

Par quels mécanismes un régime hypocalorique diminue-t-il la production de radicaux libres? On l'ignore, mais on suppose que, lorsque l'apport calorique est limité, les mitochondries de toutes les cellules ou d'une partie d'entre elles consomment moins d'oxygène ou l'utilisent de façon plus efficace, limitant la production de radicaux libres par unité d'oxygène consommée.

Et l'homme?

Les médecins ne préconiseront pas de régime hypocalorique draconien tant qu'ils ne seront pas convaincus par des expériences rigoureuses menées sur des primates. Néanmoins, ils donnent déjà quelques conseils : toute restriction alimentaire serait préjudiciable aux enfants, puisqu'elle retarde la croissance chez les rongeurs. De plus, les enfants supportent moins bien le jeûne que les adultes, et ils seraient plus sensibles aux effets négatifs potentiels d'un régime hypocalorique (même si la restriction calorique n'est pas équivalente au jeûne). En revanche, un régime hypocalorique commencé vers l'âge de 20 ans devrait allonger la durée maximale de vie.

De combien devrait-on réduire l'apport calorique? Lors des premières expériences, les rats qui commençaient leur régime à l'âge adulte ne vivaient pas plus longtemps que les autres, sans doute parce qu'ils étaient mis trop rapidement au régime ou parce que ce régime était trop strict. Nous avons montré qu'une diminution progressive de l'apport calorique jusqu'à 65 pour cent de sa valeur usuelle augmentait la survie de souris âgées de un an.

Comment déterminer l'apport calorique optimal pour notre espèce? Une extrapolation des résultats obtenus sur des rongeurs est difficile, mais diverses observations indiquent que de nombreuses personnes se porteraient bien en réduisant leur poids de 10 à 15 pour cent par rapport à leur «valeur d'équilibre». La détermination du poids de référence de chaque individu est difficile et, plutôt que d'essayer de l'estimer, les personnes qui se soumettraient à un régime hypocalorique devraient (avec l'aide de leur médecin) trouver par approximations successives l'apport calorique qui abaisse leur glycémie ou leur concentration en cholestérol, ou qui modifie d'autres paramètres liés à l'état de santé.

Les recherches faites sur les animaux montrent qu'un régime hypocalorique raisonnable pour l'homme correspondrait à un apport quotidien de un gramme de protéines et d'un demi-gramme environ de lipides par kilogramme de poids corporel. On ajusterait la quantité de glucides complexes (les longues molécules formées par enchaînement de sucres simples), afin d'obtenir la quantité de calories voulue. Pour obtenir les doses nécessaires en éléments nutritifs indispensables, on devrait choisir avec soin les aliments à consommer et ajouter notamment des vitamines.

Les personnes qui suivraient des régimes hypocaloriques devraient être suivies par un médecin, car ces régimes ont des inconvénients pires que la seule sensation de faim : la perte de poids qui résulterait du régime très strict provoquerait des stérilités, en bloquant l'ovulation ; de surcroît, un état anovulatoire prolongé, accompagné d'une diminution de la production d'œstrogènes, risque d'augmenter les risques d'ostéoporose (la raréfaction du tissu osseux) et de fonte de la masse musculaire au cours de la vieillesse. Enfin, les régimes trop stricts risquent de diminuer la résistance à divers stress, par exemple aux infections. La résistance aux stress n'ayant guère été étudiée chez les rongeurs soumis à un régime hypocalorique, on en ignore les conséquences.

Il faudra peut-être encore 10 ou 20 ans pour que les biologistes sachent si la restriction calorique est aussi bénéfique pour l'homme qu'elle l'est pour le rat, pour la souris et pour divers autres animaux. D'ici là, on comprendra mieux les mécanismes du vieillissement et l'on aura peut-être trouvé des moyens de le retarder, par des régimes, par des médicaments ou par tout autre méthode qui reste à découvrir.

Richard WEINDRUCH, professeur de médecine, dirige l'Institut de recherches sur le vieillissement de Madison.

Richard WEINDRUCH et Roy L. WALFORD, *The Retardation of Aging and Disease by Dietary Restriction*, Charles C. Thomas, 1988.

Free Radicals in Aging, sous la direction de Byung P. Yu, CRC Press, 1993.

Modulation of Aging Processes by Dietary Restriction, sous la direction de Byung P. Yu, CRC Press, 1994.

Le futur de la micro-électronique

DAN HUTCHESON • JERRY HUTCHESON

La fin de la croissance de l'industrie micro-électronique pourrait obliger les fabricants de circuits intégrés à proposer plus de variété.

Depuis l'utilisation des premières tablettes d'argile, à Sumer, la mise au point de nouveaux moyens de stockage de l'information bouleverse les systèmes juridiques, politiques et sociaux. La science moderne, également, se développe en symbiose avec le traitement de l'information : les progrès scientifiques permettent le stockage, la lecture et le traitement de volumes croissants d'informations, qui donnent, en retour, les bases nécessaires à de nouveaux progrès.

Au cours des dernières décennies, la micro-électronique est devenue une force motrice cruciale de l'entreprise scientifique, inaugurant une ère nouvelle. Les circuits intégrés sont à l'origine des ordinateurs personnels, qui ont transformé le monde des affaires ; ils sont utilisés dans des systèmes de commande qui permettent aux moteurs et aux machines de fonctionner de façon plus propre et plus efficace, et ils sont au cœur d'appareils médicaux qui contribuent à sauver des vies. Ce faisant, ils ont engendré une industrie dont le chiffre d'affaires atteint plusieurs centaines de milliards de francs et qui emploie des millions de personnes. Tous ces avantages, et bien d'autres, résultent principalement des efforts de miniaturisation : l'industrie micro-électronique n'a cessé de placer de plus en plus de transistors sur les puces, à des coûts de plus en plus faibles.

Cette miniaturisation est si régulière qu'elle sert de base aux raisonnements qui président aux développements industriels. Néanmoins, des experts ont craint que des obstacles techniques et économiques ne ralentissent le rythme

du développement : physiciens, chimistes ou ingénieurs, les Cassandres qui annonçaient l'imminence d'une fin de la croissance ont été contredits par la créativité et par l'ingéniosité de leurs pairs.

Pourtant, ne sommes-nous pas, cette fois, au seuil d'une mutation ? Le coût d'une nouvelle usine avoisine aujourd'hui les dix milliards de francs, et la densité des transistors approche les limites théoriques des techniques utilisées. Aussi peut-on se poser la question : qu'advient-il de cette industrie lorsqu'elle se trouvera finalement face à des barrières techniques infranchissables ?

De plus en plus de transistors

En 1964, six ans après l'invention du circuit intégré, Gordon Moore, cofondateur de la Société *Intel*, en 1968, observa que le nombre de transistors placés sur les puces doublait chaque année et il prédit que ce doublement se poursuivrait. Ce phénomène, aujourd'hui nommé loi de Moore, a eu des conséquences d'une grande portée.

Comme les doublements de densité avaient lieu sans augmentation du prix, le coût par transistor diminuait chaque année de moitié. Avec deux fois plus de transistors, une puce mémoire stocke deux fois plus de données. Les microprocesseurs sont composés d'un nombre sans cesse croissant d'unités fonctionnelles qui, moins espacées, interagissent plus vite. Ces progrès ont donc donné aux utilisateurs une plus grande puissance de calcul pour un coût égal, stimulant ainsi les ventes de

puces et la demande d'une puissance toujours plus grande.

Au grand étonnement de beaucoup d'experts – G. Moore compris –, la miniaturisation se poursuivait rapidement. À la fin des années 1970, la progression avait un peu ralenti (le nombre de transistors doublant seulement tous les 18 mois), mais ce rythme s'est maintenu depuis, aboutissant à des circuits intégrés qui comportent aujourd'hui plus de six millions de transistors. Les composants électroniques de ces puces mesurent 0,35 micromètre (ou millionième de mètre) de large. Dans quelques mois, les circuits intégrés qui seront commercialisés comporteront dix millions ou plus de transistors qui ne mesureront que 0,25, voire 0,16 micromètre de large.

Contrairement à ce que laisse penser la loi de Moore, le chemin menant à la puce d'aujourd'hui n'a pas été régulier. À plusieurs reprises, les fabricants de puces ont dû surmonter d'importantes limitations de leurs appareils et de leurs procédés de fabrication. Aucun de ces problèmes n'a été l'obstacle redouté dont la solution aurait été si coûteuse qu'elle aurait ralenti ou même arrêté la progression, conduisant cette industrie à la ruine. Néanmoins, les difficultés sont devenues de plus en plus grandes, pour des raisons liées aux techniques de fabrication des semi-conducteurs.

On obtient les circuits intégrés en façonnant des transistors interconnectés sur un disque de silicium. La fabrication consiste en une série d'étapes, nommées «niveaux de masquage», où des films de matériaux variés – dont certains sont photosen-

sibles – sont placés sur le silicium et exposés à la lumière. Après ces étapes de dépôt et de lithographie, on attaque sélectivement les zones photoactives ou, au contraire, les couches inertes, afin d'obtenir des motifs qui, une fois alignés et combinés avec ceux des autres couches, forment les transistors et leurs connexions. Habituellement, on fabrique plus de 200 puces sur un mince disque de silicium, ou galette (voir la figure 2).

Dans une première série de niveaux de masquage, on dépose des films d'oxyde isolants afin de fabriquer les transistors. Ensuite, on coule sur ces films un enduit photosensible que l'on expose avec un «photo-répéteur», un appareil semblable aux agrandisseurs photographiques ; la lumière traverse un motif nommé masque, qui est composé de parties opaques et de parties transparentes. Après exposition de la résine photosensible, un développement délimite les «trous de contact», où les différentes couches conductrices sont interconnectées : une étape de gravure dans le film d'oxyde établit des contacts électriques entre les transistors, puis la résine est éliminée.

D'autres étapes de photogravure, analogues à la première, permettent de fabriquer les films conducteurs de métal ou de silicium microcristallin qui relient les transistors. La fabrication d'un circuit intégré nécessite une vingtaine d'étape.

Les phénomènes physiques utilisés lors de cette fabrication pourraient limiter les efforts de miniaturisation. L'un de ces obstacles est le critère de Rayleigh, ainsi nommée d'après John William Strutt, troisième baron de Rayleigh, qui obtint le prix Nobel de physique en 1904 : la dimension des plus petits détails pouvant être résolus par un système optique d'ouverture circulaire est proportionnelle au quotient de la longueur d'onde de la source lumineuse par l'ouverture de l'objectif. Autrement dit, plus les longueurs d'onde sont petites et plus l'ouverture est grande, meilleure est la résolution.

Cette loi indique la dimension minimale des transistors que l'on peut placer sur une puce. La source de lumière dont on se sert le plus souvent pour la lithographie des circuits intégrés est la lampe à vapeur de mercure, dont deux rayonnements sont utilisés : la raie g du mercure, à une longueur d'onde de 0,436 micromètre, et la raie i, à une longueur d'onde de

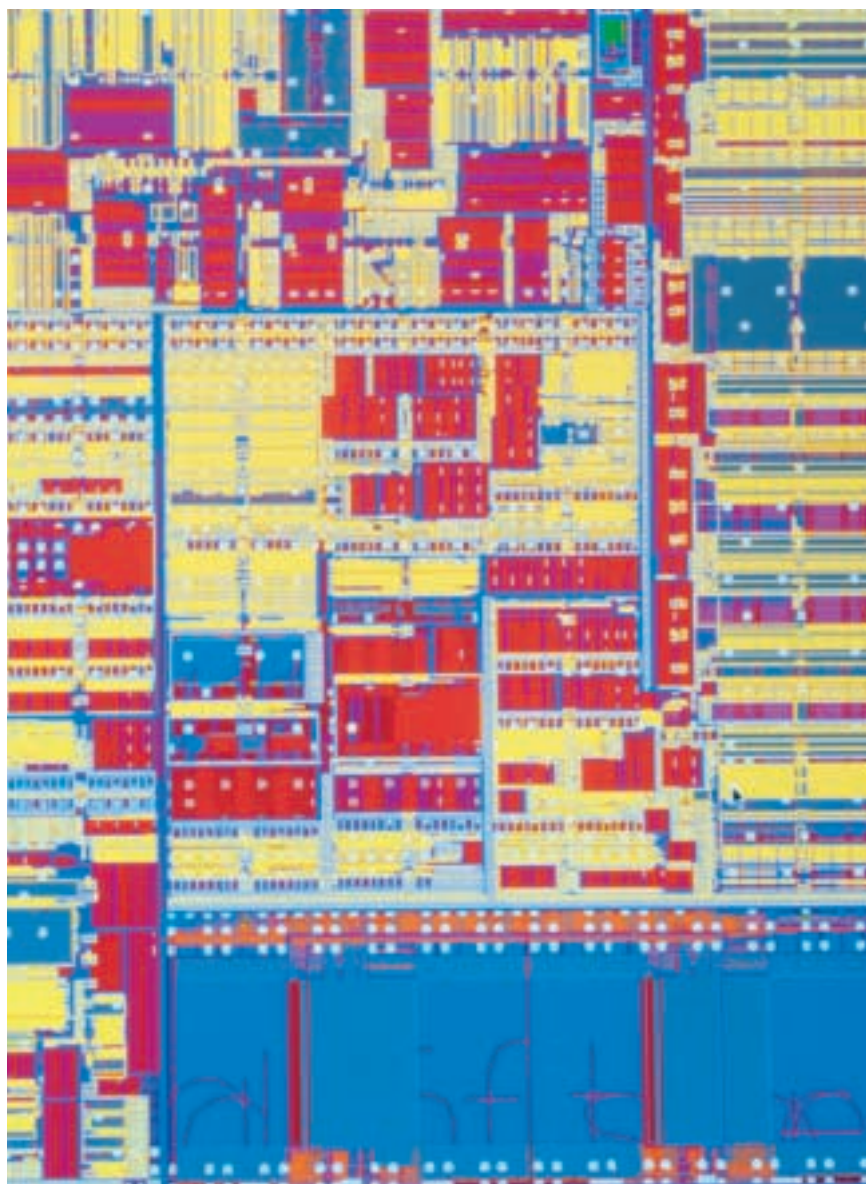
0,365 micromètre. La première est visible, tandis que la seconde est située dans l'ultraviolet proche. Les ouvertures utilisées sont comprises entre 0,28 micromètre pour les lentilles de qualité courante et 0,65 micromètre pour celles des systèmes lithographiques de pointe. Avec ces valeurs, et dans les conditions particulières qu'impose la fabrication en série, la résolution limite est d'environ 0,54 micromètre pour les lentilles utilisées avec la raie g, et de 0,48 micromètre pour celles qui sont utilisées avec la raie i.

Jusqu'au milieu des années 1980, on pensait que la raie g était la seule utilisable en pratique, mais on a progressivement levé les obstacles à l'utilisation de la raie i. L'histoire de ce

progrès illustre la complexité des relations qui existent, dans l'industrie, entre l'économie et la technique : non seulement les difficultés techniques ont été résolues, mais on a alors découvert que d'autres barrières n'étaient que des conséquences du niveau de risque que des entreprises considéraient comme tolérable. Cette histoire se répète aujourd'hui, alors que l'industrie micro-électronique commence à être gênée par les limites pratiques imposées par l'utilisation de la raie i.

Le spectacle doit-il continuer ?

La raie i semblait naguère inutilisable, parce que les verres classiques



1. LES SCHÉMAS DE CIRCUIT permettent aux concepteurs de s'y retrouver dans les plans des puces. Sur ce schéma d'une partie du prochain microprocesseur de Motorola, le Power PC 620, les différentes couches sont représentées par des couleurs distinctes.

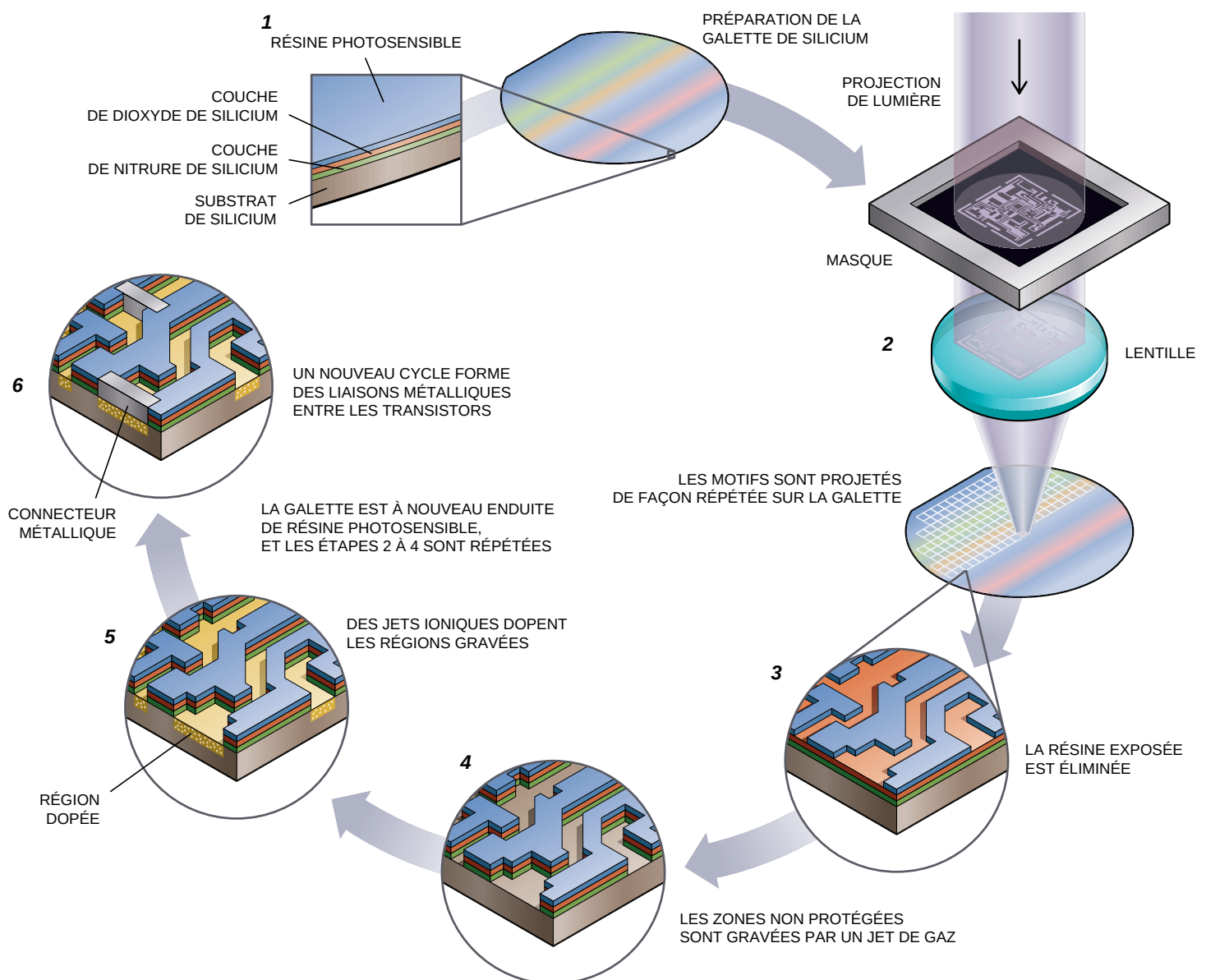
sont opaques aux ultraviolets, ce qui oblige à utiliser des lentilles de quartz. On pensait initialement que, même si l'on avait pu fabriquer des lentilles de quartz appropriées, on aurait difficilement vérifié l'alignement de motifs invisibles. En outre, comme 70 pour cent seulement de la raie i traverse le quartz, on craignait que l'énergie lumineuse absorbée ne chauffe la lentille, ce qui aurait déformé l'image.

D'autres difficultés semblaient condamner les progrès. Le critère de Rayleigh détermine aussi la profondeur de champ ; or plus la profondeur de champ est faible, meilleure est la résolution. Pour les meilleures lentilles uti-

lisées avec la raie g, la profondeur de champ est d'environ 0,52 micromètre et, pour celles de la raie i, de 0,50 micromètre. D'aussi faibles profondeurs de champ nécessitent des galettes de silicium beaucoup plus planes que celles qui étaient produites il y a quelques années, avec les meilleurs appareils alors disponibles.

Des innovations ont résolu ces problèmes. Des méthodes d'aplanissement ont procuré des surfaces optiquement planes, et la limite de Rayleigh a été dépassée grâce à des réglages fins aux bords des motifs, dans le masque ; en changeant la phase des rayonnements de la raie i, on a

obtenu une meilleure définition des bords et, donc, des détails de gravure plus fins. Enfin, comme la constante de proportionnalité entre la longueur d'onde et la résolution dépend du contraste de l'image projetée sur la galette de silicium au cours de la lithographie, les fabricants ont dû admettre, à contrecœur, une constante de proportionnalité inférieure à celle qui semblait nécessaire. En contrepartie, afin de conserver une proportion faible de défauts, ils ont dû réduire les tolérances des opérations de lithographie, de dépôt et de gravure. Ces innovations permettent aujourd'hui l'utilisation de la raie i pour la réalisation



2. LA FABRICATION DES PUCES consiste en un cycle qui peut être répété jusqu'à 20 fois. Un grand nombre de puces sont fabriquées simultanément sur une galette de silicium enduite d'un revêtement photosensible (1). Chaque cycle commence par la projection répétée d'un nouveau motif sur la galette (2). À l'endroit où se forme une image correspon-

dant à une puce, l'enduit photosensible est dissous (3), puis les zones exposées sont attaquées par des gaz (4). Ces zones sont ensuite dopées par des ions, conduisant à la formation de transistors (5). Ces transistors sont reliés entre eux à mesure que de nouveaux cycles ajoutent des couches de métal et d'isolant (6).

de transistors de 0,35 micromètre de côté.

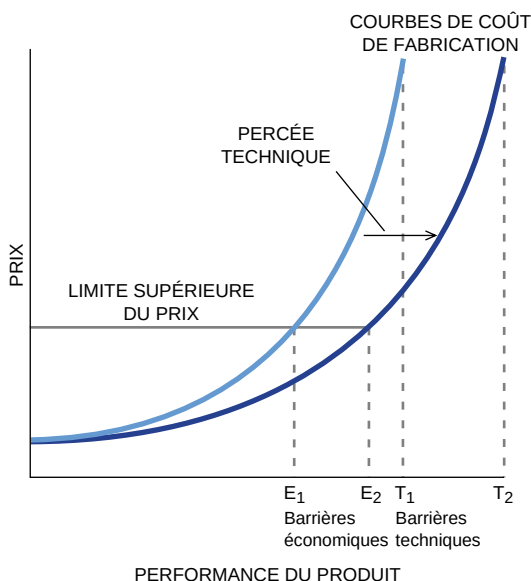
Au cours de tous ces développements, l'enjeu était la diminution du contraste que les entreprises étaient prêtes à tolérer. Lorsque le contraste est parfait, l'image créée sur la résine photosensible est nette. Comme tant d'autres limitations dans l'industrie, le contraste semblait techniquement fondamental, 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 T₁ et T₂ 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 (E₁ et E₂) 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 E₂ et T₂.

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.

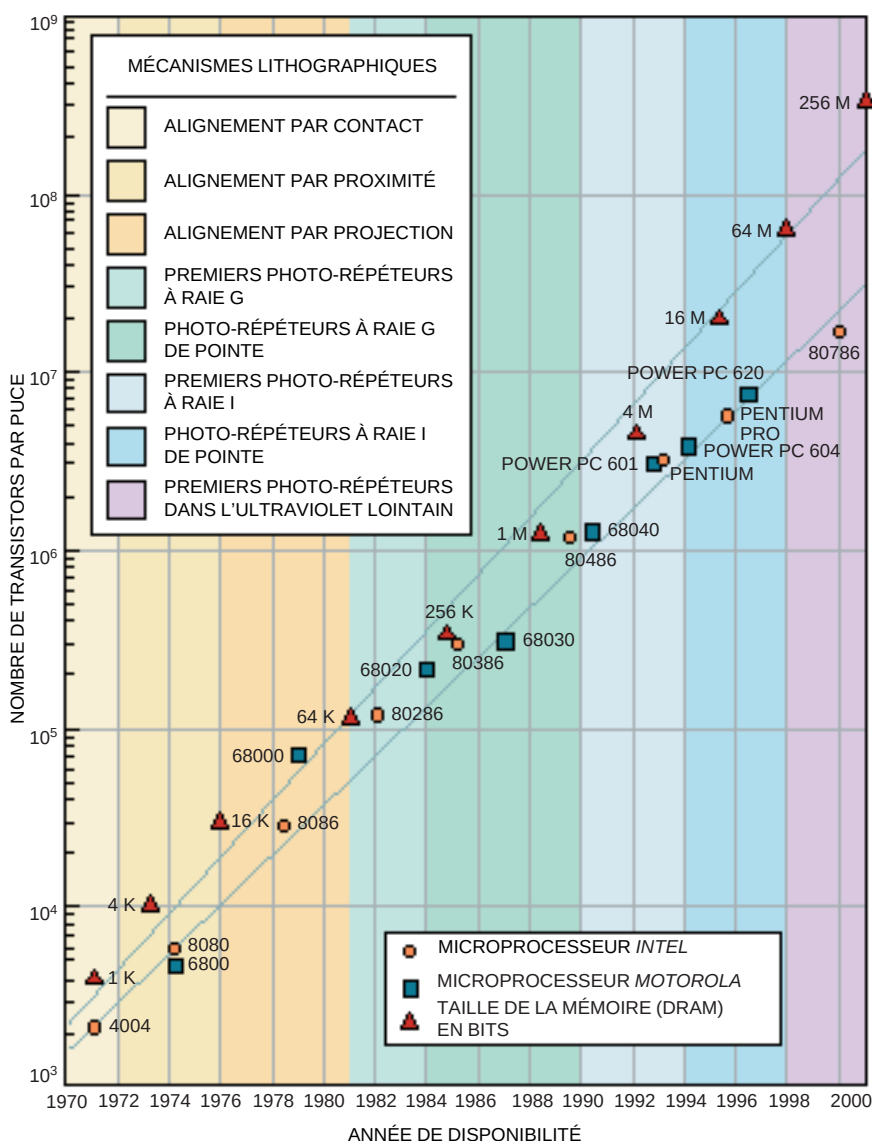
Le prix exorbitant des fonderies est souvent cité comme une indication de la proximité de barrières techniques redoutables. Toutefois, nous pensons que ces barrières ne seront pas infranchissables : l'industrie micro-électronique ne cessera pas de progresser, mais, les prix des semi-conducteurs augmenteront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

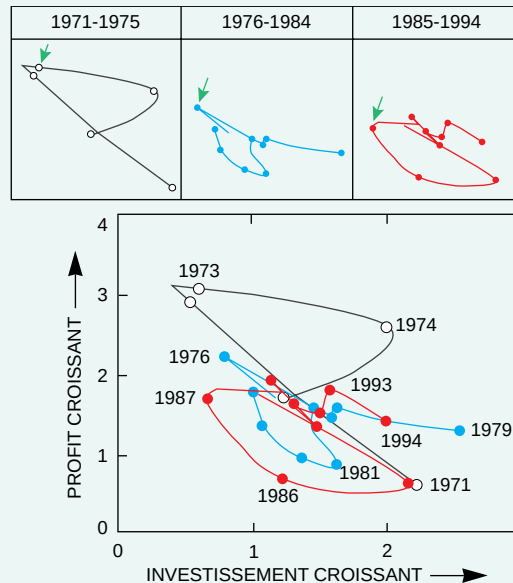
Au cours des 60 dernières années, la plupart des entreprises ont utilisé un modèle économique mis au point juste avant la Première Guerre mondiale pour estimer la rentabilité financière de leurs investissements en matériel, en recherche, en commerce, etc. Ce modèle, dû à Donaldson Brown Du Pont, a été 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 mon-

trant 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.

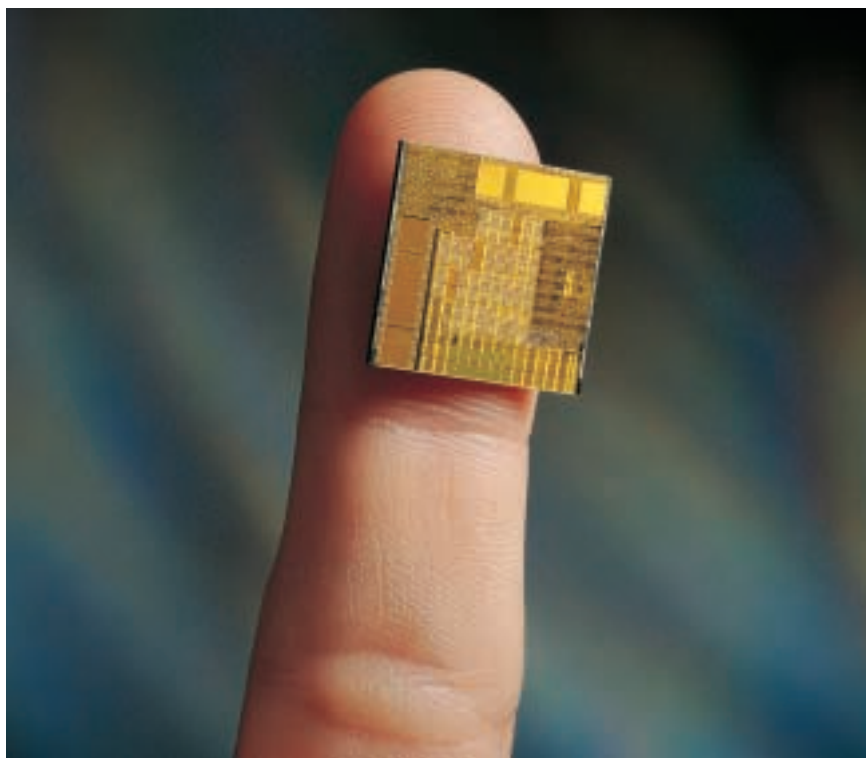
son bruit. Tous deux correspondaient à des limites ; leur échec relatif démontra que la technique ne pouvait pas offrir, de façon réaliste, plus de capacité de transport ou de vitesse. Néanmoins, l'aéronautique n'a pas... décroché. Elle est entrée dans une deuxième phase, les constructeurs mettant au point des avions plus petits, mais variés, adaptés à des marchés plus spécifiques. Les ingénieurs ont surtout cherché des avions qui consomment moins et dont le confort est accru.

Dans l'industrie ferroviaire, l'évolution fut analogue. Du XIX^e siècle jusqu'au milieu des années 1970, les ingénieurs ont continuellement augmenté la puissance des locomotives, afin de réduire les coûts du transport de marchandises. Le coût des locomotives était important, mais il augmentait moins vite que la puissance de traction. Finalement le coût de mise au point des locomotives a tant augmenté que les constructeurs et les exploitants se sont groupés. La plus grande compagnie ferroviaire américaine de l'époque, l'Union ferroviaire du Pacifique, s'est associée à la division ferroviaire de la *General Motors*, afin de construire la locomotive *EMD DD-40*, un monstre énorme qui ne put être utilisé qu'à transporter des marchandises à travers les États-Unis. Cette faillite a conduit l'industrie ferroviaire à la réutilisation d'engins plus petits et plus flexibles.

Aujourd'hui, la micro-électronique est dans une situation analogue à celle des compagnies ferroviaires américaines juste avant la locomotive *EMD DD-40*. La construction des fonderies de puces des générations futures est si coûteuse que les industriels ont commencé à s'associer en différents groupes, chacun attaquant, par sa propre méthode, l'immense problème posé par la fabrication rentable de ces puces denses.

Des grandes usines, mais peu de choix

L'histoire de l'industrie automobile est également riche en enseignements. Dans les années 1920, Henry Ford a construit une série d'usines dont chacune avait un meilleur rendement que les précédentes. L'aboutissement fut l'immense usine de Rouge, d'où les premiers exemplaires du *Modèle A* sortirent en 1928. Cette installation par-



5. LE MICROPROCESSEUR Power PC 620 de la Société Motorola contient sept millions de transistors. Abrité par un boîtier en céramique, il sera utilisé principalement par les stations de travail et les serveurs de fichiers.

tait du minerai de fer, fondait la plupart des pièces nécessaires aux automobiles et assemblait ces dernières. Cependant l'industrie automobile avait déjà évolué, et les efforts de Ford pour diminuer le prix de revient en construisant des usines plus grandes et plus rentables se faisaient aux dépens de la variété des produits : ses adversaires se moquaient de lui, disant que les clients pouvaient choisir une voiture de n'importe quelle couleur, pourvu qu'elle soit noire.

L'industrie automobile évolua notamment parce qu'elle voulut proposer plus de confort, un plus grand nombre d'options et de modèles. Quand la Société *General Motors* comprit que le rendement n'augmentait plus avec la taille des usines et que les grandes usines étaient surtout utiles pour la fabrication d'un seul produit à un grand nombre d'exemplaires, elle sépara sa société en divisions aux marchés bien définis, desservis par des usines spécialisées. Le plus grand choix de modèles qui en résulta eut les faveurs du public américain et, bientôt, la part de marché de *General Motors* s'accrut aux dépens de celle de *Ford*.

Le même phénomène se retrouve aujourd'hui en micro-électronique.

Alors qu'au début des années 1980 la Société *Intel* proposait trois versions de son microprocesseur *8086* et deux versions de son *8088*, elle propose aujourd'hui plus de 30 variantes du microprocesseur *486*. Les puces mémoires se diversifient également : le nombre de configurations DRAM de quatre mégabits proposées par la Société *Toshiba* est 15 fois supérieur à celui des DRAM de 64 kilobits en 1984.

Les industries, du chemin de fer à la micro-électronique, ont en commun une phase initiale, dominée par des efforts pour améliorer les rendements et diminuer les prix de revient. Dans le cas des trois industries de transport, qui sont beaucoup plus évoluées, la deuxième phase a été caractérisée par le perfectionnement et la diversification des produits ; la micro-électronique semble atteindre ce stade. L'effort technique des entreprises se déplace de la diminution des coûts de fabrication vers l'amélioration des gammes de produits. Notons que toutes ces industries ont continué à prospérer, malgré l'augmentation des coûts de fabrication.

L'industrie micro-électronique arrivera bientôt à un palier. Le rythme de la miniaturisation ralentira, tandis que

les coûts de fabrication grimperont en flèche. Comme l'indique l'histoire des industries aéronautique, ferroviaire et automobile, l'industrie micro-électronique pourrait s'épanouir à la rencontre de barrières économiques et techniques sans précédent et, dans une large mesure, infranchissables : dans une industrie arrivée à maturité, la croissance proviendra à coup sûr des produits perfectionnés dans des gammes plus diversifiées.

Le stockage de l'information continuera de progresser. Un ralentissement de la miniaturisation des composants pourrait avoir des avantages inattendus, en permettant notamment l'assimilation des progrès par des développements en matière d'architecture des ordinateurs ou de programmation. Même dans l'industrie micro-électronique, la maturité peut être un atout merveilleux.

Jerry HUTCHESON a créé en 1976 la Société *VLSI Research*, que son fils, Dan HUTCHESON, a rejointe en 1979. Ce dernier fait partie du Conseil des applications de l'Université de Berkeley.

Laurent BENZONI, *Le rythme de l'innovation : l'anomalie de l'industrie des circuits intégrés*, Communication et Stratégies-IDATE, 1991.

Jean-Philippe DAUVIN, *Les semi-conducteurs*, Collection Cyclope, Éditions Economica, Paris, 1992.

Jerry D. HUTCHESON et G. Dan HUTCHESON, *Is Semiconductor Manufacturing Equipment Still Affordable ?*, in *Proceedings of the 1993 International Symposium on Semiconductor Manufacturing*, Institute of Electrical and Electronics Engineers, septembre 1993.

SIA 1994 National Technology Roadmap for Semiconductors, Semiconductor Industry Association, 1994.

Gordon E. MOORE, *Lithography and the Future of Moore's Law*, in *SPIE Proceedings on Electron-Beam, X-Ray, EUV, and Ion Beam Lithographies for Manufacturing*, vol. 2437, février 1995.

Gary STIX, *Toward Point One*, in *Scientific American*, vol. 272, n° 2, pp. 90-95, février 1995.

Donald A. HICKS et Steven BROWN, *Affordability Concerns in Advanced Semiconductor Manufacturing : The Nature of Industrial Linkage*, in *Proceedings of the 1995 International Symposium on Semiconductor Manufacturing*, Institute of Electrical and Electronics Engineers, septembre 1995.
