

AMBASSADE DE FRANCE AUX ETATS-UNIS

**MISSION POUR LA SCIENCE ET LA TECHNOLOGIE
CONSULAT GENERAL DE SAN-FRANCISCO**

L'EVOLUTION DU SECTEUR DES SEMICONDUCTEURS ET DE LA MICROELECTRONIQUE AUX ETATS UNIS

Novembre 2001

Rapport de

Jean-Philippe Schweitzer

Adjoint de l'Attaché pour la Science et la Technologie
Consulat Général de San Francisco

Stéphane Raud

Attaché pour la Science et la Technologie
Consulat Général de San Francisco¹

avec la contribution de :

Geneviève Du Sault

Poste d'Expansion Economique de San Francisco

¹ Mission pour la Science et la Technologie, Consulat Général de France, 530 Bush Street. San Francisco, CA, 94108.
Tél: 415.397.4440. Fax: 415.397.9947. email: stephane.raud@consulfrance-sanfrancisco.fr.

Ref. :	Date : Novembre 2001	Diffusion : Restreinte
---------------	-----------------------------	-------------------------------

SOMMAIRE :

1. ENVIRONNEMENT GÉNÉRAL :	4
2. MARCHÉS ET APPLICATIONS :	5
1. LA TECHNOLOGIE SILICIUM :	6
a) Les microprocesseurs :	6
b) Les Processeurs de Traitement du Signal Digital ou DSP:	6
c) Les mémoires :	7
2. TECHNOLOGIES BASÉES SUR LES MATÉRIAUX COMPOSÉS :	8
a) Télécommunications :	8
b) Croissance du marché des VCSELS.....	9
c) Systèmes de communication 10 Gb/s.....	9
d) Diode Electroluminescente à haute luminosité.....	11
e) Fonderies GaAs de plus en plus nombreuses	11
3. LES ÉQUIPEMENTIERS :	12
3. LES ENJEUX TECHNOLOGIQUES :	14
1. ROADMAP DES SEMICONDUCTEURS :	14
a) 300 mm.....	14
b) Lithographie.....	15
c) Packaging.....	15
d) Interconnexion Cu et diélectriques à faible k :.....	15
e) Métrologie.....	16
f) Horloges et MIPS :	16
g) Consommation :	17
2. EVOLUTION DES PROCÉDÉS DE FABRICATION :	17
3. LE DÉVELOPPEMENT DES LED À HAUTE LUMINOSITÉ :	17
4. CONVERGENCE DE L'OPTIQUE ET DE L'ELECTRONIQUE :	18
5. SOI : SILICON ON INSULATOR	18
6. LA MICROÉLECTRONIQUE DU FUTUR :	19
a) Electronique Moléculaire :	19
b) Utilisation des Nanotubes :	20
c) Spintronic :	20
d) Transistor à un Electron (SET) :	21
4. LES GRANDS PROGRAMMES DE RECHERCHES :	21
1. PROGRAMMES GOUVERNEMENTAUX PAR AGENCE	22
2. CONSORTIA INDUSTRIELS EN R&D	24
3. CONSORTIA INDUSTRIELS STATÉGIQUES	26
5. COMPÉTITIVITÉ	27

1. Environnement général :

En plus d'exercer une influence considérable sur l'ensemble du secteur des technologies de l'information des communications (TIC), l'activité des semiconducteurs et de la microélectronique contribue fortement au produit national brut (PNB) américain. Cette industrie a en effet connu une croissance trois fois plus rapide que l'économie américaine au cours des dix dernières années et est maintenant considérée comme l'une des industries manufacturières les plus importantes aux Etats-Unis. Par exemple, la Semiconductor Industry Association (SIA) estime que 284 000 Américains travaillent pour les fabricants de semiconducteurs avec un salaire annuel moyen de plus de 40 000 \$. Ce haut niveau de salaire s'explique par le fait que les entreprises du secteur réalisent aux Etats-Unis surtout des activités de R&D et de fabrication de composants à très haute valeur ajoutée, l'essentiel de la production étant délocalisé dans la zone Asie-Pacifique où 60% des semiconducteurs sont produits. Les principaux centres de production sont situés au Japon, à Singapour et à Taiwan. En 2000, les ventes de l'industrie des semiconducteurs se situaient aux alentours de 220 M\$ à l'échelle internationale², une augmentation de 37% par rapport à 1999. Les Etats-Unis constituent le marché le plus important de l'industrie avec 30% des ventes mondiales. La force du marché américain repose aussi sur le poids des entreprises locales productrices de semiconducteurs puisqu'elles s'arrogent près de la moitié des ventes mondiales (49%).

Comme l'indique le tableau 1, le secteur connaît une période de correction qui se reflète par une contraction du marché qui affecte particulièrement les Etats-Unis. Plusieurs analystes estiment que l'euphorie des deux dernières années devrait faire place à un marché plus raisonnable et donc plus sain.

Marché	janvier à mars 2000	janvier à mars 2001	% Change
Amérique	4,60	4,11	-10,6%
Europe	3,30	3,28	-0,7%
Japon	3,35	3,59	7,0%
Asie Pacifique	3,82	3,42	-10,4%
Total	15,07	14,40	-4,5%

Tableau 1 : évolution des ventes de semiconducteurs en milliards de dollars

(source : SIA - Molly Marr et Doug Andrey - communiqué de presse du 2 mai 2001)

En septembre 2001, les ventes mondiales de semiconducteurs étaient de 10.22 M\$, soit 44.6 % de moins que les 18.44 M\$ de l'an passé à la même époque. Cependant, la baisse de 2.5 % entre septembre et août 2001 est moins forte que celles enregistrées depuis le début de l'année³. (cf tableau 2).

Marché	Evolution de septembre 2000 à septembre 2001
Amérique	-58.6 %
Europe	- 41.7 %
Japon	- 42.7 %
Asie Pacifique	- 30.9 %
Total	- 44.6 %

Tableau 2 : évolution des ventes de semiconducteurs entre 09/2000 et 09/2001.

(source : SIA Novembre 2001)

Le tableau 3 montre la domination mondiale d'Intel dont le siège est basé au cœur de la Silicon Valley, qui obtient près du triple des revenus de son plus proche rival, Toshiba, en 2000 (29,7 M\$ contre. 11,2 M\$). Les deux autres sociétés américaines qui se sont fait une place sur ce classement, Texas Instruments et Motorola, occupent respectivement la 5ème et la 6ème position depuis deux ans. Il est à noter que Motorola est la seule entreprise du classement ayant enregistré une baisse de ses revenus de 1998 à 1999, ce qui concorde avec un mauvais positionnement sur différents marchés liés aux

² source : Dataquest

³ source : SIA November 2001.

télécommunications. Notons également que, pour la période de 1999 à 2000, le leader franco/italien STMicroelectronics a connu le taux de croissance le plus élevé (55%) suivi de près par l'entreprise japonaise Toshiba (47%). Enfin, certains auront peut-être remarqué l'absence d'AMD, concurrent direct de Intel, qui, en dépit d'un taux de croissance considérable en 2000, ne figure toujours pas parmi les premiers.

Rang 2000	Entreprise	Site Web	1999 revenus M \$	2000 revenus M \$	1999 Part de marché (%)	2000 Part de marché (%)	Taux de croissance 1999-2000
1	Intel	intel.com	25.8	29.7	15.35	13.37	15.12
2	toshiba	toshiba.com	7.6	11.2	4.52	5.04	47.37
3	NEC	nec.com	9.2	11.08	5.47	4.99	20.43
4	Samsung	samsung.com	7.1	10.08	4.22	4.86	52.11
5	Texas Instrument	ti.com	7.1	9.1	4.22	4.10	28.17
6	Motorola	motorola.com	6.4	8	3.81	3.60	25.00
7	STMicroelectronics	st.com	5.1	7.9	3.03	3.56	54.90
8	Hitachi	hitachi.com	5.5	7.2	3.27	3.24	30.91
9	Hyundai	hyundai.com	5.25	6.8	3.12	3.06	29.52
10	Infineon	infineon.com	5	6.7	2.97	3.02	34.00
11	Philips	philips.com	5.1	6.5	3.03	2.93	27.45
	autres		76.2	107.12	45.33	48.23	40.58
	Total		168.1	222.1	100.0	100.0	32.12

Tableau 3 : Les leaders mondiaux de l'industrie des semiconducteurs (en milliards de dollars)

(source : Cahners In-Stat)

Les entreprises sans unités de fabrication ou « fables » aux Etats-Unis :

De façon générale, l'industrie des semiconducteurs tend à s'éloigner de l'intégration verticale pour migrer vers une chaîne de valeur constituée de sociétés très spécialisées. Aux Etats-Unis, cette tendance est partiellement attribuable aux coûts prohibitifs de la construction des unités de fabrication de semiconducteurs. A titre d'exemple, la fab MOS2 de Motorola fut construite en 1974 pour 4 m\$ alors que son usine la plus récente lui a coûté plus de 1,7 M\$, soit 424 fois la somme payée en 1974. Cette évolution explique en partie la montée en flèche d'entreprises « fables » aux Etats-Unis, qui optent de sous-traiter la fabrication de leurs circuits pour se concentrer sur la conception et le design. Parmi celles-ci figurent des sociétés telles que MIPS qui, poussées par la complexité croissante des circuits et par la possibilité de réutiliser et de migrer la propriété intellectuelle, se spécialisent dans le design de cœurs de microprocesseurs embarqués. Ceux-ci sont vendus principalement à des fabricants de circuits intégrés (Texas Instruments, Infineon, Atmel, etc.) sous forme de licences et de royalties.

A l'heure actuelle, 75% des entreprises « fables » (entreprise sous traitant plus de 75 % de sa production) sont situées aux Etats-Unis, ce qui représente environ 450 sociétés américaines. Ces entreprises ont connu une augmentation de leur chiffre d'affaires de l'ordre de 68% en 2000 soit près du double du taux de croissance observé pour l'industrie des semiconducteurs en général.

2. Marchés et applications :

Le marché des semiconducteurs peut se diviser en deux catégories : les systèmes réalisés sur des supports (substrats) silicium ou sur des substrats composés (III-V ou II-VI par exemple). La maîtrise actuelle de la technologie Silicium permet de produire des circuits et des composants en grande quantité pour des coûts très compétitifs. Les substrats composés sont donc réservés aux applications à hautes performances et spécifiques que le Silicium ne peut atteindre. Depuis plusieurs années, les composés sont annoncés comme les remplaçants du Silicium pour de nombreuses applications, ce qui se concrétise peu en raison des progrès technologiques et des réductions de coûts de production continus de ce dernier.

1. La technologie Silicium :

a) Les microprocesseurs :

Intel a connu une année difficile en 2000, partiellement attribuable, selon Andy Reinhardt⁴, à son CEO Craig Barrett, qui, n'ayant pas anticipé l'explosion de la demande en 1999, n'a pas su adapter les capacités de production de son entreprise à cette croissance formidable. Ce manque de vision d'Intel a permis à son concurrent AMD (Advanced Micro Device) de gagner des parts de marché dans le secteur informatique et à d'autres entreprises de s'établir sur de nouveaux segments. Au premier trimestre 2001, AMD détenait 21% du marché des processeurs pour PC (contre 17% à la fin 2000), Intel conservant la part du lion avec 75%. Pour contrecarrer cette nouvelle concurrence et pour limiter sa dépendance face à l'industrie du PC, Craig Barrett diversifie son activité autour du concept de l'Extended PC pour faire ainsi d'Intel la « clé de voûte des futures maisons électroniques ». Si le géant de Santa Clara a investi plus de 8 M\$ en acquisitions, soit deux fois son budget R&D, dans le but de relancer ses capacités d'innovation et de se positionner sur des nouveaux segments de marché, de nombreux analystes s'interrogent sur la capacité de son CEO à répéter l'exploit de son prédécesseur Andy Grove qui avait converti l'activité centrale d'Intel des mémoires aux microprocesseurs.

L'année 2000 fut également témoin d'une défaite symbolique d'Intel sur le plan de l'innovation. En effet, AMD a supplanté Intel à deux occasions en 2000 : lors du lancement du processeur Athlon à 800Mhz en mars 2000, devançant ainsi son rival de quelques jours, et lors de la mise sur le marché du premier microprocesseur à 1Ghz avec un mois d'avance sur Intel. Ces deux victoires évènements ont permis à AMD de gagner la confiance de Compaq et Gateway, préalablement clients exclusifs d'Intel, et d'augmenter ainsi sa part de marché de 12% à 17% en 2000. Par ailleurs, la société Broadcom, spécialisée dans la fabrication de processeurs dédiés aux communications à haut débit, se positionne sur des nouveaux marchés en pleine croissance sur lesquels Intel n'a pas réussi à s'imposer.

Ainsi, si Intel demeure le leader incontesté du secteur des microprocesseurs, l'entreprise doit maintenant faire face à une concurrence aussi ambitieuse qu'innovante et ce, sur plusieurs fronts.

Il importe également de mentionner l'intérêt croissant des constructeurs informatiques et des fabricants de microprocesseurs pour les composants graphiques, afin de bénéficier de la popularité du multimédia et du traitement de l'image. Les entreprises Nvidia et ATI dominent ce secteur qui ne pourra que profiter de la croissance du marché des consoles de jeux. Nvidia est le seul fabricant de microprocesseurs à avoir affiché une progression des ventes de l'ordre de 62% par rapport à la même période en 2000 pour dépasser les 240 m\$ en revenus au premier trimestre 2001.

b) Les Processeurs de Traitement du Signal Digital ou DSP:

Les Digital Signal Processing (DSP) sont des processeurs optimisés pour le traitement d'informations ou de signaux analogiques, comme le son ou la vidéo, préalablement convertis en signaux digitaux. Chaque DSP remplit une tâche spécifique, telle que la reconnaissance vocale, le traitement d'image ou le graphisme, et implique en général l'utilisation d'algorithmes de technique de compression et de traitement du signal.

Selon Max Baron⁵, les DSP, grâce à l'amélioration de leur performance et à la réduction de leurs coûts de production, devraient trouver de plus en plus de débouchés dans les nouveaux appareils numériques comme les lecteurs MP3, les caméscopes numériques, les imprimantes couleurs, les lecteurs DVD ou les consoles de jeux vidéo. A moyen terme, le secteur des transports sera lui aussi porteur puisque les DSP s'incorporeront aussi bien dans les systèmes de communications internes de la voiture que dans les futurs moteurs électriques. Il est également à noter que les DSP sont de plus en plus incorporés sur des 'System-On Chip' (SOC) qui intègrent plusieurs fonctions sur un même substrat.

Le secteur des DSP connaîtra le taux de croissance le plus important de l'industrie des composants électroniques au cours des prochaines années et ce, en dépit du ralentissement observé en 2001. Selon la SIA⁶, les ventes de DSP devraient en effet atteindre les 6 M\$ en 2002 et ainsi retrouver le niveau des ventes record enregistré en 2000. L'année 2001 devrait être témoin du renforcement des alliances entre fabricants de DSP dans le but de mieux concurrencer le leader incontesté du secteur, Texas Instruments. A titre d'exemple, Lucent Technologies, numéro deux du secteur et leader de la téléphonie sans fil⁷, s'est allié avec Motorola et Micro Electronics pour le développement du DSP SC140 Core qui devrait permettre une amélioration considérable du traitement des informations pour les applications sans fil et Internet. Intel, pour sa part, s'est allié à Analog Devices pour la création d'une ligne de DSP qui sera développée sur la plate-forme « Intel Personal Client

⁴ Business Week, San Francisco

⁵ analyste en chef à Cahners In-Stat Group, www.instat.com

⁶ Source : communiqué de presse de la SIA, 06/06/2001

⁷ Source : électronique news "lucent broadcast 64 channel DSP" par Tom Murphy

Architecture ». Les produits résultant de ces initiatives menées par Intel et Lucent Technologies seront en compétition avec les produits de Texas Instruments basés sur la technologie Open Multimédia Application PlatForm⁸.

c) Les mémoires :

Si les analystes anticipaient un taux de croissance d'environ 23% pour ce secteur de l'électronique en février 2001, les prévisions sont devenues, depuis lors, plus prudentes suite aux résultats enregistrés par les entreprises du secteur pour le premier trimestre 2001. Les nouvelles prévisions de la SIA publiées début juin 2001 ont d'ailleurs révélé que le marché des DRAM (Dynamic Random Access Memory), considéré comme le segment phare du secteur des mémoires, a été l'un des segments les plus touchés par le récent ralentissement économique de cette année. Le SIA reste néanmoins optimiste à long terme et prévoit une croissance annuelle moyenne de plus de 30% jusqu'à l'horizon 2004.

Toujours selon la SIA, le marché des DRAM devrait atteindre les 27 milliards d'USD en 2002⁹ alors que le marché des mémoires flash devrait passer de 10 à 14 M\$ pour cette même période. Cette demande accrue est largement attribuable aux nombreux débouchés liés à ce type de composant : notamment les PC, les téléphones portables, les assistants personnels (PDA) et le secteur des transports qui intègrent de plus en plus les mémoires à leurs véhicules. En 2001, le marché des PC sera encore le principal consommateur de DRAM avec 75% des ventes totales. En revanche, les analystes anticipent que seulement 55% des DRAM seront destinées aux PC en 2004, alors que les systèmes liés à l'infrastructure pour Internet seront à l'origine de 27% des ventes. Le reste des ventes de DRAM concernera les consoles de jeux (9%) et les PDA et autres appareils mobiles (7%).

En ce qui concerne les SRAM (Static Random Access Memory), l'année 2000 aura été une heureuse surprise¹⁰ avec des ventes de plus de 6 M\$, en hausse de 40% par rapport à l'année précédente. Cette hausse des ventes s'explique par la conjonction de deux phénomènes :

- En 1999, beaucoup de fabricants se sont convertis à la fabrication de DRAM, anticipant la baisse des commandes de SRAM par les fabricants de PC qui intègrent de plus en plus des CPU avec des mémoires cache intégrées.
- La hausse non-anticipée de plus de 51% des ventes de téléphones cellulaires en 2000.

Ces deux événements ont engendré une raréfaction de l'offre qui a suscité une hausse des prix. En 2001, les ventes de téléphones cellulaires devraient maintenir la forte demande pour les SRAM, un segment, comme le souligne Brian Matas (vice président des analyses de marchés à IC Insights), compté pour mort il y a deux ans mais qui semble aujourd'hui promis à quelques belles années.

L'année 2000 aura été particulièrement mouvementée pour la société Rambus, une des start-up les plus innovantes dans le domaine des mémoires. Les RDRAM (Rambus DRAM), lancées au début 2000, devaient être les seules mémoires pouvant être couplées au Pentium 4 d'Intel. Cependant, des tests ont démontré qu'en comparaison aux mémoires classiques, les RDRAM n'amélioraient pas significativement la performance du Pentium 4. Le prix moyen d'une RDRAM étant le double des mémoires classiques, Intel a décidé de développer un Pentium 4 supportant à la fois RDRAM et DRAM. Par ailleurs, Rambus a débuté un procès pour violation de propriété intellectuelle à l'encontre de plusieurs fabricants de mémoires dont Infineon, Toshiba et Hitachi. Le procès, qui devrait durer jusqu'en 2002, a déjà des répercussions sur l'industrie puisque Micron, Infineon et Hynix¹¹ refusent de payer toute redevance à Rambus, leur permettant ainsi d'offrir des prix plus compétitifs que ceux des entreprises qui continuent d'accepter les conditions de Rambus.

Sur le plan de l'innovation, Infineon et IBM¹² se sont illustrés en annonçant leur alliance pour le développement d'une MRAM¹³ (Magnetic RAM), capable de remplacer à la fois les DRAM et les mémoires Flash. En effet, les MRAM pourront stocker la même quantité d'information que les mémoires actuelles avec un accès plus rapide et une consommation d'énergie moindre. De plus, les MRAM conservent les informations même en l'absence d'alimentation électrique. Les premiers produits de ce type devraient être commercialisés d'ici 2004. La société Motorola travaille aussi au développement d'une MRAM qu'elle vise à lancer courant 2004, ce qui laisse présager une concurrence serrée avec l'alliance IBM-Infineon.

⁸ Source : Silicon Strategies "Intel Analog Devices to Detail DSP" par Darrel Dunn le 27/11/00

⁹ Source : Electronic News "DRAM Market 2001" par Sherry L. Garber le 8/01/01

¹⁰ Source : Electronic News "SRAM Market trends 2001" par Brian Matas le 8/01/01

¹¹ Anciennement Hyundai Electronics Industries

¹² technologie : http://www.research.ibm.com/resources/news/20001207/_mramimages.html

¹³ Source : Electronics Times, Joanne Aslett, le 11/12/2000

2. Technologies basées sur les matériaux composés :

a) Télécommunications :

Le marché des télécommunications subit un ralentissement de son activité depuis plusieurs mois. Du côté des réseaux câblés ou optiques terrestres, de nombreux fournisseurs doivent aujourd'hui faire face à d'importantes dettes difficiles à honorer alors que plusieurs faillites ont eu lieu parmi les petits acteurs. Du côté "sans fil", les principaux acteurs, tels que Nokia et Motorola, indiquent un ralentissement de la croissance. L'industrie des composants GaAs (Gallium-Arsenic) est donc directement concernée par cette baisse d'activité, que ce soit pour les communications sans fil avec la fabrication d'émetteurs/récepteurs et de circuits intégrés rapides à base de Ga-As, ou pour le marché des réseaux terrestres à base de fibres optiques utilisant de nombreux circuits intégrés Ga-As comme nous allons le voir.

Réseaux sans fil :

Le début de l'année 2001 est marquée par une perte de vitesse par rapport aux résultats exceptionnels de 2000 (taux de croissance $>40\%$)¹⁴, mais le résultat global est néanmoins prévu à 3.8 M\$¹⁵ pour les ventes de circuits intégrés Ga-As, traduisant une croissance de 25-30 %. Les principaux fabricants de téléphone portable, comme Nokia et Motorola, ont vendu entre 405 et 410 millions d'unités en 2000, et prévoient des ventes pour 2001 comprises entre 505 et 575 millions d'unités. (cf figure 1).

Réseaux câblés :

Le marché des circuits intégrés analogiques pour fibre optique devrait passer de 350 m\$ en 1999 à 1.6 M\$ en 2004¹⁶, avec une domination des technologies GaAs pour la réalisation de commandes de laser, des amplificateurs transimpédance (TIAs), et des multiplexeurs/démultiplexeurs de signaux. Cette croissance est portée par la demande en perpétuelle augmentation de large bande passante pour le transfert de données, se concentrant aujourd'hui sur les technologies à 10 Gbit/s. Ainsi, le marché des circuits intégrés analogiques pour les fibres optiques procure à l'industrie GaAs un potentiel de croissance. Cependant, afin de rester compétitifs, les fabricants de GaAs vont devoir réduire de manière significative leurs prix de ventes pour faire face à la concurrence des circuits intégrés SiGe qui empiètent de plus en plus sur les domaines traditionnels du GaAs.

Pour les composants optiques, les revenus globaux présentés sur la figure 2 peuvent se diviser en trois catégories : les sources laser, les pompes lasers et les récepteurs (photodétecteurs + TIAs), représentant respectivement 55 %, 25 % et 20 %.

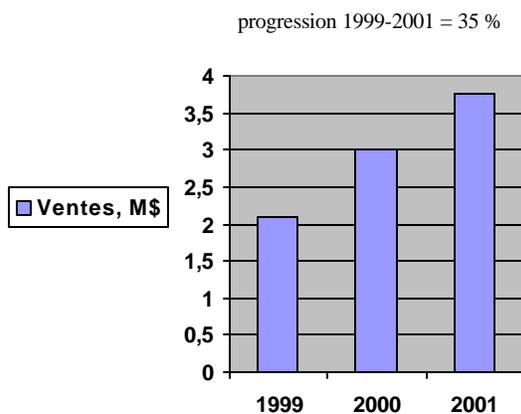


Figure 1 : Ventes mondiales de circuits GaAs

source : Strategies Unlimited

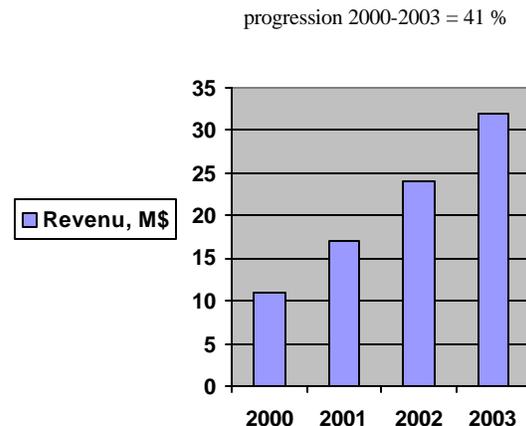


Figure 2 : Marché mondial des composants optiques.

source : RHK, inc.

¹⁴ Compound Semiconductor 7(1) Feb 2000

¹⁵ Strategies Unlimited

b) Croissance du marché des VCSELS

Le VCSEL (Vertical Cavity Surface-Emitting Laser) est un laser pouvant émettre un faisceau de lumière cohérente par sa surface grâce à une cavité résonnante et amplificatrice verticale. Du fait de cette émission verticale, les VCSELS apportent notamment une nouvelle flexibilité pour la réalisation de connexions optiques en facilitant leur agencement sur un même support dans la conception d'un réseau de sources lasers.

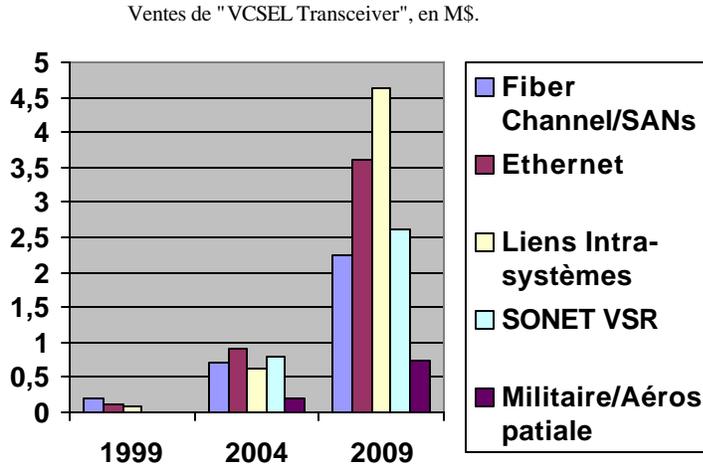


Figure 4 : prévision de marché pour les émetteurs/récepteurs VCSELS.

source : Compound Semiconductor.

Le marché des émetteurs/récepteurs à base de VCSELS a atteint 262 m\$ en 1999¹⁷, soit plus de trois fois la consommation de 1998. Alimentée par le succès de l'Ethernet Gigabit et du Fibre Channel, mais aussi de l'émergence de nouvelles applications, telles que le 10 Gigabit Ethernet, cette croissance va continuer pour atteindre \$ 3.4 Milliards en 2004 et \$ 14.1 Milliards en 2009, (figure 4). Les moteurs de cette croissance sont :

- l'avancée rapide des standards de transferts de données avec une croissance importante du Gigabit Ethernet et du 10 Gigabit Ethernet, dont les enjeux sont détaillés dans le paragraphe suivant, ainsi que la continuation de la croissance agressive des réseaux optiques, migrant vers le 2Gb/s puis vers le 10 Gb/s.
- la pénétration du marché des télécommunications avec l'apparition de solutions à faible coût pour les échanges à courte portée SONET VSR (Very Short Range) 10 Gb/s également détaillé dans le paragraphe suivant. Electronic Cast prévoit que le SONET VSR comptera pour 26 % du marché des VCSELS d'ici 2004, représentant 884 m\$. En comparaison, l'Ethernet a une croissance prévue de 86.5 m\$ en 1999 à 952 m\$ en 2004.
- le développement de nouvelles demandes telles que les interconnexions optiques en série et en réseau pour les "switchs" ou des communications intra-systèmes. Elles sont amenées par exemple à remplacer le bus PCI pour faire face aux exigences imposées par des unités centrales de calcul et les réseaux plus rapides.

Cette croissance des ventes de transcepteurs VCSELS a gonflé les capacités de développement et de production des vendeurs traditionnels de source laser et a ouvert la porte à de nouveaux acteurs. Les marges sont déjà faibles et la baisse des prix devrait continuer. L'apparition de nouveaux marchés, les besoins en lasers plus rapides et en connexions à large bande passante nécessitent de nouvelles innovations, ce qui devrait favoriser une diversification du marché et surtout une augmentation des marges.

c) Systèmes de communication 10 Gb/s

Les connexions optiques à 10Gb/s sont aujourd'hui bien maîtrisées et utilisées pour les communications longues distances et les opérateurs s'intéressent désormais à la prochaine génération de systèmes à 40Gb/s. D'après une étude d'ElectroniCast, le marché des transmetteurs pour les télécommunications à 10 Gbit/s devrait cependant continuer à croître et passer de 157 m \$ en 2001 à 9 M\$ en 2010¹⁸. Après un démarrage à 100 000 unités produites en 2001, la croissance du marché des connexions 10 Gbit/s nécessitera 2 millions de transmetteurs en 2003 pour atteindre 7 millions d'unités en 2005. Cette

¹⁶ Compound Semiconductor June 2001

¹⁷ Compound Semiconductor 7(1)Feb 2001

¹⁸ Compound Semiconductor July 2001

croissance du marché serait accompagnée d'une baisse importante du coût du module unitaire. Ce marché peut être divisé en 5 applications : le VSR (Very Short Reach) OC-192, les interconnexions propriétaires 10 Gbit/s, les canaux de fibres optiques, Infiniband, et le 10 Gigabit Ethernet.

Composants microélectroniques pour les VSR optiques :

Les interfaces optiques actuelles pour les standards 10 Gb/s (OC-192) SONET et SDH sont conçues pour des transmissions sur des distances de 2 km ou plus, rendant le coût des composants extrêmement élevé pour des communications à très courte portée comme les applications intra-bureau. C'est d'ici qu'est née la volonté de développer des interfaces VSR spécifiques avec des transmetteurs utilisant des VCSELs afin de limiter considérablement les coûts de connexion. De nombreux fabricants de composants optoélectroniques tels que Agilent, Emcore, Honeywell, Infineon, Gore et Mitel, développent en parallèle ces assemblages de VCSELs pour les connexions VSR, alors que Vitesse et Connexant annoncent des circuits intégrés spécifiques pour ces applications.

Interface PMD (Physical Media Dependent)	Technologie Laser	Type de Fibre	Distance minimum	Applications principales
850 nm serial	1*10 Gb/s VCSEL	Multi-mode	65 m	Connexion de switch, routeurs dans les salles d'équipements des bureaux centraux de "point of presence" (POPs)
1310 nm large WDM	4*2.5 Gb/s lasers DBF non refroidis ou VCSELs	Installée Multi mode	300 m	Circuits principaux de LAN, entre bâtiments, dans les campus Liens des réseaux 10GbE vers les réseaux SONET/SDH WAN
		Mode simple	10 km	circuits principaux de LAN/MAN connectant géographiquement des bâtiments, commande à distance de serveurs.
1310 nm serial	DBF lasers ou VCSELs	Mode simple	10 km	" "
1550 nm serial	lasers DBF refroidis	Mode simple	40 km	circuits principaux MAN/WAN

Tableau 4 : Quatres interfaces PMD (Physical Media Dependent), technologies de transmetteurs optiques, ont été conçues pour supporter le 10GbE. La sous couche PMD est la partie physique qui gère l'émission et la réception des signaux optiques. Les différentes interfaces PMD supportent une grande variété d'applications, tels que les réseaux locaux (LANs), les réseaux métropolitains (MANs) et les réseaux large portée (WANs).

source : compound semiconductor

Les composants microélectroniques pour les réseaux Ethernet :

Les différentes formes de l'Ethernet (Ethernet 10 Mb/s, Fast Ethernet 100 Mb/s, et Gigabit Ethernet 1Gb/s) ont été largement adoptées pour les réseaux locaux (LANs), et l'industrie développe maintenant un nouveau standard 10 Gb/s. Le 10 GbE (10 Gigabit Ethernet) est également compatible avec les transmissions longue distance (> 40 km) qui peuvent être utilisées pour construire les réseaux métropolitains (MANs). Le nouveau standard inclut aussi une option permettant au 10 GbE d'emprunter les infrastructures OC-192 SONET existantes. Le standard 10 Gigabit Ethernet développé par les industriels devrait être adopté début 2002 par le groupe de travail IEEE 802.3ae.

Picolight, producteur de transmetteurs à base de VCSELS juge que le marché devrait atteindre 100 K unités durant 2002¹⁹. La figure 5 indique aussi que le nombre de ports Gigabit Ethernet devrait poursuivre une croissance jusqu'en 2004, le nombre étant très supérieur à celui des ports 10 Gigabits Ethernet.

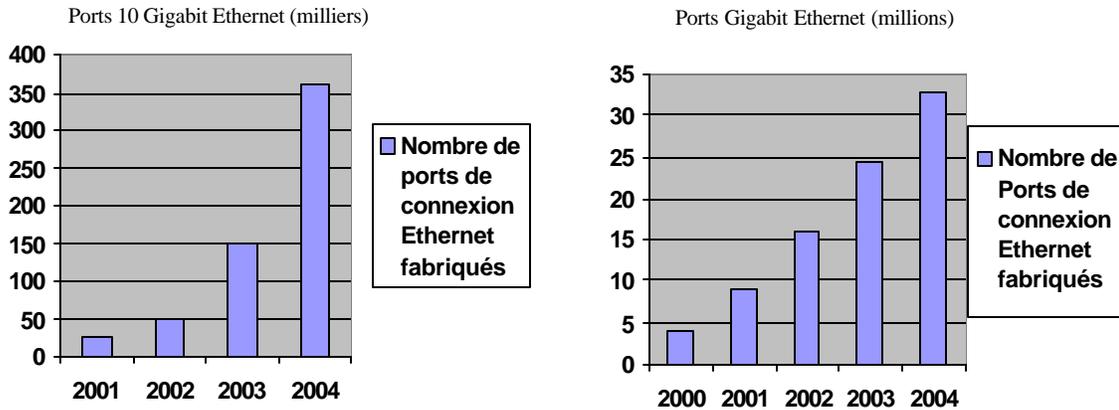


Figure 5 : prévision de marché pour le Gigabit Ethernet et le 10 Gigabit Ethernet. Au moins 90 % du Gigabit Ethernet est pour les applications courte portée, utilisant des transmetteurs à base de VCSELS 850 nm. D'autres sources suggèrent que 50 % ou plus des ports 10 GbE contiendront des transmetteurs VCSELS 850 nm en série.

source : Dell'Oro Group

d) Diode Electroluminescente à haute luminosité

Avec une croissance exceptionnelle dépassant les 58 % annuels pendant les 5 dernières années, le marché de LEDs à fortes luminosités a atteint 1.2 M\$ en 2000, soit 42 % du marché global des LEDs. Cette croissance robuste est amenée à se poursuivre pendant les 5 années à venir, jusque 3.4 M\$ en 2005²⁰. Le marché se développe dans de nombreux secteurs, comme le rétroéclairage des petits affichages LCD (type téléphone portable), les feux de signalisation (grâce à une consommation énergétique 80 % inférieure à celle d'une lampe à filament), l'automobile avec l'éclairage intérieur (50 % des véhicules fabriqués en Europe utilisent les LEDs pour l'instrumentation) ou encore l'éclairage extérieur (comme la nouvelle Cadillac DeVille dont les feux stop et clignotants sont des LEDs). Dans le futur, un nouveau marché pourrait émerger et connaître une croissance fulgurante : celui de l'éclairage général, en remplacement de l'ampoule à incandescence.

En effet, d'ici 2025, on estime que l'éclairage par émission lumineuse de la matière à l'état solide (SSL : Solid State Lighting) pourrait diminuer de 50 % la quantité d'électricité utilisée pour l'éclairage général, et réduire la consommation globale d'électricité de 10 %. Ceci représente une économie de 100 M\$ par an aux Etats Unis. Ces calculs supposent une pénétration de 50 % du marché par les SSL, puis des sources de lumières capables de fonctionner à 200 lm/W. Ce niveau de performance ne pourra être atteint que suite à des progrès conséquents pour les technologies AlInGaP et InGaN, et à leur utilisation pour la fabrication de sources de lumière blanche.

Les fabricants de LEDs devront aussi répondre aux critères spécifiques imposés par l'industrie de l'éclairage, comme une distribution de lumière uniforme, la maîtrise des densités de flux émis, le rendement des couleurs, l'efficacité, la durée de vie et les coûts.

e) Fonderies GaAs de plus en plus nombreuses

Les fonderies ne sont pas nouvelles pour l'industrie du GaAs mais leur visage change. Si certaines de ces usines de fabrications disposent aussi de leur propre bureau de design, de nombreuses entreprises émergentes se spécialisent dans la

¹⁹ Compound Semiconductor 7(1) Feb 2001

²⁰ Strategies Unlimited

fabrication, sans bureau d'étude. La première fonderie GaAs, Global Communication Semiconductor (GCS), fut construite en Californie, suivie de Network Device Inc. (NDI) achetée par Alpha. Depuis, le modèle de la fonderie fut adopté avec grand succès par l'industrie du semiconducteur, et sans surprise principalement à Taiwan, par les géants tels que Taiwan Semiconductor Manufacturing Company (TSMC) et UMC.

Les clients des fonderies peuvent se diviser en deux catégories : les entreprises de design qui ne possèdent pas d'unité de fabrication (encore appelées "fabless"), et les producteurs de GaAs (aussi appelés "IDMs", pour Integrated Device Manufacturers) qui ont besoin de diversifier leur production pour de multiples raisons.

La liste des "fabless" GaAs ne cesse de s'allonger avec par exemple Stanford Microdevices, la plus grande entreprise "fabless" vendeuse de composants RF pour télécommunications, ou Endwave, qui se concentre sur les systèmes de communications sans fil, et Multilink, pour les circuits imprimés de fibre optique. D'après Owen Wu²¹, président de GCS, environ 40 % de ses commandes proviennent d'entreprise "fabless", et le reste des IDMs. L'utilisation des fonderies telles que la sienne par ces deux groupes devrait s'accroître, mais cette proportion rester la même. Trois raisons principales poussent les IDMs à sous-traiter leur production dans les fonderies. Tout d'abord, la volonté des fabricants de GaAs d'offrir à leurs clients une deuxième source pour leurs produits. Deuxièmement, certains fabricants n'ont pas de capacité de production suffisante pour faire face à la demande. Finalement, les fonderies leur permettent d'accéder à une technologie de production récente ou alternative dont les IDMs ne disposent pas nécessairement.

Il existe bien évidemment de nombreux arguments pour ou contre l'utilisation des fonderies. Pour les entreprises "fabless", l'avantage indéniable est d'éviter la construction d'une usine de fabrication. Cela signifie des investissements et des risques technologiques plus faibles et une flexibilité accrue. La construction d'une usine peut signifier l'implication d'une équipe de spécialistes technologiques au moins pendant deux ans. Les inconvénients du "fabless" concernent la réactivité plus lente due à la difficulté de s'assurer un traitement prioritaire pour répondre à une demande spécifique d'un client.

Quoi qu'il en soit, la demande pour les services de fonderies ne cesse de croître, et les fonderies comme les "fabless" vont à l'avenir jouer un rôle de plus en plus important dans l'industrie du GaAs.

3. Les équipementiers :

La fabrication des microprocesseurs ou autres composants électroniques nécessite le développement d'équipements de production et de contrôle de plus en plus sophistiqués, performants et coûteux. Les principaux changements en cours concernent la réduction de la largeur de trait et l'augmentation de la taille des wafer à 300 mm.

Marché des équipementiers	1999 millions de \$	2000 millions de \$	00/99 croissance	% du marché mondiale en 2000
Europe	3235	6622	99 %	14 %
Japon	5522	9221	66 %	19 %
Amérique du Nord	7452	13154	73 %	27 %
Corée	1978	3962	95 %	8 %
Taiwan	4524	9424	106 %	19 %
Reste du monde	2786	6002	113 %	12 %
Total	25497	48385	87 %	100 %

source : Semi-Mai 2001

Tableau 5 : marché mondiale des équipementiers.

En 2000, le marché mondial des équipements de fabrication de semiconducteurs s'élevait à 48,4 M\$, en hausse de plus de 76% par rapport à 1999. Malgré la volatilité du cours des actions des entreprises 'high tech' et la contraction de la croissance américaine, la demande en composants devrait rester forte à long terme et maintenir la demande pour des équipements toujours plus performants. D'une façon générale, le marché américain représente 27% du marché mondial des équipements. Cette part relativement importante cache malgré tout des disparités considérables selon les segments de marché.

²¹ source : Compound Semiconductor 7(1) Feb 2001

Fabrication				Test			
Unité : milliers de \$	Ventes	Part du marché Mondial	Part du Marché Américain		Ventes	Part du marché Mondial	Part du Marché Américain
Masque et réticule	159 009	27 %	1 %	Test de logique	457 479	28 %	19 %
Assemblage et Emballage	338 291	9 %	3 %	Test de mémoire	378 593	25 %	16 %
Installations de production	557 237	34 %	5 %	Signal Mixte/Linéaire	772 503	23 %	32 %
Fabrications de tranche de Silicium	34 324	19 %	0,32 %	Autre ATE (Automated Test Equipments)	37 461	25 %	2 %
Total Ventes USA	10 724 789	27 %	100 %	Total Ventes USA	2 429 466	26 %	100 %
Total Ventes Monde	39 185 949			Total Ventes Monde	9 199 479		

Tableau 6 : ventes d'équipements de traitement et de contrôle aux Etats Unis (milliers de \$).

Le marché américain des équipements de « wafer manufacturing » représente environ 30% du marché mondial. Ce segment constitue la quasi-totalité (90%) des ventes d'équipements aux Etats-Unis. Cette tendance n'est pas spécifique au marché américain puisqu'elle se retrouve aussi bien en Europe, en Corée et, dans une moindre mesure, au Japon où les ventes pour ce type d'équipement ne représentent que 65% du marché japonais. Ce tableau révèle également que le marché américain constitue une part relativement faible du marché mondial de l'Assemblage et de l'Emballage (9%) et de celui de la fabrication des tranches de silicium (19%).

Essentiellement des intégrateurs, les fabricants d'équipements américains sont implantés pour la plupart dans trois régions des Etats-Unis :

- la Silicon Valley en Californie,
- la Route 128, qui parcourt la région de Boston jusque dans l'état du Maine,
- la région d'Austin au Texas

Société	Pays	Revenus en 2000 (m\$)	Site Web
Applied Materials	USA	9564	www.appliedmaterials.com
Tokyo Electron	Japon	6093	www.tel.co.jp
Nikon	Japon	3523	www.nikon.com
Teradyne	USA	3044	www.teradyne.com
ASM Lithography	Pays-Bas	2028	www.asml.com
Advantest	Japon	1806	www.advantest.co.jp
KLA-Tencor	USA	1498	www.kla-tencor.com
Lam Research	USA	1230	www.lamrc.com

source : Cahners In-Stat

Tableau 7 : les principaux fabricants d'équipements au monde.

Sur la scène mondiale, les entreprises américaines sont de par leur taille principalement en compétition avec les conglomérats japonais, quatre des huit principaux fabricants d'équipements au monde sont d'origine américaine.

L'augmentation des coûts de R&D et de l'amplitude des fluctuations du cycle économique du secteur des semi-conducteurs conduit inévitablement les fabricants d'équipements à se consolider, d'autant que la chute brutale des marchés boursiers qui a fortement touché les entreprises du secteur des hautes technologies permet l'achat d'entreprises pour parfois 80% de moins qu'en 2000.

Cependant, les demandes d'équipements dépendent de trois facteurs :

- L'innovation technologique : certains pensent que les fabricants de semi-conducteurs vont retarder l'adoption de nouvelles technologies le temps que la demande se redresse, d'autres estiment que les fabricants vont se lancer dans l'innovation pour stimuler la demande et faire baisser leurs coûts de production.
- Le commerce extérieur : les fabricants d'équipement américains d'envergure mondiale tels qu'Applied Materials ou KLA-Tencor ont une forte activité à l'export, ce qui a pour avantage de réduire l'impact des fluctuations économiques de certains pays sur les revenus de ces entreprises. Malheureusement, il semble que le ralentissement des ventes de semi-conducteurs cette année soit un phénomène d'envergure mondiale.
- La demande en semi-conducteurs : c'est évidemment le facteur le plus influent mais aussi le moins prévisible parce qu'il relève de plusieurs secteurs.

La secousse boursière du secteur des TIC a principalement fait des victimes au niveau des petits et moyens fabricants de semi-conducteurs. Il est donc à prévoir que ces entreprises fassent peu d'achats d'équipements au cours des deux prochaines années, le temps de consolider leurs comptes.

A la lecture des capacités d'investissements des principaux acteurs américains, on constate que ceux-ci réalisent des volumes d'achats bien supérieurs à la taille du marché intérieur américain. Cette situation s'explique surtout parce que les leaders américains du secteur sont des acteurs d'envergure mondiale dont les investissements s'étendent bien au-delà de leur pays d'origine. Ces entreprises ayant souvent une politique d'achat centralisée en ce qui concerne les contrats d'achat les plus importants, il est donc d'un intérêt stratégique de collaborer avec celles-ci sur sol américain afin de s'ouvrir des opportunités dans des pays tiers.

3. Les enjeux technologiques :

1. Roadmap des semi-conducteurs :

Sponsorisée par la SIA et publiée par Sematech, l'ITRS (International Technology Roadmap for Semiconductors) est un document passant en revue les technologies nécessaires dans le temps pour produire des microprocesseurs ou des mémoires toujours plus miniaturisés, plus rapides et moins chers. La dernière version de la Roadmap date de 1999 et certains points ont fait l'objet d'une mise à jour à la fin de l'année 2000. Historiquement le fruit d'une initiative purement américaine, la dernière version résulte d'une collaboration internationale regroupant l'Europe (EECA), la Corée (KSIA), le Japon (EIAJ), et Taiwan (TSIA). La Roadmap sert à la fois de référence pour les fabricants de semi-conducteurs et de guide pour les fournisseurs d'équipements, de matériels et de logiciels. Elle offre aussi des objectifs précis aux chercheurs pour les années à venir.

L'ITRS est étroitement liée à la loi de Moore qui prévoit le doublement tous les 18 mois du nombre de transistors par puces et du nombre d'instructions par seconde exécutées par un processeur (MIPS : Millions of Instructions per Second). Mais elle porte aussi sur la fonctionnalité (mémoire non volatile, puissance intelligente), l'énergie (batterie) et les coûts (coût par fonction, historiquement décroissant de 25 % par an). L'évolution d'une technologie est décrite par un cycle où chaque étape représente un progrès technologique significatif, typiquement une amélioration de 70 % par rapport au nœud précédent.

Nous allons dans la partie qui suit énumérer les principaux enjeux technologiques²² émergents de la Roadmap²³, puis nous tenterons d'établir un état des lieux de l'avancement des principaux acteurs aux Etats-Unis.

a) 300 mm

L'avènement des wafers de 300 millimètres a un impact considérable pour plusieurs fabricants de semi-conducteurs. Cette nouvelle taille offre la possibilité de produire deux fois plus de circuits imprimés sur une même galette, permettant ainsi d'augmenter la productivité de façon significative. Par conséquent, de nombreuses sociétés se munissent d'équipements destinés au traitement de wafers 300 mm ce qui nécessite néanmoins des investissements très onéreux. En effet, selon Applied Materials, la transition vers le '300 mm' est un des changements les plus coûteux de l'histoire de l'industrie.

Le ralentissement économique et la réduction des dépenses en équipement ne devraient pourtant pas affecter de façon significative les investissements consacrés à l'adoption du wafer 300 mm. Cette forte demande est stimulée par le fait que ce

²² SolidState Technology, January 2000. "2000 Roadmap Unveiled".

²³ ITRS 1999, 2000 update : <http://public.itrs.net/>

nouveau standard pourrait réduire les coûts de production de 30%, un avantage concurrentiel majeur sur le créneau des microprocesseurs d'entrée de gamme.

b) Lithographie

La lithographie est le poste le plus important de la production de semiconducteurs et peut représenter jusqu'à 20 % des investissements totaux d'une usine de fabrication²⁴. Ces coûts ont subi une progression plus importante que les autres : ils sont passés de 7.1 % du montant total des équipements en 1993 à 15.1 % en 1999²⁵. A titre d'exemple, une mémoire 1 mb nécessitait 10 expositions, alors que désormais une unité 64 mb requiert 23 masques et une technologie à 0.5 μm , et 27 masques pour une technologie à 0.25 μm pour le 256 mb. Les budgets de R&D mondiaux pour la lithographie ont atteint 538 m\$ en 1999, principalement pour les outils optiques 193 nm. Nikon est le leader incontestable depuis plus de dix ans du marché de la lithographie, suivi par ASML et SVGL qui se sont regroupés. Des financements importants sont d'autre part réservés au développement de la lithographie de prochaine génération (NGL : Next Generation Lithography) comme l'Extreme Ultra Violet (EUV), la lithographie rayon-X (XRL), la lithographie par faisceau d'électrons (EPL) ou ionique (IPL).

La Roadmap de 1999 prévoyait des résolutions de gravure de 130 nm pour les DRAM en 2002, se basant sur un cycle de trois ans. Encore une fois, l'industrie est allée plus vite que les prévisions, et ce stade est aujourd'hui atteint. L'apparition des NGL est de plus en plus repoussée par les progrès constants de la lithographie optique, bien moins onéreuse. De nombreux industriels estiment que la lithographie optique 157 nm pourra même atteindre une largeur de trait de 70 nm, à l'horizon 2008. C'est l'opinion des consortia Sematech, MIT's Lincoln Labs, Silicon Valley Group Inc. ASML annonce que 9 fabricants de puces, incluant Infineon Technologies AG, Motorola Inc., Philips Semiconductor, Taiwan Semiconductor Manufacturing Co. et STMicroelectronics, ont rejoint leur consortium pour produire des outils de lithographie optique 157 nm d'ici 2003. ASML espère pouvoir graver des motifs de 70 nm sur des 'wafers' de 300 mm utilisant cette technologie optique, qui comporte de nombreux avantages techniques sur les NGL, notamment l'exposition possible à pression atmosphérique.

Parmi toutes les NGL énumérées précédemment, l'EUV suscite le plus d'intérêts, avec un laser au xénon pulsé de longueur d'onde 13 nm pouvant graver des motifs de moins de 0.1 μm . Le consortium se concentrant sur l'EUV, EUV LLC, regroupe essentiellement des acteurs américains : Intel, AMD, Micron Technology, Motorola, SVGL et Virtual National Laboratory (i.e la combinaison des 3 laboratoires nationaux : Lawrence Livermore National Laboratory, Lawrence Berkeley Laboratory et Sandia National Laboratories), mais aussi Infineon et ASML. La technologie EPL est abordée de trois manières différentes et dans le cadre de différents consortia : SCALPEL mené par Lucent, ASML avec Applied Materials ; PREVAIL avec IBM et Nikon ; FED (Field Emission Display) avec Motorola. Chacun de ces projets est encore loin de la production, SCALPEL ne prévoit pas de système avant 2004-2005. Les investissements R&D pour chacune des approches pourraient atteindre 1 M\$ en 2002.

Information Network affirme que s'il est probable que l'EUV l'emportera sur les autres NGL, elle ne s'imposera pas sur la lithographie optique avant 2011 ou 2014 avec le passage des étapes technologiques 50 nm et 30 nm.

c) Packaging

La prévision des technologies d'assemblage et de packaging (AP) est un des sujets de la Roadmap qui a le plus bénéficié de la coopération internationale. L'ITRS inclut ainsi désormais une partie sur l'interconnexion et le câblage du support de puce et son aptitude à transmettre des informations et de l'énergie. Elle contient aussi une vaste discussion sur le niveau de packaging du "wafer". Un autre aspect primordial est la fiabilité des contacts sur l'enveloppe de la puce. En effet, celle-ci subit l'augmentation permanente de puissance de la puce et doit en même temps répondre à des tensions de fonctionnement de plus en plus faibles.

Aussi, l'émergence des "system-on-chip" (SoC) qui intègrent de nouvelles contraintes pour le packaging, principalement la distribution d'énergie entre les différents éléments, et fait l'objet d'une nouvelle section dans la Roadmap.

d) Interconnexion Cu et diélectriques à faible k :

Depuis les années 80, les interconnexions au niveau des microprocesseurs sont en aluminium et utilisent des isolants à base de SiO₂. L'amélioration perpétuelle des circuits intégrés, avec des transistors de plus en plus petits et des vitesses d'opération de plus en plus rapides, a atteint une phase critique nécessitant l'utilisation de nouvelles technologies. D'où le développement des interconnexions cuivre, meilleures conductrices d'électricité, et de matériaux isolants à faible k permettant de déposer des couches plus minces. En effet, les transistors passant sous la barre des 0.18 μm , les délais de propagation en raison des interconnexions aluminium deviennent trop long. La réduction de la constante diélectrique nécessaire est dépendante de la taille du transistor. Ainsi, pour une gravure à 0.13 μm , un $k < 3$ est ciblé. Pour une largeur de trait inférieur, on recherche un $k < 2.2$.

²⁴ The Information Network

²⁵ Solid State Technology, 01/2001.

Certains fabricants de circuits intégrés ont déjà choisi les matériaux à faible constante diélectrique qu'ils privilégient. Par exemple, IBM prévoit d'introduire son SiLK en production avant la fin de l'année. AMD, Motorola, et TSMC se concentrent sur le diélectrique "Black Diamond". L'élaboration de ces nouveaux matériaux diélectriques nécessite la mise en place de procédés innovants, comme le "dual damascène". L'introduction du cuivre pose des problèmes de contamination des autres couches minces du microprocesseur et nécessite un contrôle très précis. Pour les DRAMs, les diélectriques bw-k associés au cuivre pour des motifs allant jusque 100 nm sont dès aujourd'hui l'alternative pour remplacer rapidement l'aluminium. Concernant les MPU, le câblage aluminium pourrait continuer jusqu'en 2003 en production.

Le SiO₂ était jusqu'à présent déposé par CVD (Chemical Vapor Deposited) et des efforts considérables ont été fournis pour étendre cette technique aux diélectriques à $k < 2.2$. Cependant, ces nouveaux matériaux diélectriques présentent une forte porosité ce qui les fragilise mécaniquement. Concilier des performances bw-k avec une résistance mécanique suffisante au procédé d'intégration très exigeant, comme le CMP (Chemical Mechanical Polishing), représente l'enjeu majeur pour les matériaux ultralow-k²⁶.

e) Métrologie

Le concept de métrologie in situ s'affirme de plus en plus en devenant une métrologie intégrée au procédé d'élaboration. Le contrôle se fait pendant la réalisation des circuits intégrés ou par exemple lors de la croissance d'une couche mince.

Les principaux enjeux mis en évidence par la Roadmap sont :

la métrologie lithographique : La mise au point pour une visualisation en profondeur des reliefs, des dépôts ou des gravures (DOF : Depth Of Focus) est déterminante pour l'avenir de la lithographie. Les mesures vont devenir de plus en plus difficiles à réaliser en raison de l'association de nouveaux matériaux et de la complication des procédés de fabrication. Les SEM (Scanning Electron Microscope) à faible voltage offrent des résolutions supérieures mais une profondeur de champ moins bonne. L'holographie électronique pourrait être une solution utile en deçà de 70 nm.

la métrologie FEP : Les enjeux de la métrologie pour le Front End Processing (FEP) résident dans la précision des mesures des très fines épaisseurs des diélectriques élaborés pour les "portes" de transistors et éventuellement des diélectriques à haute constante diélectrique k (high-k). Il y a aussi un besoin émergent de mesure de profils 2D et 3D de dopants, de mesure des propriétés d'interface et des capacités des diélectriques.

la métrologie d'interconnexion : Le contrôle systématique de la qualité des barrières de diffusion et des couches de cuivre est primordial aussi bien au niveau des motifs que des contacts, et provient du fait que le dépôt de couches minces n'est pas le même dans ces structures que sur la tranche test. De plus, la métrologie des interconnexions nécessite la caractérisation des films diélectriques à faible k (low-k), par des mesures de porosité, complétée par des mesures d'épaisseur pour évaluer la taille des pores et leur retenue en molécules d'eau.

la caractérisation des matériaux et de leur contamination : La caractérisation de la contamination des surfaces et des matériaux continue d'être un élément essentiel des procédés de fabrication. Des améliorations continues sont nécessaires pour les micro-calorimètres, les techniques utilisant la diffraction et la fluorescence X en incidence rasante, les microscopes électroniques à transmission en balayage (STEM) et bien d'autres techniques.

f) Horloges et MIPS :

Les performances d'un processeur ne sont pas uniquement caractérisées par sa fréquence de fonctionnement d'horloge mais aussi par le nombre d'opérations exécutées par seconde (MIPS : Million Instructions per Second). Pour améliorer cette performance, une première approche consiste à réaliser des processeurs avec une cadence de fonctionnement élevée réalisant des opérations simples à chaque cycle. La deuxième approche met l'accent sur l'efficacité du calcul et la quantité d'informations traitées à chaque cycle.

Historiquement, Intel et AMD ont opté pour la première solution, et Motorola la deuxième. Ceci explique pourquoi à des fréquences d'horloge bien plus faibles les processeurs de Motorola peuvent égaler et même dépasser les processeurs haute fréquence d'Intel et AMD. Aujourd'hui, AMD semble se détacher de la voie initialement empruntée aux côtés d'Intel jusqu'au Pentium 4, marquant le début de la divergence des deux compagnies quant à l'architecture du processeur. Après avoir marqué des points en passant fièrement la barre du GigaHz avant Intel, AMD s'attache aujourd'hui à mettre en avant l'importance des MIPS pour les performances du processeur, afin de démystifier les horloges rapides. Un test de performance audité par Arthur Andersen établit que le Athalon XP de AMD à 1.53 GHz serait 20 %²⁷ plus efficace qu'un Pentium 4 d'Intel à 1.8 GHz.

Motorola étend la famille de son processeur haute performance PowerPC G4 en lançant le MPC7450, processeur cadencé à 867 MHz. Les processeurs PowerPC équipent notamment les ordinateurs Apple et sont développés par IBM et Motorola. Ils tirent leur performance non pas d'une cadence de processeur ultra rapide (à comparer avec les 2 GHz d'Intel)

²⁶ SolidState Technology, September 2001, supplément : "Copper, low-k dielectrics"

²⁷ e-inSITE 25/10/01, Financial Times Limited

mais d'une architecture offrant un registre de calcul vectoriel 128 bits comprenant 162 instructions intégrées²⁸. En optimisant le traitement de données vectorielles, telle que la compression, la vidéo, l'audio ou le cryptage, ce registre de calcul supplémentaire permet d'exécuter un grand nombre d'instructions consécutives à chaque cycle d'horloge.

g) Consommation :

La start-up californienne Transmeta pourrait supplanter le standard x86 d'Intel avec la nouvelle architecture de son microprocesseur Crusoe. Cette nouvelle technologie de 128bits VLIW (Very Long Instruction Word) permet la conception de microprocesseurs plus puissants et moins gourmands en énergie. Pour cela, Transmeta a su intégrer à ses microprocesseurs Crusoe²⁹ un micro-programme (code morphing) permettant une compatibilité totale avec l'architecture x86 d'Intel. Ces avantages concurrentiels semblent s'intéresser dans le secteur des ordinateurs portables puisque Sony a lancé en décembre 2000 le VAIO PictureBook C1VN, un ordinateur de poche multimédia fonctionnant sur un microprocesseur Crusoe. Depuis le début 2001, Toshiba, IBM, NEC, Fujitsu, et Gateway ont choisi Crusoe pour leur gamme d'ordinateurs portables. Enfin, Transmeta a déjà scellé une alliance avec AMD visant le développement du microprocesseur Sledgehammer.

Face à ce succès, IBM présente son nouveau processeur Power PC 405 LP dont la consommation d'énergie serait réduite de 90 %. Celui-ci est doté de circuits permettant d'interrompre ou réactiver instantanément l'activité de certaines parties du processeur en fonction de leur rôle dans l'exécution des tâches en cours. IBM annonce aussi la création du Low-Power Computing Research Center au sein de son laboratoire d'Austin, Texas. Par ailleurs, le MPC7450 de Motorola mentionné au paragraphe précédent est fabriqué avec une technologie cuivre-0.18 μm et contient trois modes programmables d'économie d'énergie.

2. Evolution des procédés de fabrication :

Comme nous l'avons mentionné précédemment, les motifs à 0.13 μm étaient annoncés par la Roadmap 1999 pour 2002. Pourtant, cette technologie est aujourd'hui maîtrisée par quelques grands fabricants de processeurs. Le passage de 0.18 μm à 0.13 μm permet de limiter la consommation en énergie des processeurs, de réduire leur coût et d'augmenter les volumes de production. La moitié des processeurs Intel Pentium4 sera fabriquée suivant la technologie 0.13 μm d'ici le deuxième trimestre 2002, et la totalité fin 2002.

Le 17 Octobre 2001, Intel annonce officiellement l'ouverture d'une unité de fabrication 0.13 μm à Chandler, Arizona (Fab22). Cette unité est une des six d'Intel utilisant les technologies cuivre et 0.13 μm mais reste sur des wafers à 200 mm (comme Fab 17, 2à et D2). Elle représente un investissement total de 2 M\$ et atteindra sa capacité maximale fin 2002. Les prochaines unités de fabrication d'Intel produiront des puces sur des wafers de 300 mm en utilisant une technologie cuivre-0.13 μm . C'est le cas de la Fab D1C, usine prototype, à Hillsboro, Oregon, qui sera opérationnelle pour le deuxième trimestre 2002, et de la Fab 11X à Rio Rancho, Nouveau Mexique, prévue opérationnelle pour le deuxième semestre 2002. Même si la technologie 300 mm permet de produire deux fois plus de puces que le 200 mm par wafer, Intel ne prévoit pas de convertir sa Fab 22 en 300 mm. A plus long terme, Intel a fini la construction d'une usine (Fab 24) à Leixip³⁰, Irlande, qui entamera la production de wafers 300 mm technologie 0.10 μm en 2003.

Le 12 Juin 2001, Motorola lançait une nouvelle version de son produit phare, le processeur PowerPC, avec le e500 PowerPC Book E. Le e500 fonctionne à 800 MHz sur de l'HiPerMOS7 à 0.13 μm CMOS, avec consommation réduite à 3mW/MHz. Le e500 doit fournir une puissance de calcul de 2.1 MIPS (1800 Dhrystone) à 800 MHz sur une surface de 6 mm carrés.

Broadcom Corporation annonce un nouveau design du système Gigabit Ethernet, le BCM5424. Utilisant la technologie 0.13 μm , le BCM5424³¹ a une très faible consommation énergétique (< 1 W par port), et est produit sur des wafers 300 mm, avec des interconnexions cuivre. Infineon passe de 0.17 μm à 0.14 μm pour la fabrication de ses DRAM 256 Mbit proposant ainsi la plus petite mémoire 256 Mbit du marché et diminuant les coûts de production de 30 %³². L'entreprise compte aussi transférer toute sa production de DRAM 0.14 μm sur des wafers 300 mm.

3. Le développement des LED à haute luminosité :

Le DOE (Department of Energy) et l'OIDA (Optoelectronics Industry Development Association) se sont regroupés pour mettre en place un programme visant à développer des LED à haute luminosité destinées à l'éclairage. Quoi qu'il en soit, afin d'être compétitif avec les technologies traditionnelles, l'enjeu principal de l'industrie des LEDs est de minimiser le rapport coût/luminosité.

²⁸ press release motorola 18 July 2001 ; www.apple.com

²⁹ communiqué de presse Sony Electronics à San Diego, 08/09/2000.

³⁰ Electronic News Online, 17/10/01

³¹ e-inSITE 30/10/01

³² Electronic News 18/10/01

Il existe deux approches principales³³ permettant d'obtenir de la lumière blanche à partir de LEDs : combiner plusieurs LEDs de couleurs différentes, ou utiliser du phosphore ou autre matériau pour convertir l'émission d'une LED bleue ou UV en lumière visible (principe de fonctionnement des tubes à néon). Contrairement à la combinaison de plusieurs LEDs, la deuxième approche ne nécessite pas de contrôle minutieux de l'émission de la LED et coûte moins cher. En revanche, elle se heurte à un problème de rendement lors de la conversion d'énergie, et il existe peu de matériaux autres que le phosphore. La solution optimale pourrait être la combinaison d'une LED UV et d'un phosphore tricolore, comme dans les lampes fluorescentes (le phosphore est excité par une longueur d'onde de 254 nm). La LED ne contribuant pas à la lumière blanche émise, le point blanc est indépendant des caractéristiques de cette dernière, qui n'est là que pour exciter le phosphore le plus efficacement possible. D'après l'OIDA, le développement d'une nouvelle génération de phosphore devrait prendre 5 ans.

Une des cibles pour les LEDs **AlInGaP** est d'augmenter l'efficacité quantique interne, particulièrement à petite longueur d'onde, où le confinement des porteurs de la bande de conduction est faible. Une amélioration des performances et de la sensibilité à la température pourrait être obtenue en modifiant le gap, suivant une technique très utilisée pour les lasers AlInGaP mais pas encore développée pour les LEDs. Ceci nécessite une grande maîtrise du procédé de croissance des couches minces et serait envisageable à l'avenir avec une amélioration de la qualité de la production par les réacteurs MOCVD (Chemical Vapor Deposit). Un autre enjeu pour les LEDs AlInGaP est de les rendre opérationnelles à fort courant électrique tout en maintenant leur fiabilité et leur efficacité, afin d'augmenter considérablement la luminosité.

Pour les composés **Nitrurés**, le principal objectif est de développer de nouveaux substrats remplaçant le saphire et de permettre la croissance de couches de faible densité en défauts, tels que les GaN, AlN et ZnO. Là aussi, des progrès sont à faire dans le design des réacteurs et la compréhension du procédé de croissance du nitrure, améliorant ainsi le procédé MOCVD pour déposer des couches épitaxiées de InGaN plus uniformes. Le fonctionnement à fort courant des LEDs à composés nitrurés pourrait créer une diminution considérable des coûts.

4. Convergence de l'Optique et de l'Electronique :

Un des sujets phares aujourd'hui est l'intégration des composants optiques et des circuits intégrés des télécommunications sur un même support. Plusieurs niveaux d'assemblage sont possibles, allant du co-packaging d'un module optique avec un microprocesseur à l'intégration monolithique d'éléments de différents types sur la même tranche. La motivation derrière cette volonté d'intégration est tout d'abord le coût par la réduction du nombre des étapes intermédiaires. D'autre part, des modules plus intégrés engendreraient une amélioration des performances et une économie d'encombrement et d'énergie des systèmes. Le problème réside dans le fait que si les CMOS, SiGe, GaAs et InP sont tous candidats pour les circuits intégrés rapides de tels modules, seuls l'InP représente un choix viable pour les émetteurs/récepteurs à des longueurs d'onde acceptables pour les télécommunications.

Une des premières approches de la convergence est le packaging des composants optiques et des circuits intégrés dans la même boîte pour créer des transmetteurs pouvant combiner des fonctions d'émission et de réception d'un signal pour tout port optique. Ce type de produit est déjà proposé par des fournisseurs comme Lucent ou JDS Uniphase. Des tels modules à 40 Gb/s devraient se développer considérablement d'ici mi 2002³².

L'intégration complète devrait commencer par la disposition de détecteurs et d'amplificateurs sur un même support. Puis la combinaison de modulateurs électroabsorption avec des drivers haut voltage, qui est l'exemple même du produit réalisable à partir d'InP et pas concevable en utilisant des drivers à base de GaAs ou SiGe. Il s'agira ensuite d'intégrer, en plus du modulateur, des drivers et de l'amplificateur, un émetteur/récepteur, dont la partie la plus difficile sera le laser.

Les investissements et le nombre de partenariats ou de fusions entre les fabricants traditionnels d'électronique et de composants optiques sont donc amenés à croître fortement dans un avenir proche. Ainsi, TRW, Vitesse et Nortel ont investi de manière significative dans la technologie InP³⁴. Aussi, le développement du 40 Gb/s et de l'intégration devrait tirer vers le haut le marché des ICs rapides (analogiques et à signaux mixtes) utilisés dans les réseaux optiques. Si il a diminué de 13 % en 2001 (de 850 m\$ en 2000 à 740 m\$ en 2001), il doit atteindre 2,9 M\$ d'ici 2005³⁵.

5. SOI : Silicon on Insulator

L'industrie s'intéresse de plus en plus aux substrats SOI pour remplacer les plaquettes de silicium monocristallines des procédés CMOS actuels et pour la réalisation de circuits logiques hautes performances. Le SOI offre la possibilité de circuits intégrés à basse consommation et horloge rapide, et l'intégration de MOSFET à très faible énergie et de transistors à double porte en deçà de 100 nm. Les substrats SOI à haute résistivité permettent également de concevoir des composants à fonctions mixtes RF-digitale.

³³ Compound Semiconductor 7(1) Feb 2001

³⁴ Compound Semiconductor, July 2001

³⁵ : III-Vs review : the advanced semiconductor magazine, vol.14, n°5 June/July 2001

La technologie SOI, qui existe depuis trois décennies, devrait finalement connaître une croissance de 55 % entre 1999 et 2003³⁶. Les principaux moteurs de cette croissance vont des applications militaires et aérospatiales aux équipements industriels, en passant par le traitement des données, les communications et l'électronique. Avec l'augmentation de la demande, les prix des wafers SOI 200 mm devraient chuter fortement, la production en masse de wafers SOI de 300 mm étant prévue pour 2003. La demande pour les wafers SOI s'est transposée de la technologie des films épais aux films minces. Depuis 1997, deux avancées majeures ont accéléré le développement du SOI. Tout d'abord, l'apparition de solutions de fabrication efficaces et peu chères, comme le SmartCut de SOITEC, puis le développement de systèmes microélectroniques à base de SOI à grand volume de production. Aujourd'hui, SOITEC, Canon et Silicon Genesis utilisent tous trois des process propriétaires. Il s'agit de coller deux wafers ensemble, l'un servant de wafer de base et l'autre étant traité avec une couche d'oxyde implantée. Ce dernier est ensuite sectionné à faible épaisseur, ne laissant qu'une fine couche active sur le wafer support. IBM a implémenté en 1999 la technologie SOI dans son processeur PowerPC, et compte désormais élargir cette approche aux ASICs. Motorola, Texas Instrument, Mitsubishi Electric, Fujitsu et Samsung travaillent sur des systèmes à hautes vitesses et basses consommations de la technologie SOI. Philips, qui se concentre sur les systèmes à haut voltage, et Honeywell sur les systèmes à haute température pour l'aérospatiale et le secteur automobile, sont leaders pour les nouvelles applications.

Les technologies SOI présentes dans les produits IBM et les processeurs RISC (Reduced Instruction Set Computer) sont utilisés dans les serveurs pour applications e-business. Parmi les prochains produits à hautes performances, la puce Power4 sera incorporée dans les stations de travail RS/6000. IBM conçoit ses puces SOI en suivant les étapes des autres procédés, c'est à dire à 0.18 et 0.13 μm ³⁷. Les meilleures performances du SOI par rapport à une architecture classique résultent de la couche d'oxyde enfouie (buried oxide layer) formée tôt lors du processus de fabrication. Après la formation de cette couche, une technique conventionnelle de fabrication de circuit intégré est suivie pour créer le transistor à effet de champ sur la couche d'oxyde enfouie. Ainsi, d'une part la zone de capacitance entre la jonction et le substrat est considérablement réduite, et d'autre part les diffusions sont latéralement isolées d'autres motifs par l'oxyde déposé.

6. La microélectronique du futur :

La Roadmap des semiconducteurs (ITRS) prévoit qu'une barrière technologique sera atteinte vers 2014 dans la course à la fabrication de transistors de plus en plus petits pour la réalisation de microprocesseurs et calculateurs de plus en plus performants et de moins en moins chers. Pour contourner cette limite, des alternatives et de nouvelles technologies sont aujourd'hui envisagées à plus ou moins long termes, telles que :

- l'électronique moléculaire,
- les transistors à un électron,
- les transistors organiques ou "plastiques" qui utilisent des semiconducteurs et supports organiques,
- l'association de nouveaux matériaux avec le Si (par exemple le GaAs),
- les ordinateurs ADN qui utilisent l'infinité des combinaisons des acides nucléiques,
- l'utilisation des films minces de protéines,
- les systèmes d'information quantiques qui utilisent les états quantiques des systèmes physiques,
- les microprocesseurs optiques basés sur des transistor optiques ou à effet auto-électro-optique symétrique,
- la spintronic qui manipule les électrons dans un circuit utilisant l'effet de leur spin.

Plusieurs de ces alternatives peuvent être regroupées sous l'appellation "nanoélectronique". Celle-ci peut être abordée de deux manières différentes : 'top-down' et 'bottom-up'. La première consiste à substituer petit à petit, en fonction des avancées technologiques, des éléments d'un système microélectronique pour les remplacer par des éléments nanoélectroniques, au comportement physique différent, mais remplissant les mêmes fonctions. L'autre approche a pour objectif de concevoir entièrement, brique par brique, un nanosystème, i.e un système électronique uniquement composé d'éléments nanométriques. Quelle que soit l'approche, les premiers systèmes ne devraient pas apparaître avant plusieurs années. Cependant, la recherche dans ce domaine s'organise aux Etats Unis avec la mise en place de centres d'excellence pluridisciplinaire soutenue par les gouvernements et l'industrie.

a) Electronique Moléculaire :

Au-delà de la première loi de Moore qui concerne la miniaturisation des composants, les laboratoires industriels s'intéressent aux possibilités offertes par l'électronique moléculaire pour s'affranchir de la seconde loi de Moore. Celle-

³⁶ Gartner Dataquest

³⁷ IBM Micro News, First Quarter 2001, Vol.7, No.1

ci prévoit l'augmentation quasiment exponentielle avec le temps des coûts de construction d'une usine de production de semiconducteurs, que l'électronique moléculaire pourrait limiter, selon Stanley Williams de HP.

L'idée initiale de l'électronique moléculaire est la réalisation d'un composant électronique actif comme une diode ou un transistor à partir d'une seule molécule. Les premières recherches au début des années 70 étaient très prometteuses, et c'est l'invention du microscope à effet tunnel (STM) qui a réellement permis la manipulation moléculaire en 1987, jusqu'à la démonstration de l'effet d'amplification avec une seule molécule en 1997. Le groupe de D.Eigler d'IBM Almaden cherche à maîtriser l'interaction d'échange entre 2 atomes magnétiques distants au travers d'une bande de conduction formée à la surface du métal, permettant ainsi de concevoir des 'molécules calculantes'.

A plus court terme, une autre approche consiste à élaborer des réseaux étendus de jonctions planaires, par l'autoassemblage de nanotubes par exemple, afin de créer l'architecture d'un circuit. La jonction créée à l'intersection de deux fils en prenant en sandwich quelques molécules permet la réalisation d'un switch ou d'une petite cellule mémoire. Cette démarche est activement développée par HP et UCLA qui travaillent sur des jonctions composées de 10^4 à 10^6 molécules. Pour coder des informations binaires, il est nécessaire que la jonction se comporte comme un interrupteur commutable. Les molécules étant ainsi soit conductrices d'électricité, soit isolantes. Des chercheurs des universités de Yale et Rice ont réalisé une jonction d'une couche d'un millier de molécules entre deux électrodes métalliques. Selon eux, les molécules subirait une réduction (gain d'électrons) formant un anion conducteur. Au-delà d'une certaine tension appliquée, une seconde réduction créerait un dianion isolant³⁸. Récemment, des chercheurs des Bell Laboratories de Lucent Technologies auraient conçu un transistor organique d'une seule molécule sur un substrat silicium³⁹.

b) Utilisation des Nanotubes :

Un nanotube est un tube pouvant s'étendre sur une longueur de plusieurs milliers d'atomes, pour un rayon d'une dizaine d'atomes seulement. Ceux étudiés aujourd'hui sont principalement en carbone ou en silicium. En plus de leurs propriétés physiques exceptionnelles, ils affichent des caractéristiques particulièrement intéressantes pour l'élaboration de circuits électroniques. Un tiers d'entre eux sont d'excellents conducteurs électriques et donc utilisables pour tout ce qui est connexion. Les autres présentent des propriétés semiconductrices, donc utiles pour constituer des diodes ou des transistors. A long terme, il est envisagé de réaliser des ensembles électroniques dont les connexions seraient assurées par un réseau de nanotubes, reliant entre eux des nano-transistors ou nano-diodes.

Le centre de recherche Thomas J.Watson d'IBM à New York a déposé et organisé en grand nombre des nanotubes de carbone sur une puce de silicium, et a pu ensuite sélectionner les nanotubes semiconducteurs et créer un réseau en supprimant les tubes conducteurs par l'application d'un courant intense⁴⁰. Le groupe de Charles Lieberg de l'université de Harvard a lui montré que les jonctions entre nanotubes peuvent être utilisées pour créer des transistors à effet de champ. En utilisant des nanotubes de silicium, son équipe a conçu une diode et un inverseur, le premier assemblage de semiconducteurs nanométriques de type n et p.

Par ailleurs, une équipe de recherche de Sandia National Laboratories a mis en évidence l'auto organisation d'atomes de Plomb lorsqu'ils sont disposés sur du Cuivre⁴¹. Cette auto organisation, prévue par la théorie, laisse entrevoir de nombreuses opportunités pour la création de motifs nanoscopiques ordonnés.

c) Spintronic :

Toujours avec l'objectif de coder des informations binaires dans un volume le plus petit possible, la spintronic utilise le spin de l'électron, notamment, pour stocker de l'information ou créer des mémoires ou des fonctions logiques plus rapides. Cette démarche s'inscrit donc dans la tendance émergente qui consiste à utiliser l'état quantique de la matière pour réaliser des opérations digitales.

Le bit est codé par un déséquilibre de population électronique spin positif / spin négatif. Les états de spin sont détectés par un film magnétique. Le déséquilibre de population est compensé par l'établissement d'un courant électronique allant du matériau au collecteur, ou inversement, selon la configuration. Un tel fonctionnement bipolaire peut mener à la réalisation de mémoires ou de fonctions logiques. Le principal problème concerne la recherche de matériaux adaptés et l'optimisation de leurs propriétés pour la construction d'objets électroniques au fonctionnement quantique.

³⁸ J.Chen *et al*, *Science*, 286, 1550.

³⁹ Microelectronics Technology Alert, 16 nov. 2001.

⁴⁰ San José Mercury News.

⁴¹ Microelectronics Technology Alert, 05 oct. 2001.

Le centre de recherche d'IBM Almaden et le Pacific Northwest National Labs annoncent la mise au point d'un semiconducteur magnétique à température ambiante, primordial pour l'électronique quantique. Celui-ci a été élaboré par dépôt moléculaire épitaxié. Cette technique, qui est en concurrence avec l'ablation laser, s'avère difficile à mettre en place, mais offre par la suite un meilleur contrôle au niveau atomique, donc un meilleur résultat.

Un autre problème fondamental de la spintronic est sa très haute sensibilité aux perturbations, notamment extérieures (température, champ magnétique...). Si les expériences sont prometteuses en milieu conditionné des laboratoires, ceci est loin d'être le cas dans des conditions 'normales' d'utilisation. De grands progrès sont à faire dans ce domaine, soit en isolant la puce du monde extérieur, soit en maîtrisant sa sensibilité aux perturbations.

d) Transistor à un Electron (SET) :

L'étape ultime du transistor consiste à maîtriser et amplifier un courant électrique réduit à sa plus simple expression : un seul électron. En effet, un tel dispositif permet de rendre le transistor non seulement plus petit, mais encore de limiter sa consommation énergétique. La réduction de la taille des éléments électroniques permet d'accroître la densité d'intégration tout en augmentant les vitesses de calcul pour un microprocesseur ou une mémoire. Le transistor à un électron pourrait donc jouer un rôle pour le développement de nouveaux assistants personnels ou autres systèmes portables.

Comme tous les transistors, le SET (Single Electron Transistor) fonctionne par juxtaposition de semiconducteurs n et p. Mais les deux semiconducteurs sont tellement dopés qu'ils se comportent pratiquement comme des métaux, donc conducteurs d'électrons. En revanche, ils sont séparés par un isolant d'une épaisseur typique de 10 Å, soit environ deux couches atomiques. Cette épaisseur assure le transit des électrons par effet tunnel, à température ambiante. Le couplage en série de deux systèmes de ce type (partageant donc une électrode) permet d'obtenir un SET, en créant une « île de Coulomb » dont on fixe le potentiel avec une capacité. La réalisation d'un tel système nécessite une maîtrise parfaite de la technique de dépôt des couches minces, de leur épaisseur et de leur chimie.

Une équipe de Stanford a mis au point un tel dispositif avec une plage de fonctionnement électrique assez large⁴². Le LETI de Grenoble a réalisé le premier SET le plus petit avec une porte de 20 nm, alors que le Lawrence Berkeley National Laboratory propose un SET avec une porte de 23 nm. Cependant, Intel semble avoir récemment réalisé un SET avec une porte de 20 nm pour des courants de fuite plus faibles.

4. Les grands programmes de recherches :

Il n'existe pas aux Etats Unis de Ministère de la Recherche pour définir les orientations stratégiques et les financements fédéraux. Ce rôle est rempli par l'Office of the President for Science and Technology⁴³ (OPST). Contrainte par les restrictions budgétaires et stimulée par l'industrie, l'administration Clinton a cherché à rendre les investissements de R&D en électronique plus efficaces. L'ESC (*Electronics Subcommittee*) a donc été créé en 1993 sous le *Committee on Civilian Industrial Technology* (CCIT) du *National Science and Technology Council* (NSTC). Il est composé de représentants du DoD/DARPA, du DoC/NIST, de la NSF, du *Department of Energy* (DoE), de l'*Office of Science and Technology Policy* (OSTP), du *National Economic Council* (NEC), de l'*Environmental Protection Agency* (EPA), de la NASA, et de la *National Security Agency* (NSA). L'ESC soutient également le *Committee on Information and Communication* (CIC) du NSTC. Les budgets attribués aux agences sont ensuite répartis parmi les établissements et les centres de recherche par le biais d'appel d'offre.

Il convient également de mentionner les CRADA (Cooperative Research and Development Agreement) qui sont des contrats de recherche entre les laboratoires fédéraux, l'industrie et les universités. Ces accords facilitent les échanges d'informations et les collaborations entre le secteur public et le secteur privé. Le financement d'un projet est assuré par les partenaires industriels, les laboratoires contribuant en ressources humaines et matérielles. Les propriétés intellectuelles sont négociées lors de la signature du CRADA.⁴⁴

⁴² http://www.mitre.org/technology/nanotech/single_electron_transistor.html

⁴³ <http://www.ostp.gov>

⁴⁴ <http://www-otd.nci.nih.gov/crada.htm>

1. Programmes gouvernementaux par agence

Ce chapitre présente les différentes agences américaines qui financent de près ou de loin la recherche en microélectronique. Les budgets mentionnés ne sont donc pas obligatoirement dédiés à cette thématique.

1-1 Department of Defense (DoD) et la DARPA,

Mission :

La DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency) est l'agence de recherche du DOD qui a pour mission le développement de nouvelles technologies ayant des applications militaires potentielles, en exploitant des inventions, des idées, des concepts à hauts risques.

Elle est divisée en 7 départements, dont le MTO (Microsystems Technology Office) dont l'objectif ultime serait l'intégration de l'électronique, de la photonique et des systèmes électromécanique (MEMS) sur une même puce.

Budget :

Le budget total de la DARPA (2.2 M\$ pour 2002) se divise en 4 catégories (recherche de base, recherche appliquée, développement des technologies avancées et management de la recherche) dont voici quelques exemples de programmes impliquant en partie la microélectronique :

	2001 (m\$)	2002 (m\$)
- Systèmes informatiques et technologies des communications	330	382
- Commandes intégrées et technologies du contrôle	215	173
- Technologies électroniques et matériaux	261	358
- Technologies électroniques avancées	219	177
- Systèmes de communication, contrôle et de commande	128	117

A titre d'exemple, voici le détail du budget pour les technologies électroniques avancées, dont l'objectif est la fabrication et le design de produits électroniques variés tels que des systèmes de capteurs, des composants microélectroniques etc... qui ont des applications militaires et un potentiel commercial :

	2001 (m\$)	2002 (m\$)
- Capteurs intégrés non refroidis	16	6
- Technologie module électronique	39	33
- Systèmes d'information tactique	0	0
- Centres d'excellence	5	4
- Applications des technologies de fabrication	0	0
- Lithographie avancée	55	25
- MEMS et technologies des microsystèmes intégrés	48	37
- Technologies d'intégration mixte	53	69

Site internet : <http://www.darpa.mil>

1-2 Department of Commerce (DoC)

Le DOC administre plusieurs programmes de recherche qui implique en général l'industrie.
Le National Institute of Standards and Technology (NIST) gère les programmes ATP pour le compte du DOC.

1-2-1 ATP

Mission :

L'*Advanced Technology Program* (ATP), qui a débuté en 1990, est un partenariat exemplaire entre l'industrie américaine et le gouvernement pour améliorer la compétitivité des Etats-Unis, en développant de nouvelles technologies pouvant avoir des applications commerciales, mais présentant des risques stratégiques. Cependant, en raison de son caractère "corporate welfare", l'administration Bush remet en cause l'attribution de financements à l'ATP et aucun fond ne sera débloqué avant la fin de l'audit en cours du DOC, et une décision du Sénat et du Parlement.

<u>Budget</u> :	2001 (m\$)	2002 (m\$)
	145	13 *

Site internet : http://nist.gov/public_affairs/budget/2002table.htm

Programme : <http://atp.nist.gov/>

Les programmes futurs comportant des activités microélectroniques⁴⁵ sont intitulés :

- Technologies microsystèmes et nanosystèmes (développement des infrastructures d'ingénierie, packaging et l'élaboration de microsystèmes à partir de nanotechnologies),
- Nanotechnologie, électronique biomoléculaire (monocouches autoassemblées, nanotubes et biopolymères conducteurs d'électrons et de photons),
- Electronique organique (composants et systèmes innovants, structure électrique ou optique dérivée de matériaux organiques et technologie de fabrication)
- Lithographie de semiconducteur,
- Communication sans fil (microélectronique, électronique radiofréquence)

1-2-2 Laboratory Program

Mission :

Le *Laboratory Program* se concentre sur l'amélioration des systèmes de mesures et sur l'établissement de standards américains. Il existe 8 laboratoires, dont un, l'*Electronics & Electrical Engineering Laboratory* (EEEL), s'occupant de toutes les mesures liées à l'électronique.

<u>Budget</u> :	2001 (m\$)	2002 (m\$)
(pour les 8 laboratoires)	301	336

L'EEEL dispose d'une section microélectronique (Office of Microelectronics Program) ayant pour rôle:

- le management du National Semiconductor Metrology Program (NSMP), une initiative du NIST pour les besoins les plus urgents de l'industrie du semiconducteur en mesure et caractérisation,
- l'assistance aux activités de développement de la métrologie des semiconducteurs sans ségrégation en fonction des sources ou des financements pour un impact maximum sur l'industrie du semiconducteur.

Site internet : <http://www.eeel.nist.gov>

* Cette requête, ajoutée aux fonds restant de 2001, donnera un budget global pour 2002 de 79.9 m\$..

⁴⁵ <http://atp.nist.gov/atp/focusprg.htm#Proposed>

1-3 National Science Foundation (NSF)

Mission :

La NSF est une agence gouvernementale américaine indépendante responsable de la promotion de la science et de l'ingénierie au travers de nombreux programmes représentant un investissement de plus de 3.3 M\$ par an pour près de 20000 projets de recherche et d'enseignement en science et ingénierie.

<u>Budget global :</u>	2001 (M\$)	2002 (M\$)
	4.41	4.47
<u>Budget recherche (R&RA) :</u>	3.34	3.33

Programmes :

La R&RA (Research and Related Activities) porte l'effort en 2002 sur la recherche en biocomplexité environnementale, en technologie de l'information, en science et ingénierie à échelle nanométrique, et à l'apprentissage pour le 21ème siècle. Parmi les 8 départements⁴⁶, celui de l'Ingénierie s'intéresse entre autres à la microélectronique avec un budget total de 431 m\$ réparti sur de nombreuses thématiques telles que :

- La création de centres de recherche en ingénierie (Engineering Research Centers) orienté vers le multimédia, la fabrication et le packaging électronique, la fabrication de semiconducteur, et la bioingénierie (budget de 63 m\$)⁴⁷.
- L'étude de la microélectronique, de la nanoélectronique, du micromagnétique, de la photonique et des MEMS (budget de 10 m\$)⁴⁸.
- Les sciences et l'ingénierie nanométriques dont les capteurs et les nouveaux matériaux électroniques (budget de 17 m\$)⁴⁹.

Site internet : <http://www.nsf.gov/home/about/>

2. Consortia industriels en R&D

L'industrie des semiconducteurs et de la microélectronique est organisée sous la forme de plusieurs Consortia. Depuis la fin du soutien du gouvernement fédéral à certains d'entre eux, ceux-ci se sont ouverts à l'international.

2-1 Microelectronics Advanced Research Corporation (MARCO)

Mission :

MARCO est une organisation à but non lucratif qui finance et organise de nombreux programmes universitaires de recherche en microélectronique tels que les "Focus Center Research Program". MARCO appartient intégralement au SRC, mais sa gestion est indépendante. Ses fonds proviennent de sponsors tels que la SIA, la DARPA, et les industriels des semiconducteurs. MARCO s'occupe de gérer la R&D en électronique à très long terme (plus de 8 ans) dans les universités.

Programmes : <http://marco.fcrp.org>

⁴⁶ <http://www.nsf.gov/bfa/bud/fy2002/summary.htm>

⁴⁷ http://www.nsf.gov/bfa/bud/fy2002/eng_1eec.htm

⁴⁸ http://www.nsf.gov/bfa/bud/fy2002/eng_1ecs.htm

⁴⁹ http://www.nsf.gov/bfa/bud/fy2002/eng_1cts.htm

A propos des **Focus Center Research Program (FCRP)** :

En 1997, le DOD, en collaboration avec la SIA et des membres de l'industrie des semi-conducteurs américaine a lancé cette initiative pour accroître les programmes universitaires de recherche à long terme appliqués à la microélectronique. La mission des FCRP consiste à :

- concentrer l'attention et les ressources sur les sujets de recherche microélectronique indispensable à un maintien de la croissance et de la productivité de l'industrie des semi-conducteurs,
- renforcer les infrastructures universitaires de recherche et augmenter leurs capacités en microélectronique,
- regrouper les fonds de sponsoring des industriels impliqués afin d'atteindre une taille critique de financement, et
- recadrer la créativité de la recherche universitaire sur des objectifs précis.

Chaque Focus Center est "virtuel" puisqu'il regroupe plusieurs universités, ce qui permet de disposer d'équipements variés et de compétences pluridisciplinaires de haut niveau, un atout majeur pour la recherche en microélectronique. Ils reçoivent un budget de 10 m\$ par an.

Quatre FCRP ont été créés à ce jour⁵⁰ :

- le Design and Test Focus Center piloté par UC Berkeley,
- l'Interconnect Focus Center piloté par le Georgia Institute of Technology,
- le Materials Structures & Devices Focus Center piloté par le MIT (Massachusetts Institute of Technology),
- le Circuits, Systems & Software Focus Center piloté par Carnegie Mellon University.

2-2 Semiconductors Manufacturing Technology (SEMATECH)

Mission :

Basé à Austin (Texas) SEMATECH est aujourd'hui une structure internationale regroupant 13 industriels des semi-conducteurs : AMD, Agere Systems, Conexant, Hewlett-Packard, Hynix, Infineon Technologies, IBM, Intel, Motorola, Philips, STMicroelectronics, TSMC, et Texas Instruments. Elle a été un des instruments qui a permis à l'industrie des semi-conducteurs américaines dans les années 80 de reprendre une position de leader grâce à des soutiens financiers du gouvernement fédéral importants, qui ont aujourd'hui disparu.

Programmes : <http://www.sematech.org>

Les programmes de recherche se concentrent sur des aspects précompétitifs et concernent :

- les outils d'installations avancés,
- l'Environnement, la Sécurité et la Santé (ESH),
- les procédés Front End,
- les interconnexions,
- la lithographie,
- la méthode de fabrication et de productivité.

2-3 Semiconductor Research Corporation (SRC)

Mission :

La SRC soutient la recherche fondamentale et appliquée à moyen terme (entre 4 et 8 ans) en électronique dans les universités et les institutions de recherche. Ce consortium a distribué 428 millions de dollars depuis sa création en 1982 pour des contrats de recherche long terme liés aux semi-conducteurs. Ses membres sont des industriels acteurs majeurs de l'industrie des semi-conducteurs comme IBM, Intel, AMD, Motorola etc...

Budget : environ 35 millions de dollars en 2000.

Programmes : <http://www.src.org>

⁵⁰ <http://www.fcrp.org/>

2-4 Microelectronics and Computer Technology Corporation (MCC)

Mission :

La MCC effectue de la R&D consortiale à moyen terme (3-5 ans) dans le domaine des technologies de l'information et de l'électronique avancée. Ce consortium a perdu de son importance dans les années 90.

Programmes : <http://www.mcc.com>

3. Consortia industriels stratégiques

Ces consortia établissent des plan-cadres, collectent des informations et stimulent la R&D dans des domaines précis afin entre autres d'assurer la domination de l'Amérique du Nord sur le secteur des semi-conducteurs.

3-1 Semiconductor Industry Association (SIA)

La Semiconductor Industry Association (SIA) est la première association représentant l'industrie des semi-conducteurs américaine. Elle regroupe 90 % des acteurs de la microélectronique US. Elle offre aux industries locales l'opportunité de s'unir dans un effort collectif afin de toujours augmenter la compétitivité de ce secteur représentant pratiquement 220 M\$ de chiffre d'affaire à l'échelle mondiale. La SIA s'occupe de problèmes de commerce international, d'environnement, de sécurité, définit des orientations technologiques, ou encore enregistre les données pour produire des statistiques.

Elle est d'autre part à l'origine de la Roadmap ITRS (www.itrs.com), document incontournable pour l'industrie des semi-conducteurs (cf paragraphe 3.1).

Site internet : <http://www.semichips.org>

3-2 National Electronics Manufacturing Initiative (NEMI)

Le NEMI a pour mission de renforcer les infrastructures américaines pour la production à grand volume, faible coût de produits électroniques.

Site internet : <http://www.nemi.org>

3-3 United States Display Consortium (USDC)

Le but de l'USDC est de développer les infrastructures pour rendre compétitive l'industrie américaine des écrans plats et haute-définition.

Site internet : <http://www.usdc.org>

3-4 Optoelectronics Industry Development Association (OIDA)

La mission de l'OIDA est d'améliorer la compétitivité de l'industrie américaine en optoélectronique.

Site internet : <http://www.oida.org>

3-5 Institute for Interconnecting and Packaging Electronic Circuits (IPC) et Interconnection Technology Research Institute (ITRI)

L'IPC est une association chargée d'améliorer la compétitivité de l'industrie des interconnexions et des circuits imprimés.

Site internet : <http://www.ipc.org> ; <http://www.itri.org>

3-6 National Storage Industry Consortia (NSIC)

Le rôle de la NSIC est d'améliorer la compétitivité de l'industrie américaine du stockage de données.

Site internet : <http://www.nsic.org>

5. Compétitivité

La puissance des industriels américains du secteur des semiconducteurs et de la microélectronique s'appuie sur de très grandes entreprises telles qu'Intel ou Motorola ayant les moyens financiers de diffuser des produits innovants à grande échelle et donc à prix concurrentiel. Les industriels américains bénéficient :

- d'un réseau d'entreprises à la pointe de l'innovation, ayant accès à d'importants capitaux que cela soit par le biais des marchés boursiers (Nasdaq), ou d'investisseurs privés (fonds d'amorçage, capitaux-risqueurs) pour les plus petites structures,
- un marché intérieur important où l'adoption de nouveaux produits est très rapide,
- un soutien important du gouvernement fédéral et des états locaux à la recherche précompétitive.

L'industrie du semiconducteur américaine, qui était en difficulté dans les années 80, a su retrouver son rang de numéro un et domine à nouveau le marché mondial. Ceci s'est fait notamment grâce à l'aide de l'état et à la mise en place de nombreuses initiatives collectives regroupant les efforts des industriels du secteur. Si les acteurs se livrent une concurrence acharnée et veulent être les premiers à sortir le nouveau produit, ils n'hésitent pas à s'associer sur des projets de recherche à long terme d'une part afin de mettre en communs leur savoir-faire et leurs moyens, et d'autre part d'orienter la microélectronique vers des standards et des technologies qu'ils maîtrisent.