

de transistors de 0,35 micromètre de côté.

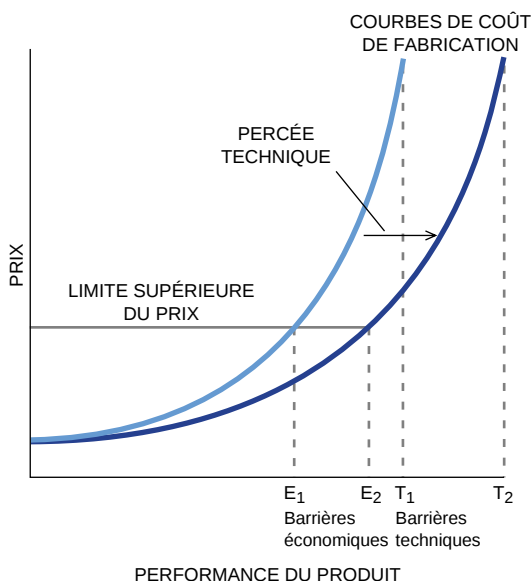
Au cours de tous ces développements, l'enjeu était la diminution du contraste que les entreprises étaient prêtes à tolérer. Lorsque le contraste est parfait, l'image créée sur la résine photosensible est nette. Comme tant d'autres limitations dans l'industrie, le contraste semblait techniquement fondamental, mais il n'était déterminé que par un choix de risques industriels. On trouva finalement que l'affaiblissement du contraste ne réduisait pas les rendements si le contrôle de qualité était renforcé à d'autres moments de la fabrication.

Quand le flot des innovations se tarira-t-il ? C'est difficile à dire, mais, lors de l'amincissement du flot en un mince filet, les conséquences économiques de l'approche des barrières techniques pourraient se faire sentir avant que les barrières elles-mêmes ne soient atteintes : le coût des augmentations de performances des puces croît rapidement lorsque les techniques de fabrication sont utilisées à leur limite, de sorte que les prix de vente, devenant excessifs, risquent de conduire à une stagnation du marché avant l'épuisement des innovations techniques.

Pourtant, le mûrissement d'une nouvelle technique s'accompagne d'une réduction du prix de revient des circuits intégrés. L'industrie passe alors d'une courbe de rendement associée à l'ancienne technique à une autre courbe, correspondant au nouveau procédé. Une découverte permettant de changer de technique de fabrication abaisse la courbe du prix de revient, repoussant les limites techniques (voir la figure 3). On obtient alors, sans augmentation du prix de revient, des performances supérieures, ce qui pousse les acheteurs à remplacer leur ancien matériel. Ce phénomène est important dans l'industrie électronique, car les produits sont rarement utilisés avant de devenir obsolètes.

Les procédés de fabrication et les mécanismes technico-commerciaux évoqués s'appliquent à toutes les sortes de puces, mais le marché principal est celui des puces mémoires. Le prix d'un méga-octet de mémoire a baissé, de 2,5 millions de francs il

PERFORMANCE EN FONCTION DU PRIX



3. LE PRIX DE REVIENT DES PUCES dépend de la technique utilisée pour leur fabrication. Les abscisses T_1 et T_2 correspondent à des barrières techniques : des accroissements minimes des performances des puces deviennent très coûteux. Cependant, les barrières économiques apparaissent bien avant les barrières techniques. Ces barrières se trouvent aux intersections (E_1 et E_2) des courbes avec la droite représentant le prix maximum que le client est disposé à payer. Les percées techniques ont pour effet d'abaisser la courbe jusqu'à la position de la courbe la plus foncée. Les performances s'améliorent alors, ce qui déplace les barrières en E_2 et T_2 .

y a 25 ans, jusqu'à moins de 200 francs aujourd'hui. Au cours de la même période, le coût d'une usine de fabrication de telles puces a augmenté, de moins de 20 millions de francs, jusqu'à un peu plus de 6 milliards de francs, ce qui les rend hors de portée de la plupart des entreprises, à l'exception des plus grandes. Ces coûts astronomiques, dus pour la plus grande partie aux investissements nécessaires à des innovations techniques toujours plus imposantes, ont à nouveau attiré l'attention sur les limites de l'industrie des semi-conducteurs.

Les innovations nécessaires

L'industrie micro-électronique ne s'arrêtera pas brusquement, mais les barrières seront si hautes que leur franchissement engendrera des changements plus profonds que ceux provoqués par les cycles précédents.

La plupart des obstacles ont pour origine : soit les structures en couches minces qui composent le circuit intégré ; soit les sources lumineuses néces-

saires à la fabrication de conducteurs extrêmement fins ; soit la largeur des conducteurs eux-mêmes. La constante diélectrique des couches minces isolantes, par exemple, est au cœur de deux difficultés. Quand une couche de matériau isolant est placée entre deux conducteurs, les signaux électriques des deux conducteurs n'interfèrent pas si la constante diélectrique de l'isolant est élevée. Avec l'intégration croissante, les couches sont de plus en plus serrées, et les interférences entre les conducteurs empirent. Pour y remédier, on cherche à réduire la constante diélectrique des isolants. Cette recherche impose de trouver des matériaux de faible constante diélectrique et, aussi, de mettre au point de nouvelles structures de films à faible constante diélectrique. Certains ingénieurs examinent ainsi comment on pourrait cribler la couche isolante de petits vides, pour profiter de la faible constante diélectrique de l'air.

En revanche, en d'autres zones des circuits intégrés, les matériaux doivent avoir une constante diélectrique élevée. La plupart des circuits intégrés contiennent des condensateurs, c'est-à-dire des composants capables de conserver des charges électriques. Dans les mémoires vives nommées DRAM (*Dynamic Random Access Memory*, soit «mémoire dynamique à accès aléatoire»), chaque bit est stocké dans un condensateur : un condensateur chargé représente le nombre binaire 1, tandis qu'un condensateur non chargé représente le nombre binaire 0. Les puces requièrent des condensateurs ayant des capacités importantes. La capacité étant proportionnelle à la constante diélectrique, les DRAM et autres puces semblables doivent contenir des matériaux de constante diélectrique élevée.

Parallèlement, les ingénieurs cherchent des sources lumineuses plus performantes pour les opérations de lithographie. Nous avons vu que la résolution s'obtient par l'emploi de longueurs d'onde plus courtes. Les sources lumineuses au mercure, les plus utilisées aujourd'hui, émettent très peu d'énergie aux longueurs d'onde inférieures à 0,365 micromètre (la raie i). Les lasers (comme les lasers à excimères) sont efficaces jusqu'à environ 0,193 micromètre, mais ils engen-

drent peu d'énergie au-dessous de cette longueur d'onde ; on les a récemment utilisés pour fabriquer de petites quantités de puces spécialisées de haute performance. Pour obtenir des résolutions encore supérieures, on devra employer des sources de rayons X, mais 20 années de recherche en lithographie à rayons X n'ont pas encore donné les résultats escomptés : aucune puce commercialisée aujourd'hui n'a été fabriquée par ce moyen.

Des usines à dix milliards

La résolution des difficultés techniques revient cher : le coût des équipements des usines (ou fonderies) devient prohibitif. Les progrès du matériel lithographique, notamment,

sont très importants, car la résolution minimale en dépend. Bien que celle-ci ait diminué d'environ 14 pour cent par an depuis le début de cette industrie, le prix du matériel lithographique a augmenté de 28 pour cent chaque année.

Initialement, chaque nouvelle génération de matériel lithographique coûtait dix fois plus que la précédente. Aujourd'hui, grâce aux outils mis au point précédemment, le coût double seulement à chaque innovation notable. Le prix des autres matériels de fabrication de semi-conducteurs a augmenté de manière analogue.

Ainsi le coût global de la construction de fonderies microélectroniques double tous les trois ans, moitié moins vite que le degré d'intégration. La

Société *Intel* dépense aujourd'hui cinq milliards et demi de francs pour sa nouvelle usine à Hillsboro, dans l'Oregon, et six milliards et demi de francs pour celle de Chandler, en Arizona. Les Sociétés *Samsung* et *Siemens* construisent chacune des fonderies qui, une fois terminées, auront coûté sept milliards et demi de francs ; la Société *Motorola* envisage même une fonderie qui coûterait 12 milliards. On peut construire des fonderies de silicium plus petites, mais elles sont moins rentables.

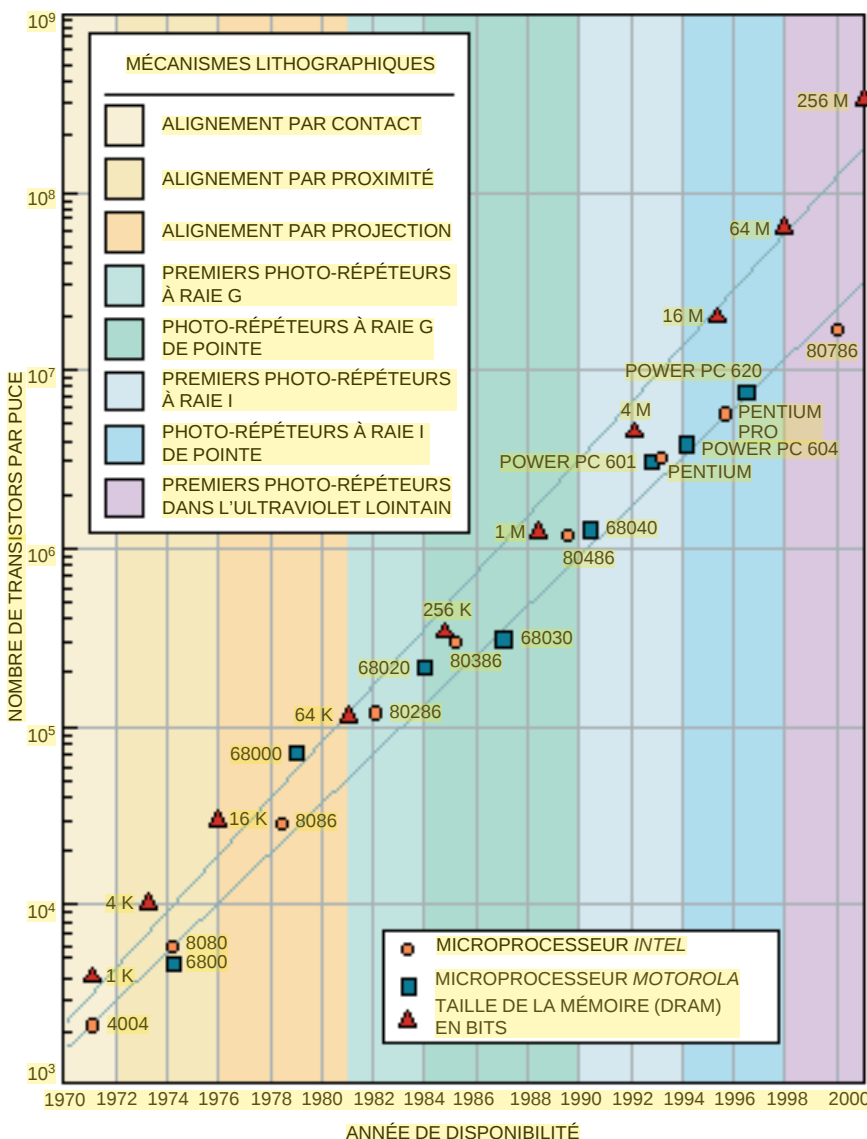
Le prix exorbitant des fonderies est souvent cité comme une indication de la proximité de barrières techniques redoutables. Toutefois, nous pensons que ces barrières ne seront pas infranchissables : l'industrie micro-électronique ne cessera pas de progresser, mais, les prix des semi-conducteurs augmenteront et l'allure des changements dans l'industrie ralentira.

Un tel changement ne serait pas sans précédent. Le coût par bit de mémoire a augmenté de 279 pour cent entre 1985 et 1988, sans conséquence néfaste... au contraire : 1988 a été l'une des meilleures années pour l'industrie micro-électronique. Si le coût par bit augmente de manière permanente, le régime industriel se modifiera, ainsi que les modèles économiques.

Toujours plus haut, toujours plus loin

La plupart des industries de plus de dix ans d'âge ont subi de tels changements de régime. Malgré ses particularités, l'industrie micro-électronique reste soumise aux principes de l'économie et à la loi de l'offre et de la demande. L'histoire des industries techniques anciennes, tels l'aéronautique, le transport ferroviaire et l'automobile, pourrait indiquer les évolutions de la micro-électronique.

Comme cette dernière, l'aéronautique s'est rapidement développée : en une cinquantaine d'années, elle est passée du monoplane de Clément Ader à la *Caravelle*. Comme l'industrie micro-électronique, elle a initialement intéressé l'armée avant de passer aux marchés civils (le transport de courrier et de passagers). Elle a assuré sa croissance en abaissant les coûts du kilomètre-passager parcouru, tout en réduisant la durée des voyages, de sorte qu'elle ressemble à la micro-électro-



4. LA DENSITÉ DE TRANSISTORS SUR LES CIRCUITS INTÉGRÉS CROÎT À UNE VITESSE EXPONENTIELLE. Sur cette courbe logarithmique, on voit que le rythme de la miniaturisation a été maintenu grâce à une succession de procédés lithographiques de plus en plus performants.