

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.

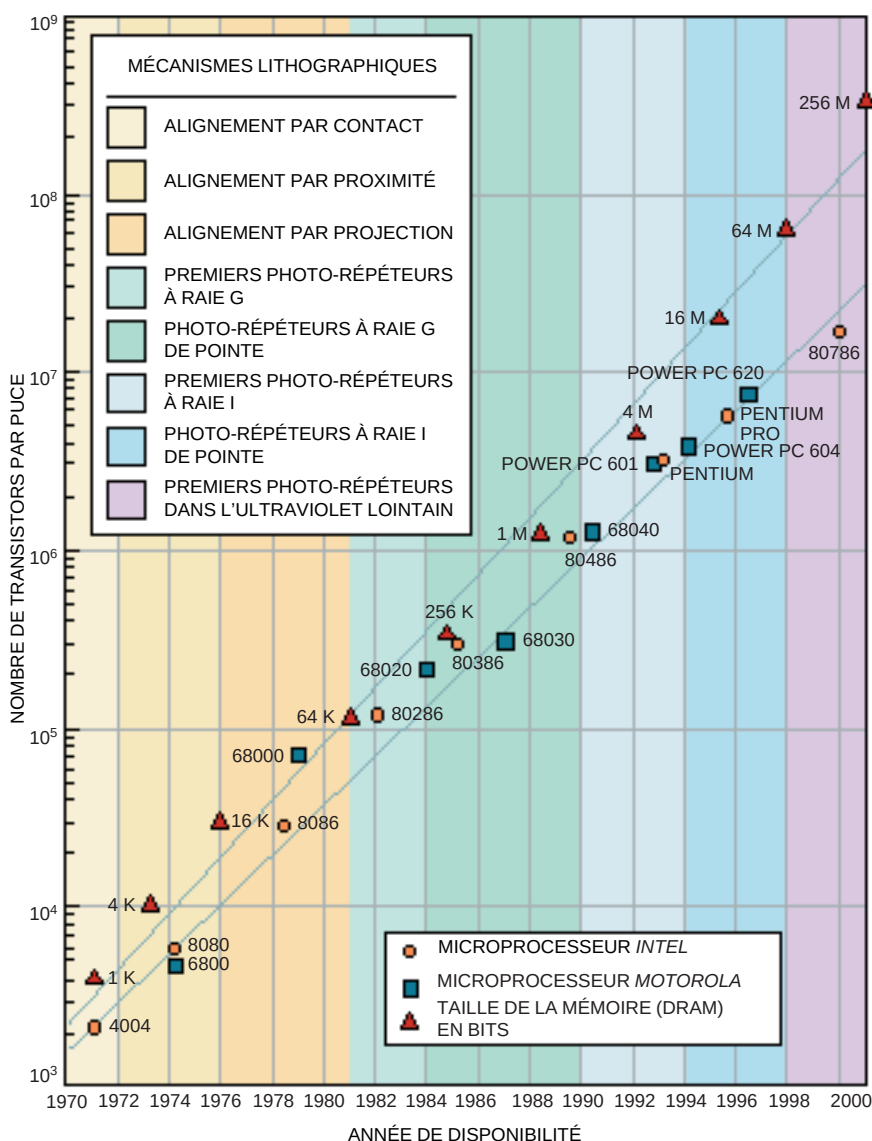
Le prix exorbitant des fonderies est souvent cité comme une indication de la proximité de barrières techniques redoutables. Toutefois, nous pensons que ces barrières ne seront pas infranchissables : l'industrie micro-électronique ne cessera pas de progresser, mais, les prix des semi-conducteurs augmenteront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

nique, qui accroît la densité des transistors et, donc, augmente les performances, tout en abaissant les coûts.

Pendant plusieurs décennies, l'industrie aéronautique a progressé en

centrant ses études sur l'accroissement des vitesses de vol et de la capacité de transport des avions. Ainsi sont nés le *Boeing 747* et le *Concorde*. Bien que le *Boeing 747* ait été techniquement

réussi, l'appareil est difficile à remplir, sauf sur les trajets les plus longs. D'autre part, le *Concorde* a été une faillite économique en raison de sa consommation de carburant et de

Les cycles de profit

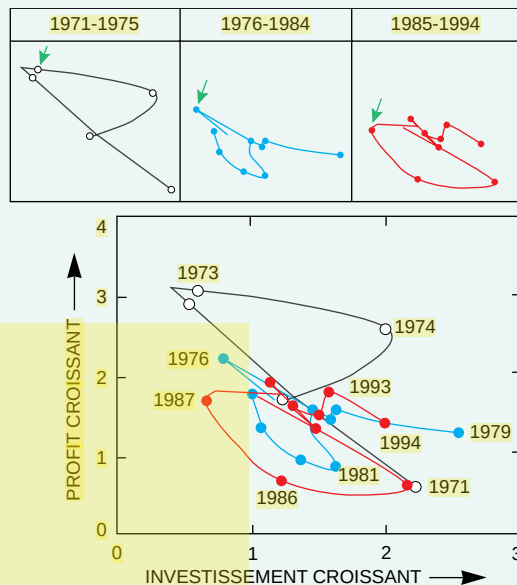
Au cours des 60 dernières années, la plupart des entreprises ont utilisé un modèle économique mis au point juste avant la Première Guerre mondiale pour estimer la rentabilité financière de leurs investissements en matériel, en recherche, en commerce, etc. Ce modèle, dû à Donaldson Brown Du Pont, a été introduit par la Société *General Motors*, lorsqu'elle a cherché à dominer la Société *Ford Motor*.

Aujourd'hui adopté universellement, ce modèle de rendement des capitaux investis est appliqué avec succès dans les industries pour lesquelles le taux de croissance et d'avancées techniques est faible. En revanche, ce modèle n'a, à notre connaissance, jamais bien fonctionné dans le cas d'un secteur tel que l'industrie micro-électronique, où beaucoup des principaux taux de variation – de la performance des produits et du prix de revient du matériel de fabrication, pour n'en citer que deux – sont non linéaires. Cette non-linéarité distingue l'industrie micro-électronique de toutes les autres grandes industries et fait qu'aucun modèle économique classique ne s'applique.

L'industrie micro-électronique doit investir périodiquement des sommes importantes pour la recherche et l'achat de matériel, chaque nouvel investissement étant plusieurs fois supérieur au précédent. De plus, comme pour toute entreprise saine, ces investissements doivent se rentabiliser au bout d'un certain temps. Or, les fabricants de semi-conducteurs n'ont aujourd'hui aucun moyen pour déterminer avec précision quelle proportion de leurs bénéfices provient des investissements techniques. C'est pourquoi, depuis plusieurs années, nous cherchons des méthodes prenant en compte ces éléments non linéaires, afin de modifier le modèle de rendement des capitaux investis.

Dans le modèle classique, on effectue de nouveaux investissements lorsque des écarts se manifestent entre la capacité actuelle d'un fabricant et sa capacité anticipée (cette dernière est la capacité dont une entreprise pense avoir besoin pour faire face à la demande dans un avenir proche). De tels écarts sont habituellement dus à la dépréciation du matériel et aux départs d'employés expérimentés. Dans une industrie telle que la micro-électronique, au contraire, on doit anticiper continuellement les accroissements de capacité, mais aussi prévoir et planifier les progrès importants des techniques de fabrication.

Pour prendre en compte cet effet d'entraînement technique, nous avons commencé par considérer le quotient de la somme d'argent produite au cours d'une année par les investissements pour



CE DIAGRAMME DE PHASE montre l'évolution de la relation entre les bénéfices et les investissements techniques de la Société *Intel* au cours de son histoire. Les points représentatifs forment des boucles dont chacune correspond à un cycle d'environ six ans (chaque boucle est représentée par une couleur particulière). Au cours de chaque cycle, la Société *Intel* passe d'une période sans profit, en raison d'investissements importants, à une période de profit engendrée par des investissements moins lourds. Les flèches vertes indiquent l'année du cycle durant laquelle la Société *Intel* a gagné le plus d'argent et dépensé peu en équipement.

les techniques nouvelles effectuées l'année précédente. Par technique nouvelle, nous entendons aussi bien du nouveau matériel de fabrication que la recherche et les études d'industrialisation. Les bénéfices produits au cours de l'année sont le profit brut produit par l'exploitation, y compris l'argent réinvesti pour la recherche.

Ce quotient mesure le profit différentiel rapporté aux investissements différentiels de l'année précédente. Il indique l'état de santé économique de l'entreprise, en ce qui concerne les bénéfices engendrés par les investissements dans des techniques toujours plus coûteuses. Le modèle de rendement des capitaux investis, au contraire, mesure le profit différentiel annuel produit, non seulement par les investissements de l'année précédente, mais par tous les investissements, quels qu'ils soient.

Jusqu'ici, nous avons groupé le nouveau matériel et les études dans la catégorie des techniques nouvelles, mais l'effet d'entraînement technique devient plus frappant lorsqu'on distingue ces deux catégories et que l'on met en évidence leurs relations. On peut notamment calculer la proportion de ces deux investissements et tracer la courbe montrant la variation de cette proportion en fonction du quotient de la somme produite au cours d'une année donnée par les investissements en techniques nouvelles au cours de l'année précédente. La figure ci-dessus reproduit une telle courbe pour la Société *Intel*.

Plusieurs aspects intéressants de l'histoire financière d'*Intel* apparaissent sur ce « diagramme de phase ». En reliant les points représentatifs, on obtient des boucles dont chacune correspond à un cycle d'environ six ans, au cours duquel la Société *Intel* passe d'un état peu profitable, en raison de gros investissements, à un état d'excellents bénéfices, en raison d'investissements plus légers. Le diagramme montre qu'*Intel* aborde maintenant une nouvelle période de gros investissements. D'autres sociétés microélectroniques et des sociétés qui vendent des produits à la pointe de la technique ont des cycles analogues. La chronologie des périodes de bénéfices et des périodes d'investissements varie selon les sociétés.

Le minimum de chaque boucle est inférieur à celui de la boucle précédente. Cette observation, peut-être la plus remarquable qu'on puisse tirer de cette figure, signifie que les bénéfices d'*Intel*, rapportés aux dépenses en capital qui les ont produits, diminuent de cycle en cycle. Ce diagramme de phase, qui montre le cycle complet allant des investissements techniques à leurs résultats, est un outil puissant pour observer et gérer les cycles d'investissements propres à cette industrie dynamique.