



HAL
open science

Electronique et mondialisation

Christophe Bernard, Laurent Vautherin

► **To cite this version:**

Christophe Bernard, Laurent Vautherin. Electronique et mondialisation. Sciences de l'ingénieur [physics]. 1995. hal-01909777

HAL Id: hal-01909777

<https://minesparis-psl.hal.science/hal-01909777>

Submitted on 31 Oct 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



ECOLE DES MINES
DE PARIS



[306]

Electronique et mondialisation

Quel avenir pour le secteur de la micro- électronique ?

Ch. Bernard et L. Vautherin

Christophe BERNARD
Ingénieur des Mines

Laurent VAUTHERIN
Ingénieur de l'Armement

Ecole des Mines de Paris
Corps Techniques de l'Etat
Promotion 1992

Electronique et mondialisation

Quel avenir pour le secteur de la micro-électronique ?

Pilote: Marc FOSSIER, Directeur de Cabinet du Président
et du Directeur Général de France Telecom

Terrain: Didier HUCK, sous-directeur prospectives et affaires internationales
au SERVICE des Industries de Communication et de Services (SERICS) à la DGSI,
Ministère de l'Industrie.

REMERCIEMENTS

Nous remercions le lecteur de consacrer à l'étude de notre mémoire un temps que nous savons compté.

Ce rapport ne peut en aucun cas être considéré comme purement personnel : il s'agit d'un travail d'équipe, la contribution de chacun des interlocuteurs que nous avons pu rencontrer nourrissant notre réflexion de nouvelle matière.

A ce titre, nous tenons à remercier tout particulièrement Marc FOSSIER, dont le soutien permanent nous a été des plus précieux, ainsi que Didier HUCK et Pascal LAGARDE du SERICS, dont la connaissance du secteur a fourni de nombreuses pistes de réflexion.

Nous remercions également les représentants des différentes entreprises et administrations que nous avons rencontrés au long de cette année, et naturellement les membres de la commission des travaux personnels qui ont eu la patience d'assister aux présentations intermédiaires de nos travaux, et qui, en nous livrant leurs réflexions, nous ont permis d'affiner notre travail de recherche, et d'éviter les nombreuses embûches qu'il comportait.

SOMMAIRE

Introduction	1
I. La croissance fulgurante de la micro-électronique.....	2
A. L'explosion du marché	2
B. La course à l'intégration.....	3
1. La loi de Moore.....	3
2. Les road-maps ou cartes technologiques	4
C. Fluctuations et grandes constantes	5
II. L'importance des semi-conducteurs.....	7
A. Un chiffre d'affaire devenu considérable.....	7
B. L'omniprésence de l'électronique	8
1. Pervasion de l'électronique et croissance.....	8
2. La révolution des ASIC	9
3. Des prises de position fortes dans les autres secteurs.....	12
a. L'informatique	12
b. L'électronique grand-public	13
c. Les communications.....	13
1. La numérisation.....	13
2. Les réseaux de communications mobiles	13
3. Les réseaux de communication à haut débit	14
d. Le secteur automobile	14
1. L'aide à la navigation	14
2. Le multiplexage.....	15
e. L'aéronautique et l'espace	15
C. Aspects stratégiques	15
1. La répartition de la production dans le monde	16
2. Éléments historiques.....	16
3. Les problèmes de dépendance	17
III. Des risques considérables	19
A. Des cycles et des fluctuations terribles.....	19
1. Le mécanisme des cycles du silicium	19
2. Des temps de vie courts et des risques importants	21

B.	Une activité très concurrentielle	21
1.	Peu de barrières naturelles	21
2.	La concurrence en temps	22
a.	Le phénomène d'apprentissage	22
b.	L'impossible politique du cavalier seul	24
C.	Des investissements colossaux	25
1.	La recherche et le développement	25
2.	Les investissements matériels.....	26
IV.	La croissance est-elle soutenable ?.....	28
A.	Les limites technico-économiques.....	28
B.	Les limites de marché.....	29
C.	Les limites financières	30
1.	Des gains de productivité considérables.....	30
2.	L'amortissement des unités de production	31
3.	La faiblesse des besoins en fonds de roulement.....	32
V.	Quel avenir pour le secteur de la micro-électronique	33
A.	Chacun son usine: un modèle non soutenable	33
1.	L'explosion du prix des usines.....	33
a.	La complexité croissante des unités	34
b.	La concentration des fournisseurs de machines.....	34
c.	La course au gigantisme des usines	34
2.	La réduction du nombre d'usines nouvelles	35
3.	Le difficile financement des nouvelles usines.....	36
4.	Une solution possible : le partage des usines	37
B.	La conception, un facteur de différenciation	37
C.	Les nouvelles organisations possibles.....	38
ABC	de la micro-électronique.....	40
	Qu'est-ce qu'un semi-conducteur ?.....	40
	Qu'est-ce qu'un circuit intégré ?	41
	La fabrication des semi-conducteurs	42
	Lexique	46
	Liste des personnes rencontrées	51

Introduction

Surtout connu pour ses aspects les plus spectaculaires, la miniaturisation et la puissance des circuits intégrés, le secteur de la micro-électronique a aujourd'hui atteint une taille plus que respectable : il pèse plus de 100 milliards de dollars dans le monde. De nouvelles usines se construisent chaque jour, qui apportent chacune emplois (plus de 1000 personnes), valeur ajoutée et surtout exportations au pays qui les accueille. C'est aussi, de plus en plus, un secteur stratégique pour l'ensemble de l'industrie : le silicium détermine souvent les performances, le prix et donc la compétitivité des produits dans lesquels il est installé, et s'accapare souvent la valeur ajoutée de ses clients.

Mais la micro-électronique n'est pas qu'un secteur qu'il faudrait maintenir pour des seules raisons d'indépendance nationale : c'est aussi un secteur qui s'est considérablement développé, puisqu'il croît de plus de 15% par an depuis 1970, qu'il subit des récessions d'une ampleur inouïe, et qu'il avance au rythme d'une révolution technique tous les cinq ans!

Au carrefour entre biens intermédiaires et produits de haute technologie, les semiconducteurs doivent sans cesse absorber des coûts de recherche et de développement plus élevés que ceux de l'industrie spatiale, et des investissements industriels qui feraient fuir les sidérurgistes.

Enfin, la micro-électronique est un domaine dans lequel les prix des nouvelles usines ne cessent de progresser, à un rythme encore plus frénétique que le marché.

C'est donc cette industrie que nous nous sommes efforcés de comprendre au long de ce mémoire, en analysant les ressorts qui fondent la croissance et les raisons pour lesquelles des industriels se sont lancés et survivent sur un tel marché, et en montrant enfin pourquoi la structure habituelle de la production va bientôt subir un profond bouleversement.

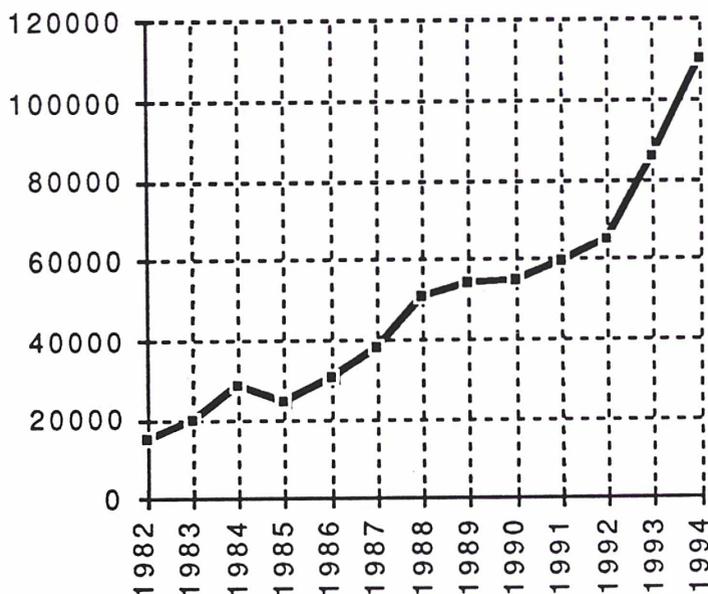
I. La croissance fulgurante de la micro-électronique

Nous étudierons ici le secteur de la micro-électronique au silicium, que l'on peut encore identifier sans être trop approximatif au secteur de la micro-électronique entière. En effet, s'il existe une autre filière, l'électronique à l'arséniure de gallium, celle-ci reste encore relativement confidentielle, même si elle joue un rôle clef dans la téléphonie portable, qui a actuellement le vent en poupe. De même, si les écrans plats sont de plus en plus souvent fabriqués dans des technologies proches de celles de la micro-électronique au silicium, leur marché s'éloigne trop de celui des autres composants pour pouvoir figurer dans cette étude. Le secteur des semiconducteurs englobe celui de la micro-électronique avec plus marginalement les composants dits discrets (diodes, transistors).

Deux expressions peuvent caractériser la croissance de la micro-électronique : la révolution permanente et le règne de l'exponentielle. Tous les paramètres techniques ou économiques ont évolué à une cadence aussi régulière que foudroyante, alors que les techniques de production ont été profondément transformées ces dernières décennies, au point que les électroniciens ont la même considération pour les procédés employés il y a dix ans seulement qu'un constructeur automobile pour les voitures à chevaux.

A. L'explosion du marché

Le secteur enregistre depuis 30 ans une croissance moyenne de 16% par an, chiffre d'autant plus vertigineux que le PIB mondial n'a, lui, crû que de 2,8% par an entre 1980 et 1990. Le chiffre d'affaires mondial en dollars est donc multiplié par 2 tous les 5 ans.



Graphie 1: Marché mondial des semiconducteurs (en G\$)

En soi, la croissance constitue déjà un facteur d'instabilité. En effet, pour supporter une telle croissance sans faire appel à de nouveaux actionnaires, les entreprises doivent avoir une capacité d'autofinancement suffisante, alors même que la concurrence féroce les incite à grignoter leurs marges. Pire: les investissements ne servent pas seulement à financer des augmentations de capacité, mais aussi à renouveler des équipements et des techniques de production rapidement obsolètes, car il faut suivre le rythme effréné des évolutions techniques.

Cette croissance a permis des ascensions fulgurantes, comme celle d'Intel, aujourd'hui premier fabricant de semi-conducteurs au monde, avec un chiffre d'affaires qui dépasse les 10 milliards de dollars. Sur ces dernières années, cette compagnie a pu s'offrir une croissance de plus de 30% par an de son chiffre d'affaires en dollars, et s'adjuger une part du marché des microprocesseurs pour micro-ordinateurs de plus de 80%, qui laisse bien peu de place pour les fabricants de clones (AMD et Cyrix) ou les standards concurrents (Apple). Intel a fondé sa croissance sur un type de composants, les microprocesseurs et microcomposants, ce qui lui vaut d'être parfois qualifié de fabricant de niche.

On peut également citer le cas de deux fabricants coréens: Samsung et Goldstar. Grâce à des apports de capital très massifs de la part de groupes ayant décidé de parier sur la micro-électronique et plus particulièrement sur les mémoires, ces deux entreprises ont rapidement gravi les échelons du classement mondial des entreprises. On retrouve ainsi un schéma similaire à celui de la montée en puissance des électroniciens japonais. Le chiffre d'affaires de Samsung a crû ces trois dernières années (92-94) de respectivement 29%, 60% et 61%, et figure au septième rang mondial derrière Texas Instruments. Goldstar, dont les ventes ont progressé de 90% en 1994, est à la 22ème place.

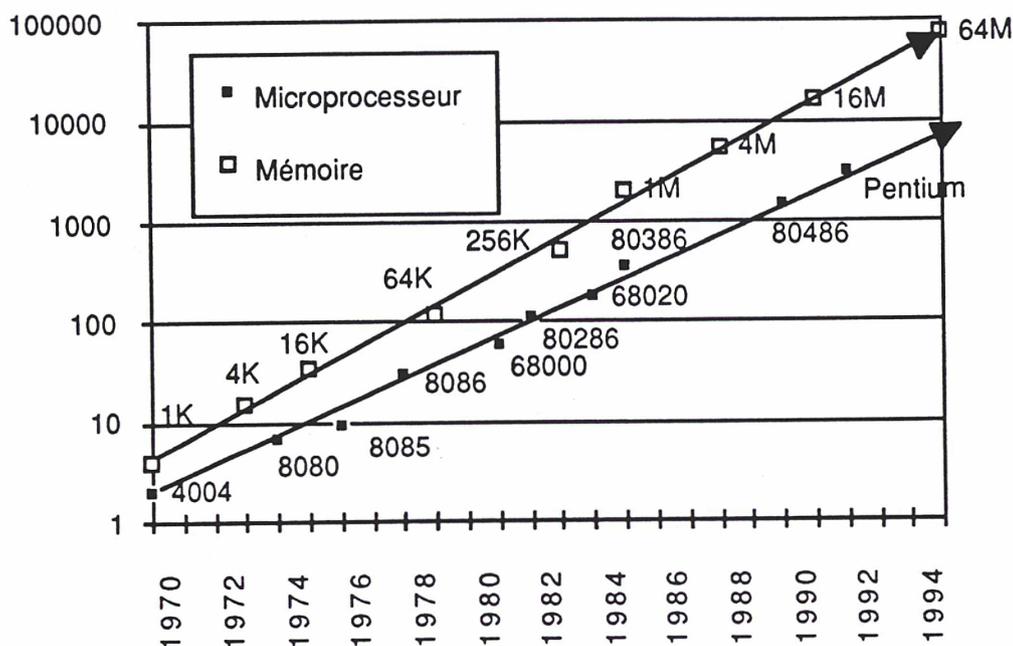
B. La course à l'intégration

En termes d'intégration, le chemin parcouru est tout simplement fabuleux : en l'espace de vingt ans, le nombre de transistors implantés sur un microprocesseur a été multiplié par mille et le prix du bit mémoire divisé par 300. Devant cette multiplication des performances, certains spécialistes n'hésitent pas à dire que, si les progrès de l'industrie automobile depuis 1950 avaient été comparables à ceux qui ont touché l'industrie du silicium, une voiture coûterait aujourd'hui 10 dollars, parcourrait 800 000 km avec un litre d'essence, et tiendrait dans une boîte d'allumettes.

1. La loi de Moore

En 1960, Gordon Moore constate qu'une réduction d'échelle de la gravure d'un facteur k permet d'avoir pour un composant d'une taille donnée, k^2 fois plus de portes et une fréquence d'horloge (à consommation égale) k fois supérieure, soit une puissance multipliée par k^3 . Puisque l'intégration offre encore d'autres avantages, comme de pouvoir réduire le nombre de composants et donc le nombre d'interconnexions entre composants dont l'installation est coûteuse et peu fiable, elle constitue une source de compétitivité formidable pour les semiconducteurs. L'évolution de la micro-électronique peut donc aussi s'analyser comme une véritable course à la miniaturisation et à l'intégration.

Ainsi, Moore constate la loi empirique suivante : la réduction d'échelle des composants est une fonction exponentielle décroissante du temps. Plus précisément, la largeur de grille d'un transistor est divisée par un facteur $\sqrt{2}$ tous les trois ans. Une autre règle du même type est également très bien vérifiée: le nombre de transistors produits double tous les ans.



Graph 2: Nombre de transistors par puce (en milliers)

La conformité de la réalité à cette loi ne laisse pas d'étonner nombre d'observateurs : comment la miniaturisation peut-elle suivre un rythme aussi régulier alors qu'elle dépend d'autant de paramètres complexes et non prévisibles ? Les difficultés techniques, les constantes de temps mises en jeu pour le développement et l'industrialisation de nouvelles technologies, les rythmes d'amortissement des chaînes de production et l'introduction des composants dans les nouvelles applications ne cessent de varier, leurs interactions changent sans cesse, et tous jouent un rôle essentiel dans l'apparition d'une nouvelle technologie.

En fait, cette loi est un parfait exemple de prophétie autoréalisatrice : les industriels, qui la croient et l'espèrent vraie, programment leurs recherches de manière à en atteindre les objectifs, qu'ils réussissent ensuite à réaliser car la loi de Moore est malgré tout réaliste.

L'évolution technique passée et telle qu'elle est prédite dans les cartes technologiques semble suivre le cours d'un long fleuve tranquille. En fait, il faut garder à l'esprit qu'elle est ponctuée de véritables révolutions technologiques. Les évolutions profondes de la lithographie, des méthodes de gravure, l'apparition du polissage mécanique sont autant de bouleversements profonds qui ont été nécessaires pour aller toujours plus loin dans l'intégration. Les barrières que ces innovations ont permis de franchir ont suscité à diverses époques des prédictions selon lesquelles la miniaturisation allait atteindre des limites infranchissables, pessimisme qui a toujours été détrompé par l'inventivité des chercheurs.

2. Les *road-maps* ou cartes technologiques

Plus précisément, les divers intervenants définissent en commun des cartes technologiques (*road-maps*) qui fixent les jalons de l'évolution technologique (facteurs de réduction, divers paramètres géométriques ou industriels, les grands sauts technologiques). C'est une sorte de carnet de rendez-vous technique des industriels qui travaillent de l'amont à l'aval.

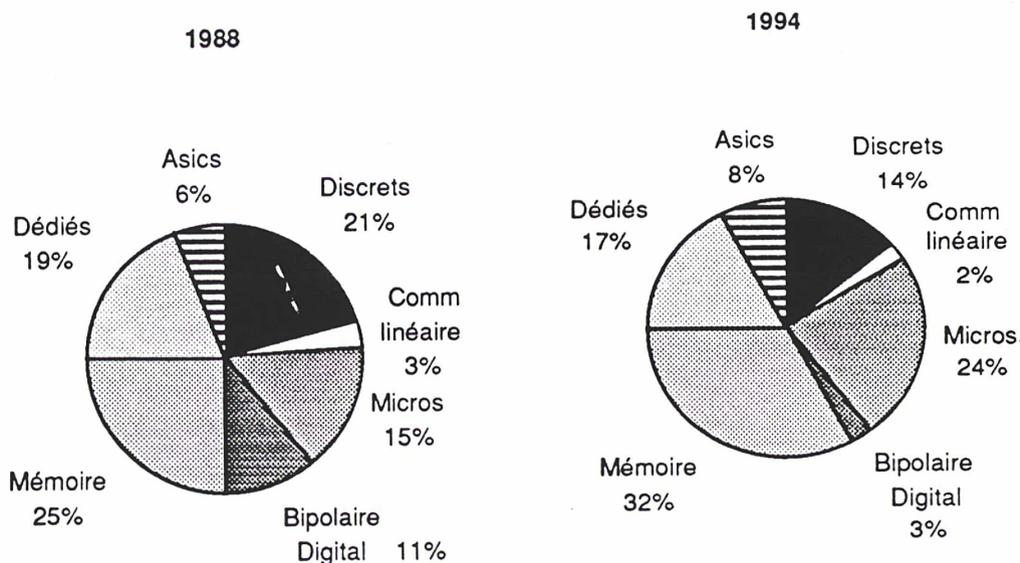
Pour jouer dans la cour des grands un industriel ne doit pas rater les rendez-vous qui lui sont impartis. Mais il ne faut pas non plus surestimer le rôle des road-maps. Ces cartes technologiques, qui favorisent sans doute l'observation de la loi de Moore, ont la fonction de coordonner les différents métiers de l'électronique (fabricants d'équipement de production, fondeurs qui gardent en général la maîtrise du procédé, concepteurs qui doivent connaître les nouveaux paramètres techniques pour définir les règles de dessins des circuits), principalement dans les phases de recherche et de développement.

Année	1992	1995	1998	2001	2004	2007
Largeur de grille (μm)	0,5	0,35	0,25	0,18	0,12	0,10
Taille des DRAMs	16 M	64 M	256 M	1 G	4 G	16 G
Portes par puce	3.10^5	8.10^5	2.10^6	5.10^6	1.10^7	2.10^7
Taille de puces (mm^2) logique et processeur: mémoire:	250 132	400 200	600 320	800 500	1000 700	1250 1000
Niveaux de connexions métal	3	4 à 5	5	5 à 6	6	6 à 7
Fréquences (MHz) interne: externe:	120 60	200 100	350 175	500 250	700 350	1000 500
Connections:	500	750	1500	2000	3500	5000
Coût de production ($\$/\text{cm}^2$)	4,00	390	3,80	3,70	3,60	3,50

Tableau 1: Carte technologique des États-Unis (SIA¹)

C. Fluctuations et grandes constantes

La croissance annuelle de 16% du secteur des semi-conducteurs est la somme de croissances très différentes. Certaines classes de produits sont en déclin, tandis que d'autres enregistrent des croissances phénoménales (79% pour les mémoires dynamiques en 1994, un peu moins pour les microprocesseurs).

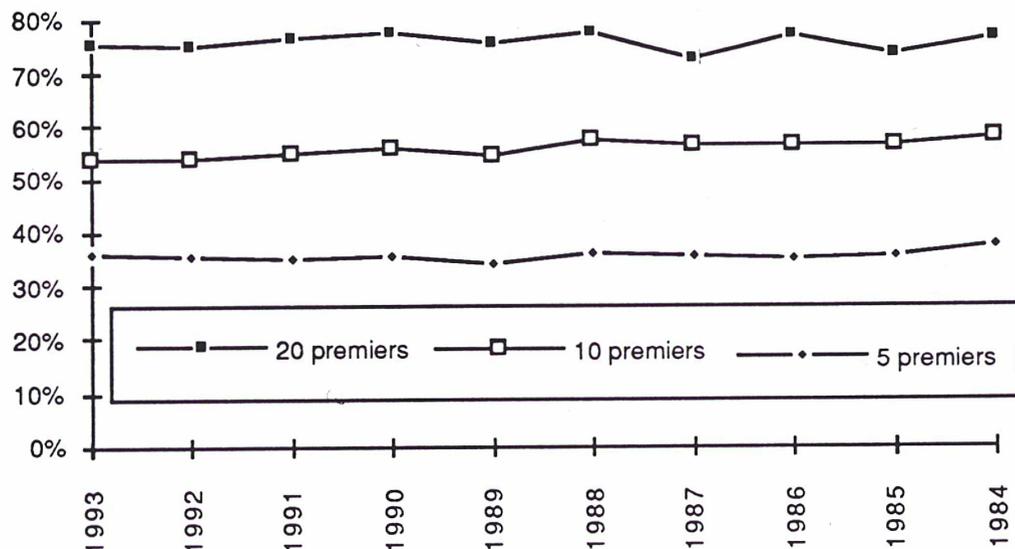


Graph 3: Évolution de la part de marché des différents produits (Dataquest)

¹Semiconductor Industry Association (voir lexique).

On assiste donc à une redistribution des cartes, les mémoires et les micro-composants s'arrogant une part de marché de plus en plus importante, au détriment des composants discrets et des composants bipolaires. Alors même que le nombre de classes de produits est assez limité, la croissance globale résultante semble avoir subi un lissage statistique parfait.

De même, l'analyse des parts de marché des 5, 10 et 20 premiers composants au monde chaque année montre que ces parts de marché consolidées sont remarquablement stables, alors que les entreprises sont elles ballottées d'une place à l'autre dans un gigantesque jeu de taquin. Ainsi, Intel est passé de 1987 à 1993 de la dixième à la première place, et Texas Instruments est passé de la première à la cinquième place entre 1984 et 1986.



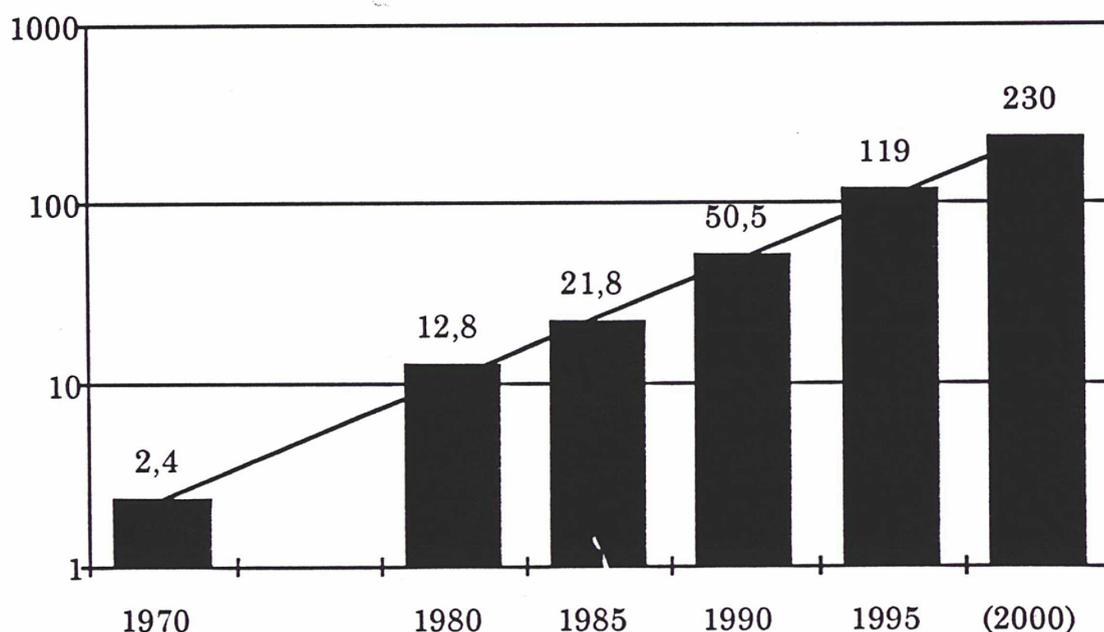
Graph 4: Parts de marché des 5, 10, 20 premiers producteurs mondiaux (Dataquest)

II. L'importance des semi-conducteurs

Sans craindre de tomber dans les lieux communs, il faut souligner que le secteur de la micro-électronique a pris une place considérable, et a placé ses pions dans tous les secteurs de l'économie. On trouve des circuits intégrés dans des biens extrêmement variés, et ils deviennent un facteur de compétitivité décisif. C'est ce qu'il faut comprendre dans la formule imagée "6% du prix et 100% des performances". Les composants électroniques peuvent parfois se retrouver dans les endroits les plus saugrenus, et les composants débordent d'imagination pour trouver de nouvelles applications à des circuits intégrés.

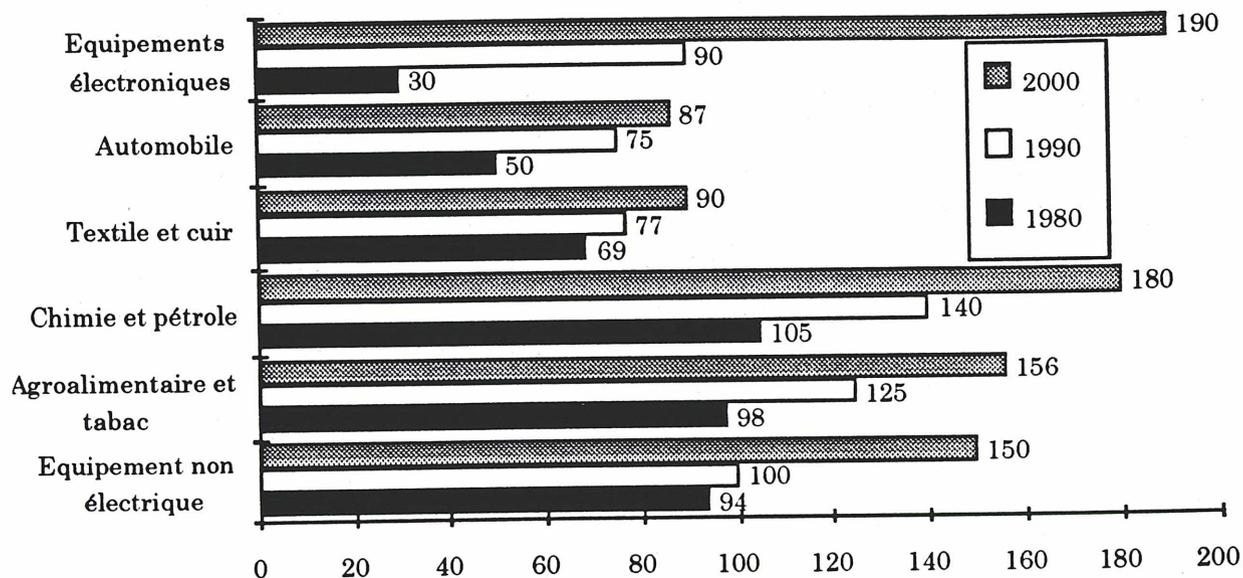
A. Un chiffre d'affaire devenu considérable

Avec une croissance de 16% en moyenne, on estime que le marché des semiconducteurs s'élèvera à la fin de l'année 1995 à 119 milliards de dollars, et à 200 milliards en l'an 2000.



Graphe 5: Marché mondial des semiconducteurs en milliards de dollars (Dataquest)

D'autres données sont bien plus parlantes encore. Les équipements électroniques, c'est-à-dire les biens dont la fonction est exécutée par un circuit électronique ont un marché qui croît très vite. Ainsi, en Europe, les équipements électroniques ont déjà dépassé le secteur automobile en 1990. En 2000, ils auront dépassé le secteur de la chimie et l'agro-alimentaire (et tabacs).



Graph 6: Marchés de différents secteurs en Europe en milliards d'écus (Philips).

B. L'omniprésence de l'électronique

Certains secteurs ont vu leur développement lié à ceux de l'électronique et de la micro-électronique, comme l'informatique ou l'électronique grand-public. Ce sont les secteurs clients clefs qui ont soutenu la demande en composants respectivement aux États-Unis et au Japon. Plus récemment, les télécommunications se sont mises à offrir de nouveaux débouchés et ont enregistré une très forte croissance d'activité en s'appuyant sur la micro-électronique et la micro-informatique. Sans circuits intégrés, pas de télécopieur produit en grande série, pas de modem, pas de commutateur numérique. De même, le secteur de l'automobile est un nouvel Eldorado que les composants contemplant avec convoitise. Même si l'électronique a déjà fait son apparition depuis longtemps dans ce secteur avec Bosch, les possibilités offertes par la micro-électronique et le savoir-faire dérivé de l'informatique et de l'électronique grand-public sont immenses. Enfin, d'autres secteurs ont pour des raisons spécifiques besoin de composants électroniques, comme la défense, l'aéronautique et l'espace d'une part, et l'électronique industrielle d'autre part. Cependant, ces secteurs n'offrent pas encore de débouchés très importants, et ne suscitent donc pas autant d'intérêt chez les composants.

Un des facteurs qui est à l'origine de la très grande diffusion des semi-conducteurs dans des industries de produits de masse est l'approche dite ASIC. Elle permet de réduire considérablement les coûts de production de circuits électroniques, d'augmenter leur fiabilité, leur compacité. Ce sont les atouts que confèrent cette approche qui permet ainsi de satisfaire des besoins de plus en plus variés et complexes.

1. Pervasion de l'électronique et croissance

L'anglicisme pervasion désigne le phénomène par lequel les composants micro-électronique diffusent dans un secteur industriel donné en proposant des solutions techniques de rechange à des méthodes plus anciennes et en augmentent ainsi la compétitivité.

Ils profitent ainsi d'une double croissance : ils envahissent toujours de nouveaux domaines, et s'accaparent une part toujours croissante de la valeur ajoutée dans les secteurs où ils se sont imposés.

En fait, ils jouissent même d'une triple croissance, puisque le gain de performances obtenu par l'adjonction de semiconducteurs, éventuellement en parallèle avec une réduction des coûts de revient et des prix de vente, provoque une croissance du secteur client. Ainsi Jean-Philippe Dauvin, de SGS-Thomson, a-t-il mis en évidence une corrélation entre croissance d'un secteur et son intensité en semi-conducteurs.

Cette diffusion de la micro-électronique dans les équipements électroniques a été estimée par M. Dauvin. Les résultats sont consignés ci-dessous.

Année	1960	1970	1980	1990
Part de valeur ajoutée	3 à 4%	4 à 6%	6 à 9%	10 à 16%

Tableau 2: part du prix des composants dans le prix des équipements

Le part de valeur ajoutée est la part du coût des semiconducteurs dans le prix de vente de l'équipement. Techniquement, ce transfert de valeur ajoutée correspond toujours au remplacement d'une phase de montage mécanique (circuit imprimé, composants électromécaniques) par la mise en place d'un circuit intégré unique.

2. La révolution des ASIC

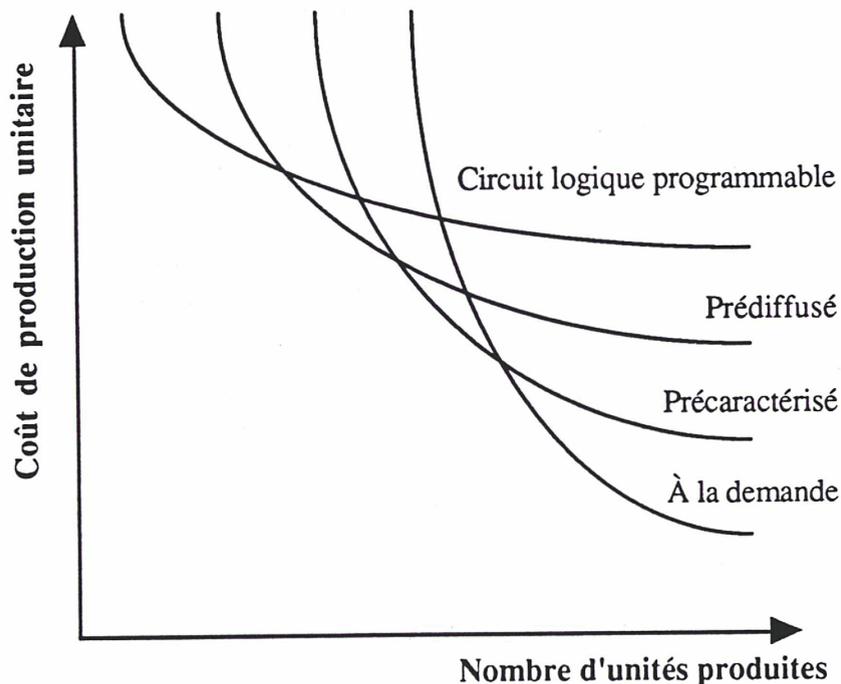
L'ASIC (Application Specific Integrated Circuit) est un circuit qui est conçu à la demande d'un client pour un produit particulier. C'est-à-dire que le client décrit les fonctions que cet ASIC doit remplir, à niveau plus ou moins avancé, suivant que ses besoins en performances (consommation, taille et vitesse) sont plus ou moins aigus.

Ainsi, un client comme Bull conçoit ses propres circuits intégrés au meilleur degré de précision. Il indique au fondeur la forme exacte du circuit, des pistes et de chaque composant. À l'inverse, un fabricant de terminaux téléphoniques n'aura pas besoin de circuits dont les temps de réponse sont de l'ordre de la nanoseconde. Aussi, il pourra économiser sur la conception de son circuit en donnant une description fonctionnelle du circuit plus globale, en s'appuyant éventuellement sur une *bibliothèque de fonctions* fournie par le fondeur. Ces bibliothèques de fonctions ne sont pas autre chose que des morceaux de circuits tout prêts qui peuvent être assemblés entre eux, et qui réalisent des fonctions usuelles plus ou moins complexes (des portes logiques, des oscillateurs, des unités de mémoire, des petits processeurs, etc.).

Produit en grande série, un ASIC ne coûte que quelques francs à produire, ce qui permet de réaliser des économies considérables dans l'étape de montage, et d'avoir un avantage compétitif considérable dans des secteurs très sensibles au prix comme l'électronique grand-public ou une partie de la micro-informatique.

Malheureusement la contrepartie du faible coût marginal d'un ASIC est le coût élevé de conception. Aussi, un composant entièrement conçu pour un usage unique n'est pas adapté à de très petites séries, où des circuits conçus à partir de composants discrets et de composants standards reviennent moins cher.

Pour s'adapter à la très grande variété des besoins des clients, les fondeurs ont élaboré d'autres démarches de conception plus ou moins coûteuses qui donnent d'autres compromis entre coût marginal de production d'un système et son coût de conception. Entre les ASIC décrits ci-dessus (ASIC dits *full custom* ou "intégralement à la demande"), et l'approche qui consiste à assembler des composants discrets, on trouve trois démarches intermédiaires. On peut donc ainsi décrire les cinq approches différentes:



Graph 7: Coûts de production unitaires des différents types d'ASIC

- les ASIC *full custom*. Ils sont dessinés jonction par jonction et piste par piste par le client et/ou le fondeur. C'est par exemple le circuit conçu par Bull. Pour que cette option soit intéressante en termes de coût, il faut espérer un tirage d'un million d'exemplaires. L'investissement initial se compte en millions de francs et la mise au point demande entre 1 et 2 ans.

- les ASIC *précaractérisés*. Ce sont des circuits qui sont produits de la même manière que les ASIC *full custom*, mais le client donne une description fonctionnelle plus globale, en s'aidant d'une bibliothèque de fonctions. C'est l'exemple du fabricant de postes téléphoniques. Le développement d'un tel circuit coûte entre 500 000 et un million de francs et dure quelques mois.

- les ASIC *prédifusés* ou *gate-arrays*. Les premières étapes de fabrication du circuit sont toujours les mêmes: on dispose sur le circuit intégré des rangées de cellules qui ont des fonctions simples. La seule liberté de conception du client consiste à relier d'une manière ou d'une autre ces différentes cellules de base avec des pistes d'aluminium pour réaliser une fonction complexe de son choix. On réduit l'investissement de départ, puisque les premières étapes de production sont pas spécifiques au produit et peuvent être réalisées en grande série. En revanche, un circuit est nécessairement recouvert de cellules inutilisées, et le coût marginal de production est plus élevé. Le coût de développement est entre 100 000 et 200 000 francs et dure quelques semaines.

- les circuits logiques programmables ou *programmable logic devices*. Ce sont des circuits fabriqués alors que leur fonction n'est pas encore définie. Ils sont constitués d'une matrice de fonctions simples et reliées entre elles par un réseau de connexion. La programmation de la fonction se fait électriquement en détruisant des jonctions électriques.

- pour mémoire, l'approche par assemblage de composants discrets et de circuits intégrés standards au fer à souder sur un circuit imprimé. Dans cette approche, la conception d'un circuit ainsi réalisable peut se faire avec un crayon et un papier, alors que pour les approches ci-dessus, un ordinateur plus ou moins puissant est nécessaire. Cette approche est donc toute désignée pour les petites séries.

Même si des performances très poussées ne sont pas nécessaires pour une application donnée, le recours à une technologie avancée permet d'arriver à un niveau d'intégration qui se justifie par les seuls gains de coûts de production de l'équipement final. À titre d'exemple, une technologie suffisamment fine qui permet d'intégrer sur le même circuit un microprocesseur et les éléments de mémoire nécessaires à une application donnée sera avantageuse en terme de coût, puisque la phase de montage sera simplifiée (moins de composants à monter, moins d'interconnexions, etc.).

Quand on va d'une approche extrême (l'ASIC full custom) à l'autre (l'assemblage de composants discrets), on a les évolutions suivantes: l'investissement initial de conception décroît, le coût marginal de fabrication croît, le temps pour arriver à fabriquer le premier circuit décroît, le poids du circuit augmente. Souvent, des critères de coûts font choisir une filière ou une autre, mais pour certaines applications, le critère de poids devient prédominant (téléphonie mobile, espace). D'autres critères (rapidité, consommation) peuvent également entrer en jeu.

Finalement, les ASIC conviennent particulièrement à deux types de clients : ceux pour qui seule compte la performance, qu'elle se mesure en termes de puissance de traitement, de poids ou de consommation de courant, et ceux dont les produits sont vendus en grandes quantités et dont le prix est un facteur concurrentiel déterminant. On trouve donc des ASIC presque partout.

L'arrivée des ASIC a profondément changé les relations de l'industrie des semiconducteurs avec ses clients :

- Aujourd'hui un équipement électronique comme une télévision ou un poste téléphonique ne contient guère que deux ou trois circuits intégrés, au lieu d'une forêt de composants discrets soudés à grand frais sur un circuit imprimé. Des observateurs décrivent cette évolution en disant "the system is becoming a chip"². En d'autres termes, les ASIC sont l'un des vecteurs les plus efficaces de la pervasion du silicium : ils résument à eux seuls tout le savoir-faire et la spécificité du produit qu'ils habitent, et permettent donc aux composantiers de s'approprier une part croissante de la valeur ajoutée de leurs clients.

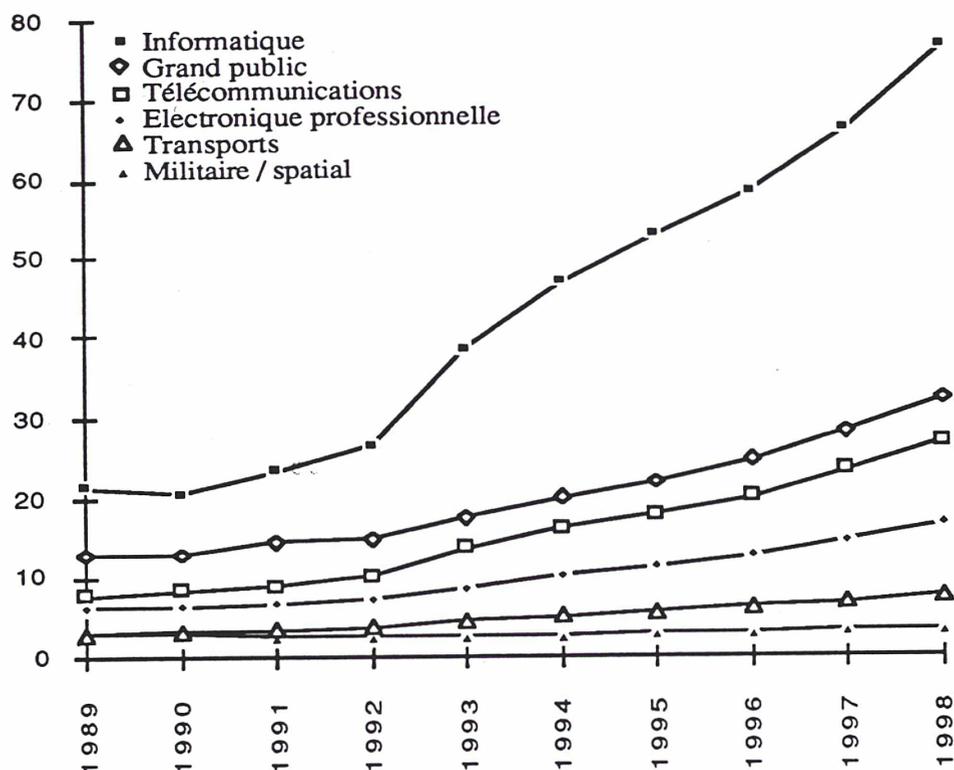
- Le marché des produits standards est très volatil : chacun se fournit chez le composantier qui propose, à un instant donné, les plus bas prix, la meilleure qualité, les délais les plus courts, etc. Il n'y a aucun lien de long terme entre fournisseur et client.

En revanche, les ASIC sont le plus souvent conçus en collaboration étroite entre le composantier et son client : celui-ci doit intégrer les contraintes technologiques de son fournisseur, et tirer le meilleur parti possible de ses possibilités. Cette personnalisation de la conception à un composantier donné lie ensuite le client : il ne peut plus changer de fondeur sans devoir étudier à nouveau son ASIC, et donc sans supporter des frais de conception très importants. De la même manière, il devient difficile au composantier de décevoir son client : il risque de perdre le prochain contrat. La montée des ASIC engendre donc un changement des relations client-fournisseur au profit d'accords de long terme, voire de véritables partenariats industriels.

²Le système se réduit progressivement à une puce.

3. Des prises de position fortes dans les autres secteurs

Le silicium s'impose maintenant dans tous les secteurs : autrefois réservés aux seules applications informatiques et militaires de pointe, les semi-conducteurs occupent désormais une place de choix dans l'ensemble de la vie économique : on n'imagine plus de téléviseur sans télécommande ou recherche automatique des canaux ni d'automobile haut de gamme sans ABS, injection électronique ou climatisation. Les prévisions laissent d'ailleurs à penser que cette prise de contrôle s'accroîtra encore dans les quelques années qui viennent.



Graph 8: Achats de semi-conducteurs par les différents secteurs clients (Dataquest)

a. L'informatique

C'est le secteur client qui a le plus soutenu l'industrie des semi-conducteurs aux États-Unis. Les besoins en performances ont été tels qu'ils ont relégué au second plan les critères de coût. Dans ce secteur, les fabricants de composants ont acquis une position déterminante : la conception des architectures des équipements est subordonnée au fonctionnement de processeurs conçus par les composants.

L'évolution technique et les besoins en composants ont crû, si l'on fait abstraction des cycles du silicium, sans défaillir depuis l'apparition des premiers ordinateurs personnels. La part du prix d'achat de semi-conducteurs dans le prix de vente d'un ordinateur, qui ne cesse de s'élever, atteint aujourd'hui 35%.

Les besoins en semi-conducteurs en informatique sont faciles à imaginer : l'avantage technologique est décisif. Il faut donc un accès privilégié aux technologies les plus avancées. Quand le fabricant ne contrôle pas lui-même cette technologie, il lui faut développer les relations aussi étroites que possible avec un fournisseur qui dispose d'une

telle technologie. Ainsi, Intel dispose d'une des technologies les plus avancées en fabrication de circuits logiques.

b. L'électronique grand-public

L'électronique grand-public est considéré comme le secteur client principal qui a offert aux composants japonais les débouchés sur lesquels ils ont assis leur croissance. Le critère le plus important en électronique grand-public est un critère de coût. Il faut que les nouveaux produits mis sur la marché soient le meilleur marché possible. Puisque l'utilisation intensive d'ASIC permet d'obtenir des réductions de coût importantes, la micro-électronique a aujourd'hui entièrement envahi ce secteur. Les technologies les plus avancées ont des coûts de développement très élevés, mais elles offrent un avantage de coût considérable dès que la production se fait en quantité suffisante.

Certaines évolutions technologiques provoqueront encore des regains de demande la numérisation, déjà entamée avec le son (disques compacts, cassettes numériques), touchera bientôt l'image, et le produit des synergies entre les communications, l'informatique et l'électronique grand public, classiquement appelé *multimédia.*, semble promis au plus brillant avenir.

c. Les communications

Le secteur des télécommunications regroupe à la fois les équipements d'infrastructure destinés aux opérateurs téléphoniques, ainsi que les terminaux de toutes sortes (téléphones, télécopieurs, cartes modem).

1. La numérisation

Dans les années 1970 sont apparues la transmission et la commutation numérique, qui s'appuient sur des technologies micro-électroniques très avancées. Un commutateur est un équipement extrêmement puissant, piloté par un logiciel de plusieurs millions de lignes de codes dont la conception est très complexe.

2. Les réseaux de communications mobiles

On a récemment assisté à l'explosion du marché de la téléphonie mobile avec des réseaux comme Itinériss ou SFR en France (et dans une moindre mesure le Bi-Bop). Ce réseau de communication repose sur des stations terrestres hertziennes qui sont reliées au réseaux téléphoniques des opérateurs nationaux.

D'autres projets bien plus ambitieux encore sont en gestation plus ou moins avancée. À l'instar du réseau de communications maritimes Inmarsat, il reposent sur des batteries de satellites à plus ou moins basse altitude qui quadrillent la surface de la Terre. Ces réseaux ne se contentent pas d'offrir une connexion aux réseaux téléphoniques classiques, mais peuvent les contourner et ainsi offrir un réseau de communication parallèles. On dénombre trois projets :

projet	auteur(s)	nombre de satellites	échéance prévue
Iridium	Motorola	66	1996
Globalstar	Alcatel et SS Loral	48	1998
Teledesic	Gates et Mc Caw	840	2001

Tableau 3 : principaux projets de télécommunications mobiles par satellites

Le projet le plus ambitieux est indubitablement celui de Gates et Mc Caw, qui repose sur la couverture de presque toute la surface terrestre par une armée de quelques 840 satellites, et permet de s'affranchir de tout opérateur téléphonique terrestre.

3. Les réseaux de communication à haut débit

La généralisation de l'emploi de l'informatique et l'apparition de réseaux locaux à très haut débit (Ethernet et autres) cantonnés au périmètre d'une entreprise ou d'une université, a suscité le besoin de communications rapides à l'échelle nationale voire internationale. De solutions ont déjà été proposées, comme Internet ou Transpac, mais sont offertes à un nombre restreint de clients, et montrent déjà leurs limites.

Des projets d'autoroutes de l'information ont germé dans les esprits. Les acteurs principaux n'ont pas encore défini précisément ce que ce terme devait désigner concrètement. De besoins exprimés essentiellement par des professionnels on essaie d'extrapoler l'accueil auprès du public que pourrait avoir un service qui permettrait de faire de la visiophonie, d'accéder à la réalité virtuelle, d'avoir des émissions de télévision sur commande (video on demand). Ce sujet a été l'objet de nombreux rapports (le rapport Théry en France), mais malgré les spéculations intellectuelles nombreuses sur le sujet, aucune solution technique n'a été considérée à l'unanimité comme étant le meilleur compromis technico-économique. Car on peut aussi bien imaginer un réseau synchrone ou asynchrone, de transmission commutée ou par paquets.

Aucun groupe d'intérêt ne s'est pour l'instant déclaré prêt à choisir une solution technique particulière pour lancer dans l'aventure. Les États et les grands opérateurs (France Telecom, Deutsche Telekom, NTT, ATT), vont financer des expériences pour tester la faisabilité économique de certaines innovations d'usage.

d. Le secteur automobile

L'usage de composants électroniques dans l'automobile n'est pas récent. Un des pionniers a été Bosch, qui vend depuis l'ère des composants discrets (1967) des injections électroniques, et qui a une position dominante aujourd'hui. Le développement rapide de ces activités a été soutenu par l'application des règles antipollution.

Ces dernières années, on a assisté au développement des systèmes ABS (*adaptive brake system*, ou système qui évite le blocage des freins), plus récemment de l'ASR (système anti-patinage), de l'air-bag (coussin gonflable de protection), de prétensionneurs, des suspensions variables, de châssis à quatre roues directrices, des ordinateurs de bord. La micro-électronique a permis des évolutions et des réductions de coûts considérables dans les systèmes de suspensions pilotées, des directions assistées, et l'installation d'éléments de confort supplémentaires (sièges électriques à mémoire, synthèse vocale, déverrouillage des portières à distance).

Deux types de développements sont attendus pour l'avenir : la mise au point de systèmes d'aide à la navigation dialoguant éventuellement avec l'infrastructure, et la modification du mode de connexion des organes entre eux.

1. L'aide à la navigation

Diverses initiatives peuvent être recensées dans ce domaine. En France, on peut citer le programme Carminat, qui associe l'État, Renault, TDF et la Lyonnaise des Eaux. Ce programme, très ambitieux, vise à la mise au point un système d'aide à la navigation qui, communiquant avec une infrastructure intelligente, donne le meilleur chemin à suivre à un conducteur (prochain feu à gauche, à droite, tout droit, etc.), en tenant compte de facteurs temporaires comme les embouteillages ou les travaux. Diverses expérimentations ont eu lieu. On trouve également des projets chez PSA et Philips (CARIN).

Des réalisations apparaissent sur le marché. On trouve depuis un an au Japon des systèmes d'aide à la navigation constitués d'un GPS (*Global Positioning System*), de cartes sur CD-ROM, d'un écran plat et d'une unité centrale capable de faire du *pattern matching* (mise en correspondance de motifs) pour localiser précisément la voiture. Un modèle similaire a été annoncé par CLARION pour 1996 en France.

2. Le multiplexage

L'introduction du multiplexage dans la connexion des différents organes d'une automobile est une révolution inspirée de l'informatique, où tous les périphériques d'un ordinateur sont connectés à un même bus (bus PCI ou VESA). Cette évolution transparente pour l'utilisateur est motivée par le souci de faire des économies de poids et de coût de fabrication en réduisant considérablement le nombre de fils électriques dans une voiture. En effet, la multiplication des organes électroniques et les échanges d'informations de plus en plus nombreux qu'elle implique se sont traduits par une multiplication du nombre de fils reliant ces organes entre eux, la longueur totale de ces fils atteignant maintenant un kilomètre par voiture.

Deux standards de multiplexage s'opposent, le CAN (Bosch) et le VAN (constructeurs français plus Daimler Benz). BMW semble privilégier l'utilisation d'un bus PC standard, pour lequel les composants sont déjà disponibles.

L'arrivée en masse de semiconducteurs dans l'automobile ne se fait pas sans mal, tant les cahiers des charges imposés par les constructeurs sont draconiens : en plus d'exigences de coût extrêmement rigoureuses, propres à un secteur grand public, on trouve des contraintes techniques terribles : les composants doivent supporter sans peine vibrations et corrosion, garder un fonctionnement normal à des températures extrêmes (-40 à +150°C), résister à des variations violentes de température et durer dix ans; le tout pour quelques francs. Certains n'hésitent d'ailleurs pas à résumer l'ampleur du défi qui attend les composants en ces termes : 'un composant automobile est un composant militaire ou spatial au prix d'une diode'. Il est vrai qu'on envisage d'installer directement ces circuits dans des satellites ou des avions de chasse!

e. L'aéronautique et l'espace

L'avantage décisif que procurent les circuits intégrés dans ce domaine est un avantage de poids. Les contraintes de poids sont considérables pour les satellites, les avions de chasse et même les avions de transport commercial. Même si cela tend à se tempérer un peu ces dernières années, on peut affirmer que les critères de coûts sont secondaires, ce qui peut pousser les acheteurs de composants à choisir des solutions techniques normalement destinées à des quantités de production plus élevées.

La relation entre acheteur et fournisseur de composants est très déséquilibrée dans ce secteur, puisque les fabricants d'avions ou de satellites ont davantage besoin de circuits intégrés que les composants n'ont besoins de tels clients qui ne leur demandent de toute manière que des productions en petites quantités.

C. Aspects stratégiques

Quand on considère les besoins en composants électroniques dans différents secteurs de l'économie, quand on considère également la balance commerciale française ou même européenne des échanges en semi-conducteurs, on constate un déséquilibre important. Plus encore, la structure de fourniture des fabricants européens les rend très dépendants vis-à-vis de l'extérieur. Les marchés mondiaux sont-ils suffisamment

concurrentiels pour que cette dépendance ne constitue pas un danger, aussi bien pour l'industrie automobile que pour l'électronique grand-public ou l'aéronautique ?

1. La répartition de la production dans le monde

On divise classiquement le monde en quatre zones ou régions. Les États-Unis, le Japon, l'Europe, et le reste du monde, que l'on peut sans crainte assimiler à l'Asie du sud-est, voire même pour l'instant encore à la Corée.

On trouve un premier déséquilibre: entre fabrication d'équipements électroniques de tous types et PIB. La ratio du chiffre d'affaires électronique sur le PIB, ce qu'on pourrait appeler l'*électronisation du PIB* est très différente entre le Japon, les États-Unis, l'Europe et la Corée.

Région	États-Unis	Japon	Europe	Asie du sud-est
CA électronique (G\$)	195	174	149	115
PIB (G\$)	6000	3500	8500	1100
Rapport	1:30	1:20	1:56	1:9

Tableau 4 : PIB et CA électroniques en 1993 (Dataquest et Britannica)

On trouve un deuxième déséquilibre structurel: entre production et consommation de semiconducteurs. Les parts de marché sont approximativement réparties ainsi entre les quatre régions selon le graphe 9. On voit qu'actuellement, les parts de marché respectives des États-Unis, du Japon, de l'Europe et de l'Asie du sud-est sont de 40%, 40%, 10% et 10%. La part de l'Europe stagne ou décroît, celle du Japon décroît également. Les États-Unis renforcent leur position et surtout les pays d'Asie du sud-est s'envolent. En revanche les marchés des quatre régions (volumes achetés par les quatre régions) se répartissent de la façon suivante, pour respectivement les États-Unis, le Japon, l'Europe et l'Asie du sud-est: 32%, 31%, 19%, 18%. Ces chiffres sont repris dans le tableau 5:

Région	États-Unis	Japon	Europe	Asie du sud-est
Parts de ventes	43%	40%	9%	7%
Parts des achats	32%	31%	19%	18%

Tableau 5: Tailles relatives des marchés et parts de marchés des différentes régions en 1993 (Dataquest)

On voit nettement que les États-Unis et le Japon sont excédentaires, alors que l'Europe et l'Asie du sud-est sont encore déficitaires.

Enfin il y a également un déséquilibre en amont entre parts de marchés sur les équipements et matières premières de production et les productions en semi-conducteurs. Les maîtres presque incontestés en équipements de production sont le Japon et les États-Unis.

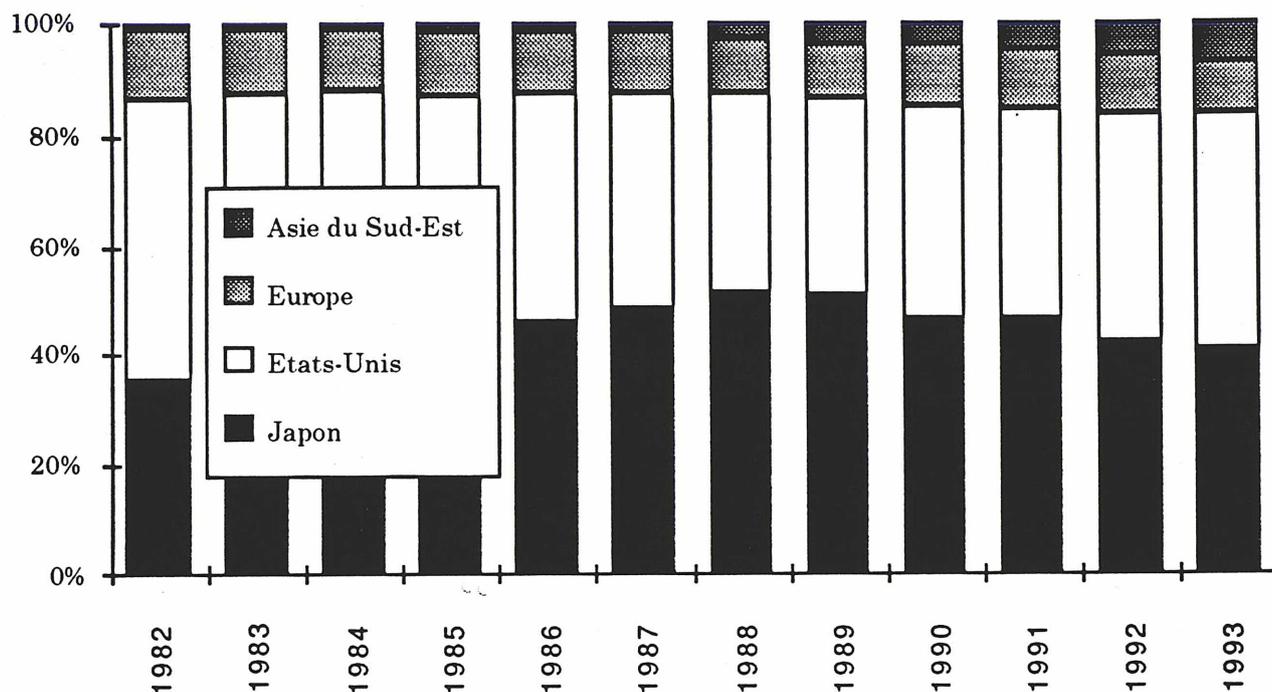
2. Éléments historiques

Les éléments donnés ci-dessus sont bien insuffisants pour se faire une idée précise de l'évolution des rapports de forces entre les différentes régions.

Ainsi, la situation à peu près égale entre l'Europe et l'Asie du sud-est en 1993 cache de fortes différences dynamiques. Ainsi qu'on peut le lire sur le graphe 9, la part de marché de l'Europe stagne (9% en 1993 et 10.6% en 1991), alors que la part de marché de l'Asie du sud-est croît constamment: 7,3% en 1993, contre 4,6% en 1991.

De même, le rapport de forces entre les États-Unis et le Japon ont été inégaux. D'un avantage initial des États-Unis, où le transistor avait été inventé, le Japon a vu sa part

croître sûrement au détriment des États-Unis et de l'Europe. En 1985 et 1986, les fabricants américains subissent de fortes méventes, pour avoir été pris de vitesse par les fabricants japonais. Cette hégémonie japonaise, avec environ 50% du marché mondial les années 1987, 1988 et 1989 a été peu à peu entamée par une reprise en main de l'industrie américaine pour en arriver au statu quo actuel.



Graph 9: Les parts de marché obtenues par les entreprises des différentes régions du monde (Dataquest)

3. Les problèmes de dépendance

Les tenants d'un soutien massif à une industrie locale des semiconducteurs mettent souvent en avant le problème de dépendance des industries aval et leur fragilité face à un fournisseur monopolistique ou à des fournisseurs "monoculturels", les plus beaux exemples étant alors japonais.

On a notamment souvent reproché aux industriels japonais d'agir avec une logique de groupe qui pouvait aller au delà même des structures de groupes intégrés appelés *zaibatsu*. Cette coopération suit en général le schéma suivant: un fournisseur ou un groupe de fournisseurs japonais se rendent incontournables pour la fourniture d'un composant vital pour la fabrication d'un produit donné. En discriminant les clients étrangers et les clients japonais lors de la fourniture de ce composant, ils pénalisent les clients étrangers, qui perdent des parts de marché et disparaissent au profit de leurs concurrents japonais.

C'est ainsi que l'on analyse la montée en puissance de Taiwan dans les circuits intégrés à une époque où la rentabilité intrinsèque de tels investissements était peu évidente: comme une garantie face à des fournisseurs trop puissants. C'est ce qui explique le maintien coûte que coûte d'entreprises comme IBM, Philips, Siemens ou Alcatel dans le secteur des semiconducteurs, quelle que soit sa rentabilité.

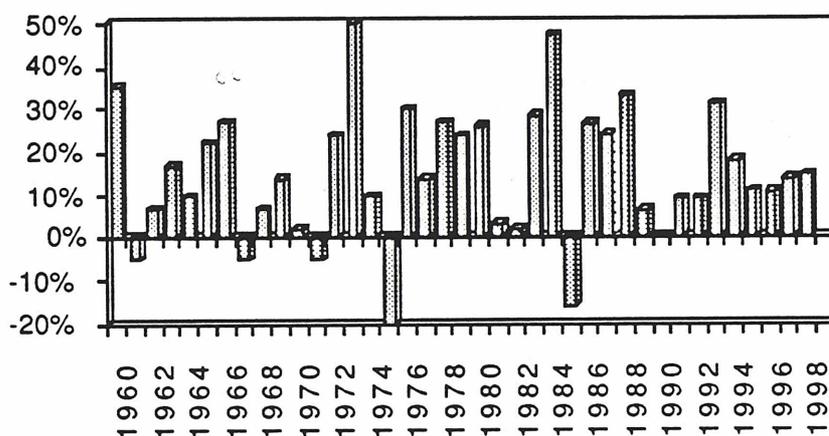
Ce genre de comportement est peut-être plus fréquent au Japon que dans les pays occidentaux. Cela dit, il peut être le fait d'un seul groupe intégré dans un autre pays, si celui-ci détient le monopole de la fourniture d'un composant (Intel).

III. Des risques considérables

Forte croissance, invasion de tous les secteurs de l'économie, prise de la valeur ajoutée, l'industrie de la micro-électronique semble devoir voler de succès en succès. Pourtant, les industriels ne se contentent pas de signer de nouveaux contrats : les difficultés du secteur sont à la mesure de ses promesses, gigantesques.

A. Des cycles et des fluctuations terribles

La première impression laissée par les courbes de croissance à long terme est trompeuse. La croissance n'est pas régulière, mais subit de forts à-coups à court terme. À des phases de croissance très soutenues, qui peuvent atteindre 50% par an, succèdent des récessions extrêmement violentes, puisque la demande chute parfois de 20% d'une année sur l'autre. Cette croissance extrêmement perturbée est une des spécificités du secteur de la micro-électronique. On la désigne sous le nom de cycle du silicium.



Graph 10: La croissance du marché des composants électroniques (Dataquest)

1. Le mécanisme des cycles du silicium

Les explications proposées pour ces cycles reposent toujours sur le schéma suivant:

1. Un nouveau besoin est exprimé par l'industrie cliente. La demande peut au départ être satisfaite par le fonctionnement des usines en pleine capacité.

2. La demande croît encore et dépasse la capacité installée. Les prix montent et les délais s'allongent. En réponse à la pénurie, les clients font des stocks de sécurité, des doubles commandes. La hausse prévue des prix provoque une spéculation. La demande exprimée auprès des composants est de ce fait supérieure aux besoins réels. Les composants, misant sur une croissance trop forte, surinvestissent.

3. Avec la mise en route de nouvelles unités de production, l'offre explose. On réalise alors que l'on est en surcapacité. Les prix chutent. Les déstockages et la spéculation à la baisse des prix provoquent une baisse de la demande encore plus brutale.

4. Les prix atteignent leur niveau plancher. Le rapport offre / demande se stabilise. La spéculation disparaît, les commandes retrouvent leur niveau naturel.

La présence de ces cycles, leur violence et leur récurrence s'expliquent donc finalement par deux phénomènes :

- le délai de mise à disposition de nouvelles capacités de production est de l'ordre de trois ans. Les industriels doivent donc estimer leur demande future pour calibrer leurs nouvelles unités de production en sachant que s'ils sous-dimensionnent celles-ci, ils ne pourront pas répondre à leur demande avant trois autres années. Ils ont donc toujours tendance à sur-dimensionner leurs nouvelles unités par rapport à la demande anticipée.

- Or, la décision d'investir est prise au moment où les perspectives sont bonnes, c'est-à-dire au moment où l'industrie des semi-conducteurs est en sous-capacité. À ce moment, les industriels surévaluent grossièrement la demande, puisque leurs clients, devant la pénurie ambiante, passent des doubles, voire des triples commandes.

Les capacités des nouvelles unités de production dépassent donc toujours largement la demande réelle, ce qui provoque la crise.

On considère que ces cycles conjoncturels sont les crises qui mettent à mort les compétiteurs les plus faibles pour ne laisser que les meilleurs en lice. Le choc initial est souvent provoqué par une innovation d'usage des semi-conducteurs (la microinformatique familiale, la numérisation de l'audio, etc.)

En 1985 et en 1986, les japonais avaient anticipé une hausse de la demande en mémoires et avaient investi pour cela à contre-cycle, c'est-à-dire à une époque où la demande ne laissait pas envisager de reprise. Le résultat a été dramatique pour les fabricants américains de mémoires, qui ont été pris de court et se font rafler des parts de marché très importantes, au point de perdre leur hégémonie. Cet épisode de ce que l'on se plaît à appeler parfois la guerre économique est toujours décelable dans les courbes historiques relatives à l'industrie américaine des semi-conducteurs, avec une violente baisse du chiffre d'affaires et une violente hausse de tout indicateur ayant le chiffre d'affaires au dénominateur, sur ces deux années.

Les industriels, face à la menace des cycles, se sont rapidement dotés d'outils de prévision, comme le fameux 'Book to Bill ratio', qui mesure la part relative des commandes sur les factures et les renseigne sur le sens du marché : un ratio supérieur à 1 indique une croissance du secteur, un ratio inférieur à 1 une récession. De plus, dans la mesure où, en temps normal, ce ratio ne s'éloigne pas trop de 1, des valeurs différentes suggèrent la présence d'anomalies.

Ces dernières années, le mécanisme des cycles semble s'être grippé : leur longueur a considérablement augmenté, passant de 4 à 8 ans, alors que leur amplitude s'est sensiblement amortie.

Plusieurs phénomènes simultanés semblent expliquer cette rupture :

- Les industriels, échaudés par la violence des retournements de conjoncture précédents, se montrent plus modérés dans leurs estimations de la demande. Les cas de sous-capacité durable semblent en effet beaucoup plus fréquents que par le passé. On peut se demander pourquoi les industriels ont dû faire l'expérience d'autant de cycles avant de modérer leurs prévisions de ventes. Une raison possible est qu'ils raisonnaient en termes de position sur le marché, et qu'investir massivement le plus tôt possible leur permettait de prendre des parts à leurs concurrents.

- Le marché s'est mondialisé puisque, si les USA et le Japon représentaient à eux seuls 72% de la demande totale en 1985, ils ne comptent plus que pour 64% en 1993. De plus, la contribution de ce bloc à la croissance du secteur a également fortement diminué, passant de 67% en 1985 à 58% en 1993. Le marché est donc beaucoup moins affecté par les fluctuations de conjoncture économique dans certaines parties du globe.

- Enfin, la production s'est elle-même diversifiée (mémoires, microprocesseurs, ASIC...) et le secteur client est beaucoup moins monolithique: si l'informatique s'arroge sans conteste la première place des clients, l'électronique grand public n'est plus un second isolé car les débouchés dans les télécommunications connaissent une croissance forte, et les composants attendent beaucoup de la diffusion des semi-conducteurs dans l'automobile, puis dans la domotique.

2. Des temps de vie courts et des risques importants

Même si le cycle complet d'un produit, depuis le développement des technologies associées à la maturation du marché est très long, la fenêtre commerciale pendant laquelle ce produit peut être mis avec profit sur le marché est extrêmement brève. Les investissements supportés par un composantier pour pouvoir mettre une nouvelle génération de produits sur le marché sont considérables, puisqu'ils représentent à eux deux 25 à 30% du coût des composants, s'ils sont vendus dans des volumes suffisants. Une mévente déséquilibre considérablement cette structure de coût, au point de rendre l'exercice très déficitaire pour le composantier.

La fragilité structurelle de ce secteur (course technologique nécessitant des investissements et de la R&D importants, ce qui implique des risques considérables) peut être une des raisons pour laquelle l'appui financier solide d'un groupe intégré ou de banques confiantes peut être très appréciable.

B. Une activité très concurrentielle

La mondialisation s'applique tout particulièrement à la micro-électronique. Pour des raisons spécifiques à ce secteur qui vont être développées ci-dessous, les échanges se font à travers le monde entier, et on assiste à une spécialisation mondiale de la production, aussi bien entre les entreprises émanant des différentes régions du monde qu'au sein de chaque entreprise qui se doit, pour rester compétitive, de placer les différentes étapes de sa production dans des sites judicieusement choisis en fonction de leurs avantages propres. La micro-électronique est de par les spécificités des produits commercialisés un secteur où la concurrence est extrêmement vive. La distance et les barrières naturelles ne suffisent pas pour masquer les différences criantes de coûts de revient ou de politiques industrielles de groupes ou d'États que l'on peut avoir entre certains pays, si bien que les retournements de fortune d'anciens leaders sont parfois très violents.

1. Peu de barrières naturelles

Les composants ont deux caractéristiques qui font de leur secteur un de ceux au monde où la concurrence est la plus exacerbée. Ces deux caractéristiques sont toutes les deux nécessaires pour que la concurrence soit aussi dure.

Tout d'abord, aucune barrière culturelle ne retient les composants. Quelques composants spécifiques d'interface homme-machine mis à part, la plupart des composants sont absolument les mêmes d'un bout à l'autre de la planète. Qu'ils s'agisse

de composants discrets simples, de portes logiques, de microprocesseurs ou de mémoires, aucune adaptation n'est nécessaire d'un pays à l'autre, et la langue universelle utilisée pour écrire les modes d'emploi est l'anglais. À elle seule, cette caractéristique n'est pas suffisante. Il existe évidemment d'autres produits à peu près aussi indifférenciés, comme le béton. Pour autant, les marchés étrangers n'ont pas encore été inondés de béton japonais pour des problèmes de coût de transport.

La deuxième barrière qui ne freine pas les échanges de semi-conducteurs est donc la barrière du transport. Celle-ci devient presque totalement insensible pour des produits atteignant le rapport prix sur poids des semi-conducteurs. Ainsi, les fabricants n'hésitent à délocaliser leur production ou une étape de la production dans un pays quelconque de la planète. Typiquement, la phase de diffusion est réalisée dans le pays propriétaire de l'entreprise, mais l'emballage est effectué en Asie du sud-est. Cette pratique est tellement générale que le GATT a dû en prendre compte pour définir le pays d'origine d'un semi-conducteur comme étant le pays où la diffusion a été effectuée.

Zone	Exportations (% Production)	Importations (% Consom.)
Asie du sud-est	55%	88%
Europe	41%	69%
USA	50%	37%
Japon	37%	13%

Tableau 6 : Echanges commerciaux entre les principales zones productrices et consommatrices

La mondialisation est telle qu'un incendie dans une usine de Sumitomo Chemicals qui fabriquait des résines époxy a provoqué une flambée du cours des mémoires dans le monde entier. Un circuit intégré n'est pas fabriqué dans une seule usine, ni même dans un district industriel localisé, mais sur des sites éloignés de dizaines de milliers de kilomètres, avec des produits parfois importés de loin.

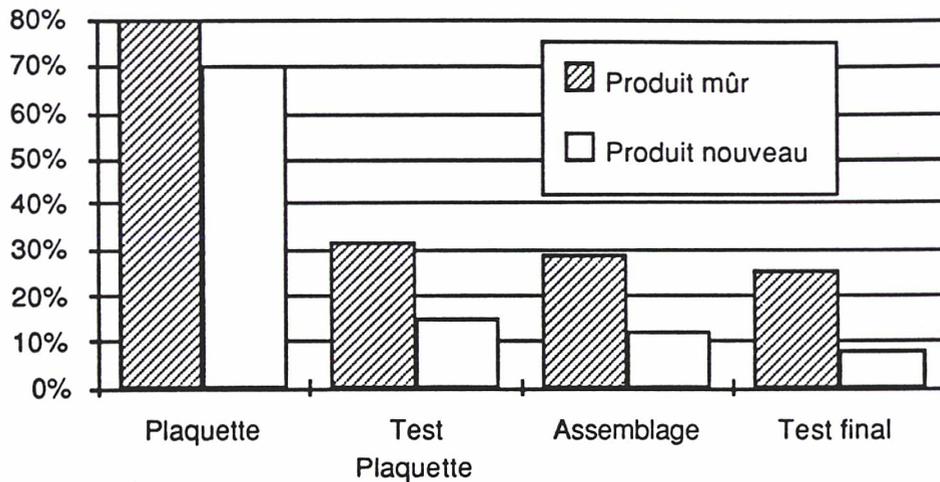
2. La concurrence en temps

Cette concurrence en temps est très caractéristique aux semi-conducteurs. Lancer un nouveau produit au bon moment est d'une importance vitale pour le fabricant qui doit attendre suffisamment pour trouver une demande, mais pas trop s'il ne veut pas se faire imposer des prix trop bas ne correspondant pas à sa structure de coût.

a. Le phénomène d'apprentissage

Dans la fabrication des circuits intégrés, le phénomène d'apprentissage a une influence capitale, car son impact sur le rendement est considérable. Au lancement d'une production, les rendements peuvent varier dans des proportions de 1 à 10 d'un fabricant à l'autre. Or suivant les séries de produits, la part des coûts variables dans la production de tranches de silicium varie de 30% à 50%, en rythme de production de croisière.

Un fabricant qui a des rendements deux ou trois fois supérieurs à un concurrent peut le forcer à vendre ses composants à un prix où il n'est même pas capable de couvrir ses coûts variables (matières premières et main d'œuvre), alors que lui pourra avoir une politique de prix lui permettant de rentabiliser ses investissements.



Graphe 11: Rendement cumulé d'une ligne de production (ICE)

Deux facteurs principaux déterminent le rendement d'une production: la contamination et la stabilisation technique du procédé.

La contamination, c'est la présence de micro-particules présentes dans l'atmosphère ou dans les fluides utilisés et susceptibles d'abîmer un circuit. Une micro-particule de poussière qui tombe sur un circuit tracé sur une tranche de silicium n'a pas l'effet d'un grain de poussière qui se dépose dans une couche de peinture d'une carrosserie: elle fait proportionnellement les mêmes dégâts qu'un avion qui s'écrase sur une agglomération dense. Le circuit ne fonctionne plus et est perdu. Pour les générations actuelles de circuits, les zones de production sont des salles blanches de classe 1 ou 10, c'est à dire que l'air qui y circule doit contenir moins de 1 ou 10 particules de poussière par pied cube. Les précautions prises sont considérables: l'air est filtré, le personnel revêt des tenues spéciales et accède aux zones de production par des sas de décontamination munis de douches à air, et ne peut pas introduire n'importe quel type d'objet. Notamment le papier et le maquillage sont proscrits. Les exigences de propreté atteignent les limites de l'observable et les responsables de la production ont chacun une idée différente de la cause majeure de contamination dans leur usine (contamination par les personnes ou par des procédés de traitement).

La stabilisation technique du procédé est une phase qui consiste à ajuster certains paramètres (temps, températures etc.) et améliorer l'uniformité du traitement sur toute la surface de la plaque. Elle demande un suivi étape par étape du procédé, de multiples observations et mesures sur les tranches en cours de traitement, des recoupements pour identifier l'étape qui est susceptible d'être améliorée, et demande donc beaucoup de temps.

La concurrence peut donc finalement se décrire comme une course technologique. On essaie de sortir ses nouveaux produits en avance sur ses concurrents, afin de bénéficier le premier de la courbe d'expérience et de réaliser des marges substantielles tout en étranglant les retardataires.

Le cas du marché des mémoires dynamiques (DRAM) illustre très bien l'avantage en termes de parts de marché que confère la primeur. Le tableau 7 montre que pour chaque génération de DRAM, le premier entrant s'arroge systématiquement le plus grosse part de marché.

Génération	Premier entrant	Production de masse	Premier producteur	Deuxième producteur
16K	Mostek (1976)	1978	Mostek (25%)	NEC (20%)
64K	Hitachi (1979)	1982	Hitachi (19%)	NEC(15%)
256K	NEC (1982)	1984	NEC (27%)	Hitachi (24%)
1M	Toshiba (1985)	1987	Toshiba (47%)	Mitsubishi (16%)

Tableau 7 : premiers entrants et parts de marchés pour différentes générations de DRAM

b. L'impossible politique du cavalier seul

L'analyse précédente explique cette course technologique si intense dans le monde des semiconducteurs. Pourtant, on n'assiste pas à l'émergence de leaders technologiques, constamment en avance sur le peloton, car de même que les retards sont disqualifiants, les échappées en solitaire ne peuvent durer bien longtemps.

- Si l'industriel est en retard, il ne pourra pas saisir les marchés ouverts par la nouvelle génération de composants, qui sont souvent ceux où la croissance est la plus importante, et risque donc de perdre durablement des parts de marché. On constate que le marché a, sauf pour des produits totalement indifférenciés (comme les mémoires), une certaine inertie. Quand un client s'est fixé un fournisseur, et qu'il en est sûr, il lui faut un avantage de prix non négligeable pour se convaincre qu'il doit passer à un deuxième.

- La situation inverse n'est paradoxalement pas forcément plus enviable : un industriel trop en avance risque de se trouver en avance sur tout le monde, y compris ses fournisseurs de machines. Il devra donc participer à la mise au point de la nouvelle génération d'équipements de production qui, une fois opérationnels, seront proposés à ses concurrents.

On peut ainsi citer le cas d'IBM qui, pour vouloir fabriquer une nouvelle génération de DRAMs bien avant ses concurrents, a dû acquérir des machines de photo-lithographie à ultraviolets, extrêmement coûteuses, et qui sont devenues obsolètes dès que la nouvelle génération d'équipements est sortie sur le marché, quelques mois plus tard.

L'industriel concerné investit donc finalement plus en R&D que ses concurrents, dégrossit le travail pour l'ensemble de l'industrie, et ne dispose finalement que d'une avance très réduite, puisque les concurrents peuvent acheter les nouvelles machines.

Aussi importe-t-il de posséder une technologie en phase avec celle de ses concurrents, l'idéal étant sans doute d'être un peu en avance.

Il faut donc garder à l'esprit que développer une nouvelle technologie en avance sur la concurrence peut s'avérer très coûteux. Le choix des échéances de développement d'une technologie est donc le compromis entre des considérations de coût de développement qui devient prohibitif si le fabricant est trop en avance de phase et des considérations de part de marché et sur les marges qui en découlent qui sont elles d'autant plus élevées.

C. Des investissements colossaux

La course vers la miniaturisation, pour obtenir des circuits de plus en plus compacts, complexes, économiques et rapides, a permis des gains considérables, puisque les tailles des grilles de transistors sont passées de 10 microns en 1989 à 1 micron en 1990, et atteindront peut-être 0,1 micron en l'an 2007. Mais elle a aussi imposé des contraintes redoutables aux composantiers.

En effet, le procédé de fabrication devient de plus en plus complexe (traitements de surface, recuits, polissages mécaniques etc.), à cause de cette miniaturisation que l'on veut obtenir en conservant un rendement correct. De 50 étapes de traitement en 1980, on est passé à plus de 400 aujourd'hui. Les prochaines générations atteindront 700 étapes de fabrication. Le savoir-faire se dilue de plus en plus entre les techniciens des usines.

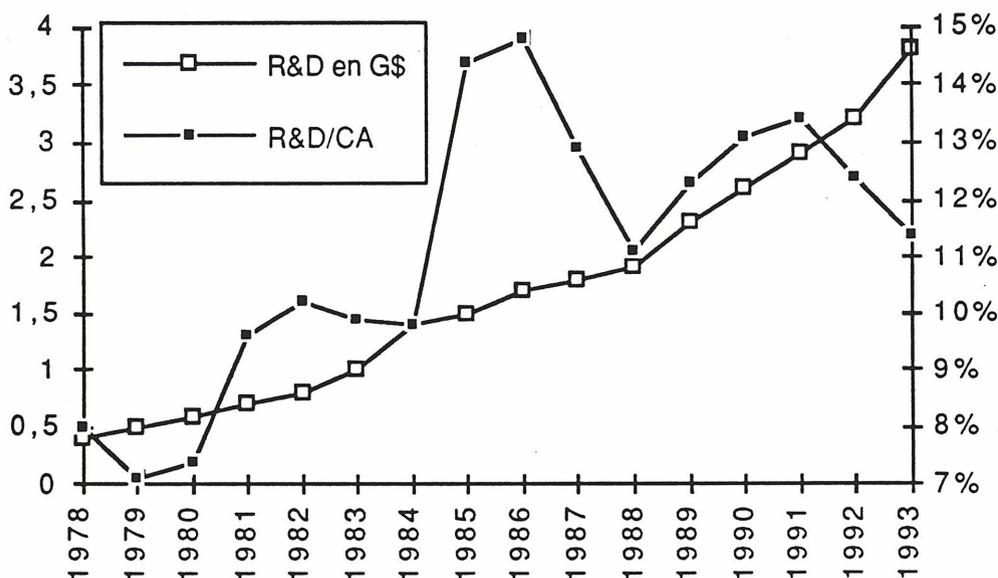
Les circuits sont de plus en plus fragiles, de plus en plus exposés au cours de traitements de plus en plus complexes et de plus en plus longs, et ont des surfaces de plus en plus grandes. Le taux de circuits non défectueux décroît exponentiellement avec leur surface et le nombre de manipulations : il convient donc d'affiner les conditions de traitement pour ne pas voir le rendement passer de 80% à 0,1% entre deux générations.

Les réductions d'échelles imposent en outre des sauts technologiques, tant les précisions des techniques existantes sont insuffisantes (limite de diffraction de la lumière pour la photo-lithographie, isotropie de la gravure par attaque chimique, etc.).

De ce fait, les investissements, qu'ils concernent la recherche et le développement ou l'installation de capacités de production, atteignent des valeurs colossales.

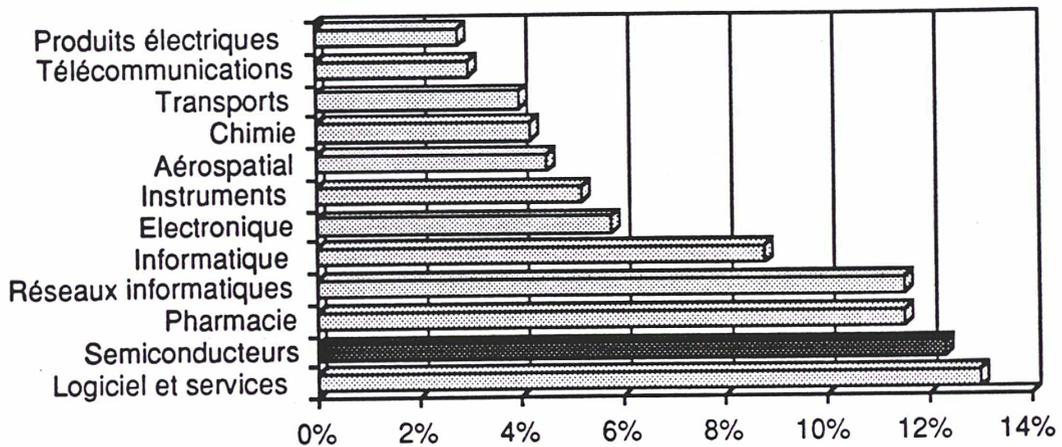
1. La recherche et le développement

Les dépenses en R&D atteignent des valeurs considérables : en 1994, pour les 20 premiers fabricants mondiaux, elles s'élevaient à 14% du chiffre d'affaires. Ces chiffres ne prennent pas en compte l'important soutien dont bénéficient les composantiers, sous formes de programmes de recherche subventionnés, de recherche universitaire ou d'instituts financés par les États.



Graph 12: dépenses en R&D des composantiers américains (source: SIA)

L'importance de ces dépenses apparaît encore mieux quand on les compare à celles que réalisent d'autres industries de haute technologie : selon une étude menée par la SIA, l'industrie des semi-conducteurs figure au second rang des secteurs les plus intensifs en recherche et développement, juste après la conception de logiciels et les services.



Graph 13: Comparaison du ratio R&D/CA pour différents secteurs industriels de haute technologie (SIA)

2. Les investissements matériels

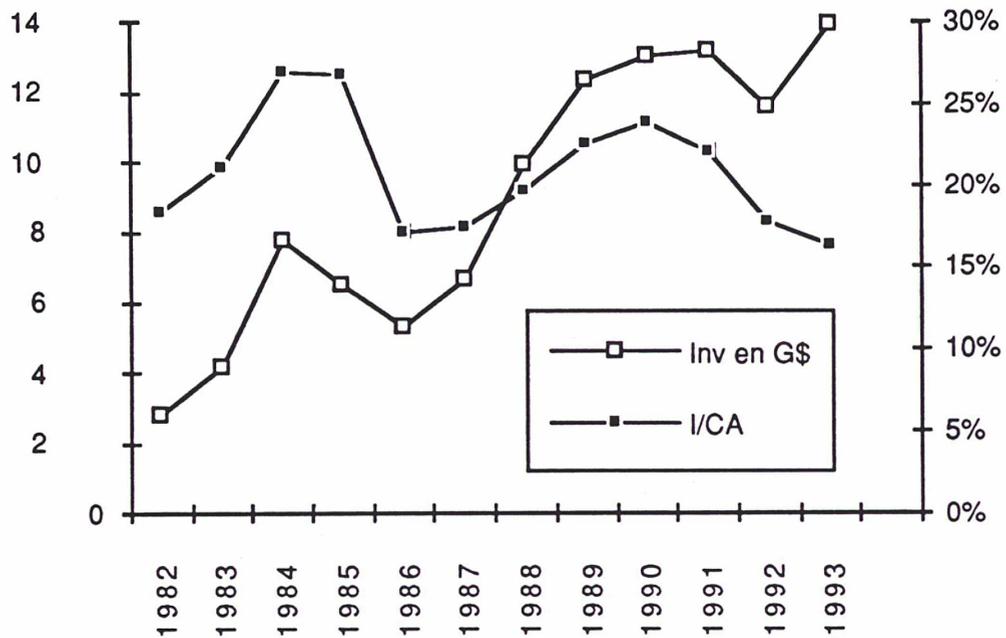
Les changements de technologie imposent un renouvellement complet du matériel de production à un rythme rapide.

De plus, les efforts de productivité conduisent à une augmentation constante des tranches de silicium : de 4 pouces en 1980, leur diamètre atteint aujourd'hui 8 pouces, et on estime que la transition vers les tranches de 12 pouces est proche.

Mais les investissements ne portent pas que sur les machines : les nouvelles contraintes sur la propreté n'imposent pas seulement un changement des équipements, mais aussi une refonte complète de l'organisation de la production et de la conception des bâtiments. Pour les générations futures de composants, on envisage la possibilité de salles blanches totalement automatisées et sans présence humaine ou de machines ayant leur propre cage de traitement ultra propre, ce qui nécessiterait des transferts de tranches d'une machine à une autre par des systèmes de sas. Ces exigences de propreté deviennent telles qu'elles posent des problèmes de faisabilité technico-économique des salles blanches de plus en plus ardues.

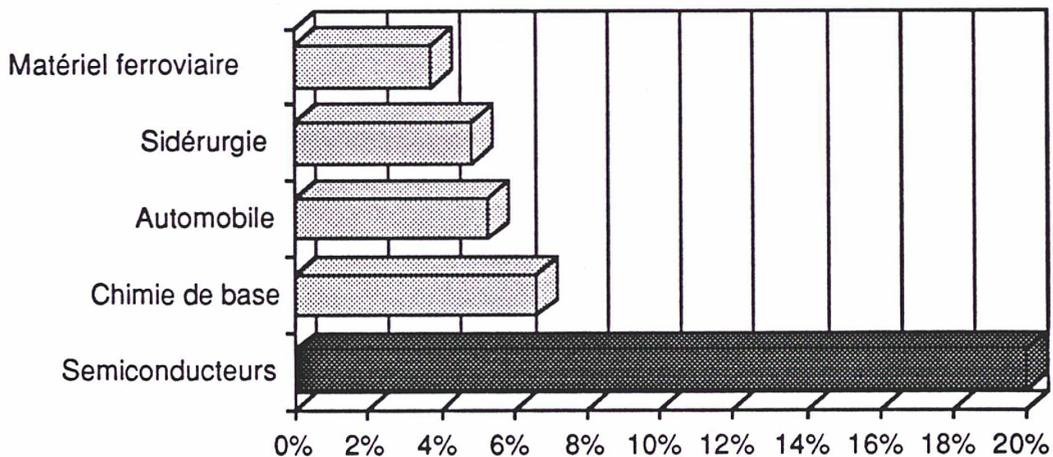
D'autres problèmes deviennent cruciaux, comme les problèmes de vibrations. Les usines nouvelles sont construites de préférence loin d'infrastructures routières et de zones trop densément industrialisées. Les salles de production sont construites sur des dalles découplées mécaniquement du sol, certaines machines sont même installées sur des dalles spéciales et anti-vibrations.

Par conséquent, les investissements en capital atteignent, eux aussi, des valeurs stupéfiantes : ils oscillent toujours entre 15 et 20% du chiffre d'affaires de l'industrie, et sont aujourd'hui estimés à près de 30 milliards de dollars dans le monde.



Graphe 14: Investissements en capital de l'industrie des semiconducteurs

Ici encore, la comparaison à d'autres secteurs est éloquent : l'industrie des semiconducteurs investit plus en capital que la plupart des industries lourdes.



Graphe 15: Comparaison des ratios Inv/Ca dans différents secteurs industriels

En outre, le poids énorme et croissant des investissements ne doit faire oublier que les produits utilisés dans la fabrication de semi-conducteurs sont aussi de plus en plus chers. Les divers fluides utilisés doivent être de plus en plus purs, les tranches de silicium de plus en plus irréprochables (ainsi, les tranches de 8 pouces utilisées désormais sont des tranches dites *zéro dislocation*. Au moins à la surface utilisée, la structure cristalline du silicium est parfaite. Leur prix est tellement élevé que les composants les consomment avec parcimonie pour les recherches et les tests.

IV. La croissance est-elle soutenable ?

La croissance du chiffre d'affaire mondial en semi-conducteurs se fait à rythme très rapide. Elle n'est donc pas encore mature. Jean-Philippe Dauvin, aime à dire que l'industrie de l'électronique se trouve actuellement au stade de maturité de l'automobile en 1920, ou du textile en 1880. Le PIB mondial ne croissant qu'à un rythme d'environ 3% par an, l'explosion des semiconducteurs cessera forcément un jour, mais quand? Dès qu'il est question de prospective, il est de bon ton de faire des prédictions mesurées. Beaucoup trop de prévisions précises ont par la suite été grossièrement démenties pour que nous puissions croire avoir une vision exacte de l'avenir. Nous nous bornerons donc ici à présenter quelques obstacles qui peuvent limiter la percée des semiconducteurs, ou à l'inverse les éléments qui permettent d'espérer que cette aventure technologique n'est pas près de s'arrêter en si bon chemin.

A. Les limites technico-économiques

Les Cassandre ne manquent pas dans le monde des semiconducteurs. De nombreuses voix s'élèvent régulièrement, qui affirment la fin de la miniaturisation : au prochain saut technologique, les transistors changeront de comportement, ils dissiperont trop de chaleur... Pourtant, la régularité de ces prédictions n'a d'égale que celle de la miniaturisation. Ainsi pensait-on qu'il serait impossible d'avoir une échelle de dessin en dessous d'un micron, alors qu'aujourd'hui, elle atteint 0,35 micron en production. On ne peut donc s'empêcher de modérer l'importance des barrières techniques, ni de céder à un certain optimisme.

En revanche, les fabricants de semiconducteurs craignent que les exigences des technologies de plus en plus fines ne rendent ces dernières trop coûteuses pour qu'elles puissent accéder au marché. On a actuellement les prémices d'une telle évolution avec le retard qu'ont pris les mémoires de 16 Mbits pour entrer sur le marché, car elles ne sont pas encore vendues à un prix plus intéressant que l'ancienne génération des mémoires à 4Mbits.

On peut tout de même présenter ici les obstacles techniques et technico-économiques à surmonter dans un avenir proche pour avoir une évolution technologique qui reste conforme à la loi de Moore.

- La lithographie est actuellement considérée comme une étape limitante. La lumière utilisée pour projeter les images des masques a une longueur d'onde très proche de la résolution recherchée. Une réduction d'échelle demande donc le passage à une longueur d'onde plus courte (des ultraviolets profonds), voire aux rayons X. Ce saut technologique n'est cependant pas considéré comme un obstacle majeur en soi puisque, pour des résolutions supérieures, des solutions très différentes comme la gravure par faisceaux d'ions sont envisagées : il existe déjà une technique de lithographie précise par faisceaux d'électron, où un pinceau d'électrons parcourt la tranche en dessinant les détails des circuits comme le fait une table traçante sur une feuille de papier. Malgré tout, ce type de procédé reste extrêmement lent et n'est pas envisageable pour une fabrication en grande série.

- On considère que pour des raisons physiques intrinsèques, des transistors avec des grilles de moins de 0,1 microns sont difficilement envisageables. La grille correspondante aurait une épaisseur de 100 atomes, ce qui induit d'une part des variations statistiques de comportement trop fortes, et impose par ailleurs des passages à des tensions nominales plus faibles (environ 1 volt). Cette baisse de tension engendre une hausse du rapport signal sur bruit qui demande de nouveaux développements technologiques (durcissement aux ondes électromagnétiques, etc.)

- Une autre limite déjà évoquée est l'exigence de propreté de plus en plus forte. Une réorganisation des salles blanches est inévitable, avec des zones propres totalement isolées des opérateurs. En plus des surcoûts considérables dans la construction des bâtiments ou dans le prix des équipements, il faut faire appel à une automatisation encore bien plus poussée.

B. Les limites de marché

Tout comme l'évaluation des limites physiques, toute prévision concernant le marché doit être effectuée avec la plus grande circonspection. Il est très difficile de prévoir l'accueil qu'il réservera à une innovation technologique ou d'usage. Certains produits comme l'ordinateur personnel lancé par IBM ont eu un succès inespéré, avec des chiffres de ventes qui ont pulvérisé les prévisions. À l'inverse, les lecteurs de cassettes numériques et les télévisions haute définition, dont les promoteurs espéraient beaucoup ont été des échecs retentissants.

Les prévisions qui ont le plus souvent été contredites sont celles qui annonçaient un ralentissement durable des besoins en composants. On peut aujourd'hui citer quelques innovations technologiques naissantes qui laissent prévoir des besoins substantiels en composants dans les années à venir.

- Les besoins en microprocesseurs et en mémoires pour le secteur informatique restent considérables. La puissance de calcul n'est pas un luxe recherché pour des applications de modélisation ou de recherche lourde mais également pour des applications destinées à un public très large dont l'ergonomie de plus en plus soignée augmente considérablement les besoins en rapidité et en mémoire. A titre d'exemple, les fabricants de mémoires prévoient une forte hausse de demande en mémoires avec la sortie annoncée du système d'exploitation Windows 95, de Microsoft. De même, un logiciel de traitement de texte de nouvelle génération a un fonctionnement tellement plus lourd que les versions antérieures qu'il ne fonctionne guère s'il n'est pas installé sur un ordinateur d'une génération récente.

- L'ergonomie et l'interface homme-machine peuvent encore faire des progrès considérables, qui ne se limitent pas aux logiciels d'ordinateurs ou aux équipements électroniques. Des techniques comme la reconnaissance vocale en sont encore à leurs premiers balbutiements, et pourront sans doute s'appuyer des composants de plus en plus puissants pour gagner en efficacité.

- Les besoins en mémoires et composants numériques vont être considérablement augmentés par la numérisation de l'audiovisuel grand-public. Cette numérisation s'est déjà amorcée

- Les télécommunications et la mise en service de réseaux publics avec des capacités correspondant aux besoins suscités par l'usage de l'informatique et d'équipements de puissance similaire provoqueront des besoins en composants considérables.

- L'industrie automobile est déjà consommatrice de composants électroniques. Mais les changements de mode de conception des véhicules et d'organisation du système de commande d'organes vont également susciter des besoins considérables. Ce nouveau marché permettra le développement d'un savoir-faire et la fabrication à bas coût de composants qui pourront par la suite être utilisés pour développer des applications dites de *domotique*.

La liste des besoins futurs est sûrement plus longue, tant l'imagination des industriels est sans limites, dès lors qu'il s'agit de trouver une nouvelle application pour des composants qui offrent un rapport fonctionnalités sur prix imbattable. Il suffit de se rappeler qu'on trouve désormais des composants dans des objets aussi variés que des chaussures de sport qui estiment la distance parcourue à pied et les calories consommées, des poupées qui parlent, des cartes de vœux qui diffusent un air de musique.

S'il est difficile de chiffrer ces besoins, on peut au moins en tirer la certitude que la demande en composants n'est pas près de se stabiliser. Toutefois, il faut garder à l'esprit que les besoins décrits ci-dessus ne s'exprimeront que si les gains en productivité des fabricants de semi-conducteurs rendent ces biens accessibles à des prix que les clients sont prêts à payer. En d'autres termes, les limites technico-économiques et les limites de marchés sont liées.

C. Les limites financières

Depuis plusieurs années, l'industrie des semiconducteurs peut être extrêmement rentable. En effet, même s'il est impossible d'estimer la rentabilité de la profession, puisqu'un grand nombre de composants font partie de grands groupes intégrés dans lesquels les données comptables sont consolidées, les quelques chiffres disponibles indiquent des marges tout à fait confortables.

	SGS-Thomson	AMD	Intel	Micron	National Semicond.	Texas Instruments
CA (M\$)	2 649	1 648	8 782	1 628	2 295	6 483
Résultat net (M\$)	363	218	2 295	400	240	808
Marge	14%	13%	26%	25%	10%	12%
MBA ³ (M\$)	651	393	3 323	539	414	1 232
MBA ³ /CA	25%	24%	38%	33%	18%	19%

Tableau 8: Principales données financières de quelques composants en 1994

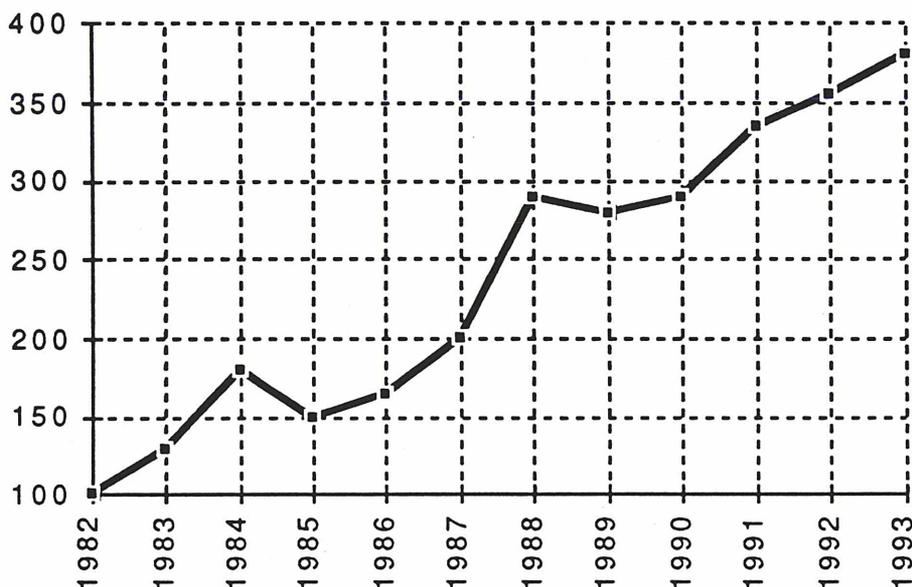
1. Des gains de productivité considérables

A chaque génération technologique, les machines deviennent plus chères, les fluides utilisés plus purs et donc plus coûteux, les bâtiments plus complexes. Pourtant, ces renchérissements sont tous largement compensés par l'intensité et la constance des gains de productivité de l'industrie.

En effet, les machines sont toujours plus performantes, plus automatisées. De même, l'augmentation de la taille des plaquettes, dont la surface a été multipliée par un facteur 4 en l'espace de quelques années, a permis de réaliser des gains considérables : les délais causés par le chargement et le calage des machines se sont considérablement

³Marge Brute d'Autofinancement

réduits, le nombre de machines nécessaires pour atteindre une même capacité de traitement a fortement diminué, et avec lui le nombre d'opérateurs et de personnel de maintenance.



Graphie 16: Valeur ajoutée par employé (indice 100 en 1982) (SIA)

2. L'amortissement des unités de production

Le rythme de renouvellement technologique, qui détermine la vitesse de construction de nouvelles usines, pourrait laisser à penser que les industriels n'amortissent jamais leurs usines existantes : elles sont rapidement dépassées par d'autres usines qui fabriquent de nouveaux produits, et ce à un coût moindre.

En réalité, il n'en est heureusement rien.

En effet, les nouvelles générations ne détrônent pas instantanément les anciennes : leur production concerne d'abord les composants de pointe, en faible nombre, pour lesquels le coût compte moins que la performance intrinsèque. Ces usines ne deviennent ensuite compétitives vis à vis de leurs aînées que quand leur position sur la courbe d'expérience (qui dépend de leur production cumulée) atteint un niveau suffisant. Il s'écoule donc un certain temps entre l'entrée en production des nouvelles générations et l'obsolescence des usines existantes.

D'autre part, il existe des produits dont le temps de vie est beaucoup plus long qu'une génération technologique de composants, et qui doivent impérativement être réalisés dans une technologie antérieure, voire même ancestrale aux yeux des composants. On peut ainsi citer le cas de certains composants à usage militaire : un char d'assaut, qui dure plus de 15 ans, doit pouvoir être réapprovisionné en pièces détachées tout au long de son existence. De même, les cartes à puces montées sur les cartes de crédit ou les télécartes doivent pouvoir être lues par les lecteurs installés dans les cabines téléphoniques et les distributeurs de billets conçus il y a longtemps.

Pour toutes ces raisons, les usines d'ancienne génération, loin de peser dans les finances des composants, en sont souvent les enfants chéris : amorties, elles servent souvent de vaches à lait pour financer les équipements dernier cri. Il serait d'ailleurs faux

de croire qu'un composantier peut survivre en ne fabriquant continuellement que les produits de nouvelle génération.

Enfin, ce n'est pas parce que la technologie change que toutes les machines deviennent obsolètes : à côté de certains procédés critiques, comme la photolithographie et la gravure sèche, on distingue des étapes dites réductibles, pour lesquelles la miniaturisation des composants n'impose pas de remise en cause. On peut ranger dans cette dernière catégorie les étapes de cuisson ou d'épitaxie.

3. La faiblesse des besoins en fonds de roulement

Le financement de la croissance lui-même ne remet pas en cause la viabilité : les marges, qui sont nous l'avons vu importantes, suffisent d'autant plus à financer l'accroissement du besoin en fonds de roulement que celui-ci reste relativement faible, puisque les stocks sont souvent très limités.

V. Quel avenir pour le secteur de la micro-électronique

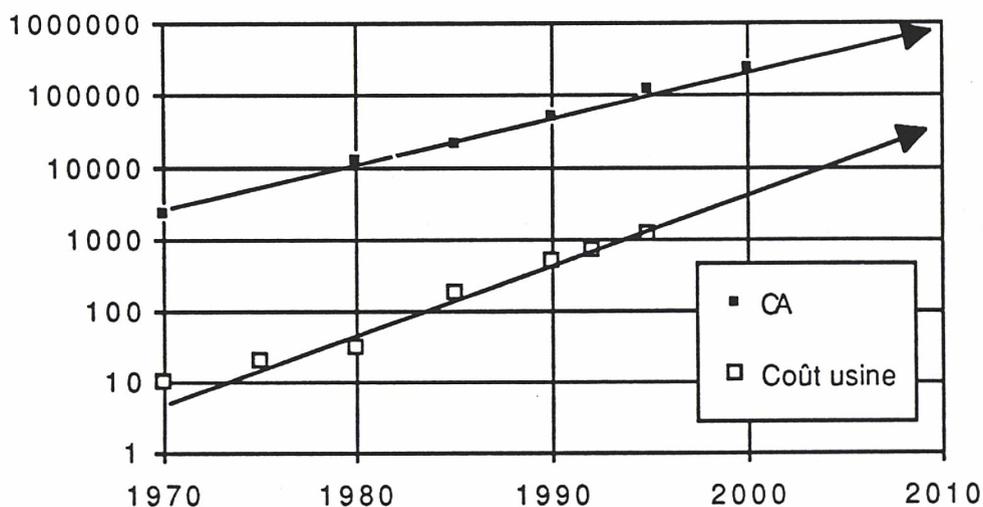
Personne ne peut aujourd'hui affirmer avec certitude que la croissance s'infléchisse dans les quelques années qui viennent : les débouchés des semiconducteurs semblent encore virtuellement illimités, les limites techniques sont repoussées d'année en année, et les performances financières de l'industrie paraissent tout à fait correctes. Pourtant, il n'est pas garanti que l'industrie du silicium puisse suivre son marché sans une restructuration profonde : les unités de fabrication deviennent plus chères d'années en années, et leur prix pèse de plus en plus lourd dans les finances des composants.

A. Chacun son usine: un modèle non soutenable

Jusqu'à présent, les composants mettaient en place plusieurs usines de composants, spécialisées dans la production de certains types de composants comme les mémoires, ou dans certaines technologies. Or, les prix de ces nouvelles usines deviennent chaque jour plus importants, et leur financement pose de plus en plus de problèmes aux industriels. Il semble donc que ce modèle ne soit plus soutenable, car le rythme de réinvestissement ne peut être ralenti.

1. L'explosion du prix des usines

Le prix des unités de production augmente structurellement plus vite que le marché des semiconducteurs : alors que le chiffre d'affaire de la profession croît en moyenne de 16% par an, le prix d'une usine progresse de 23% par an.



Graphie 17: Évolution comparée du marché des semiconducteurs et du prix d'une usine (en M\$)
(Dataquest)

a. La complexité croissante des unités

Chaque nouvelle génération d'usines correspond à une nouvelle génération technologique. Or, le progrès technique passe souvent par une sophistication croissante des procédés, et donc des machines et même des infrastructures.

Ainsi, la miniaturisation des circuits demande chaque jour une automatisation plus poussée, les manipulations humaines devenant par trop imprécises. Ainsi, alors que la lithographie est aujourd'hui entièrement automatique, les masques étaient il n'y a pas si longtemps calés à la main, l'opérateur faisant coïncider le motif du circuit avec son emplacement prévu sur la tranche de silicium.

D'autre part, les procédés eux-mêmes ont dû changer, pour atteindre les niveaux de précision requis par l'échelle submicronique. Par exemple, les procédés de gravure traditionnels par attaque chimique ont dû être remplacés par des procédés à plasma, anisotropes.

Les mêmes impératifs de précision ont conduit à des contraintes énormes sur les bâtiments eux-mêmes : pour pouvoir graver des pistes épaisses de quelques dixièmes de microns seulement, les vibrations doivent être minimales. Par conséquent, il n'est pas rare de voir des salles de production installées sur des dalles de béton anti-vibrations complètement désolidarisées du reste de l'usine.

Enfin, pour assurer une bonne qualité aux composants, les tranches de silicium doivent rester isolées de la moindre poussière. On produit donc en salle blanche de classe 1 (1 particule par pied cube), beaucoup plus propres qu'une salle d'opérations chirurgicales, ce qui n'est possible que par la circulation de flux d'air laminaires et à fort débit à travers planchers et plafonds. Le coût de ces salles blanches atteint donc désormais aussi des valeurs astronomiques.

b. La concentration des fournisseurs de machines

Les prix des machines n'augmentent pas seulement à cause de leur complexité croissante. En effet, la course technologique a fait apparaître parmi les fournisseurs de machines plusieurs entreprises leaders sur certains types d'équipements, qui profitent de leur position quasiment monopolistique pour élever le prix de leurs produits. Ainsi, Applied Materials règne sans partage sur les équipements de gravure par plasma, tandis que Nikon et Canon se partagent 80% du marché des photorépéteurs.

L'augmentation des marges de ces fournisseurs accroît donc aussi sensiblement le prix des équipements.

c. La course au gigantisme des usines

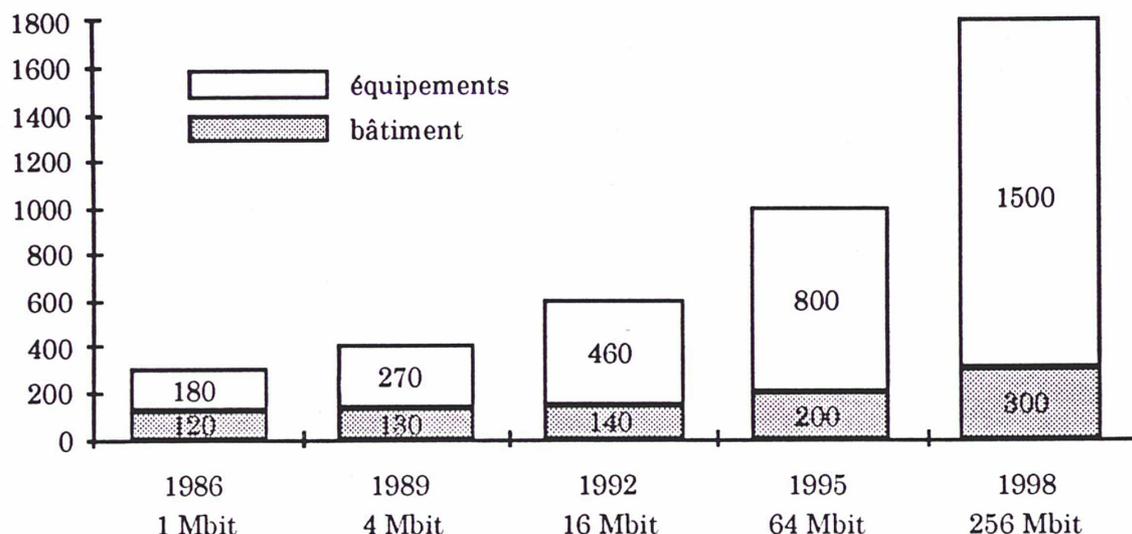
Les économies d'échelles sont très sensibles au niveau d'une usine.

En effet, le nombre de machines installées doit toujours être surdimensionné par rapport aux besoins de production, pour pouvoir assurer la maintenance et gérer les pannes. Or, compte tenu du prix de ces machines, il est rapidement avantageux d'en regrouper un grand nombre sur la même unité, puisque cette concentration dilue les coûts de non utilisation des équipements redondants.

De même, toutes les machines n'ont évidemment pas la même capacité de production ni le même débit. Les industriels affrontent devant des problèmes de goulets d'étranglement, qui se résolvent mieux quand la production se rapproche d'un multiple commun des capacités des différentes machines. En effet, si un industriel utilise par exemple deux types d'équipements, traitant respectivement 20 et 30 tranches à l'heure, la seule façon de ne pas sous-utiliser un équipement consiste à produire un multiple de 60 tranches à l'heure, ce qui permet d'utiliser chacun des équipements à pleine capacité.

Or, il est évidemment plus facile d'atteindre un multiple commun des capacités de chaque type de machines quand la production est élevée que quand elle est faible.

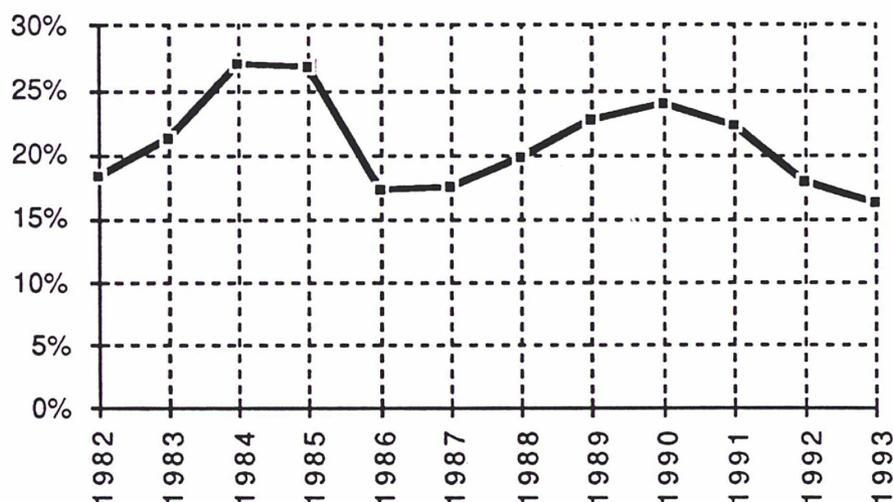
On assiste donc finalement à une course à la taille des usines, ce qui n'est évidemment pas non plus sans incidence sur l'augmentation de leur coût unitaire.



Graphe 18: Coût de construction d'une usine de DRAM de 20000 tranches par mois (en M\$) (Dataquest)

2. La réduction du nombre d'usines nouvelles

L'écart entre la croissance du marché et celle du prix d'une usine nouvelle suggère que la part des investissements des composants dans leur chiffre d'affaires ne fait qu'augmenter. Ce n'est pourtant pas vrai. En effet, le ratio Investissement / Chiffre d'affaires de la profession affiche une étonnante stabilité depuis 1980, en restant de l'ordre de 15-20%.



Graphe 19: Ratio Investissement / CA (Dataquest)

En effet, les industriels ont profité des gains de productivité offerts par les nouveaux équipements et de la croissance de la taille unitaire de leurs usines pour compenser la hausse du prix d'une unité en réduisant le nombre de constructions d'usines nouvelles tout en gardant voire augmentant leur capacité de production. Là où avant, une usine pouvait traiter 20 000 tranches de 4 pouces par mois, une nouvelle unité produit encore 20 000 tranches par mois, mais celles-ci ont maintenant un diamètre de 8 pouces et contiennent donc 4 fois plus de composants.

Ainsi, une étude récente montre que le nombre de nouvelles usines construites chaque année devrait passer de 22 en 1994 à 15 en l'an 2000.

Pourtant, cette solution atteint aujourd'hui ses limites, puisque les industriels, à l'exemple d'IBM, ne disposent souvent plus que d'une seule usine d'une technologie donnée.

La réduction du nombre d'usines passe donc maintenant par l'accroissement du délai entre deux constructions d'usines nouvelles. Or, les nouvelles unités de production sont généralement installées lors d'un saut technologique, puisque les industriels doivent toujours disposer de la dernière technologie de production existante s'ils ne veulent pas perdre de parts de marché. L'accroissement du délai entre deux constructions d'usines nouvelles n'est donc viable que si le rythme de renouvellement des technologies ralentit.

Il ne faut alors pas oublier que les road-maps technologiques ne prévoient pas de ralentissement dans un avenir proche, ce qui laisse à penser que ce ralentissement du rythme technologique ne viendra pas de raisons techniques.

Dans le même temps, il convient de garder à l'esprit que l'investissement dans une nouvelle génération d'usines est une opération rentable : dans un premier temps, elle permet de satisfaire des besoins qui n'avaient pu être couverts faute de performances suffisantes, et donc de s'ouvrir de nouveaux marchés. Ensuite, quand la position sur la courbe d'expérience permet de produire des composants à plus bas coût que ceux de la génération précédente, cette dernière devient obsolète et perd le marché.

Or, l'industrie des semiconducteurs compte parmi ses membres plusieurs membres de groupes intégrés, comme par exemple NEC, Philips, Samsung, IBM, etc. Ces groupes disposent des fonds suffisants pour financer de nouvelles unités sans compromettre leur bilan, et seront sans doute prêts à investir, comme le montre l'exemple récent de Daimler-Benz, qui vient d'autoriser sa filiale MHS, un petit fabricant basé à Nantes, de construire une nouvelle usine dont le prix représente le triple de son chiffre d'affaires.

Il ne semble donc pas réaliste d'attendre un ralentissement du rythme de renouvellement technologique.

3. Le difficile financement des nouvelles usines

Comment les industriels vont-ils financer leurs nouvelles unités de production, s'ils ne peuvent pas compter sur l'appui d'un parent solvable?

En premier lieu, la solution de l'autofinancement semble peu réaliste : malgré l'importance de leurs capacités d'autofinancement, les industriels ne pourront assurément pas tous se payer de nouvelles usines sans recourir à des demandes de fonds.

Or, l'emploi de prêts bancaires semble également peu souhaitable : outre que leur attribution dépend de ratios qui coïncident mal avec l'énormité des sommes en jeu, ils engendrent une flambée des frais financiers qui grèverait la rentabilité de l'entreprise et sa capacité de financement ultérieure.

La seule solution semble donc finalement venir de l'augmentation de capital, qui coûte d'autant moins cher que les industriels ne distribuent habituellement pas de dividendes, les investisseurs recherchant surtout de fortes plus-values. C'est d'ailleurs ce qu'a bien compris SGS-Thomson, qui a augmenté son capital de près de 40% en l'espace de quelques années. Pourtant, ici encore, les limites du système sont apparentes : les augmentations de capital en bourse fragilisent l'entreprise en cas de difficultés, facilitent les OPA et donc la concentration du secteur; pour les mêmes raisons, on peut douter que les investisseurs soient prêts à assumer plus de risques que les actionnaires 'industriels', et donc qu'ils souscrivent à un grand nombre d'opérations de ce genre.

4. Une solution possible : le partage des usines

Finalement, l'organisation actuelle de l'industrie, où chaque composantier dispose de ses propres usines, n'apparaît plus soutenable. La seule solution envisageable pour les constructeurs qui souhaitent rester indépendants est donc le partage d'usines. C'est d'ailleurs cette tendance que l'on observe depuis quelques années : ainsi, IBM produit des DRAMs en collaboration avec Siemens. Siemens et Toshiba ont annoncé récemment la construction d'une usine en commun en Angleterre. On connaît également une usine partagée à quatre intervenants à Singapour.

A terme, si la tendance ainsi observée se poursuit, on peut imaginer des partages avec un nombre encore plus grand de participants, et éventuellement une organisation plus systématique de l'achat et de la cession de droits de production, gérés par exemple avec un marché à terme.

Quel impact ce genre d'organisation aurait sur la nature de l'activité des entreprises de semiconducteurs et sur la structure de l'industrie, c'est ce que nous développons ci-dessous.

B. La conception, un facteur de différenciation

Puisque le partage d'usines équivaut à une mise en commun de technologies et de capacités de production avec des concurrents, ne s'apparente-t-il pas à une concentration ou du moins une cartellisation déguisée du secteur?

Nous pensons que ce risque, s'il existe, peut être largement réduit : le secteur de la micro-électronique fourmille déjà d'exemples de partenariats technologiques, qui ne ressemblent en rien à une concentration car les industriels prennent soin de ne pas s'associer sur tout avec le même concurrent.

De plus, il nous semble qu'un autre argument permet les partages d'usines sans cartellisation : la multiplication des produits dédiés et des ASIC a engendré un nouveau type de différenciation, basé sur la capacité de conception des composantiers et sur la présence de relations commerciales de long terme avec leurs clients.

En effet, pour les produits standards, les conditions du marché s'apparentent à celles de l'épicerie, chacun choisissant sur étagère ses fournitures en fonction de critères de prix, qualité, délais, etc.; la clientèle est donc extrêmement volatile.

En revanche, la conception des ASIC se fait le plus souvent en commun entre le fondeur et son client, pour que le circuit final soit compatible avec la technologie de diffusion du composantier et en exploite au mieux les possibilités. De ce fait, une fois les masques réalisés, il devient très coûteux pour le client de changer de fournisseur, puisque ce changement affecterait la définition même du composant. De même, pour gagner la

fourniture de la génération suivante d'ASIC, le fondateur ne peut plus se permettre de laisser partir ses clients ni de les décevoir. On assiste donc à l'établissement de relations client-fournisseur de long terme, voire à l'émergence de véritables partenariats industriels.

Les produits dédiés participent aussi de cet allongement des relations commerciales : pour concevoir un produit qui satisfera exactement les besoins d'un secteur client, le composantier doit impérativement disposer de liaisons constantes avec un échantillon représentatif de ce secteur.

La montée en puissance de ces composants a donc ouvert le champ à une autre différenciation, qui ne repose plus seulement sur la technologie, mais aussi sur la capacité de conception et les relations avec certains types de clients. Ainsi, la relative absence des composantiers japonais dans la production d'ASIC pour clients européens s'explique essentiellement par des différences culturelles (et surtout linguistiques) entre les équipes de conception du fondateur et celles du client, et non pas par l'éloignement des usines ou l'inadaptation des technologies.

Or, ce type de différenciation reste tout à fait compatible avec des partages d'usines, puisque ces derniers ne concernent que la technologie.

On peut donc supposer que la mise en commun d'unités de production, loin de s'apparenter à une concentration, mènerait sans doute plus à l'accroissement de la différenciation par la conception et les relations commerciales qu'à une cartellisation et une uniformisation brutale de l'industrie.

C. Les nouvelles organisations possibles

Le partage d'usines fonctionnera d'autant mieux qu'il laissera aux composantiers une possibilité de différenciation. Nous venons de plus de montrer que, même si un industriel réalise tous ses produits dans des usines communes à d'autres partenaires, il ne perd pas son identité puisqu'il lui reste la possibilité d'une différenciation par la conception de circuits et par la qualité de ses relations commerciales avec ses clients de long terme.

De plus, le partage d'usines ne verra le jour que si les usines en question sont gérables. Or, on conçoit aisément qu'il puisse exister un conflit d'intérêt entre l'optimisation de l'usine dans les comptes de l'actionnaire majoritaire, qui passe par la fabrication des produits dont la marge est la plus forte, quel que soit celui des partenaires qui le vende, et l'optimisation des entreprises qui partagent cette usine, pour qui l'important est de livrer en quantité suffisante et dans les délais requis les produits qui lui ont été commandés. C'est d'ailleurs ce type de problèmes que doit actuellement régler Philips Semiconductors dans son usine de Singapour.

Nous pensons donc que les industriels, qui ne peuvent plus financer tous leurs investissements seuls, choisiront d'abord de partager les usines qui fabriquent des produits indifférenciés, voire même celles qui ne réalisent qu'un seul composant. Le cas de l'accord entre Siemens et IBM, qui concerne la production à Corbeil-Essonnes de DRAMs, produit standard par excellence, illustre bien ce type de logique. En effet, ce type d'accord ne touche en rien l'identité de l'entreprise, puisque le produit est standard, et l'usine résultante est facilement gérable.

Les composantiers ont donc tout à gagner de ces associations qui ne perturbent pas la vie de l'entreprise et lui permettent de garder des fonds pour financer, seuls cette fois, les usines stratégiques, qui produisent par exemple des produits logiques.

De la même manière, il n'est pas interdit de penser que les composants acceptent relativement aisément de s'associer avec des concurrents disposant du même type de technologie : les risques de transfert non contrôlé de savoir-faire sont minimes, et les gains potentiels issus de la mise en commun des petites recettes assez élevés.

La multiplication de tous ces partenariats devrait permettre aux industriels de nouer des relations de confiance suffisamment solides avec certains de leurs concurrents pour pouvoir ensuite envisager d'étendre les accords à des unités plus problématiques.

Mais nous pensons que les composants pourront même franchir le Rubicon et partager les usines qui utilisent les technologies logiques : pour gérer la production de ces usines, et arbitrer entre les intérêts de l'usine et ceux des partenaires, il pourrait se créer un marché des droits de production sur l'usine dont la valeur, variable, rendrait compte des intérêts de chacun. Les industriels pourraient d'ailleurs, quand leurs commandes seraient basses, céder ces droits à des tiers qui, eux, absorberaient ainsi un pic de demande, et optimiser ainsi à tout instant la charge de l'usine.

ABC de la micro-électronique

Qu'est-ce qu'un semi-conducteur ?

Les matériaux semi-conducteurs

Semiconducteur intrinsèque

Un semiconducteur est un matériau de conductivité intermédiaire entre un conducteur et un isolant. Ceci revient à dire que l'énergie qu'il faut donner à un électron pour qu'il passe de la bande de valence à la bande de conduction est de l'ordre de grandeur de l'énergie d'agitation thermique. (Pour un conducteur, les bandes de valence et de conduction se touchent, tandis que pour un isolant, le saut d'énergie est très supérieur à l'énergie d'agitation thermique). Les semiconducteurs sont soit des cristaux d'atomes de la colonne IV de la classification de Mendeleiev (comme le silicium ou le germanium), ou des alliages d'atomes des colonnes III et V (arséniure de gallium).

Une propriété particulière et très utilisée du silicium est que sous sa forme pure et cristalline, il est semi-conducteur, alors que sa forme oxydée, SiO_2 , est isolante.

Semiconducteur extrinsèque

Une modification très utilisée d'un semiconducteur est le *dopage*. Elle consiste à insérer dans le réseau cristallin du semiconducteur des impuretés de la colonne III (bore, aluminium, gallium, indium) ou de la colonne V (phosphore, arsenic, antimoine). Ces impuretés sont respectivement des accepteurs ou des donneurs d'électrons.

Les donneurs ont un électron de plus qui est déjà à un niveau d'énergie situé au niveau de la bande de conduction du réseau, et qui peut donc se déplacer aisément. Les semiconducteurs dopés ainsi (semiconducteurs de type N) ont une conductivité augmentée grâce à de charges libres qui sont des électrons excédentaires.

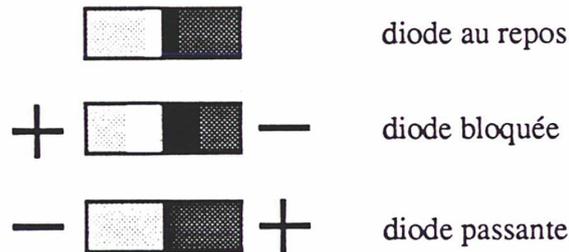
A l'inverse, les accepteurs ont une lacune à un niveau d'énergie comparable à la bande de valence du réseau. Un électron d'un atome voisin du réseau peut donc s'y transférer aisément. Ce faisant, il laisse une lacune sur l'atome qu'il a quitté, laquelle peut à nouveau être comblée par un électron d'un deuxième atome, etc. Un semiconducteur ainsi dopé (semiconducteur de type P) a une conductivité accrue grâce à des lacunes mobiles (que l'on peut considérer comme des charges positives fictives).

Les composants semiconducteurs

Les principaux composants semiconducteurs exploitent les propriétés particulières des *jonctions* entre zones dopées P et N.

Le composant le plus simple est la *diode*. C'est une jonction entre deux zones dopées respectivement P et N. On constate que si on applique une tension dans un sens (pôle plus sur la zone P, moins sur la zone N), les électrons de la zone N viennent combler les lacunes de la zone P, si bien que la jonction se comporte comme le même

semiconducteur non dopé, et a une résistivité forte. La diode est dite bloquée. Dans le sens inverse, on assiste à une cogénération de lacunes et d'électrons excédentaires au niveau de la jonction, et la résistivité du semiconducteur est faible. La diode est dite passante. Des effets thermodynamiques viennent compliquer quelque peu le comportement de la diode, et lui donnent en fait une courbe caractéristique logarithmique entre tension et intensité.



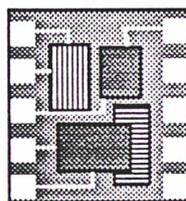
Présence d'électrons et de lacunes en fonction de la tension appliquée aux bornes d'une diode.

Le composant qui a provoqué une révolution en électronique est le transistor. C'est un composant à trois pôles constitué de deux jonctions, entre trois zones dopées. Le principe peut être résumé ainsi: faire passer un courant dans le sens passant sur la première jonction dope la zone intermédiaire et rend la deuxième jonction conductrice dans un sens qui est normalement bloquant. On a un effet d'amplification de courant. C'est le transistor qui, lorsqu'il a été inventé, a remplacé des lampes utilisées dans les postes de TSF. Ce dernier mot est tombé en désuétude, pour être remplacé précisément par "transistor". Ceci illustre à quel point l'apparition du transistor a provoqué un bouleversement du monde de l'électronique, perceptible même par l'utilisateur ultime.

Les autres composants actifs élémentaires utilisés en électronique se constituent d'un assemblage de zones dopées différemment, et on exploite les propriétés particulières des jonctions ainsi formées et leurs interactions.

Qu'est-ce qu'un circuit intégré ?

C'est un circuit monolithique gravé sur un rectangle de silicium (ou plus rarement d'arséniure de gallium). Ce circuit est en général conditionné dans un boîtier en céramique avec des pattes de connexion. Le schéma ci-dessous représente de manière très simplifiée un circuit intégré ou puce (*chip* en anglais).



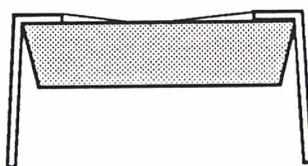
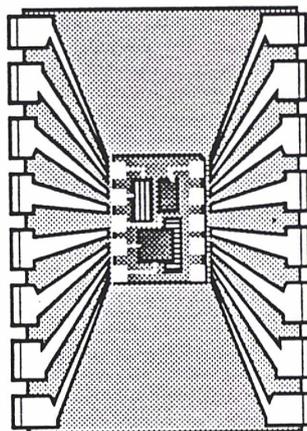
Circuit intégré ou "puce"

Le schéma ci-dessous représente une puce conditionnée dans un emballage standard, la partie supérieure de l'emballage étant enlevée. La puce est noyée dans un emballage en céramique, après avoir été reliée à des pattes de connexion.

On peut donner quelques ordres de grandeurs: le nombre de pattes pour un circuit intégré varie de très peu (moins de 8) à des grandeurs bien plus considérables (plusieurs centaines de pattes pour un microprocesseur). Le nombre de composants électroniques présents sur la puces, en général dénombrés en transistors, varie de quelques dizaines ou

quelques centaines pour les composants les plus simples à plusieurs millions ou dizaines de millions pour les microprocesseurs ou les mémoires.

L'emballage représenté ci-dessous est l'emballage le plus traditionnel pour les circuits intégrés de complexité moyenne et largement diffusés. Il existe une variété immense d'emballages divers pour des applications et des besoins particuliers. Par exemple, les composants de puissance auront un radiateur pour faciliter le dégagement de la chaleur émise. Les composants pour le secteur automobile ont aussi des exigences de robustesse particulières. Les composants pour les montres, les calculatrices et dans une moindre mesure les appareils photos ont en général des conditionnements plus légers ou même spécifiques.



Vue de dessus et latérale d'un circuit intégré dont on aurait enlevé la moitié supérieure de l'emballage.

La fabrication des semi-conducteurs

Les matières premières

La matière première à laquelle on pense en premier est le matériau semi-conducteur de base (en général silicium ou arséniure de gallium). Le fabricant de composants en reçoit sous forme de tranches (plaquettes circulaires) monocristallines. Ces tranches ont des diamètres variables suivant les générations technologiques (actuellement 4", 5", 6" et 8").

Ces tranches de silicium sont fabriquées par croissance cristalline (méthode de Czochralski ou de la zone flottante). On obtient des lingots cylindriques qui sont sciés en tranches et polis sur une face. La face supérieure des tranches est orientée de façon précise par rapport aux axes principaux du cristal.

D'autres matières premières sont les différents réactifs (substances de dopage, produits de nettoyage, résines et réactifs divers, liquides ou gazeux). Ces produits

doivent être extrêmement purs, car des impuretés peuvent abîmer les circuits en cours de traitement.

Les outils de diffusion

La lithographie

La lithographie est une des étapes clefs de la diffusion, car c'est au cours de cette étape que l'on transfère les motifs qui composent le circuit sur la tranche de silicium par un procédé photographique.

Le principe est le suivant: on projette l'image d'un masque (qui joue le rôle d'un négatif) sur la tranche, après avoir recouvert cette tranche d'une résine photosensible. Le développement consiste ensuite à traiter ces tranches avec des produits chimiques qui attaquent sélectivement la résine sur les zones exposées, et la transforment en un pochoir qui est l'image du motif projeté. On peut ainsi effectuer toute une variété de traitements sur la tranche à travers ce pochoir (dopage, attaque d'une couche d'aluminium, de SiO_2 , etc.). On voit qu'il est possible de réaliser ainsi des circuits dont la complexité est sans commune mesure avec le nombre d'opérations nécessaires à la fabrication (des millions de transistors, à comparer à quelques centaines d'opérations aujourd'hui). La complexité vient de la complexité du motif gravé sur les masques, qui contiennent toute l'information qui décrit les composants et le circuit à graver.

La résolution d'un procédé de lithographie (largeur de la tache image d'une source lumineuse ponctuelle et profondeur de champ) doit être sans cesse améliorée pour avoir des circuits plus complexes et plus denses. En effet, de méthodes de lithographie aux ultraviolets avec un rapport de grossissement de 1 (le masque qui contient le négatif était à l'origine plaqué contre la tranche de silicium) et à calage manuel, on est passé à des systèmes avec un rapport de grossissement de 1:5, appelés photorépétiteurs, qui projettent selon un schéma périodique la même image sur la tranche, après s'être calés automatiquement.

La gravure humide et sèche

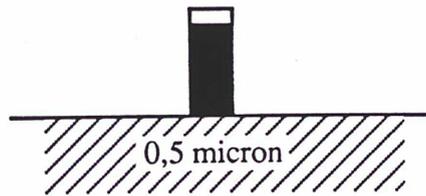
La gravure humide, qui est l'ancêtre des méthodes de gravure utilisées a atteint ses limites. Cette gravure humide est tout simplement une attaque par un produit corrosif au travers d'un masque, d'une couche située en dessous de ce masque (aluminium, dioxyde de silicium).

Le défaut de cette gravure humide est aujourd'hui de réaliser une attaque isotrope. Aux échelles auxquelles on travaille (0,5 microns), les contours ainsi obtenus ne sont plus assez droits pour assurer une solidité suffisante des pistes, alors qu'ils l'étaient auparavant.



Vue en coupe de pistes réalisées par attaque chimique pour deux générations technologiques

En revanche la gravure sèche, effectuée par un plasma, permet d'effectuer une attaque anisotrope de la couche, et d'obtenir des contours plus nets.



Vue en coupe d'une piste réalisée par gravure sèche.

Les fours (diffusion, réduction, oxydation).

Les fours servent donc à effectuer des diffusions de dopants de masse peu élevée, dont la vitesse de diffusion est suffisamment élevée à des températures de l'ordre de 1000°C. Pour les impuretés plus lourdes, on doit recourir à l'implantation ionique.

Les fours sont également utilisés pour réduire ou oxyder la surface de silicium. Dans ce cas, on chauffe les tranches dans un four en faisant passer le gaz adéquat.

L'implantation ionique

C'est une technique qui recourt à un accélérateur ionique pour insérer sur une épaisseur suffisante des impuretés dont le poids leur interdit de pénétrer suffisamment profondément dans le silicium par simple diffusion thermique.

La diffusion ou "front-end"

Les circuits rectangulaires sont tracés répétitivement sur une tranche circulaire de silicium. La surface près du bord est ainsi naturellement perdue. En général, les circuits qui sont trop près du bord, même s'ils ont gardé leur intégrité, sont en général perdus ou produits avec un mauvais rendement, car le traitement n'est pas d'une uniformité parfaite sur toute la surface des tranches.

Le nombre de puces par tranche varie grandement en fonction du diamètre des tranches et de la taille des puces. Il varie ainsi de plusieurs centaines pour des puces simples et standard à quelques unités pour les microprocesseurs.

L'objectif est de construire l'élément de circuit ci-dessous, constitué d'une diode et d'un transistor.

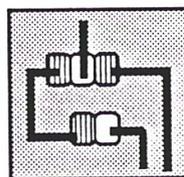
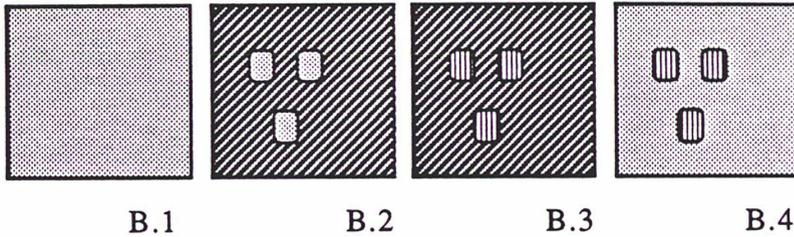
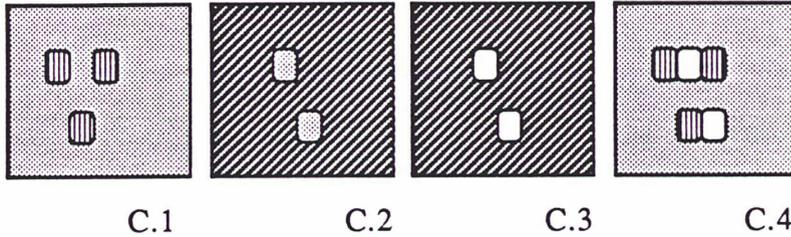


fig. A

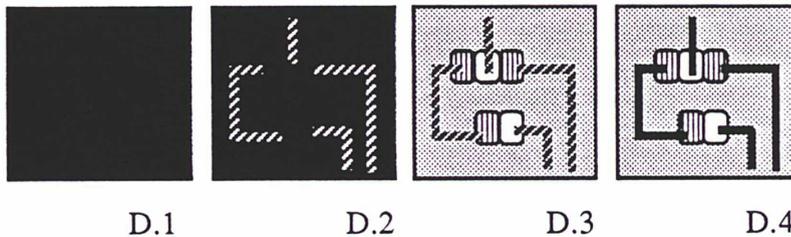
La première phase consiste à doper sélectivement le silicium en P. Pour cela, en partant de la tranche B.1, on la recouvre d'un masque (B.2). On dope la tranche à travers ce masque (B.3), et on détruit le masque (B.4)



La deuxième phase consiste à doper sélectivement la surface en N. On part pour cela de la tranche B.4 = C.1, sur laquelle on dépose un masque (C.2). On dope la tranche à travers ce masque (C.3), puis on élimine le masque (C.4).



La dernière phase consiste à tracer des pistes conductrices en aluminium pour relier les différents composants. On recouvre la tranche C.4 d'aluminium (par exemple par évaporation): D.1. On dépose le masque délimitant les pistes (D.2). On attaque l'aluminium à travers ce masque (D.3), puis on élimine le masque (D.4).



En réalité, les circuits ne sont pas traités un par un comme sur ce schéma explicatif, mais sont gravés en batterie sur des tranches de silicium de dimensions standard.

L'impression des motifs est répétitive, et est effectuée par des projecteurs appelés *steppers*, dont le nom est évocateur.

Les tests

Des premiers tests électriques sont effectués pour éliminer les puces défectueuses. Celles-ci sont marquées par une tache d'encre au cours du test et ne seront donc pas conditionnées. Concrètement, ces tests sont effectués ainsi: un jeu de fines épingles fixées sur un cadre est plaqué sur chaque puce (sur les contacts électriques d'entrées et de sorties), et la réponse à divers signaux est mesurée et comparée à la réponse normale.

L'emballage ou back-end

Les circuits qui ont passé le crible du premier test sont découpés et moulés dans des boîtiers en plastique ou en céramique, après avoir été reliés par des fils d'or aux contacts extérieurs de ces boîtiers. Une fois emballés ces circuits subissent des tests plus poussés pour détecter les défaillances qui ne l'avaient pas été au premier test ou les défaillances apparues à l'emballage.

Lexique

Le but de cette section présentée comme un glossaire est de définir des termes techniques ou appartenant au jargon du secteur, et de donner le sens de termes anglais ou français fréquemment utilisés par les gens de la micro-électronique.

ASIC

acronyme anglais (Application Specific Integrated Circuit). Circuit conçu pour un utilisateur et un usage particulier (comme par exemple un circuit gérant les fonctionnalités de confort d'un poste téléphonique). La frontière avec les ASSP ou même les composants standards est parfois ténue. Dans quelle mesure les premiers processeurs conçus pour les PC d'IBM par Intel n'étaient-ils pas des ASIC ? En pratique, l'ASIC fait surtout référence à une démarche de définition de besoin et de conception du produit ou le client final est très impliqué, puisqu'il définit le besoin et effectue le développement ou en paie les frais.

ASSP

acronyme anglais (Application Specific Standard Product). Circuit conçu pour un usage assez particulier et une catégorie de clients spécifique. Le principe de la conception est à mi-chemin entre le **circuit standard** et l'ASIC, comme l'acronyme le laisse entendre. Typiquement, le composantier consulte un ou plusieurs clients sur leurs besoins spécifiques et prend sur lui de concevoir un circuit intégré susceptible de les intéresser. Il existe en fait toutes sortes de pratiques intermédiaires entre ASIC et ASSP où des clients peuvent participer aux frais de développement contre des priorités de fourniture ou une exclusivité temporaire. Dans la catégorie des ASSP, on peut par exemple ranger certains composants conçus pour les télécommunications (convertisseurs, multiplexeurs).

back-end

phase de conditionnement des composants dans des emballages divers. Cette étape est en général effectuée par les composantiers dans des pays à bas salaires (Asie du sud-est).

classe d'une salle blanche

indice de propreté de l'atmosphère d'une salle blanche. Indique le nombre de particules par pied cube d'air. Actuellement les salles blanches ont des classes de 10 à 100. Les salles affectées aux technologies les plus en point ont une classe 1.

composants standards

Composants conçus exclusivement par un composantier et avec peu d'intervention des clients autrement que par les mécanismes de marché. La plupart du temps, des composants totalement compatibles sont conçus séparément par différents composantiers. Les normes de fonctionnement s'imposent même parfois à la plupart des concepteurs,

parce qu'ils subissent un standard de fait imposé par un concurrent leader ou par les habitudes des clients et la compatibilité entre générations de circuits.

Dataquest

entreprise spécialisée dans la collecte d'informations et la publication d'informations agrégées sur le domaine de l'électronique, des semiconducteurs, des équipements de fabrication de circuits intégrés.

diffusion

phase de la production des circuits intégrés qui consiste essentiellement à graver ces circuits en batteries sur des substrats de silicium (tranches circulaires). Plus précisément, la diffusion comprend toutes les étapes depuis les traitements préliminaires des tranches vierges jusqu'aux tests sur les circuits en batteries.

On distingue cette phase de celle de conditionnement (back-end en anglais), qui elle comprend le découpage des tranches, l'encapsulation dans des boîtiers et les tests électriques finaux.

Cette distinction a été introduite parce qu'il est très fréquent de ne pas effectuer ces deux phases dans la même usine, voire de sous-traiter la phase de conditionnement auprès d'entreprises du Sud-Est asiatique.

discrets (composants)

les premiers composants électroniques, où chaque composant a une fonction électrique simple (résistance, diode, transistor, condensateur, bobine, etc.). On parle plus généralement d'une approche discrète de la conception d'un circuit qui consiste à assembler des composants discrets, ainsi que des composants standards simples (portes logiques, unités de mémoires, etc.)

DRAM

acronyme pour Dynamic Random Access Memory (mémoire vive dynamique). Cette mémoire peut être écrite et lue avec des tensions normales et des cycles rapides (ce qu'on appelle une mémoire vive). C'est la mémoire vive de conception la plus élémentaire, et qui peut être fabriquée avec le plus haut degré d'intégration. Elle est donc utilisée pour les mémoires principales des ordinateurs, et est de ce fait produite en plus grande quantité.

Contrairement à une SRAM, elle doit être rafraîchie: en effet, l'information mémoire est stockée dans un condensateur qui a un léger courant de fuite. Aussi, environ toutes les millisecondes, l'information doit être lue et réécrite.

La taille d'une mémoire est toujours indiquée en bits (BINARY digiTS). Ainsi une mémoire de 16K contient environ 16000 bits, soit 2 kilooctets. Les générations actuelles (mi-95) sont les mémoires 4 Mbits en sursis, les 16 Mbits en difficile montée en puissance. Les investissements pour les 64 Mbits sont en cours.

Les fabricants les plus importants de DRAM sont Coréens et Japonais.

EEPROM

acronyme pour *Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory* (mémoire morte programmable et effaçable électriquement). C'est une alternative à l'EPROM. La seule différence réside dans le cycle d'effacement de la mémoire qui se fait électriquement.

EPROM

acronyme pour *Erasable Programmable Read-Only Memory* (mémoire morte programmable et effaçable). C'est une PROM non plus basée sur des rangées de fusibles mais sur des systèmes de transferts de charge par effet tunnel. L'EPROM se programme comme une PROM. Le boîtier est muni d'une fenêtre en quartz qui permet d'insoler le circuit aux ultraviolets et d'effacer tout le contenu de la mémoire en bloc.

fondeur

désigne celui dont le métier est d'effectuer la **diffusion**, phase de production des circuits intégrés qui comprend le traitement sur tranches de silicium. Ce terme est employé en général par opposition au métier de concepteur de circuits.

front-end

terme anglais pour **diffusion**

pervasion

néologisme anglais qui est un mot-valise construit à partir de *pervasive* et *invasion*. Il décrit le phénomène par lequel la micro-électronique se substitue dans un secteur donné à d'autres solutions techniques (électromécanique, composants électronique discrets), et provoque des gains de productivité et une relance du secteur par la baisse des coûts de production induite.

PROM

acronyme pour Programmable Read-Only Memory. Mémoire destinée à être utilisée comme une ROM, mais dont la programmation ne se fait pas à la fabrication mais après, avec un programmeur électrique. L'écriture consiste à faire brûler des fusibles avec des cycles d'écriture assez lents et des tensions élevées. Cette écriture est irréversible. L'avantage de cette approche par rapport à une ROM est qu'elle peut être appliquée pour de très petites séries.

ROM

acronyme pour Read-Only Memory (en français mémoire morte). Ce sont des composants qui contiennent des informations susceptibles d'être uniquement lues, car l'information est gravée sur le circuit à sa fabrication et ne peut être modifiée. Sans doute un des premiers circuits à avoir été fabriqué sur demande pour des clients, un donc un ancêtre des ASIC.

secteur des télécommunications

en anglais: *communications*

Ce secteur regroupe tous les fabricants d'équipements de télécommunications, qu'il s'agisse d'équipements d'infrastructure (commutateurs, multiplexeurs, lignes de transmissions coaxiales, optiques ou hertziennes) ou de terminaux vendus au grand public (postes téléphoniques, télécopieurs, cartes modem).

secteur de l'électronique grand-public

en anglais: *consumer electronics*

Ce secteur regroupe tous les fabricants d'équipements audio, vidéo ou d'électroménager, et toute autre forme d'équipement destiné au grand public, à l'exception de l'informatique personnelle et des équipements destinés aux télécommunications.

Ceci comprend tous équipements de haute fidélité audio, les téléviseurs, récepteurs satellites, magnétoscopes ou équipements similaires, caméra vidéo, instruments de musique électroniques. Ceci comprend également les montres, jouets et jeux électroniques, appareils photo.

Parmi les équipements électroménagers, on comprend les systèmes d'air conditionné, équipement de cuisine, etc.

secteur de l'informatique

en anglais: *data processing*

Les fabricants d'équipements utilisés en informatique: unités centrales, cartes diverses, écrans, claviers, imprimantes, périphériques de saisie, etc.

secteur des transports ou automobile

en anglais: *transportation* ou *automotive*

On trouve les fabricants d'équipements électroniques installés dans des automobiles: des organes électroniques de confort (ordinateur de bord, climatisation, aide à la navigation), de sécurité (ABS, air-bag et systèmes analogues) ou d'assistance au fonctionnement du moteur (systèmes d'injection et d'allumage électroniques).

secteur de l'électronique industrielle

en anglais: *industrial*

C'est un secteur fourre-tout qui comprend principalement des équipements de sécurité et de gestion d'énergie, des équipements de production (robot de fabrications, équipements de chaînes, etc.), les équipements médicaux et tous les équipements non recensés par ailleurs.

secteur de l'aéronautique civile et militaire

Ce secteur regroupe tous les équipements électroniques militaires de pilotage ou de combat et les équipements civils de pilotage (systèmes de reconnaissance d'aide au pilotage, de guidage de missiles, les sonars et radars), et de contrôle-commande.

SIA

acronyme pour Semiconductor Industry Association. Association regroupant les entreprises américaines (et les filiales américaines des entreprises étrangères) de l'industrie des semi-conducteurs.

SRAM

acronyme pour *Static Random Access Memory* (mémoire vive statique). C'est une mémoire vive (cycles de lecture et d'écriture rapides) plus complexe et donc à moins fort taux d'intégration en bits par mm² que les **DRAM**. En revanche, les temps d'accès étant plus rapides, on les utilise pour faire des mémoires caches d'ordinateur (mémoires à capacité plus limitée, mais réservée aux accès fréquents).

tranche

désigne une plaquette circulaire de silicium sur laquelle sont gravés des circuits intégrés en batterie. Actuellement, on emploie pour les circuits les plus grands en taille des tranches de 8 pouces (20 centimètres environ).

wafér

mot anglais souvent utilisé pour **tranche**.

Liste des personnes rencontrées

Jacques AGNIEL	COMMISSION EUROPEENNE
Max ARTIGALAS	THOMSON MULTIMÉDIA
Martine AURAY	SGS-THOMSON
Eric BANTEGNIE	SERICS
Bernard BAYLAC	SGS-THOMSON
Guillermo BOMCHIL	CNET
Jacques BONNET	IBM
Jean-Claude BRETHOUS	IBM
Armand COCHET	IBM
Michel DANIEL	ALCATEL CIT
Jean-philippe DAUVIN	SGS-THOMSON
Claude DOCHE	LETI
Henri DUPONT	MATRA COMMUNICATIONS
Francis DURUFLÉ	MATRA COMMUNICATIONS
Serge DUSSART	PSA
Jacques ESNAULT	IBM
Daniel ETIEMBLE	Université Paris Sud
Roland GERBER	CNET
Jean-Luc GIRARD	SERICS
Pascal GONDRAND	SERICS
Laurent GOUZENES	SGS-THOMSON
Alain GREINER	UPMC
François HOTTIER	PHILIPS
Daniel HUBERT	IBM
Renato ISRAEL	SAT
Jean JERPHAGNON	ALCATEL
Bernard KERVELLA	SGS-THOMSON
Jean-Paul KLEIN	GRESSI

Paul KREMER	SERICS
Pascal LAGARDE	SERICS
Michel LANNO	ISEN
Daniel LEVEILLE-NIZEROLLES	PHILIPS SEMICONDUCTORS
Pierre-Camille MARZIN	FRANCE TELECOM
Gérard MATHERON	SGS-THOMSON
Bruno MOUREY	THOMSON
Jean-Jacques POMMEREAU	PSA
Dominique PONS	THOMSON CSF
Denis RANDET	LETI
M. ROUSILLE	LETI
Michèle ROUSSEAU	SERICS
Michel SOHIER	ALCATEL CIT
Jean-Pierre TUAL	BULL
In�s VAN LIERDE	COMMISSION EUROPEENNE
Jean-Claude VASUTH	SGS-THOMSON
Robert WILMS	COMMISSION EUROPEENNE