourager la coopération scientifique entre les grands instituts de recherche européens, il conviendrait donc de prévoir dans le budget de l'Agence Nationale de la Recherche un financement spécifique pour les projets de partenariat en matière de recherche appliquée.

Enfin, la coopération entre les centres de recherche européens est encore perfectible, notamment entre le LETI et l'IMEC.

Certes, ces deux centres d'excellence ont des modèles de vente différents : alors que le LETI privilégie les collaborations bilatérales en réservant à ses partenaires l'exclusivité d'exploitation des résultats, l'IMEC favorise les programmes de recherche multilatéraux dans lesquels les résultats sont partagés entre tous les participants.

Néanmoins, dans la mesure où ces deux organismes de recherche travaillent souvent sur les mêmes sujets, les partenariats devraient être multipliés au niveau de la recherche la plus amont, notamment à travers l'échange de chercheurs.

E. L'INDUSTRIE DE LA MICROÉLECTRONIQUE EN FRANCE : UNE SITUATION INCERTAINE

La France est l'un des pays européens les plus concernés par la microélectronique grâce à la présence d'entreprises comme STMicroelectronics, Freescale, NXP, ATMEL ou encore ALTIS, mais aussi grâce à l'existence de centres de recherche de renommée internationale.

En 2006, le secteur des composants électroniques en France a dégagé un chiffre d'affaires de 10,2 milliards d'euros et employé 55.800 personnes.

Pour autant, la situation de la microélectronique en France se différencie peu de celle en Europe et malgré des atouts certains, ce secteur apparaît en pleine réorganisation.

1. L'adoption de mesures permettant un soutien indirect mais efficace à l'industrie des semiconducteurs

Si la création des pôles de compétitivité et la réforme du crédit impôt recherche ne visaient pas exclusivement le secteur de la microélectronique, ce dernier bénéficie largement de ces deux réformes.

a) La création d'écosystèmes à travers les pôles de compétitivité

En 2004, le Gouvernement a décidé de lancer une nouvelle politique industrielle à travers les pôles de compétitivité.

Chaque pôle vise à rassembler sur un territoire donné les compétences des unités publiques et privées de recherche, des centres de formation et le savoir-faire des entreprises, dans une démarche partenariale destinée à dégager des synergies et promouvoir des collaborations sur des projets innovants.

Le succès des pôles dépend de quatre facteurs :

- la mise en œuvre d'une **stratégie commune de développement** économique cohérente avec la stratégie globale du territoire ;
- des **partenariats approfondis** entre acteurs autour de projets ;
- la concentration sur des **technologies destinées à des marchés à haut potentiel de croissance** ;
- **une masse critique suffisante** pour acquérir et développer une visibilité internationale.

Quatre ans après leur lancement, 71 pôles de compétitivité ont été créés dont 7 pôles mondiaux et 10 pôles à vocation mondiale.

Or, parmi les sept pôles de compétitivité mondiaux, trois concernent plus ou moins directement le secteur des semiconducteurs¹, même si Minalogic, avec son cluster micro/nanotechnologie, est celui qui est le plus directement dédié à ce secteur.

Les pôles de compétitivité constituent ainsi :

¹ Il s'agit de Systematic en Ile-de-France sur les logiciels et systèmes embarqués, de Solutions communicantes sécurisées en région Provence-Alpes-Côte d'Azur (visant à concevoir et développer des solutions nouvelles qui intègrent composants, logiciels, réseaux et systèmes afin d'échanger et traiter des informations de manière sécurisée et fiable) et de Minalogic avec un cluster micro et nanoélectronique et un cluster « system on chip » embarqué.

- **une source d'innovation** : la proximité des intervenants stimule la circulation de l'information et des compétences et facilite ainsi la naissance de projets plus innovants ;

- **une source d'attractivité** dans la mesure où la concentration des acteurs sur un territoire donne une visibilité internationale ;

- **un frein aux délocalisations** : la compétitivité des entreprises est liée à leur ancrage territorial à travers leur intégration dans un écosystème performant.

b) La réforme du crédit impôt recherche

Avec plus de 40,6 milliards de dollars par an, la France est le **4^{ème} investisseur** de l'Organisation pour le commerce et le développement économique (OCDE) en matière de dépense intérieure de recherche et développement.

Cependant, à l'inverse des autres principaux pays, la France a réduit son effort relatif en matière de financement de la R&D depuis les années 1990.

Une telle tendance serait inquiétante pour l'avenir de l'économie de notre pays si elle devait se prolonger. En effet, la recherche et le développement sont, à l'heure de la mondialisation, un des facteurs stratégiques de la compétitivité des entreprises et de la croissance.

Or, une analyse plus fine montre que ce problème français provient principalement des carences du financement de la R&D par les entreprises comme l'illustre le tableau ci-après.

Le financement de la recherche dans les principaux pays de l'OCDE
(en %)

	% de la dépense intérieure en R&D financée par :			
	Année	Les entreprises	L'administration	L'étranger
Etats-Unis (a,p)	2005	64,0	36,0	-
Japon (e)	2005	76,1	23,5	0,4
Allemagne	2004	66,6	30,9	2,5
France	2005	52,5	40,1	7,3
Royaume-Uni	2005	42,1	38,7	19,2
UE 25 (e)	2003	53,6	37,9	
Total OCDE (e.p)	2005	62,5	-	-

(*) Etat, enseignement supérieur et institutions sans but lucratif

La réforme du crédit impôt recherche intervenue dans la loi de finances pour 2008 a donc pour but **d'encourager le développement de la recherche privée sur son territoire.**

Concrètement, elle a supprimé la part du crédit impôt recherche fondée sur l'accroissement des dépenses en R&D ainsi que le plafond du crédit qui était fixé à 16 millions d'euros.

Désormais, le taux du crédit d'impôt est de :

- 30 % pour la fraction des dépenses de recherche inférieure ou égale à 100 millions d'euros ;
- 5 % pour la fraction de dépenses supérieures à 100 millions d'euros.

Cette réforme est donc particulièrement intéressante pour les grandes entreprises qui consacrent des sommes importantes en R&D, telles que les entreprises de la microélectronique.

2. Des faiblesses à surmonter

Néanmoins, le secteur des semiconducteurs en France est pénalisé par l'absence de stratégie industrielle claire et par une lisibilité de la recherche publique encore insuffisante.

a) L'absence de stratégie industrielle

Les pôles de compétitivité sont censés incarner la nouvelle politique industrielle de la France. Même si leur création a un impact positif sur les **territoires en incitant au dialogue les représentants du monde de la**

recherche, de la formation et de l'industrie, ils sont trop nombreux et touchent des secteurs trop variés pour pouvoir être considérés comme un outil de stratégie industrielle.

A cet égard, des réserves peuvent être émises sur la tendance actuelle visant à remettre en cause les « grands programmes » au profit de politiques non ciblées de soutien à l'innovation. **Les déplacements de votre rapporteur en Asie et aux Etats-Unis ont confirmé que** l'essor d'entreprises leaders dans de nouveaux secteurs industriels est le fruit d'un volontarisme politique.

Actuellement, l'analyse stratégique fait défaut : la France se devrait d'identifier, au terme d'une analyse par secteur et sous-secteur scientifique et **au regard de son potentiel industriel les retards « irrattrapables » et les retards « rattrapables »,** vers lesquels les moyens devraient être concentrés. En amont de la détermination des objectifs budgétaires et des indicateurs de performance, **la définition d'une stratégie de recherche par grand domaine (« roadmap ») est essentielle.**

En outre, lorsque des priorités sont définies, leur mise en œuvre est défailante. La France n'a par exemple pas significativement réalloué les moyens de la recherche à la suite des décisions du CIRST¹ du 1^{er} juin 1999, qui prévoyaient une nette augmentation pour les **sciences du vivant et les sciences et technologies de l'information et de la communication.**

Enfin, **le flou est total** concernant **l'instance de proposition des grandes orientations nationales en matière de recherche.** S'agit-il du Haut Conseil de la science et de la technologie (HSCT) créé *ad hoc* par la loi d'avril 2006, du CIRST ou encore de la DGRI (direction générale de la recherche et de l'innovation) créée en 2006, au sein de laquelle une direction de la stratégie *« conçoit et anime la stratégie nationale en matière de recherche et d'innovation »* ?

b) Une lisibilité de la recherche publique encore insuffisante

La mise en place **d'un réseau de cinq grandes centrales de technologies** a été positive puisqu'elle a permis la mise à niveau des équipements de recherche et une plus grande structuration de la recherche publique. Néanmoins, après avoir visité quatre² sites sur cinq, votre rapporteur estime que la lisibilité de la recherche publique reste perfectible dans la mesure où de nombreux laboratoires travaillent sur les mêmes thématiques sans que soit vérifié si les recherches menées sont concurrentes ou complémentaires.

¹ Comité interministériel de la recherche scientifique et technique.

² Il s'agit du Laboratoire d'Électronique et des technologies de l'Information à Grenoble, du Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des Systèmes à Toulouse, de l'Institut d'Électricité Fondamentale à Orsay, du Laboratoire de Physique de la matière condensée et de Nanostructure à Marcoussis et de l'Institut de l'Électronique, de la Microélectronique et de Nanotechnologie de Lille.

Ainsi, à l'exception du LPN (laboratoire de photonique et de nanostructure), le LETI (laboratoire d'électronique et des technologies de l'information), le LAAS (laboratoire d'analyse et d'architecture des systèmes) et l'IEMN (institut d'électronique, de microélectronique et de nanotechnologies) travaillent sur les microsystèmes. Sans préjuger de la nécessité de multiplier les recherches sur ce secteur très porteur, votre rapporteur se demande s'il ne serait pas souhaitable, le cas échéant, de formaliser une collaboration entre ces trois centres de recherche sur ce secteur à l'image de l'alliance sur les technologies hétérogènes conclue au niveau européen entre le LETI, le CSEM, le VTT et les Fraunhofer.

c) L'avenir de Crolles

Freescale et NXP ayant mis un terme à leur alliance avec STMicroelectronics, la question de la pérennité du site de Crolles se pose, **même si les dirigeants de STMicroelectronics rencontrés au cours de cette étude ont insisté sur la volonté de STMicroelectronics de conserver ce site.**

L'alliance signée entre STMicroelectronics et IBM prévoit un accord croisé : STMicroelectronics adhère à l'alliance IBM qui développe à East Fishkill les technologies CMOS 32 et 22 nm et envoie une équipe d'ingénieurs. Parallèlement, IBM rejoint STMicroelectronics à Crolles pour le développement des technologies dérivées à forte valeur ajoutée pour les systèmes sur puce et affecte sur ce site une équipe d'ingénieurs. IBM s'engage également à aider STMicroelectronics à étendre son réseau de coopération à Crolles pour développer les technologies enrichies.

Néanmoins, votre rapporteur tient à rappeler que STMicroelectronics a dû déboursier 400 millions d'euros pour racheter la part des équipements de NXP et de Freescale à leur départ. Par ailleurs, le nombre de plaquettes produites actuellement à Crolles, soit 2.800 plaquettes par semaine, est insuffisant pour dégager des bénéfices. Il faudrait augmenter le volume de production à 4.800 plaquettes par semaine, ce qui représente un coût d'investissement de 750 millions de dollars.

Des discussions sont lancées avec les collectivités locales et la direction générale des entreprises du ministère de l'Economie, des finances et de l'industrie.

A ce stade, il convient de rappeler que l'importance stratégique de l'unité de production de STMicroelectronics à Crolles dépasse largement le pôle de compétitivité grenoblois et contribue largement à la reconnaissance internationale de la France dans le secteur de la microélectronique.

CONCLUSION

LE SECTEUR DE LA MICROÉLECTRONIQUE : UN CAS D'ÉCOLE DE LA PROBLÉMATIQUE GLOBALISATION - INNOVATION- DÉSINDUSTRIALISATION

L'industrie de la microélectronique est soumise à une concurrence mondiale. **Quelle que soit la nationalité de l'entreprise, sa stratégie d'implantation est globale et déterminée par la proximité avec les marchés porteurs et l'attractivité des territoires.** L'impact de la globalisation sur les Etats dépendra donc de leur capacité à influencer la naissance de nouveaux marchés et à augmenter l'attractivité de leur territoire.

A défaut d'une politique industrielle forte au niveau communautaire et en raison d'une attractivité faible liée à la fois au poids de sa fiscalité et à des règles de concurrence pénalisantes pour les investissements sur son territoire, l'Europe apparaît fragilisée par la globalisation.

Par ailleurs, l'innovation joue un rôle déterminant pour assurer la compétitivité des entreprises. Dans le secteur des semiconducteurs, non seulement les technologies évoluent très rapidement, mais la gamme des produits est renouvelée en permanence. Des sommes considérables sont donc consacrées à la recherche et développement afin d'encourager l'innovation.

L'Europe dispose d'atouts importants en matière d'innovation **tels qu'une population qualifiée, des centres de recherche reconnus internationalement et des instruments compétitifs d'incitation financière à l'innovation.** Face à la globalisation, elle s'efforce donc de se positionner sur les secteurs à forte valeur ajoutée (conception des produits) et tend à renoncer à la production. **Ainsi, dans le secteur de l'électronique grand public, il n'existe pratiquement plus de capacité de production dans l'Europe des 15 : les téléviseurs, les ordinateurs, les lecteurs de DVD, les téléphones portables sont désormais fabriqués dans les nouveaux Etats membres, voire en Asie.**

Cette tendance à la désindustrialisation de l'Europe va-t-elle s'étendre au secteur de la microélectronique ? **L'Europe va-t-elle renoncer à produire les composants et se spécialiser dans la conception des circuits ?** Votre rapporteur estime qu'une telle orientation conduirait à terme à la disparition de la microélectronique européenne et à la perte de compétitivité globale de pans entiers de l'économie.

Le développement des applications liées au « More than Moore » constitue une opportunité pour l'Europe, mais seulement à deux conditions.

D'une part, il faudra que sa spécialisation industrielle corresponde à l'essor des nouveaux marchés liés aux applications. **L'exemple des diodes luminescentes organiques illustre cette problématique.** Ces dernières ont vocation à se développer dans deux secteurs : les écrans et l'éclairage. Or, l'industrie européenne a « perdu la bataille des écrans » qui sont tous conçus et fabriqués par des entreprises asiatiques. En ce qui concerne l'éclairage, Philips est un acteur majeur mais la concurrence chinoise est forte. Les diodes luminescentes organiques ne constitueront donc un marché porteur pour l'Europe que si un tissu de PME innovantes se développe dans le domaine de l'éclairage.

D'autre part, si les applications liées au « More than Moore » peuvent permettre la reconversion des sites de production européens, ces restructurations seront coûteuses et nécessiteront l'intervention des Etats.

En outre, l'Europe doit conserver un volume minimum de production sur son territoire afin de garder la maîtrise de la technologie et de rester compétitive en matière d'innovation, même si elle n'a pas vocation à concurrencer les fondeurs taiwanais.

En effet, dans le segment « More Moore » du secteur des semiconducteurs, « la recherche suit la production » : concrètement, ce sont les préoccupations des industriels qui déterminent les nouveaux thèmes de recherche. Il serait donc à craindre que la délocalisation de la production entraîne celle des centres de recherche.

L'Europe doit donc poursuivre sa stratégie de développement de la compétitivité par l'innovation : l'objectif que se sont fixés les Etats européens à Lisbonne en visant une part consacrée à la recherche représentant 3 % du PIB reste plus que jamais d'actualité.

Néanmoins, cette politique doit s'accompagner d'une stratégie volontaire visant à lutter contre la désindustrialisation en Europe. Ainsi, le soutien public à l'innovation doit être mieux ciblé afin d'inciter la spécialisation technologique de l'Europe dans des marchés porteurs. **La question des aides à l'investissement doit également être posée dans la mesure où tous les grands pays concurrents y recourent.**

Par conséquent, l'Europe et la France ne peuvent pas se passer d'une politique industrielle volontariste établissant quelques priorités sectorielles qu'elles s'engagent à privilégier par des crédits récurrents à moyen terme.

Au terme de cette étude, il apparaît également que les applications liées aux progrès de la microélectronique sont à double tranchant.

Ce secteur devrait jouer un rôle crucial pour surmonter les défis sociétaux du XXIème siècle tels que la maîtrise des dépenses de santé et des coûts liés au vieillissement de la population, le renforcement de l'efficacité énergétique, la gestion du trafic routier et la sécurité des biens et des personnes.

Simultanément, la diffusion massive de la microélectronique dans nos objets quotidiens, la capacité de ces derniers à communiquer entre eux ainsi que le développement de technologies de traçage invisibles posent de réels problèmes en matière de protection des données à caractère privée.

En outre, non seulement l'industrie des semiconducteurs est très consommatrice en ressources naturelles, mais ses applications représentent une part non négligeable de la consommation d'électricité globale.

L'essor de la microélectronique doit donc être concilié avec le respect des données privées et de l'environnement.

La loi du 6 janvier 1978 modifiée le 6 août 2004 relative à l'informatique, aux fichiers et aux libertés a créé la commission nationale de l'informatique et des libertés. Celle-ci doit rester au cœur du dispositif de contrôle du respect des données privées par les technologies utilisant la microélectronique, même si la protection des libertés publiques doit être prise en compte dès le développement des produits pour être efficace.

Enfin, l'essor d'une « électronique verte » doit être vivement encouragé dans une stratégie globale de développement durable.

LES PROPOSITIONS

I. Soutenir le secteur de la microélectronique

A. Au niveau communautaire

RECOMMANDATION N°1 : engager une action concertée au niveau du Conseil européen pour rééquilibrer la parité entre l'euro et le dollar afin d'assurer à l'industrie européenne des conditions de concurrence plus justes.

RECOMMANDATION N°2 : charger l'Organisation Mondiale du Commerce (OMC) d'une étude sur les pratiques de soutien au secteur de la microélectronique par les pays membres de l'Union européenne et les Etats tiers. Les résultats obtenus seraient utilisés pour arrêter, dans le cadre de l'OMC, des règles visant à encadrer les subventions et exonérations fiscales accordées pour l'implantation d'unités de production.

RECOMMANDATION N°3 : aligner la réglementation européenne en matière d'aide sur les pratiques mondiales.

RECOMMANDATION N°4 : doter l'Union européenne d'une stratégie industrielle sectorielle qui reconnaisse les particularités de l'industrie de la microélectronique et autorise le cofinancement de grands projets d'investissement.

RECOMMANDATION N°5 : encourager le soutien massif de l'Union européenne et des Etats membres aux cinq projets structurants proposés par le livre blanc CATRENE portant sur la voiture autonome, la maîtrise de la consommation d'énergie, l'amélioration du système de santé, le renforcement de la sécurité et l'accès à la communication en large bande, et susceptibles de créer des marchés porteurs.

B. Au niveau national

RECOMMANDATION N°6 : s'engager dès maintenant dans l'élaboration de programmes structurants pour l'innovation dans le domaine des transports, de l'énergie, de la santé et de l'éducation, en tenant compte des spécificités de l'industrie française pour sélectionner les projets.

RECOMMANDATION N°7 : améliorer la lisibilité de la recherche publique en renforçant les partenariats entre les laboratoires travaillant sur les mêmes thématiques.

RECOMMANDATION N°8 : renforcer les liens entre les laboratoires publics et l'industrie en créant dans les organismes de recherche des instances de concertation associant les industriels et en constituant des laboratoires communs.

RECOMMANDATION N°9 : confier la valorisation de la recherche publique à un établissement existant qui aurait apporté la preuve de sa compétence en matière de transfert de technologie. Cet établissement serait mandaté pour valoriser les brevets d'un ensemble d'établissements sur un site géographique donné.

RECOMMANDATION N°10 : encourager l'emploi des chercheurs dans l'industrie par la valorisation des compétences des chercheurs et des dispositions statutaires facilitant leur mobilité.

RECOMMANDATION N°11 : prévoir dans le budget de l'Agence Nationale de la Recherche un financement spécifique pour les projets de partenariat transfrontalier en matière de recherche appliquée dans une optique de transfert industriel.

RECOMMANDATION N°12 : augmenter le budget du groupement d'intérêt public pour la coordination nationale de la formation en microélectronique considéré comme outil stratégique national de formation.

RECOMMANDATION N°13 : caler progressivement le taux normal d'impôt sur les sociétés sur la moyenne des pays de l'Union européenne (soit 25 %) d'ici 5 ans dans le cadre d'une stratégie européenne de construction d'un espace fiscal commun.

RECOMMANDATION N°14 : réformer la législation sur la taxe professionnelle en privilégiant une assiette sur la valeur ajoutée.

II. Concilier l'essor de la microélectronique avec le respect des données privées et de l'environnement

A. Concilier éthique et microélectronique

RECOMMANDATION N°15 : adapter les effectifs et le budget de la CNIL aux besoins nouveaux générés par la diffusion massive des instruments de contrôle issus de la microélectronique.

RECOMMANDATION N° 16 : introduire au cœur même de la technologie susceptible de porter atteinte à la protection des données personnelles un dispositif technique permettant de la neutraliser et d'encadrer strictement leur utilisation.

RECOMMANDATION N°17 : encourager l'élaboration d'une convention internationale sur la protection des données personnelles définissant des standards internationaux et leur donnant une force juridique contraignante.

B. Encourager le développement d'une « électronique verte »

RECOMMANDATION N°18 : utiliser les leviers de la puissance publique sous la forme d'initiatives « exemplaires » et par la réglementation pour développer « l'électronique verte » dans une stratégie globale de développement durable.

RECOMMANDATION N° 19 : informer les utilisateurs sur la consommation énergétique des appareils électroniques par un étiquetage clair et normalisé.

RECOMMANDATION N° 20 : sensibiliser l'opinion publique aux enjeux environnementaux de l'usage massif de l'électronique afin de développer des comportements « écologiquement » responsables.

RECOMMANDATION N° 21 : débloquer des crédits suffisants afin de réaliser des études toxicologiques de qualité visant à évaluer les risques liés aux nanoparticules, afin de soutenir les actions de prévention et de formation autour de ces risques et afin d'encourager une information responsable de la population.

Au terme de cette étude, la microélectronique européenne et française apparaît à la croisée des chemins.

Le « More than Moore » offre de nouvelles opportunités à l'Europe. En effet, c'est une voie de recherche moins capitalistique qui devrait créer de nombreux marchés porteurs dans les domaines de l'efficacité énergétique, des transports, de la santé et de la sécurité. L'excellence des laboratoires européens impliqués dans ce domaine de recherche, l'existence de leaders européens dans certains secteurs d'application, l'étroite coopération entre les industriels européens de la microélectronique et les fabricants des produits finis ainsi que le poids du marché intérieur sont autant d'atouts pour faire de l'Europe le leader mondial du « More than Moore ».

Néanmoins, certains signes sont inquiétants pour la compétitivité de la microélectronique européenne.

Alors que le marché européen représente 20 % de la demande globale de semiconducteurs, l'Europe attire moins de 8 % des investissements en capacité de production. Dans son rapport de 2005 sur la compétitivité de l'Europe, l'Association européenne des semiconducteurs¹ estime **qu'entre 1998 et 2003, 9 % des capacités de production européennes ont été délocalisées vers d'autres régions.**

Par ailleurs, les missions menées dans le cadre de cette étude en Asie et aux Etats-Unis montrent que **les soutiens dispensés par les concurrents de l'Europe au secteur de la microélectronique sont beaucoup plus massifs. En outre, ils s'inscrivent dans des stratégies lisibles établissant quelques priorités que les Etats s'engagent à privilégier par des crédits récurrents à moyen terme.**

Un diagnostic similaire pourrait être dressé pour l'industrie française de la microélectronique.

Depuis le dernier rapport de votre rapporteur sur ce secteur adopté par l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques en janvier 2003, **plusieurs réformes sont intervenues qui ont amélioré directement ou indirectement la compétitivité de l'industrie microélectronique française.**

Ainsi, la création d'un réseau de grandes centrales de technologie et la mise à niveau de ses équipements, la mise en place de pôles de compétitivité mondiaux, l'instauration d'une agence nationale de la recherche pour financer des projets de recherche, la création de l'OSEO, la réforme du crédit impôt recherche sont autant de mesures visant à soutenir l'innovation, considérée comme un facteur clé de la compétitivité.

¹ ESIA : European Semiconductor Industry Association

Néanmoins, la compétitivité de la France dans le secteur de la microélectronique est fragilisée à la fois par des éléments externes et des éléments internes.

Parmi les éléments externes figurent d'une part **les distorsions de concurrence** liées au soutien massif de cette industrie par les pays d'Asie et les Etats-Unis et, d'autre part, la hausse continue de l'euro par rapport au dollar depuis 2002.

Quant aux faiblesses internes, elles sont surtout liées à **l'absence d'une politique industrielle volontariste dans le secteur des semiconducteurs**, aux performances contrastées de la recherche publique et aux insuffisances constatées en matière de formation.

Il apparaît ainsi que si certaines mesures peuvent être prises au niveau national pour améliorer la compétitivité de la France dans le secteur des semiconducteurs, d'autres ne peuvent être envisagées qu'au niveau européen, voire mondial.

En effet, face à une industrie mondialisée dont le chiffre d'affaires s'élève à 256 milliards de dollars en 2007, la France, qui représente un marché de 2,7 milliards de dollars, pèse peu de poids pour imposer le respect de règles minimales de concurrence.

De même, le champion national STMicroelectronics, pourtant 5^{ème} producteur mondial de semiconducteurs avec un chiffre d'affaires de 10 milliards de dollars, ne représente que 4 % du marché mondial.

Quand on sait que STMicroelectronics doit être en mesure de consacrer près de 40 % de son chiffre d'affaire à des dépenses en R&D et en capital pour maintenir sa compétitivité, on comprend aisément qu'il cherche à nouer des alliances à la fois pour limiter ses coûts et atteindre une taille critique lui permettant de s'imposer sur un marché donné.

Cette recherche d'alliances est également indispensable au niveau étatique si la France souhaite, à travers l'Europe, influencer les règles du marché mondial.

I. SOUTENIR LE SECTEUR DE LA MICROÉLECTRONIQUE

A. LES PROPOSITIONS AU NIVEAU COMMUNAUTAIRE

1. Mettre un terme à la surévaluation de l'euro par rapport au dollar

Le quasi doublement du prix de l'euro face au dollar depuis 2002 (passé de 0,81 \$/€ à 1,56 \$/€ en mai 2008) affecte fortement la compétitivité des sites français et européens.

Selon un responsable de STMicroelectronics, une variation de la parité \$/€ de 1 cent coûte 27 millions d'euros à cette entreprise. En conséquence, **la variation de la parité \$/€ de 21 cents** entre juin 2007 (1€ = 1.34\$) et juin 2008 (1€ = 1.55\$) **a coûté 380 millions d'euros à STMicroelectronics.**

A moyen terme, la poursuite de la baisse du dollar menace le maintien en Europe non seulement des capacités de production, mais également des centres de recherche.

Votre rapporteur plaide donc pour une action politique concertée au niveau européen afin de rééquilibrer la parité entre l'euro et le dollar dans un sens plus favorable à l'industrie européenne. Il souhaite rappeler que si la politique des taux d'intérêt est du ressort de la Banque Centrale Européenne, la politique de change est de la responsabilité du Conseil européen.

RECOMMANDATION N°1 : engager une action concertée au niveau du Conseil européen pour rééquilibrer la parité entre l'euro et le dollar afin d'assurer à l'industrie européenne des conditions de concurrence plus justes.

2. Assurer le respect de règles minimales de concurrence

Le choix des implantations d'unité de production est guidé par des considérations économiques, à savoir la proximité des marchés et la compétitivité des sites.

En réalité, cette dernière est largement faussée par le poids des subventions accordées par les gouvernements.

Votre rapporteur récuse tout angélisme et sait pertinemment que toute implantation d'unité de production s'accompagne d'une participation financière de la part de l'Etat et/ou de la région qui l'accueille. L'implantation de STMicroelectronics à Crolles ou d'AMD à Dresden n'a pas fait exception à la règle.

Néanmoins, il s'interroge sur les dérives d'un système qui, faute de règles fixées au niveau international et acceptées par tous, conduit à des surenchères entre Etats et à un effet d'aubaine pour les fabricants de semiconducteurs qui arrivent ainsi à faire supporter une part croissante du coût de construction, voire de fonctionnement de leurs unités de production par la collectivité.

RECOMMANDATION N°2 : charger l'Organisation Mondiale du Commerce (OMC) d'une étude sur les pratiques de soutien au secteur de la microélectronique par les pays membres de l'Union européenne et les Etats tiers. Les résultats obtenus seraient utilisés pour arrêter, dans le cadre de l'OMC, des règles visant à encadrer les subventions et exonérations fiscales accordées pour l'implantation d'unités de production.

3. Adapter les règles du droit de la concurrence européen à la pratique mondiale

La réglementation européenne vise à éliminer les pratiques non concurrentielles dans l'espace de l'Union européenne. Son application est donc centrée sur cet espace. Or, la concurrence est mondiale.

Il serait donc souhaitable que l'Union européenne redéfinisse les règles d'attribution des aides d'Etat au secteur de la microélectronique en prenant en considération la réalité du marché mondial.

On peut ainsi s'interroger sur la pertinence de « l'encadrement communautaire des aides à la recherche et à la technologie » qui pose les règles du droit européen applicables en la matière.

Maintenir dans l'espace européen, principalement pour les entreprises européennes, des règles et des procédures contraignantes qui contrastent avec celles des principaux concurrents de l'Europe ne fait que pénaliser nos industries. En outre, justifier ce maintien par la nécessité de faire respecter la libre concurrence a peu de sens dans un contexte où la pression des coûts de recherche, de développement et de production contraint les entreprises européennes à coopérer sur presque tous les segments de la filière.

Il convient donc de définir de nouvelles règles et de préconiser des pratiques qui tiennent compte des deux caractéristiques de l'industrie des semiconducteurs :

1) C'est **un secteur aidé massivement par les Etats tiers** qui le jugent stratégique pour la compétitivité de leurs entreprises tout en reconnaissant ses énormes besoins capitalistiques pour financer ses capacités de production et sa recherche et développement,

2) C'est **un secteur dans lequel la concurrence joue moins entre les entreprises des Etats membres de l'Union européenne qu'entre les entreprises européennes et celles des pays tiers**. A cet égard, il convient de rappeler que le chiffre d'affaires cumulé des trois entreprises européennes classées parmi les 10 premiers producteurs mondiaux de semiconducteurs représente 22 milliards de dollars, soit seulement 8,5 % des ventes mondiales.

RECOMMANDATION N°3 : aligner la réglementation européenne en matière d'aide sur les pratiques mondiales.

RECOMMANDATION N°4 : doter l'Union européenne d'une stratégie industrielle sectorielle qui reconnaisse les particularités de l'industrie de la microélectronique et autorise le cofinancement de grands projets d'investissement.

4. Influencer la création de marchés porteurs pour l'industrie européenne de la microélectronique

Comme il a été indiqué précédemment, l'industrie de la microélectronique, notamment avec le développement du « More than Moore », pourrait contribuer à surmonter certains défis sociétaux du XXI^{ème} siècle tels que l'explosion des dépenses de santé, les coûts liés au vieillissement de la population, l'accroissement de l'efficacité énergétique, la gestion du trafic routier ou encore l'amélioration de la sécurité.

En outre, non seulement ce sont des marchés porteurs pour l'industrie de la microélectronique, mais ils auront un effet d'entraînement sur d'autres secteurs industriels comme l'automobile, l'instrumentation médicale, les télécommunications, les logiciels etc. ainsi que sur les services aux entreprises et aux particuliers.

Les chiffres suivants évaluent le potentiel de quelques uns de ces marchés au niveau mondial.

Selon les estimations présentées dans le livre blanc du programme EUREKA CATRENE, en 2011, **le marché mondial des semiconducteurs destinés aux technologies sans fil** devrait atteindre 21 milliards de dollars, tandis que les ventes de produits électroniques liés à cette technologie devraient s'élever à 72 milliards de dollars.

De même, **les ventes globales de semiconducteurs pour le secteur médical** devraient représenter 10 milliards de dollars en 2011, tandis que le chiffre d'affaires des équipements médicaux électroniques devrait atteindre 87 milliards de dollars.

Néanmoins, ces marchés peineront à se développer sans un soutien fort des Etats.

D'abord, les ruptures technologiques sur lesquelles ils reposent exigent la mise en place de programmes de recherche et développement longs et coûteux.

Ensuite, ces nouveaux marchés correspondent souvent à des choix de société que les industriels ne peuvent imposer par la seule technologie, comme l'illustrent les deux exemples suivants.

- Les économies d'énergie

Le renforcement de l'efficacité énergétique exige non seulement la mise au point de technologies moins consommatrices en énergie, mais également leur diffusion à travers leur substitution aux technologies existantes moins économes. Les domaines principalement visés sont l'éclairage et les équipements électriques et électroniques. Néanmoins, l'investissement dans ces nouvelles technologies représente un coût. A travers une politique d'incitation et/ou de réglementation, les autorités publiques peuvent donc accélérer le remplacement « naturel » des anciens équipements.

- La télémédecine

Le développement de la santé à distance associé à l'informatisation de l'échange des données entre les autorités médicales devrait améliorer l'offre de soins tout en contenant les dépenses. Pourtant, au-delà des défis technologiques à surmonter, **ces perspectives constituent une véritable révolution dans l'organisation des soins et soulèvent de nombreuses questions à la fois sanitaires et éthiques.**

Une expérimentation récente de télémédecine dans une maison de retraite non médicalisée s'est ainsi heurtée à la résistance des médecins qui ont soulevé la question de leur responsabilité alors que la règle de « contact direct avec le patient » ne pouvait pas être respectée.

Une autre difficulté réside dans la conciliation du respect des données privées avec le traitement et l'échange informatique des informations médicales sur le patient.

De même, **la télémédecine ne pourra s'imposer que si elle est socialement acceptée et que son financement est assuré par les caisses de sécurité sociale.** Sa mise en place doit donc être soutenue par les autorités publiques à qui il reviendra de réunir les organismes payeurs, les professionnels de la santé et les organisations de malades pour définir ensemble ce nouveau type de médecine.

A cet égard, il convient d'insister sur l'importance des standards afin d'assurer une retombée mondiale aux projets retenus. Or, l'établissement de standards nécessite une étroite collaboration entre les industries développant les produits, les utilisateurs finaux et les autorités publiques. Avec ses 500 millions de consommateurs et une grande expérience de dialogue avec les industriels et les administrations de tous les Etats membres, l'Union européenne dispose d'atouts non négligeables pour imposer des standards reconnus au niveau international.

Comme il a été indiqué précédemment, le livre blanc du programme EUREKA CATRENE a retenu cinq projets phares susceptibles de mobiliser les énergies des industriels et des pouvoirs publics :

- le développement des voitures « autonomes »
- la réduction de la consommation en énergie des objets courants de 20 %
- l'amélioration du système de santé
- le renforcement de la sécurité
- l'accès à la communication en large bande dans toute l'Union européenne.

Le choix de ces projets apparaît judicieux dans la mesure où ils satisfont les cinq conditions nécessaires à la réussite de ces projets.

Ils correspondent à une réelle demande, même si elle est parfois encore diffuse, et ont vocation à satisfaire un marché mondial.

Ces projets ont pour objectif la différenciation par l'innovation technologique. Ils supposent d'importantes nouveautés scientifiques ou des besoins d'intégration entre de multiples technologies complexes.

Ils s'appuient sur une assise industrielle solide et peuvent être confiés à des industriels européens capables de les gérer, de les cofinancer et de devenir leaders dans ces nouveaux marchés rendus.

Ils ont vocation à améliorer la compétitivité européenne dans des secteurs hautement technologiques et à créer des emplois qualifiés pérennes.

Enfin, leur succès est dépendant de l'intervention de la puissance publique à trois niveaux :

- pour coordonner les acteurs privés avec les organismes publics tels que les laboratoires de recherche ;
- pour participer financièrement aux dépenses de recherche et développement générées par ces projets ;
- pour assurer le succès commercial du projet à travers des commandes publiques ou par le biais de réglementations et/ou d'incitations fiscales.

RECOMMANDATION N°5 : encourager le soutien massif de l'Union européenne et des Etats membres aux projets structurants proposés par le livre blanc CATRENE portant sur la voiture autonome, la maîtrise de la consommation d'énergie, l'amélioration du système de santé, le renforcement de la sécurité et l'accès à la communication en large bande, et susceptibles de créer des marchés porteurs.
--

Compte tenu de la lenteur des processus de décision liée au nombre des Etats membres et à leur intérêt plus ou moins fort pour ce secteur d'activité, une action concertée entre les cinq pays européens ayant un réel intérêt stratégique dans l'industrie des semiconducteurs est préconisée.

B. LES PROPOSITIONS AU NIVEAU NATIONAL

1. S'engager dans l'élaboration de programmes structurants nationaux

Le niveau communautaire apparaît le plus adapté pour soutenir les cinq projets de recherche et développement présentés précédemment pour au moins deux raisons :

- l'importance des sommes à mobiliser qui dépassent les capacités de financement d'un seul Etat ;
- le rôle de la réglementation communautaire qui peut faciliter la création d'un marché européen et donne donc au projet une dimension commerciale nécessaire pour pouvoir ensuite conquérir d'autres marchés au niveau mondial.

Néanmoins, votre rapporteur est conscient de la lenteur du processus de décision de l'Europe des 27. Or, les marchés porteurs évoqués précédemment intéressent également nos concurrents asiatiques et américains qui bénéficient du soutien massif de leurs gouvernements respectifs et de processus de décision bien plus efficaces.

Votre rapporteur estime donc que l'Etat français doit s'engager dès maintenant dans l'élaboration de programmes structurants sans attendre le résultat des négociations au niveau communautaire.

En outre, la sélection des programmes doit tenir compte des spécificités de l'industrie française.

Les faiblesses de notre industrie ont été constatées dans de nombreux rapports¹.

Les causes du décalage français en matière de R&D privée mériteraient une analyse plus approfondie. Néanmoins, il est évident que **la faiblesse de l'effort de R&D privée constitue un facteur défavorable au dynamisme de la valorisation de la recherche, car elle affecte directement**

¹ Deux rapports peuvent être cités :

- celui de Jean-Louis Beffa du 15 janvier 2005 : « Pour une nouvelle politique industrielle »,
- celui de l'inspection générale des finances et de l'inspection générale de l'administration de l'éducation nationale et de la recherche de janvier 2007 sur la valorisation de la recherche.

l'intensité des liens entre les entreprises et la recherche publique et limite l'accès de cette dernière aux sources de financement privé.

En outre, la répartition sectorielle de la R&D pose la question de l'articulation entre les points forts de la recherche publique et la spécialisation du tissu industriel français. L'absence de taille critique des opérateurs nationaux dans certains secteurs, par exemple les biotechnologies et les logiciels, freine la diffusion des résultats de la recherche publique.

Par conséquent, la sélection des programmes structurants doit répondre à une double préoccupation :

- **utiliser des compétences industrielles nationales déjà reconnues internationalement pour créer de nouveaux marchés.** Ainsi, compte tenu de l'excellence française dans le domaine automobile, le projet visant à développer des voitures « autonomes » mériterait d'être retenu car il peut s'appuyer sur de grands opérateurs industriels nationaux ;

- **utiliser ces programmes structurants pour faciliter l'essor d'entreprises leaders dans des secteurs industriels où la France est peu présente.** Lors de ses déplacements, votre rapporteur a constaté par exemple que contrairement à l'Allemagne, l'électronique organique et la photovoltaïque sont des secteurs peu investis par les industriels français alors même qu'ils sont très prometteurs pour l'avenir. La mise en place d'un programme structurant dans ces domaines permettrait à la France de rattraper son retard et d'élargir sa spécialisation industrielle en encourageant les PME actives dans ces secteurs à collaborer et à atteindre une taille critique pour pouvoir s'imposer au niveau international.

RECOMMANDATION N°6 : au niveau national, s'engager dès maintenant dans l'élaboration de programmes structurants pour l'innovation dans le domaine des transports, de l'énergie, de la santé et de l'éducation, en tenant compte des spécificités de l'industrie française pour sélectionner les projets.
--

2. Améliorer les performances de la recherche publique

a) Renforcer la lisibilité de la recherche publique

La mise en place d'un réseau des grandes centrales de technologies a été positive puisqu'elle a permis la mise à niveau des équipements de recherche et une plus grande structuration de la recherche publique. Néanmoins, après avoir visité quatre sites sur cinq, votre rapporteur estime que la lisibilité de la recherche publique reste perfectible dans la mesure où **de nombreux laboratoires travaillent sur les mêmes thématiques sans que**

soit vérifié si les recherches menées sont concurrentes ou complémentaires.

RECOMMANDATION N°7 : améliorer la lisibilité de la recherche publique en renforçant les partenariats entre les laboratoires travaillant sur les mêmes thématiques.

b) Rapprocher les chercheurs en science fondamentale des experts de l'industrie

Le rapprochement de la recherche publique et des entreprises est nécessaire aux deux parties pour trois raisons :

- d'abord, les travaux de développement accomplis dans les laboratoires des entreprises visent surtout l'amélioration de technologies existantes, mais donnent rarement lieu à des ruptures technologiques. Celles-ci proviennent surtout de la recherche fondamentale. Or, dans tous les pays, les contraintes qui pèsent sur les entreprises entraînent une concentration progressive de la recherche de base dans les laboratoires publics. **L'accès aux connaissances issues des laboratoires publics est dès lors stratégique pour les entreprises qui doivent conserver leur avantage en se maintenant à la frontière technologique ;**

- ensuite, **l'externalisation de la recherche vers les laboratoires publics peut être décisive pour les PME** qui ne disposent pas de capacités de recherche en interne ;

- enfin, les liens avec l'industrie permettent aux laboratoires publics de garder le contact avec les problèmes les plus en pointe et de développer des qualités spécifiques sans nuire à leur recherche (contrôle des délais, exigence de qualité, définition de standards minimaux etc).

La création des pôles de compétitivité vise à rapprocher le monde de l'industrie et celui de la recherche. D'autres mesures pourraient renforcer cette tendance.

La mise en place dans les organismes de recherche d'instances de concertation associant les industriels afin d'être régulièrement tenus informés de leurs attentes doit être systématisée. Les établissements de recherche qui ont établi des relations durables avec le monde de l'entreprise ont tous adopté cette pratique, que ce soit par la création d'un « club d'affiliés » pour les entreprises partenaires du laboratoire ou par la participation d'industriels aux comités d'orientation scientifique des organismes de recherche.

La constitution de laboratoires communs doit également être encouragée car ces derniers permettent une association étroite et prolongée entre les chercheurs et les industriels et favorisent la continuité entre l'accumulation de connaissances en amont et la résolution des problèmes finalisés qui se posent à l'industrie. En outre, ils permettent d'identifier de nouveaux thèmes de recherche liés à des préoccupations industrielles.

RECOMMANDATION N°8 : renforcer les liens entre les laboratoires publics et l'industrie en créant dans les organismes de recherche des instances de concertation associant les industriels et en constituant des laboratoires communs.

c) Professionnaliser les dispositifs de valorisation

Pour avoir un impact positif sur l'innovation, la productivité et la croissance, les résultats de la recherche publique doivent être valorisés, c'est-à-dire utilisés par le secteur privé pour développer des applications innovantes.

Or, les résultats de valorisation de la propriété intellectuelle en France sont très variables selon les établissements.

Globalement, les demandes de brevets effectuées par les acteurs de la recherche publique se sont fortement développées depuis 10 ans.

Néanmoins, **les recettes issues de la valorisation de la propriété intellectuelle se situent à un niveau relativement faible** (1 % de la dépense intérieure de recherche publique contre 3% aux Etats-Unis) **et sont très concentrées : le CEA, le CNRS et l'Institut Pasteur représentent 90 % du résultat national.** Les universités représentent moins de 6 % du total, en fort contraste avec leur part dans l'effort public de recherche (27 % de la dépense intérieure de recherche publique en 2004).

Les principaux obstacles au développement d'une politique de valorisation efficace sont liés au manque de professionnalisation et de masse critique des services chargés de gérer les dépôts de brevet et de leur valorisation.

RECOMMANDATION N°9 : confier la valorisation de la recherche publique à un établissement existant qui aurait apporté la preuve de sa compétence en matière de transfert de technologie. Cet établissement serait mandaté pour valoriser les brevets d'un ensemble d'établissements sur un site géographique donné.

Parallèlement, les chercheurs doivent être sensibilisés à l'intérêt de déposer des brevets. Selon le directeur de la politique industrielle du CNRS, seuls 3 à 4 % des chercheurs déposeraient des brevets alors que 20 % au moins seraient potentiellement susceptibles de le faire.

d) Encourager l'emploi des chercheurs dans l'industrie

Le transfert de technologie ne se réduit pas à la recherche partenariale, à la propriété intellectuelle et à la création de start-up. Selon plusieurs enquêtes menées auprès d'entreprises, **l'emploi de doctorants, de docteurs ou de chercheurs en cours d'activité est considéré comme le mode principal de transfert de technologie.**

Or, il apparaît que l'emploi de chercheurs par les entreprises demeure très insuffisant et tend à se dégrader. Ainsi, alors que 50 % des 75.000 chercheurs en entreprise sont des ingénieurs, les docteurs ne représentent que 12 % du total, 4 % étant à la fois ingénieurs et docteurs.

Cette « exception française » s'explique en partie par la faiblesse de la R&D privée qui n'incite pas à l'embauche de docteurs, mais également par la division du système d'enseignement supérieur entre les universités et les écoles d'ingénieurs.

RECOMMANDATION N°10 : encourager l'emploi des chercheurs dans l'industrie par la valorisation des compétences des chercheurs et des dispositions statutaires facilitant leur mobilité.

Plusieurs dispositions ont déjà été prises dans ce sens qui ont eu un résultat mitigé¹. Néanmoins, à travers les mesures proposées auparavant (développement de liens étroits entre l'industrie et la recherche fondamentale par la consultation régulière des industriels sur leurs attentes et l'amélioration des transferts de technologie), les industriels devraient fréquenter davantage les chercheurs et être amenés à prendre conscience de leur valeur et de leur utilité, ce qui devrait les inciter à en embaucher davantage.

e) Inciter la coopération entre les Instituts Carnot et les centres de recherche européens

Le label Carnot a été créé afin de favoriser la recherche partenariale, c'est-à-dire la conduite de travaux de recherche menés par des laboratoires publics en partenariat avec des entreprises. Par conséquent, tout en réalisant de

¹ Par exemple les conventions industrielles de formation par la recherche (CIFRE) et les aides au recrutement de docteurs financées par l'OSEO.

la recherche amont, les instituts Carnot font également de la recherche appliquée dans une optique de transfert industriel.

Or, le développement de partenariats avec des centres de recherche européens est également essentiel dans ce type de recherche en permettant non seulement d'étoffer l'offre de recherche vis-à-vis des entreprises, mais également d'accélérer le processus de recherche et donc le transfert des résultats.

Plusieurs projets de coopération ont été lancés par les instituts Carnot, notamment avec les instituts Fraunhofer. Néanmoins, le nombre des projets reste limité dans la mesure où ils doivent être financés sur les fonds propres des instituts Carnot. Il est à noter qu'en Allemagne, au contraire, les instituts Fraunhofer sont incités à développer ce type de partenariats puisqu'ils bénéficient alors d'un financement spécifique, qui vient s'ajouter à leur dotation initiale.

Il conviendrait donc de s'inspirer de cette pratique.

RECOMMANDATION N°11 : prévoir dans le budget de l'Agence Nationale de la Recherche un financement spécifique pour les projets de partenariat transfrontalier en matière de recherche appliquée dans une optique de transfert industriel.

3. Renforcer les crédits de formation en microélectronique

Le développement des entreprises de la micro et de la nanoélectronique repose sur des évolutions technologiques majeures et rapides : une formation pratique d'excellence des jeunes ingénieurs est un facteur déterminant pour la réussite de cette industrie stratégique.

L'importance des investissements à consentir, la nécessaire mutualisation des moyens et la prise en compte de la répartition géographique des industries, des laboratoires de recherche et des établissements de formation ont conduit à la création d'un réseau qui regroupe les douze pôles interuniversitaires et les services nationaux de conception assistée par ordinateur, de test et de prototypages de circuits intégrés.

Ce réseau est géré par le Groupement d'Intérêt Public pour la Coordination Nationale de la Formation en Microélectronique (GIP CNFM) qui assure :

- **une mutualisation des moyens opérationnels** (les pôles du GIP CNFM regroupent des équipements de fabrication et de caractérisation, du matériel informatique et des logiciels pour la conception assistée par

ordinateur et le test des circuits et systèmes intégrés, ainsi que pour le prototypage) ;

- **un soutien pour l'innovation pédagogique et scientifique** : le GIP CNFM anime des groupes de travail (multimédia, systèmes sur une puce, nanotechnologies,...) et mène des études sur l'évolution des métiers et des compétences. Il établit les bilans nationaux de la formation et propose des programmes d'action en micro et nanoélectronique ;

- **la diffusion des connaissances** : le GIP CNFM organise des journées pédagogiques bisannuelles dont le but est de favoriser les échanges entre enseignants en micro et nanoélectronique. Il contribue à la réalisation des journées nationales du réseau doctoral en microélectronique (JNRDM) et à l'organisation du congrès européen sur la formation en microélectronique (EWME). Il publie une lettre d'information "La Puce à l'Oreille", sur la vie et les activités du réseau, sur le devenir des jeunes diplômés et sur les métiers de la micro et nanoélectronique ;

- **le contact permanent avec les entreprises** : le réseau des universités et écoles d'ingénieurs du GIP CNFM entretient des contacts étroits avec le SITELESC, syndicat professionnel qui représente l'ensemble des entreprises de la micro et nanoélectronique. En 2002, le SITELESC et le GIP CNFM ont créé le groupement d'intérêt public GIP CNFM. Ainsi, tous les grands principes de l'activité du réseau national sont décidés en commun entre universités et entreprises.

Le GIP CNFM agit dans le cadre de conventions pluriannuelles signées avec le ministère chargé de l'enseignement supérieur et de la recherche.

Depuis 12 ans, les subventions ministérielles au GIP CNFM sont en forte diminution : alors qu'elles s'élevaient à 3,6 millions d'euros en 1994, elles atteignent 900.000 euros en 2007, soit 100 euros par étudiant puisque les moyens du réseau CNFM sont utilisés chaque année par 9.000 personnes. Or, une formation en microélectronique de qualité exige l'acquisition d'équipements performants et leur renouvellement régulier pour disposer d'outils à la pointe de la technologie.

RECOMMANDATION N°12 : augmenter le budget du GIP CNFM considéré comme outil stratégique national de formation .

4. Créer un environnement fiscal plus favorable pour les entreprises implantées en France

La fiscalité joue un rôle majeur pour éviter de pousser des entreprises implantées en France à délocaliser leurs activités de production et de R&D et pour inciter l'implantation sur notre territoire d'entreprises étrangères.

Or, la France souffre d'un handicap compte tenu du niveau de son impôt sur les sociétés par rapport à ses partenaires européens et de l'existence de la taxe professionnelle qui frappe les immobilisations corporelles.

En 2008, alors que le taux nominal français de l'impôt sur les sociétés s'établit à 33,33 %, la moyenne dans les pays de l'Union européenne est de 25,8 %. En Suède, en Finlande ou au Danemark, le taux normal de l'impôt sur les sociétés est compris entre 26 % et 28 %.

En outre, ce désavantage des taux n'est pas compensé par des effets d'assiette : même si on prend en compte les taux effectifs et non plus nominaux, la France est un des pays qui taxe le plus lourdement ses entreprises.

Une réduction importante du taux de l'impôt sur les sociétés serait donc un signal fort en terme d'attractivité.

Par ailleurs, **la taxe professionnelle affaiblit considérablement l'attractivité de notre territoire** comme le rappelait le rapport de la commission sur la réforme de la taxe professionnelle¹.

D'abord, la taxation des investissements au niveau local constitue, dans l'Union européenne, **une singularité française**.

Elle **renchérit également le coût des facteurs de production et pénalise les nouveaux investissements, l'emploi et la croissance**, en particulier dans les secteurs à forte intensité capitalistique. Ainsi, le montant de la taxe professionnelle par emploi payé par STMicroelectronics sur Crolles se situe aux alentours de 28.000 euros par emploi, alors que le montant moyen en Isère pour les entreprises se situe autour de 1.800 euros par emploi.

Enfin, elle **alourdit la charge fiscale des entreprises vis-à-vis de leurs concurrentes étrangères** et pèse particulièrement sur les secteurs les plus exposés à la concurrence internationale qui sont les plus intensifs en capital. Il convient de rappeler que cette imposition est très concentrée. En 2003, 10 % des entreprises payaient 90 % de la taxe professionnelle et généraient 75 % de la valeur ajoutée. 1 % des entreprises payait 70 % de la taxe professionnelle et générait 55 % de la valeur ajoutée.

¹ Commission sur la réforme de la taxe professionnelle présidée par M. Olivier Fouquet : rapport au Premier ministre, 21 décembre 2004.

Certes, la réforme de la taxe professionnelle introduite par la loi de finances pour 2006, articulée en deux principaux volets¹, devrait alléger la fiscalité des entreprises. **Néanmoins, la taxe professionnelle reste très pénalisante pour les entreprises à forte intensité capitalistique et intervient pour une large part dans le déficit d'attractivité de la France.**

Or, l'impact d'une unité de production de semiconducteurs est énorme sur l'emploi. Selon une étude menée en 2007 par les cabinets Reverdy associés et Christian Genthon Consultant, le site de Crolles a permis la création de 4.415 emplois directs et plus de 22.000 emplois indirects.

RECOMMANDATION N°13 : caler progressivement le taux normal d'impôt sur les sociétés sur la moyenne des pays de l'Union européenne (soit 25 %) d'ici 5 ans dans le cadre d'une stratégie européenne de construction d'un espace fiscal commun.

RECOMMANDATION N°14 : adapter la législation sur la taxe professionnelle en privilégiant une assiette sur la valeur ajoutée.
--

¹ *Prorogation illimitée de la possibilité pour les entreprises d'entrer dans le dispositif de dégrèvement pour investissements nouveaux (DIN) et plafonnement effectif de la taxe professionnelle à 3,5 % de la valeur ajoutée.*

II. CONCILIER L'ESSOR DE LA MICROÉLECTRONIQUE AVEC LE RESPECT DES DONNÉES PRIVÉES ET DE L'ENVIRONNEMENT

A. CONCILIER ÉTHIQUE ET MICROÉLECTRONIQUE

1. Renforcer les moyens de la CNIL afin qu'elle puisse remplir l'ensemble de ses missions correctement

Depuis sa création en 1978, la CNIL a connu une croissance exponentielle de ses activités compte tenu de l'explosion du nombre de traitements de données personnelles enregistrés chaque année.

En 2007, elle a ainsi enregistré 56.404 nouveaux fichiers. Depuis 1978, ce sont au total 1.213.404 fichiers qui ont été déclarés à la CNIL.

En outre, la loi n ° 2004-801 du 6 août 2004 relative à la protection des personnes physiques à l'égard des données à caractère personnel a renforcé ses missions de contrôles et de sanctions administratives.

Si depuis 4 ans, le budget de la CNIL bénéficie régulièrement de crédits supplémentaires¹ et de création de postes, au regard des missions qui lui sont dévolues et des comparaisons internationales avec ses homologues européens, cet effort reste insuffisant.

A titre de comparaison, le ratio nombre d'agents par million d'habitants est de 1,6 pour la CNIL, ce qui la classe au dernier rang par rapport à ses homologues de l'Union européenne.

En terme d'effectifs globaux, elle comptera 120 postes à la fin de 2008 contre 260 pour l'autorité britannique, 400 pour l'autorité allemande et 300 pour l'autorité canadienne.

Or, l'efficacité de ses missions exige des ressources humaines suffisantes. Ainsi, on peut s'interroger sur la réalité des contrôles qu'elle exerce lorsqu'on compare les 164 missions de contrôle menées en 2007 par les 7 agents affectés à cette fonction aux 56.000 fichiers déposés dans l'année.

De même, faute d'effectifs et de crédits supplémentaires, elle ne peut engager une véritable politique d'information des citoyens et de communication sur l'importance des enjeux auxquels elle doit répondre. **A titre de comparaison, l'autorité anglaise dispose d'un budget de communication 30 fois supérieur à celui de la CNIL, soit environ 3 millions d'euros contre 100.000 euros pour la CNIL.**

Afin que la CNIL puisse assurer efficacement la protection des données à caractère privé, son budget doit donc être augmenté significativement. Pour limiter l'impact de cette hausse sur les finances

¹ Le budget de la CNIL s'élève à 11,4 millions d'euros dans la loi de finances initiale pour 2008.

publiques, une contribution pourrait être exigée des entreprises pour frais d'enregistrement des fichiers.

RECOMMANDATION N°15 : adapter les effectifs et le budget de la CNIL aux besoins nouveaux générés par la diffusion massive des instruments de contrôle issus de la microélectronique.

2. Intégrer dans la technologie la protection des données personnelles

La poursuite de la miniaturisation électronique permet déjà en partie et rendra définitivement envisageable dans un avenir très proche le développement massif (parce que peu coûteux) de dispositifs parfaitement invisibles.

Pour éviter que les applications qui en découleront portent atteinte à nos vies privées, la voie juridique permet un encadrement ferme de ces technologies.

Néanmoins, selon de nombreux juristes entendus par votre rapporteur, elle est insuffisante. Il faudrait s'assurer que dès le développement de la technologie, des « garde-fous » technologiques soient instaurés visant à garantir certains principes fondamentaux comme la sécurité et la confidentialité des données. Dans le domaine des RFID par exemple, on pourrait introduire un dispositif qui désactive les RFID une fois que la caisse du magasin a été franchie.

RECOMMANDATION N° 16 : introduire au cœur même de la technologie susceptible de porter atteinte à la protection des données personnelles un dispositif technique permettant de la neutraliser et d'encadrer strictement leur utilisation.

3. Encourager la signature d'une convention internationale sur la protection des données personnelles

Parce que l'industrie de la microélectronique est une industrie mondiale, les technologies sont diffusées très rapidement et sur l'ensemble de la planète. Or, l'autorégulation de ces dernières par les acteurs de leur développement n'est pas satisfaisante aujourd'hui.

En effet, **la sensibilité des nations au respect de la vie privée et des données privées est très variable** et ce sont souvent les pays les moins exigeants en matière de protection des données à caractère personnel qui sont responsables de la conception et de la production des technologies susceptibles de porter atteinte aux libertés fondamentales.

Néanmoins, **il existe un consensus à peu près général sur la nécessité d'assurer la protection des données personnelles** aussi bien au niveau des Etats qu'au niveau des grandes entreprises de l'immatériel comme Google, Microsoft ou IBM. En effet, ces dernières sont conscientes que la pérennité de leur succès commercial repose sur l'acceptation sociale des technologies de l'information. En outre, parce que leur marché est mondial, elles sont intéressées par une harmonisation au niveau international des règles de protection des données personnelles.

Les différends portent sur les standards minimaux de protection des données privées à instaurer et sur leur caractère contraignant.

Votre rapporteur plaide pour l'élaboration d'une convention internationale sur la protection des données personnelles. Plusieurs instances peuvent être concernées pour lancer cette initiative, telles que l'OCDE ou l'Organisation des Nations Unies.

Il convient toutefois de remarquer que l'Union européenne s'est dotée, à travers la directive 95/46 relative à la protection des personnes physiques à l'égard des traitements des données à caractère personnel et à la libre circulation des données, d'une des législations les plus protectrices au monde. **En conséquence, il faudra s'assurer qu'une éventuelle harmonisation au niveau international des règles de protection des données personnelles ne remette pas en cause le dispositif juridique introduit dans les pays membres de l'Union européenne.**

RECOMMANDATION N°17 : encourager l'élaboration d'une convention internationale sur la protection des données personnelles définissant des standards internationaux et leur donnant une force juridique contraignante.

B. ENCOURAGER LE DÉVELOPPEMENT D'UNE « ÉLECTRONIQUE VERTE »

1. Utiliser les leviers d'intervention de la puissance publique pour développer « l'électronique verte »

La puissance publique dispose de deux leviers privilégiés pour encourager le développement de « l'électronique verte » : la commande publique et la réglementation.

- La commande publique

Les administrations sont fortement consommatrices d'équipements électroniques, tels que les serveurs, les ordinateurs, les imprimantes, les photocopieuses, les fax etc.

Les politiques d'achat des administrations publiques doivent donc **privilégier l'acquisition des équipements les plus efficaces énergétiquement** afin de soutenir ce segment de marché et lui permettre de se développer.

- La réglementation

Par ailleurs, la puissance publique peut accélérer l'essor de « l'électrique verte » en instaurant des normes renforçant les exigences d'efficacité énergétique à la fois des composants électroniques et des équipements électriques/électroniques. Ainsi, **l'Union européenne pourrait imposer aux constructeurs la suppression de la position** de veille dans les téléviseurs, les lecteurs de DVD, les chaînes hi-fi et les ordinateurs dans la mesure où elle est responsable d'un gaspillage énorme d'énergie.

Par ailleurs, on pourrait envisager l'obligation d'installer dans toutes les nouvelles constructions des capteurs commandant l'éclairage, le chauffage et la climatisation.

Au niveau national, compte tenu de l'omniprésence de la microélectronique dans notre environnement quotidien et du rôle fondamental qu'elle peut jouer dans un objectif de développement durable, il apparaît indispensable d'intégrer la problématique de « l'électronique verte » dans les négociations liées au Grenelle de l'environnement.

RECOMMANDATION N°18 : utiliser les leviers de la puissance publique sous la forme d'initiatives « exemplaires » et par la réglementation pour développer « l'électronique verte » dans une stratégie globale de développement durable.

2. Sensibiliser les utilisateurs à la consommation des appareils électroniques

Le renforcement de la réglementation devra néanmoins s'accompagner d'une sensibilisation des utilisateurs sur l'impact énergétique des appareils électroniques. A l'instar des appareils ménagers, **l'introduction d'étiquettes portant sur la consommation des équipements dans les présentoirs permettrait de comparer directement les performances énergétiques des produits.**

Par ailleurs, des campagnes de sensibilisation devront être menées pour inciter la population à des comportements plus respectueux de l'environnement. Votre rapporteur a ainsi été informé d'une expérience menée dans une administration française dans laquelle les employés se sont astreints à des gestes aussi simples qu'éteindre la lumière de leur bureau et leurs équipements électroniques lorsqu'ils s'absentaient. La facture énergétique a été soudain réduite de 30 % !

RECOMMANDATION N° 19 : informer les utilisateurs sur la consommation énergétique des appareils électroniques par un étiquetage clair et normalisé.
--

RECOMMANDATION N° 20 : sensibiliser l'opinion publique aux enjeux environnementaux de l'usage massif de l'électronique afin de développer des comportements « écologiquement » responsables.
--

3. Multiplier les programmes de recherche pour anticiper et prévenir les éventuels risques en matière de santé et d'environnement liés aux nanoparticules

Comme il a été rappelé précédemment, **le secteur des semiconducteurs est aujourd'hui relativement peu concerné par les risques liés aux nanoparticules.**

La fabrication industrielle des composants utilise très peu ce type de matériau si ce n'est dans les opérations de dépôt tandis que l'intégration des nanotubes de carbone dans les puces reste encore cantonnée dans les laboratoires de recherche.

Par ailleurs, les nanomatériaux présents dans les semiconducteurs n'entrent pas en contact direct avec la population ou l'environnement dans la mesure où ils sont encapsulés dans d'autres couches de métal.

Quant au produit final, il est conditionné dans un boîtier.

Néanmoins, l'utilisation des nanomatériaux dans la microélectronique ayant vocation à se diffuser, il faut s'interroger dès maintenant sur les moyens pour protéger les salariés susceptibles d'être en contact avec les nanoparticules et s'intéresser à leur devenir lorsque les produits électroniques arrivent en fin de vie.

RECOMMANDATION N° 21 : débloquer des crédits suffisants afin de réaliser des études toxicologiques de qualité visant à évaluer les risques liés aux nanoparticules, afin de soutenir les actions de prévention et de formation autour de ces risques et afin d'encourager une information responsable de la population.

ANNEXE I - LISTE DES PERSONNES AUDITIONNÉES

I – AUDITIONS EN FRANCE

- M. Patrick ALNOT, Responsable du secteur nanosciences et nanotechnologies, ministère de l'Enseignement supérieur et de la recherche
- M. André-Jacques AUBERTON-HERVÉ, Président directeur général, SOITEC S.A.
- M. Jean-Paul BEISSON, Directeur général, Altis Semiconductor
- M. Henri BENISTY, Professeur, Institut d'optique
- Mme Dorothee BENOÎT-BROWAEYS, Déléguée générale, Vivagora
- Mme Bernadette BENSAUDE-VINCENT, Directrice de recherche au CNRS
- M. Gilles BLOCH, Directeur général de la recherche et de l'innovation, ministère délégué à l'Enseignement supérieur et à la recherche
- M. Jacques BONGRAND, Président du directoire de l'Agence pour l'innovation industrielle (AII)
- M. Joseph BOREL, Président, JB-R&D
- M. Rachid BOUCHAKOUR, Directeur du laboratoire des matériaux et microélectronique de Provence (L2MP)
- M. Jean-Philippe BOURGOIN, Directeur du programme Nanosciences, CEA
- M. Alain BRAVO, Directeur général de l'Ecole supérieure d'électricité (SUPELEC)
- Mme Martine CAUVIN, Directeur des affaires institutionnelles, groupe Orange France Telecom
- Dr Pierre CHAVEL, Directeur de recherche au CNRS, Directeur général adjoint de l'Institut d'optique, chargé de la recherche
- Mme Sophie CLUET, Directrice du département Mathématiques, physique, nanosciences et technologie, ministère de l'Enseignement supérieur et de la recherche
- M. Michel COSNARD, Président directeur général, Institut national de recherche en informatique et en automatique (INRIA)

- M. Maxime DAHAN, Responsable du département de physique et de biologie, laboratoire Kastler Brossel, Ecole normale supérieure
- M. Guy DUBOIS, Directeur général, MEDEA +
- M. Jacques DULONGPONT, Directeur général, CATRENE
- M. François EWALD, Professeur, Conservatoire national des arts et métiers
- M. Emmanuel GABLA, Chef du service technologies et société de l'information, Direction des entreprises, ministère de l'Economie, des finances et de l'emploi
- M. Eric GAFFET, Directeur de recherche, CNRS
- M. Pierre GATTAZ, Président directeur général de RADIAL, Président de la Fédération des industries électroniques et numériques (FIEN)
- M. Laurent GOUZÈNES, Directeur du plan et des programmes d'étude, STMicroelectronics SA
- Dr Xavier GRISON, Responsable du métier « composants », ministère de la Défense
- M. Jean-Charles GUIBERT, Directeur de la valorisation, Commissariat à l'énergie atomique (CEA), Directeur de MINATEC
- M. Jacques GUICHARD, Directeur des laboratoires internationaux de recherche et de développement, groupe Orange France Telecom
- M. Pierre GUILLON, Directeur scientifique, département Sciences et technologies de l'information et de l'ingénierie, CNRS
- M. Philippe HUBERT, Directeur des risques chroniques, Institut national de l'environnement industriel et des risques (INERIS)
- M. Richard KIELBASA, Professeur, Ecole supérieure d'électricité (SUPELEC)
- M. Etienne KLEIN, Adjoint au Directeur du laboratoire de recherche sur les sciences de la matière (LARSIM), CEA
- Mme Stéphanie LACOUR, Chargée de recherche au Centre d'études sur la coopération juridique internationale (CNRS-CECOJI)
- M. Vincent LAFLÈCHE, Directeur général, Institut national de l'environnement industriel et des risques (INERIS)
- M. Bernard LALOUX, Directeur des relations avec les entreprises, Institut d'optique
- Mme Isabelle de LAMBERTERIE, Directeur de recherche, CNRS-CECOJI
- M. Michel LANNON, Directeur scientifique du département mathématiques, physique, planètes et univers du CNRS

- M. Louis LAURENT, Responsable du département matières et information à l'agence nationale de la recherche (ANR)
- M. Marc LEDOUX, Directeur de la politique industrielle, CNRS
- M. Gwendal LE GRAND, Chef du service de l'expertise informatique de la Commission nationale de l'informatique et des libertés (CNIL)
- M. Philippe LEMOINE, Président directeur général, Lasergroup
- M. Jean-Luc MATE, Vice-Président « Stratégie et Technologie » pour l'Europe de l'Ouest, Siemens VDO
- M. Eric PLESKA, Responsable du pôle technique matériaux et composants, ministère de la Défense
- M. Bernard PRUNIAUX, Directeur général, Atmel Rousset
- M. Laurent ROJEY, Chef du bureau Microélectronique, direction générale des Entreprises, ministère de l'Economie, des finances et de l'emploi
- M. Jean THERME, Directeur du CEA-Grenoble
- M. Lionel TORRES, Professeur, responsable du département Microélectronique, Laboratoire d'informatique, de robotique et de microélectronique de Montpellier (LIRMM)
- M. Alex TÜRCK, Sénateur, Président de la Commission nationale de l'informatique et des libertés (CNIL)
- M. Jean VAYLET, Directeur général d'ATMEL, ex-Président du SITELESC
- M. Dominique VERNAY, Directeur de la recherche et de la technologie du groupe Thalès
- M. Enrico VILLA, Président, CATRENE
- M. Claude WEISBUCH, Directeur de recherche au CNRS et à l'Ecole polytechnique

Grenoble

- M. Roland BLANPAIN, Chef du service microsystemes pour les objets communicants, Laboratoire d'électronique et de technologie de l'information (LETI)
- M. Patrick BOISSEAU, Responsable au CEA du projet Nanobio
- M. Patrick BONNEFOND, Directeur général, SOFILETA S.A.
- M. Jean-Pierre BRAUN, Directeur général, CROCUS Technology
- M. Jean CHABBAL, Chef du département micro-technologies pour la biologie et la santé, Laboratoire d'électronique et des technologies de l'information (LETI)

- M. Cyril COLIN-MADAN, Design Platform Manager, STMicroelectronics
- M. Michel DESTOT, Député, Maire de Grenoble
- M. Bernard DIENY, Chercheur, CEA
- M. Alain FONTAINE, Directeur, Institut Néel-CNRS
- M. Bertrand FONTAN, Directeur, STMicroelectronics
- M. Paul JACQUET, Directeur, Institut national polytechnique de Grenoble (INPG)
- M. Laurent JAMET, Directeur du développement, SOFILETA S.A.S.
- M. Nicolas LETERRIER, Délégué général, Minalogic
- Dr Laurent MALIER, Directeur du LETI
- M. Didier MARSACQ, Directeur du Laboratoire d'innovations pour les technologies des énergies nouvelles et les nano-matériaux (LITEN)
- M. Gérard MATHERON, STMicroelectronics SA, Directeur du site de Crolles, Président du SITELESC
- M. Jean-Claude MICHALINA, General Manager Cores and Subsystems Division, STMicroelectronics SA
- M. Mehdi MOUSSAVI, Ingénieur, CEA
- M. Pierre PUGET, Adjoint au chef du LETI
- M. Dominique THOMAS, Directeur des programmes de recherche et de développement, STMicroelectronics SA
- M. Gilles THOMAS, Senior Manager, Programmes de recherche et de développement, STMicroelectronics SA
- M. Daniel VELLOU, Vice-président du LETI

Marcoussis

- M. Dominique MAILLY, Directeur adjoint du Laboratoire de photonique et de nanostructures (LPN)
- M. Jean-Yves MARZIN, Directeur du LPN
- M. Ariel LEVENSON, Directeur du C'nanoIDF, Directeur de recherche
- Mme Marjorie THOMAS, Docteur en physique, Chargée de mission C'nano IDF

Toulouse

- M. Denis BLANC, Directeur général France, Freescale semiconductor
- M. Raja CHATILA, Directeur, Laboratoire d'analyse et d'architecture des systèmes (LAAS)
- M. Christian JOACHIM, Directeur de recherche, Centre d'élaboration des matériaux et d'études structurales (CEMES)
- M. Robert PLANA, Directeur scientifique, LAAS
- M. Jean-Louis SANCHEZ, Directeur adjoint, LAAS

Orsay

- M. CHAPPERT, Institut d'électronique fondamentale (IEF)
- Mme Sophie GUERON, Chercheur, Laboratoire de physique des solides (LPS)
- M. LOURTIOZ, Directeur, IEF
- M. Jean-Paul POUGET, Directeur de recherche, Directeur du LPS
- Mme Sylvie RETAILLEAU, Professeur, IEF
- Mme Odile STEPHAN, Enseignant-chercheur, LPS
- M. André THIAVILLE, Chercheur, LPS

Lille

- M. Alain CAPPY, Directeur, Institut d'électronique, de microélectronique et de nanotechnologie (IEMN)

II - DÉPLACEMENTS À L'ÉTRANGER

A. EN ASIE

CHINE POPULAIRE

- M. Sébastien BERNARD, Directeur stratégique, STMicroelectronics Shanghai
- M. Andy CHUANG, Directeur du marketing, CSMC
- M. Songlin FENG, Directeur, Institut des Microsystèmes et de l'information technologique de Shanghai
- M. Kyo Jung HONG, Senior Manager, Hynix-ST Semiconductor

- M. Jiwei JIAO, Professeur, Institut des microsystemes et des technologies de l'information de Shanghai
- M. Jong Keun KANG, Vice-président, Hynix-ST Semiconductor
- M. D.W. KIM, CFO/ Vice-président, Hynix-ST Semiconductor
- M. Young Jin KO, Manager, Hynix-ST Semiconductor
- M. Le LUO, Professeur, Institut des Microsystemes et de l'information technologique de Shanghai
- M. Thierry MATHOU, Consul général de France à Shanghai
- M. Yves ROUBINET, Directeur administratif et financier, Hynix-ST Semiconductor
- M. Kyo Seok SEO, General Manager, Hynix-ST Semiconductor
- M. Xi WANG, Professeur, Institut des Microsystemes et de l'information technologique de Shanghai
- Mme Aileen YAN, Directrice des relations publiques, CSMC Technologies Corporation

SINGAPOUR

- M. Emmanuel ARENE, Président Directeur général, Soitec Singapore
- M. Pierre BUHLER, Ambassadeur de France à Singapour
- M. Yves CARMONA, Premier Conseiller, Ambassade de France
- M. Jean-Louis CHAMPSEIX, Directeur des ressources humaines, STMicroelectronics Asia Pacific
- M. Damian CHAN, Directeur adjoint, Conseil du développement économique
- M. Song Hwee CHIA, Président, Chartered semiconductor manufacturing
- M. Gert DREWES, Vice-président du développement en Asie, RECIF Technologies
- M. Laurent FILIPOZZI, Directeur des opérations, Soitec Singapore
- M. François GUIBERT, Président Directeur général, STMicroelectronics Asia Pacific
- Mme Xue Min HANG, Directeur de laboratoire, Conseil du développement économique
- M. Kee Keong Patrick KHAW, Institut de la microélectronique

- M. Charles LEE, Directeur stratégique du marketing, Institut de la microélectronique
- M. Daniel NOGUEIRA, Directeur des achats, Soitec Singapore
- M. Patrick PLANTE, Président Directeur général, Centre Thales Technologie de Singapour
- M. Bertrand STOLTZ, Directeur financier, STMicroelectronics Asia Pacific
- M. Chor Shen TAY, Conseil de recherche pour la science et l'ingénierie
- M. Keng Hwa TEO, Responsable du développement industriel, Institut de la microélectronique
- M. Yong Chua TEO, Directeur du développement industriel, Institut de la microélectronique

TAÏWAN

- M. Ching-Ray CHANG, Professeur et Président, département de physique, université nationale de Taiwan
- M. Yih Chen CHAO, Directeur général, bureau du développement industriel, ministère des Affaires économiques
- M. Tzi-Dar CHIUEH, Professeur, département de l'ingénierie électrique, université nationale de Taiwan
- M. Ma DAO, Président, Institution Chung Hua pour la recherche économique
- M. James C. HO, Directeur adjoint, Fonds national de développement
- M. David S. HONG, Président, Institut de recherche économique de Taiwan
- M. Liang-Han HSIEH, Directeur général, Institut de recherche technologique et industrielle (ITRI)
- Mme Chun-Fang HSU, Directrice générale adjointe, Conseil pour la planification économique et le développement
- M. John JAHN, Directeur, ITRI
- M. Jason KAO, Directeur adjoint, Institution de recherche économique de Taiwan (TIER)
- M. Handy KO, Directeur adjoint, Taiwan Semiconductor Manufacturing Company (TSMC)

- M. Michael KRAMER, Relations publiques et institutionnelles, Taiwan Semiconductor Manufacturing Company (TSMC)
- Mme Hwey-Ying LEE, Chercheur, Conseil national de la science
- M. Johnsee LEE, Président, ITRI
- M. York LIAW, Secrétaire Général du Conseil pour la planification économique et le développement (CEPD)
- Mme Vivian Y.P. LIEN, Directrice adjointe, bureau du développement industriel, ministère des Affaires économiques
- M. Muching LIN, Manager, Calyon, Crédit agricole CIB
- M. Cheng-Chin (Eric) LU, bureau du développement industriel, ministère des Affaires économiques
- M. Philippe PELLEGRIN, Président de la Chambre européenne de commerce de Taipei
- M. Jean-Claude POIMBOEUF, Directeur, Institut français de Taipei
- M. Daigee SHAW, Président, Institution Chung Hua pour la recherche économique
- Mme Dana TSAI, Relations publiques, Taiwan Semiconductor Manufacturing Company (TSMC)
- M. Chung-Ping TSAI, bureau du développement industriel, ministère des Affaires économiques
- Mme Cheryl TSENG, Directeur Général, Conseil pour la planification économique et le développement (CEPD)
- M. Cary H. WANG, bureau du développement industriel, ministère des Affaires économiques
- M. Wayne WANG, Conseil national de la science
- M. An-Yeu WU, Directeur Général adjoint, ITRI
- M. Hung-Duen YANG, Secrétaire d'Etat, Conseil national de la science
- M. Thomas M. F. YEH, Vice-président, Conseil pour la planification économique et le développement (CEPD)

B. AUX ETATS-UNIS

- M. Tilak AGERWALAZ, Vice-président, Centre de recherche d'IBM à Watson
- M. Robert ALLEN, Centre de recherche d'IBM à Almaden
- M. Pushkar APTE, Vice-président, Association de l'industrie des semiconducteurs, San Jose, Californie
- M. Bob BLEWER, Senior Manager, Parc technologique et scientifique de Sandia, Nouveau-Mexique
- M. Gian-Luca BONA, Centre de recherche d'IBM à Almaden
- Mme Lisa BREEDEN, Directeur de la communication, Etat du Nouveau-Mexique
- M. Bert BRUGGEMAN, Vice-président, SVTC Technologies
- M. Jim CLINCH, Chef de programme, Parc technologique et scientifique de Sandia, Nouveau-Mexique
- Mme Donna COTE, Manager, IBM Microelectronics, East Fishkill
- M. Richard B. DASHER, Directeur, Centre des systèmes intégrés, université de Stanford
- M. Duane DIMOS, Directeur, Institut national des nanotechnologies
- M. Géraud DUBOIS, Ingénieur, Centre de recherche d'IBM à Almaden, San Jose, Californie
- M. Dan EDELSTEIN, IBM Fellow Manager, université d'Albanie
- M. Michael M. FANCHER, Collège des nanosciences et nanotechnologies, université d'Albanie
- M. H. Eliot FANG, laboratoires nationaux de Sandia
- M. Paul A. FARRAR, Vice-président, IBM New York
- Mme Deirdre FIRTH, Responsable du développement économique, ville d'Albuquerque
- M. August N. FRANZE, Directeur, IBM Yorktown
- Mme Kathy GAITHER, laboratoires nationaux de Sandia
- M. Paolo A. GARGINI, Directeur de la stratégie technologique, Intel Corporation
- M. Percy GILBERT, Vice-président, IBM New York
- Mme Anne GUNDELFINGER, Vice-président, Intel Corporation
- Mme Jill HALVERSON, assistante du sénateur Jeff BINGAMAN, Nouveau-Mexique

- M. Brian V. HANNAFIN, Vice-président, Centre pour la croissance économique
- M. Daryl HATANO, Vice-président, Association de l'industrie des semiconducteurs, San Jose, Californie
- M. Gilbert V. HERRERA, Directeur, laboratoires nationaux de Sandia
- M. Aymeril HOANG, Chef du secteur des technologies de l'information, Mission économique, San Francisco
- M. Peter D. HOH, IBM New York
- M. Thomas H. IVERS, Directeur de production, IBM New York
- M. Steve JANACK, Collège des nanosciences et nanotechnologies, université d'Albanie
- M. Didier JANCI, Chef de la mission économique de San Francisco
- M. John E. KELLY, Vice-président, IBM Yorktown
- M. Hervé KERMEL, Manager, IBM New York
- M. Bulent KURDI, Centre de recherche d'IBM à Almaden
- M. Byron D. MARTIN, Operations Manager, Centre de recherche d'IBM à Watson
- M. David MEDEIROS, université d'Albanie
- Mme Jackie Kerby MOORE, Directrice exécutive, Parc technologique et scientifique de Sandia, Nouveau-Mexique
- M. Pierre-François MOURIER, Consul général de France à San Francisco
- M. Marcel PELGROM, Professeur, Centre des systèmes intégrés, université de Stanford
- M. Jan RABAEY, Centre de recherche de Berkeley sur les technologies sans fil
- M. Daniel RUGAR, Centre de recherche d'IBM à Almaden
- M. James Y. RYAN, Professeur de nanoscience, centre technologique d'Albanie
- M. William ROZICH, Directeur, université d'Albanie
- M. Ron SAMPSON, Directeur, STMicroelectronics
- Mme Paula SCHOENEMAN, Parc technologique et scientifique de Sandia, Nouveau-Mexique
- Mme K. SCOTTIE GINN, Vice-président, IBM Yorktown
- M. Ghavam SHAHIDI, IBM Fellow, Directeur, IBM New York

- M. Neal D. SHINN, laboratoires nationaux de Sandia
- Mme Yumiko TAKAMORI, Intel Corporation
- M. Thomas N. THEIS, Directeur, IBM New York
- M. Michel VILLEMAIN, Président Directeur général, PRESTO Engineering
- Mme Quat T. VU, Program manager, Intel Corporation
- Mme Carolyn WALLACE, Centre de recherche d'IBM à Almaden

C. EN BELGIQUE

- M. Costa ANDROPOULOS, Chef d'unité, Direction générale des entreprises et de l'industrie
- M. Dirk BEERNAERT, Chef d'unité, Direction générale de la société d'information et des medias
- M. Herbert von BOSE, Directeur général des technologies industrielles, Direction générale de la recherche
- Mme Imke DEBECKER, Interuniversity MicroElectronics Center (IMEC)
- M. Ludo DEFERM, Président du Business Development, IMEC
- M. Jean-Charles DJELALIAN, Direction générale de la concurrence, Commission européenne
- M. Roger DE KEERSMAECKER, Vice-président des relations stratégiques, IMEC
- M. Jean-Noël DURVY, Directeur de la politique d'innovation, Direction générale des entreprises et de l'industrie, Commission européenne
- M. Heico FRIMA, Direction générale de la recherche, Commission européenne
- M. Mark MACGANN, Directeur général, European Information and Communications Technology Industry Association (EICTA)
- M. Donald O'CONNELL, Directeur, Propriété intellectuelle, IMEC
- M. Per Martin SCHMIDT, Direction générale de la recherche, Commission européenne
- M. Carlos TENREIRO, Chef adjoint d'unité, Direction générale de la concurrence, Commission européenne
- M. Renzo TOMELLINI, Direction générale de la recherche, Commission européenne

- M. Peteris ZILGAVIS, Chef d'unité, Direction générale de la recherche, Commission européenne

D. AUX PAYS-BAS

- M. Hans BAKKER, Responsable des programmes d'innovation, ministère des Affaires économiques
- M. Jo DE BOECK, Directeur de l'IMEC-Pays-Bas
- M. Hans DIJKHUIS, Directeur, ASML
- M. Clement GOOSSENS, Directeur, Point-One
- M. Rob HARTMAN, Directeur, ASML
- M. Pim KAT, Directeur, Technobis, Point-One
- M. Bert KOOPMANS, Professeur, Représentant NANONED
- M. Arthur van der POEL, Ambassadeur du programme Point-One
- M. Alfred van ROOSMALEN, Vice-président, NXP Semiconductors
- M. Ben RUCK, Consultant pour le programme d'innovation, SenterNovem
- M. Louk A. H. TEUNISSEN, Secrétaire d'Etat à l'innovation
- M. Fred WESTERVELD, Responsable du groupe de travail sur les PME dans Point-One
- M. Willem ZWALVE, Directeur pour l'innovation, ministère des Affaires économiques

E. EN ALLEMAGNE

- M. Johann W. BARTHA, Professeur, université technique de Dresde
- M. Dieter BIMBERG, Directeur, Institut de physique du solide
- Mme Gaby-Fleur BÖL, Institut fédéral d'évaluation des risques
- M. Manfred DIETRICH, ministère de l'éducation et de la recherche
- M. Jens DREWS, Directeur des relations institutionnelles
- Mme Elke ECKSTEIN, Vice-président, AMD
- Mme Astrid EPP, Institut fédéral d'évaluation des risques
- M. Reinhard GRÜNWALD, Office d'évaluation des choix technologiques auprès du Bundestag

- M. Jürgen KOSSACK, Vice-président Siemens AG
- M. Hubert LAKNER, Directeur, Institut Fraunhofer de microsystemes photoniques
- M. Klaus-Dieter LANG, Directeur adjoint, Institut Fraunhofer d'intégration microélectronique et de fiabilité
- M. Norbert LEHNER, Infineon, Président du groupe de support de l'European Nanoelectronics Initiative Advisory Council (ENIAC)
- M. Thomas PETERMANN, Office d'évaluation des choix technologiques auprès du Bundestag
- M. Harald PÖTTER, Marketing, Institut Fraunhofer d'intégration microélectronique
- Mme Karin RATHS, Relations publiques, AMD Saxony
- M. Christoph REVERMANN, Office d'évaluation des choix technologiques auprès du Bundestag
- M. Jürgen RÜSTIG, Vice-président, Qimonda Dresden
- M. Wolfgang SCHMID, Président Directeur général, Qimonda Dresden, Président de la Silicon Saxony
- M. Oliver SEILER, Invest in Germany
- M. Gildas SORIN, Président Directeur général, NOVALED
- M. Reiner WITTKOWSKI, Vice-président, Institut fédéral d'évaluation des risques

ANNEXE II - LISTE DES ABRÉVIATIONS

AFSSET : Agence Française de Sécurité Sanitaire de l'Environnement et du Travail

CATRENE : Cluster for Application and Technology Research in Europe on Nanoelectronics

CEA : Commissariat à l'Energie Atomique

CEMES : Centre d'Elaboration de Matériaux et d'Etudes Structurales

CSEM : Centre Suisse d'Electronique et de Microélectronique

CIME : Centre Interuniversitaire de Microélectronique

CITST : Comité interministériel de la recherche scientifique et technique

CMOS : Complementary Metal Oxyde Semiconductor

CNIL : Commission Nationale de l'Informatique et des Libertés

CPU : Central Processing Unit

DARPA : Defense Advanced Research Projects Agency

DRAM : Dynamic Random Access Memory

DGRI : Direction générale de la recherche et de l'innovation

ENIAC : European Nanoelectronics Initiative Advisory Council

FCRP : Focus Center Research Program

GRC : Global Research Corporation

HSCT : Haut Conseil de la science et de la technologie

IEMN : Institut d'Electronique, de Microélectronique et de Nanotechnologies

IEF : Institut d'Electronique Fondamentale

INERIS : Institut National de l'Environnement industriel et des Risques

INPG : Institut National Polytechnique de Grenoble

INRIA : Institut National de Recherche en Informatique et en Automatique

ITRS : International Technology Roadmap for Semiconductors

JESSI : Joint European Submicron Silicon

LAAS : Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des Systèmes

LCD : Liquid Crystal Display

LETI : Laboratoire d'Electronique et de Technologies de l'Information

LITEN : Laboratoire d'Innovations pour les Technologies des Energies nouvelles et des nanomatériaux

LPN : laboratoire de photonique et de nanostructure

MARCO : Microelectronics Advanced Research Corporation

MEDEA : Microelectronics Development for European Applications

MRAM : Mémoires Magnétiques à Accès Aléatoire

OLED : Organic Light Emitting Diode

PCRD : Programme cadre de recherche et développement

RFID : Radio Frequency Identification

SIA : Semiconductor Industry Association

SITELESC : Syndicat des Industries de Tubes Electroniques et SemiConducteurs

SOI : silicium sur isolant

TSMC : Taiwan Semiconductor Manufacturing Company

UMC : United Microelectronics Corporation