

De la machine-outil à la mécatronique : les enjeux de la compétitivité

Jean-Raphaël Chaponnière *

Depuis dix ans, l'évolution du marché de la machine-outil s'est traduite par la baisse des ventes de machines traditionnelles, relayées par la progression des machines-outils à commandes numériques. Cet article retrace les bouleversements récents qu'a connus cette industrie située au cœur des mutations technologiques qui ont affecté la mécanique, l'électronique et les matériaux. Il dresse le panorama de la production actuelle ainsi que des forces et faiblesses des principaux acteurs : le maintien de l'Europe comme premier producteur et exportateur mondial grâce surtout à l'Allemagne, la Suisse et l'Italie ; le recul des Etats-Unis où les importations représentent 52 % du marché national en 1989 contre 26 % en 1980 ; la percée des producteurs japonais devenus les deuxièmes exportateurs mondiaux en ayant su adapter et commercialiser la technologie de la commande numérique acquise au départ aux Etats-Unis. Après avoir examiné comment le secteur de la machine-outil s'est adapté dans chacun de ces pays en terme de production, cette étude aborde l'analyse de sa diffusion dans le tissu industriel et les difficultés rencontrées pour introduire ces nouveaux équipements dans les entreprises.

Les analyses sur l'industrie de la machine-outil commencent souvent par un paradoxe : cette industrie dont tous s'accordent à reconnaître le rôle stratégique ne pèse pratiquement pas dans la production, l'emploi et les échanges, moins d'un demi point de PIB dans les principaux pays producteurs. Ce contraste devrait s'accroître avec le temps. En effet, la machine-outil disparaît en tant qu'équipement mécanique pour devenir le cœur d'un nouveau secteur, la mécatronique que les statistiques ont du mal à saisir (encadré 1).

* Jean-Raphaël Chaponnière est ingénieur de recherche-CNRS, à l'Institut de recherche sur l'économie, la production et le développement, IREPD, université de Grenoble.

L'industrie de la machine-outil en mutation

Les caractéristiques technico/économiques de l'industrie de la machine-outil ont beaucoup évolué depuis dix ans :

Marché : il n'existe pas un marché de la machine-outil mais une centaine de segments de marchés qui diffèrent de par les types de machines, leur spécificité (de la machine sur mesure à la machine catalogue), leur capacité de production (BCG 1985, Frémeaux 1990).

Taille : cette segmentation de la demande et le fait que les entreprises ont souvent été créées par un technicien porteur d'un projet précis, font que l'industrie a été longtemps dominée par des petites et moyennes entreprises et qu'elle était géographiquement très concentrée : la moitié de l'industrie ouest-allemande est dans la région de Stuttgart ; aux Etats-Unis, les centres traditionnels sont autour de Chicago et de Boston ; à Taiwan aux alentours de Tai'Chung. Cette structure évolue. Les leaders japonais ont des tailles très supérieures à celles de leurs concurrents allemands ou américains : le premier fabricant mondial Yamazaki-Mazak emploie 5000 personnes et réalise un chiffre d'affaires de 1.200 millions de dollars.

Economies d'échelle : traditionnellement, l'industrie de la machine outil a été une activité de petites séries à durée de vie longue ; les constructeurs faisaient leur réputation sur un modèle déterminé et les économies d'échelle se réalisaient sur la production cumulée du même modèle (Pratten, 1970). Cette organisation a fonctionné jusqu'à ce que la généralisation de la production modulaire, l'introduction de la CAO et de l'automatisation flexible transforment les conditions de production et offrent aux entreprises de réaliser des économies d'échelle et des économies opportunité (voir note 19) (scope). Alors que le Boston Consulting Group évaluait le volume minimum de production de tours à 400 unités par an en 1985, les constructeurs japonais fabriquent 200 tours conventionnels et 60 tours à commande numérique par mois.

Cycle : la demande de machine-outil est suscitée par les décisions d'investissement des industries utilisatrices (automobile, mécanique générale, aéronautique dans des proportions variées selon les pays), aussi la production est-elle soumise à des fluctuations cycliques qu'expliqueraient les anticipations des industries d'aval. Ces fluctuations sont très fortes aux Etats-Unis où les périodes de récession pour la machine-outil ont été 1969-1971, 1973-1975, 1981-1983 ; elles sont moins marquées en RFA et au Japon qui exportent davantage.

Intensité technologique : les PMI n'ont pas les moyens d'entreprendre des activités de R&D et les plus grandes entreprises ont consacré entre 3 et 5 % de leur chiffre d'affaires à la recherche. L'industrie est caractérisée par la haute qualification de sa main-d'œuvre. Avec la diffusion de l'électronique, la maîtrise de l'interface mécanique/électronique impose d'engager davantage de dépenses de R&D. La recherche est appelée à jouer un rôle plus important que par le passé dans la compétitivité ; les entreprises doivent de plus en plus adapter leurs machines à la demande en développant des logiciels.

Marché international : à l'exception du Japon, les plus grands exportateurs sont aussi les plus grands importateurs, qu'il s'agisse des petits pays fortement spécialisés comme la Suisse ou des grands producteurs comme la RFA, l'Italie et les Etats-Unis. Aucun pays ne couvre l'ensemble de la gamme.

Il en résulte un commerce intra-sectoriel important, mais dont l'intensité dépend de fait du niveau d'agrégation avec lequel on mesure les échanges. On constate en effet que l'offre des différents pays est très spécialisée. Ainsi les fabricants allemands assurent la moitié des exportations de machines à tailler les engrenages, un tiers des meuleuses et des machines qui travaillent par déformation. La RFA et le Japon assurent ensemble 70 % des exportations de centres d'usinage.

C'est parce qu'ils ont été les acteurs de cette mutation qui participe de la mise en place d'un nouveau paradigme technologique, que les Japonais ont percé sur le marché mondial de la machine-outil. La différenciation que l'on constate entre producteurs d'équipements d'automatisation flexible contraste avec la généralisation de la diffusion de ces équipements dans les pays utilisateurs y compris les NPI. Par contre, et en dépit d'un consensus sur les performances des méthodes japonaises d'organisation de la production, il ne semble pas qu'elles se généralisent aussi rapidement que l'utilisation d'équipements flexibles.

L'évolution de la production mondiale

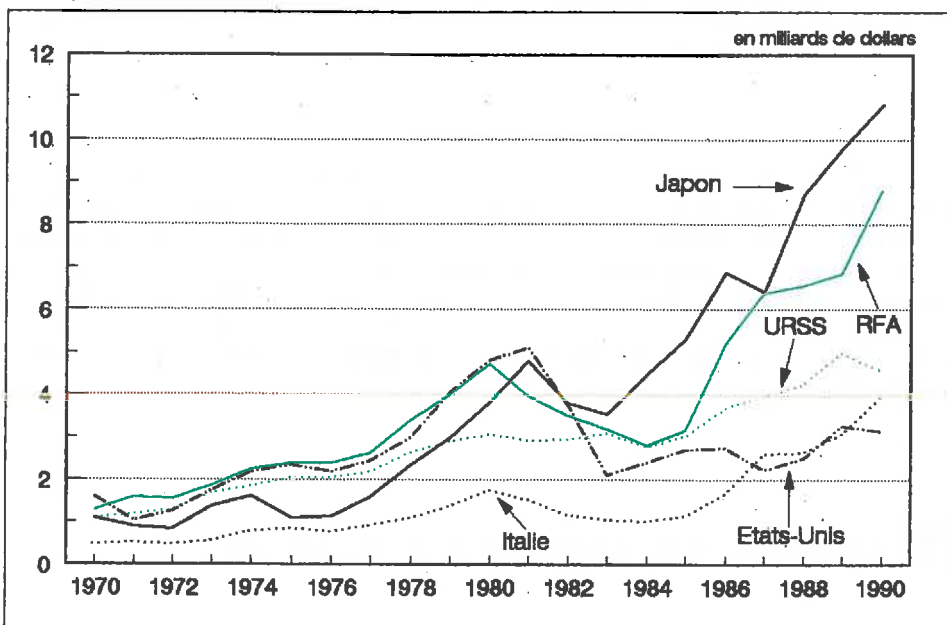
La production mondiale de machines-outils a quintuplé en vingt ans (1970-1990) en dollars courants, ce qui, mesuré en prix constant ¹, correspond à une croissance assez faible. L'évolution de la production aux Etats-Unis, au Japon et en Europe fait apparaître des fluctuations d'ampleurs inégales et, jusqu'en 1982, de périodicités variables selon les pays (graphique 1). Les cycles de la machine-outil ne se sont pas développés de façon synchronique ². La crise de 1981/1983 a par contre affecté tous les pays, exacerbant la concurrence sur les marchés d'exportation. Aucune industrie n'a été épargnée par la récession — la production japonaise a reculé de 30 % — mais son impact a été plus sévère pour les industries les plus fragiles — anglaises et françaises — qui ont eu plus de difficultés à se relever et n'ont pas pu profiter du retournement de cycle à partir de 1985.

1. Une mesure délicate du fait de la transformation des produits avec l'électronique : les premières machines-outils à commande numérique remplaçaient six ou sept machines-outils conventionnelles, et les plus récentes offrent beaucoup plus de possibilités.

2. Contrairement à ce que l'on constate au niveau du cycle des affaires.

GRAPHIQUE 1

Les principaux fabricants de machines-outils



Source : American Machinist

Les pays de l'Europe de l'Est et l'Union soviétique ont occupé jusqu'à maintenant une place singulière. D'après les estimations de la production³, l'URSS se situerait selon les années au second ou troisième rang alors que l'ensemble des pays socialistes assurerait 15 % de l'offre mondiale en 1990. Mais, à l'exception notable de la RDA (cinquième exportateur mondial), cet ensemble est resté à l'écart des échanges internationaux. Les pays socialistes orientaient 80 % de leurs exportations vers les pays du Comecon pour des raisons qui paraissent relever moins d'un souci d'autarcie que d'une difficulté réelle à maîtriser les technologies-clés de la mécanique, difficultés qui ont été aggravées par les mesures restrictives imposées par le règlement du COCOM.

3. Les estimations les plus courantes publiées par l'*American Machinist* reprennent les statistiques du Minstankoprom. Il s'agit des productions recensées par les ministères dont relève directement la machine-outil mais qui ignorent les productions réalisées sous la tutelle d'autres ministères en particulier de celui de la Défense.

L'industrie de la machine-outil présente plusieurs caractéristiques des industries « mûres »⁴ ; certains avaient même annoncé sa délocalisation vers les pays du Sud dans les années soixante-dix⁵. Il n'en a rien été. La production est concentrée dans les principaux pays industrialisés et seul Taiwan et, dans une moindre mesure, la Corée ont réussi à percer sur les marchés internationaux. Cette industrie a en effet été bouleversée par la « fusion technologique » (F. Kodama, 1990) de la mécanique, de l'électronique et de la technologie des matériaux qui a provoqué la « révolution mécatronique ». Aussi depuis dix ans, l'évolution du marché apparaît comme la résultante de deux mouvements opposés : la diminution des ventes de machines conventionnelles et l'essor de celles des machines-outils à commandes numériques (MOCN) qui représentaient (en valeur et en moyenne) 10 % des ventes des grands pays industrialisés en 1978, 20 % en 1985 et 50 % en 1989.

Au début du siècle, huit machines-outils sur dix étaient exportées par l'Allemagne, les Etats-Unis ou la Grande-Bretagne. Après la guerre, et jusqu'en 1960 les machines américaines et anglaises ont dominé le marché. Depuis 1970, l'évolution du classement fait apparaître le maintien de l'Europe à la première place et deux évolutions contrastées : la montée de la production japonaise qui coïncide avec le recul de la production américaine (graphique 2). Ces transformations s'expliquent par des facteurs qui relèvent autant de l'offre (stratégie des entreprises, organisation des structures industrielles, attitude vis-à-vis des innovations, modalités de financement et politique industrielle) que de la demande (évolution des principaux secteurs, exigences technologiques des utilisateurs).

L'Europe au premier rang

La production européenne de machines-outils qui avait diminué au début des années quatre-vingt, a repris depuis 1985 et sa part dans la production mondiale reste constante autour de 37 %. L'Europe conserve ainsi sa position devant le Japon et, en excluant les échanges intra-européens, elle garde sa place de premier exportateur mondial et constitue le plus grand marché. Les pays européens sont la principale source de technologies si l'on en juge par le nombre de brevets déposés dans les domaines liés directement à la machine-outil entre 1982 et 1988 (à l'exception des technologies reposant sur l'utilisation du laser et des céramiques où elle se situe derrière le Japon) (Atkins, 1990). Si l'on en croit le jugement des Japonais⁶, l'Europe qui est un centre d'excellence pour l'ingénierie mécanique, se rapproche du Japon pour la maîtrise de l'électronique sans être toutefois capable d'offrir des machines ayant la même fiabilité à des prix compétitifs.

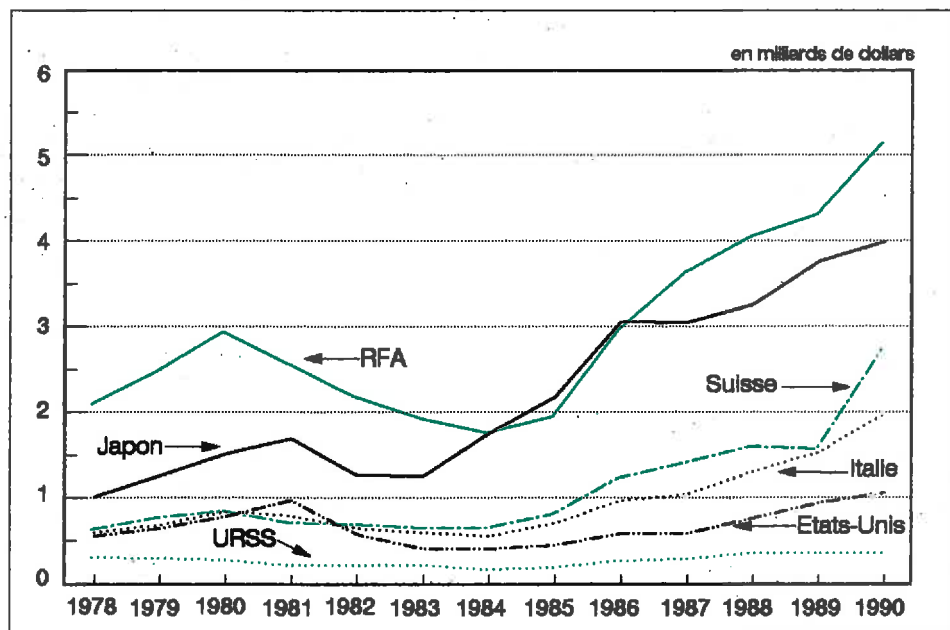
4. Une croissance lente, un faible degré d'innovation, la concurrence des producteurs du Sud. Par contre, contrairement aux industries mûres, elle emploie une main-d'œuvre très qualifiée.

5. D'après une étude de la CEE : les créations de joint-ventures allemandes en Amérique latine se sont multipliées à cette époque.

6. MITI, *The Japanese machine tool industry*, Tokyo, 1989.

GRAPHIQUE 2

Les principaux exportateurs



Source : American Machinist

Cette stabilité tient largement à la solidité de l'industrie allemande, aux positions acquises par l'industrie suisse (cinquième exportateur mondial) qui s'est spécialisée dans plusieurs niches technologiques (machines pour usinage électrochimiques) et au dynamisme de l'Italie, cinquième producteur mondial performant dans les perceuses et aléseuses, où la flexibilité des entreprises a facilité la transition vers la mécatronique.

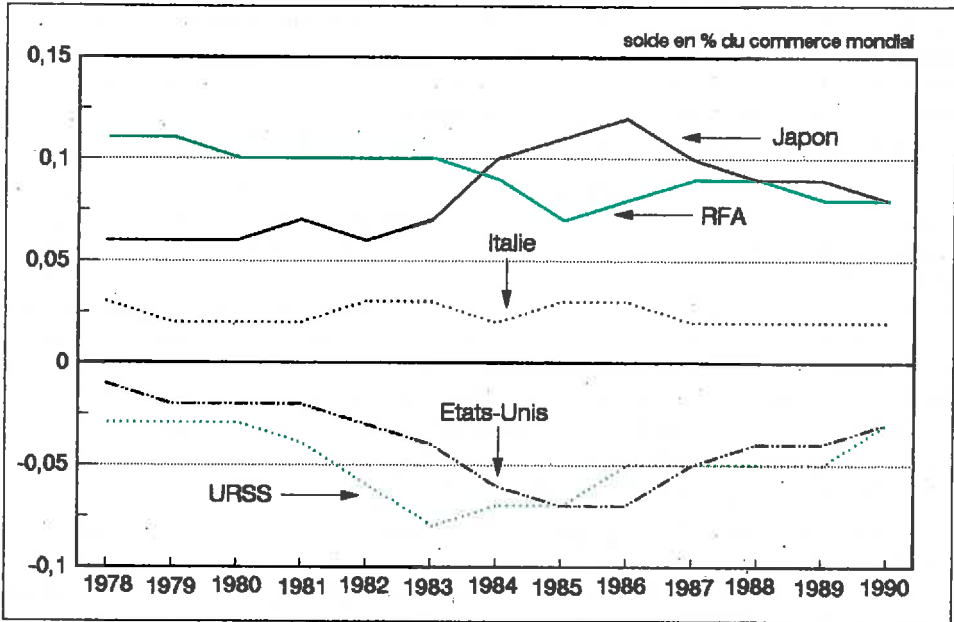
L'Allemagne, « atelier du monde »

L'Allemagne qui dominait l'industrie dès le début du siècle, a retrouvé sa place de premier producteur et de premier exportateur mondial à partir de 1970. La suprématie allemande repose sur la maîtrise des technologies de la mécanique ; aussi les industriels allemands, pris de court par la révolution mécatronique, ont-ils souffert de l'offensive japonaise sur les MOCN standards à la fin des années soixante-dix, mais ils se sont ressaisis. Leur position sur le marché international, mesurée par le solde de ses

échanges rapportée au commerce mondial de machines-outils, qui s'était détériorée jusqu'en 1984, s'est depuis stabilisée à un niveau proche de celui du Japon (graphique 3).

GRAPHIQUE 3

Position sur le marché International de la machine-outil



Source : American Machinist

L'industrie, qui emploie 100 000 personnes, est constituée de 350 entreprises, les « mittelständischen Betriebe » spécialisées sur un type de machine. Ce sont dans leur grande majorité des firmes de taille moyenne, entre 100 et 500 emplois et à capitaux familiaux. La production est toutefois concentrée dans les plus grandes entreprises, qui, spécialisées par famille de produits, sont souvent liés à des sidérurgistes ou à des grands groupes de la mécanique. Les groupes industriels allemands considèrent leurs filiales machines-outils comme des investissements dont la rentabilité doit être appréciée à long terme, aussi acceptent-ils de les soutenir en période de conjoncture ralentie.

La production couvre toute la gamme des machines-outils. Les industriels allemands sont traditionnellement très performants pour certains types de machines (machine à tailler les engrenages par exemple) et d'une façon générale pour les machines spécialisées dont la conception exige que le constructeur entretienne des relations étroites avec l'utilisateur, mais dont la composition peut reposer sur des sous-ensembles relevant de techniques qui n'ont rien de révolutionnaires.

D'une façon générale, le degré de sophistication de la demande est considéré comme un facteur-clé de la compétitivité d'une industrie nationale. Porter (1990) en fait l'un des sommets de son « diamant de la compétitivité » des nations. Cette approche est tout à fait pertinente dans le cas de l'industrie de la machine-outil et permet de rendre compte de la force de l'industrie allemande (et japonaise) qui a bénéficié d'un marché national extrêmement exigeant, alors qu'inversement les utilisateurs américains paraissent s'être moins souciés des performances techniques dans leur choix. Les acheteurs allemands placent les considérations technologiques au premier plan de leurs préoccupations. Une enquête menée en Grande-Bretagne et en Allemagne (1984) a comparé les critères d'achats dans l'un et l'autre pays. Il en ressort que 69 % des industriels allemands placent les performances technologiques au premier rang et n'attachent qu'une importance secondaire aux prix alors que ce n'était le cas que pour 11 % des acheteurs britanniques (Artemis March 1989).

L'Etat n'est pas intervenu directement pour promouvoir l'industrie mais comme le rappelle Colletis (1987), s'il n'existe pas dans l'histoire industrielle allemande d'équivalent au plan sectoriel machine-outil de la France, cela ne signifie pas que le développement de ce secteur-clé de l'industrie allemande se soit réalisé sans soutien public. Ce soutien a été davantage décentralisé ; l'industrie a bénéficié d'une aide importante de la part des Länders qui a pris dans certains cas une forme d'intervention très directe⁷. Au niveau fédéral, l'action de l'Etat a consisté à faciliter la sous-traitance avec les constructeurs est-allemands et à favoriser l'articulation entre les entreprises et les centres de recherche. En effet, et c'est une spécificité allemande, la profession entretient des relations de coopération étroite avec les laboratoires universitaires dont une vingtaine sont engagés dans des recherches portant sur la machine-outil.

Confrontées à la concurrence japonaise qui s'est portée sur les machines standards à commande numérique (tours, puis centres d'usinage), les entreprises allemandes, conseillées en cela par le Boston Consulting Group (BCG, 1985) ont choisi d'abandonner la fabrication de ces machines pour s'engager davantage dans celle de machines spécialisées, en intégrant toutefois dans leur conception et leur fabrication les technologies de l'électronique.

Les industriels allemands ont réussi leur transition vers la mécatronique. Ce succès est redevable des synergies qui se sont développées entre les activités mécaniques et électroniques. Les industriels allemands ont pu bénéficier (Tournier, 1990) du soutien de Siemens⁸. Grâce aux licences achetées au japonais Fanuc, Siemens est devenu le second fabriquant mondial de systèmes de contrôle. Pour les autres producteurs allemands, cette collaboration leur a offert la possibilité d'intégrer plus facilement l'électronique et d'internaliser progressivement la fabrication de contrôles en se limitant à des systèmes simples, laissant à Siemens le soin de développer des systèmes plus

7. Le principal actionnaire de Gildemeister, premier groupe allemand et européen de l'industrie, est le Land de Rhénanie-Westphalie. Cet appui lui a permis de mener une politique très ambitieuse de rachats de PMI dans les années soixante-dix qui l'a mis en difficulté.

8. Au milieu des années soixante-dix une démarche de quelques producteurs a été effectuée auprès de Siemens pour obtenir des commandes qui soient mieux adaptées à un contexte d'atelier ordinaire c'est-à-dire avec un bureau des méthodes réduit au minimum, plus manipulable et plus programmable par les responsables de l'atelier (Maurice et Serge, 1989).

sophistiqués. Ce rattrapage met en évidence le fait que la réussite dans la mécatronique exige une maîtrise préalable de la mécanique, et qu'inversement, la maîtrise des technologies de l'électronique ne permet pas l'économie de l'étape mécanicienne pour entrer directement dans la mécatronique (Cohen, 1989). Un constat que l'on peut faire dans les pays industrialisés mais aussi dans les NPI (Hoffman, 1988 ; Judet, 1989).

Du point de vue commercial, la stratégie de niche poursuivie par les constructeurs allemands rencontre ses limites dans la concurrence internationale comme en témoignent les difficultés de l'entreprise Deckel. L'industrie allemande a renforcé sa position sur le marché européen, en perdant des points sur les marchés non européens.

La réunification va renforcer le poids de l'Allemagne dans l'industrie de la machine-outil. La Saxonnie a été le berceau de l'industrie allemande et au sein du Comecon, la RDA disposait d'une forte position et s'est classée cinquième exportateur mondial, et 9^e producteur avec une production de 1,0 milliard de dollars (1990). Il existait déjà une coopération intense entre les industries des deux pays, les constructeurs ouest-allemands sous-traitaient à l'Est le bas de gamme ou équipaient de commandes numériques les machines fabriquées en RDA. Ce renforcement allemand se fera aux dépens des autres pays européens qui exportaient vers la RDA (10 % des exportations de la France) (encadré 2).

Le cas de la France

Le rachat de Servomac, un fabricant italien de moteurs par Num, le leader français des systèmes de contrôle, quatrième mondial loin derrière Fanuc, Mitsubishi et Siemens, a été salué comme un signe de renouveau de l'industrie française de la machine-outil¹.

L'industrie française a traversé une période douloureuse au début des années quatre-vingt ; la crise a révélé des faiblesses structurelles (Bruggeman 1985, Cohen 1989). Les entreprises plus spécialisées que leurs homologues allemandes étaient totalement absentes de plusieurs lignes de production, et leur spécialisation (fraiseuses, presses mécaniques) était fragile. Les industriels qui avaient pour la plupart fondé leur développement sur la base de rapports étroits avec leurs clients ont eu du mal à passer à l'étape mécatronique, l'industrie a beaucoup souffert de l'absence d'organisation des solidarités interindustrielles qui ont fait, entre autres choses, la force de l'industrie allemande (Colletis, 1987).

Le plan machine-outil coïncidant avec un effondrement de l'investissement et interrompu en 1986, n'a mobilisé qu'une minorité des entreprises. Il n'a pas été suffisant pour freiner le déclin qui s'est poursuivi jusqu'en 1988. Plusieurs constructeurs ont disparu ou n'ont survécu que grâce à des alliances passées avec des investisseurs étrangers, suisses, japonais et allemands et l'emploi est tombé de 20 000 à 9000 (1990). L'industrie n'a pas profité de la reprise du marché jusqu'en 1989 ; on a assisté à un accroissement sensible des importations et l'offre française ne représente plus que le tiers du marché.

1. Ce rachat s'inscrit dans une stratégie d'intégration de l'entreprise qui doit en outre anticiper les effets attendus de l'investissement de Fanuc au Luxembourg : « Life yet in French machine tool », *Financial Times*, 8 novembre 1990.

Le déclin américain

Les prouesses technologiques de l'armée américaine dans la guerre du Golfe contrastent avec les difficultés que rencontre l'industrie américaine sur les marchés des technologies de pointe, qu'il s'agisse de semi-conducteurs, de fibres optiques et de machines-outils. Dans ce domaine, on a assisté à un véritable effondrement qui pour certains auteurs illustre le déclin américain (Starr, 1988). Second exportateur mondial derrière l'Allemagne jusqu'en 1939, les Etats-Unis ont dominé l'industrie d'après-guerre jusqu'en 1971. Entre 1978 et 1982, l'industrie a profité indirectement du programme d'économie d'énergie du Président Carter (Real, 1980) qui a donné un coup de fouet aux ventes de machines-outils à l'industrie automobile. L'industrie a ensuite souffert de la récession mais la chute de la production n'aurait rien eu de très dramatique si elle ne s'était accompagnée d'une progression très rapide des importations qui ont représenté 26 % du marché national en 1980, 44 % en 1985 et 52 % en 1990. Parallèlement les exportations, qui représentaient entre 15 et 18 % de la production dans les années soixante, ont donné des signes de faiblesse et le solde des échanges, négatif depuis 1977, s'est considérablement détérioré. Autre signe préoccupant, le pourcentage croissant des sous-ensembles dans les exportations (40 % en 1989) qui est certes significatif de la longévité des machines américaines mais aussi de la diminution des exportations de nouvelles machines.

La position des Etats-Unis sur le marché international, mesurée par le solde de ses échanges rapporté au commerce mondial de machines-outils, s'est profondément détériorée.

Ces évolutions sont d'autant plus surprenantes que le marché américain de la machine-outil, même s'il s'est rétréci, a longtemps été le second marché mondial. Les industriels ont sous-estimé la concurrence japonaise, le PDG de Cincinnati Milacron, le leader américain des années soixante-dix, qui s'est reconverti depuis dans les machines à injecter, reconnaissait : « Nous avons ignoré les Japonais dans les machines-outils, et maintenant il est trop tard ; notre attitude a changé et nous ferons en sorte que cela ne se renouvelle pas pour les machines à injection »⁹. Les entreprises ont progressivement perdu le contrôle de leur marché intérieur. Plusieurs grands noms de la profession ont disparu, d'autres se sont transformés en importateurs ou se maintiennent en concevant des machines pour l'industrie de la défense, un client exigeant du point de vue technologique mais moins regardant sur les coûts et les délais.

Les raisons du déclin

Les explications avancées pour expliquer ce déclin (Artemis March, 1989) ont mis en évidence des facteurs interdépendants qui concernent l'ensemble des secteurs

9. Réponse à la commission de la productivité américaine citée dans *Artemis*, mars 1989.

industriels (Delmas, Cepii 1989). Parmi ceux qui ont plus particulièrement handicapé l'industrie de la machine-outil :

- l'inadéquation des ressources humaines : La compétitivité de cette industrie repose beaucoup sur la qualification de la main-d'œuvre. Les ingénieurs et les techniciens américains ont hésité à s'engager dans une industrie où les probabilités de mise au chômage étaient élevées du fait des fluctuations très fortes des effectifs à l'occasion des retournements de cycle ;
- les exigences de rentabilité à court terme des actionnaires des grands groupes industriels qui avaient racheté de nombreuses entreprises de la machine-outil dans les années soixante-dix. Ces exigences étaient peu adaptées à cette industrie cyclique, caractérisée par la longue durée de maturation de ses produits. Les mêmes considérations peuvent être invoquées pour expliquer le caractère « frileux » des industriels qui, méfiants vis-à-vis des innovations, ont donné la préférence aux achats de machines-outils ayant fait leur preuve — attitude qui contraste avec celle des industriels allemands. On constate à ce propos que le pourcentage des machines-outils de moins de dix ans dans le parc américain a diminué de 1945 jusqu'à la fin des années soixante-dix (de 61 % à 31 %) pour se redresser depuis (40 % en 1988, comparé aux 48 % du Japon en 1987) ;
- un biais technologique pour les machines de haut de gamme : la première MOCN a été développée dans les laboratoires de servo-mécanismes du MIT pour l'usinage de pales d'hélicoptères (Noble, 1985). Soucieux de performances techniques, et indifférent aux coûts, le Pentagone a orienté les entreprises vers des machines sophistiquées qui répondaient aux exigences de l'industrie aéronautique et de l'armement mais qui ne correspondaient pas aux besoins des entreprises moyennes de la mécanique. Du fait de ce biais technologique, la diffusion de la MOCN a été lente.

En outre les fabricants de systèmes de « contrôle » ont été lents à se convertir à la technologie câblée ainsi qu'à la technologie électronique, et ne l'ont fait que forcés par la concurrence japonaise. Il s'en est suivi une prolifération de systèmes souvent incompatibles, ce qui a contribué à freiner les ventes (Dertouzos, 1989). La concurrence japonaise a profité de cette inadéquation entre l'offre et la demande. Elle a autant joué sur les facteurs prix que sur les facteurs hors prix. Il est significatif de constater (Artemis March, 1989) que les importations ont augmenté rapidement au moment de la reprise du marché. Confrontés à un gonflement rapide de leurs carnets de commandes, les industriels américains, se refusaient à accroître leurs capacités de production ; les utilisateurs qui se voyaient imposer un allongement des délais de livraison, se sont tournés vers du matériel japonais et sont ensuite restés fidèles à leurs nouveaux fournisseurs.

Un futur japonais

Le Voluntary Export Agreement imposé en 1987, a accéléré le mouvement d'internationalisation de l'industrie japonaise. Les industriels japonais ont multiplié les

créations de filiales aux Etats-Unis pour y assembler leurs machines. Ils ont investi pour contourner les barrières protectionnistes, mais aussi pour se rapprocher du marché et pour être en mesure de mobiliser les capacités des Américains qui dominent la technologie des systèmes. A l'instar de ce que l'on observe dans la construction automobile, la production des transplants japonais devrait progressivement réduire le taux de pénétration des importations et assurer à l'industrie un futur autant japonais qu'américain (encadré 3).

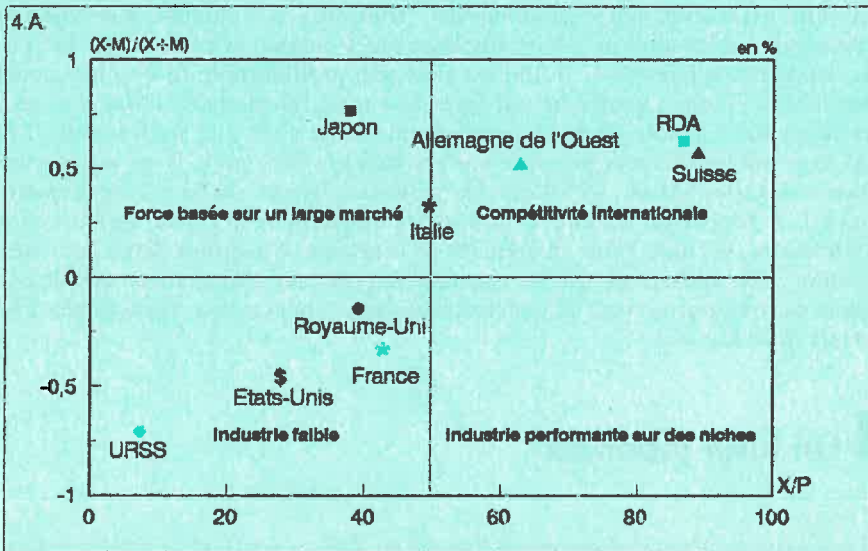
Les marchés internationaux

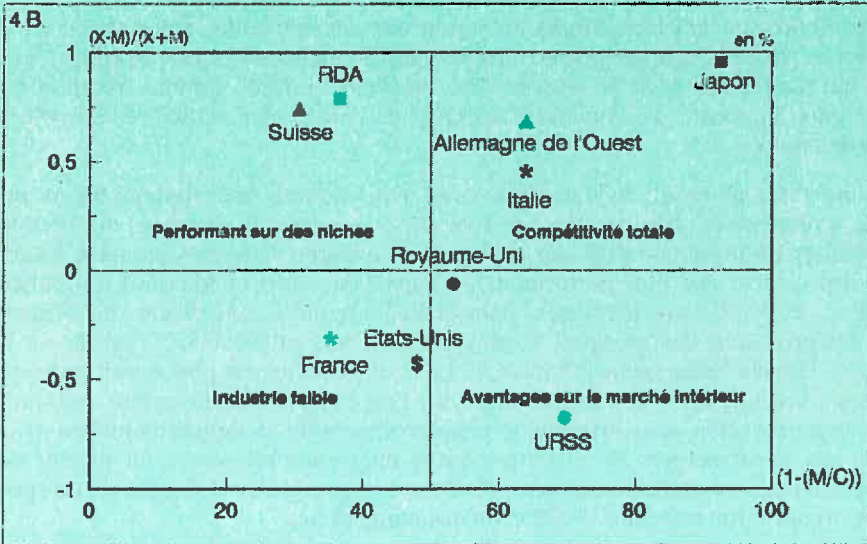
Les échanges extérieurs représentaient un tiers de la production mondiale de machines-outils en 1970 et la moitié en 1990. Le degré d'ouverture des industries nationales est très élevé, compris entre 75 et 100 pour la plupart des grands pays industrialisés à l'exception notable du Japon du fait de sa faible ouverture aux importations. La mesure du solde des échanges, de la part du marché domestique assurée par la production locale et de la part exportée permet d'analyser l'avantage comparatif des principaux producteurs (graphique 4).

Les échanges s'effectuent entre pays industrialisés. En 1980 et en 1988, 80 % des exportations de machines-outils en provenance des pays de l'OCDE et des économies socialistes ont été dirigées vers ces mêmes pays. Le commerce intra-européen de machines-outils représente le tiers des échanges mondiaux, et les échanges entre économies socialistes 15 %.

GRAPHIQUE 4

Les avantages comparatifs *





* voir encadré 4

L'ensemble des pays du Sud absorbent 20 % des exportations des pays industrialisés. Ils constituent un débouché peu important et décroissant pour les pays européens, alors qu'ils assurent un débouché croissant pour les constructeurs japonais qui équipent les économies d'Asie en développement rapide. La crise des pays latino-américains a davantage affecté les fabricants américains qui exportent près de 40 % de leur production en Amérique latine.

* Analyse de l'avantage comparatif

Les graphiques 4A et 4B permettent de mieux apprécier l'avantage comparatif des différents pays producteurs de machines-outils (méthodologie développée par Atkins). Ils prennent en considération trois indicateurs :

- le solde des échanges rapporté aux échanges totaux qui différencie les pays exportateurs nets des autres ;
- la part de la production exportée qui témoigne de la compétitivité internationale des industries ;
- la part du marché intérieur assurée par l'industrie locale qui traduit le degré d'autosuffisance. Cet indicateur couplé au précédent permet de voir si cette autosuffisance se traduit ou non en compétitivité internationale.

L'utilisation de ces indicateurs permet de distinguer parmi les importateurs nets ceux qui sont performants sur des niches (Suisse) (graphique 4A) de ceux qui sont performants sur leur seul marché national.

La suprématie japonaise

Les ventes de machines-outils au Japon ont dépassé celles aux Etats-Unis. Les acheteurs japonais sont très exigeants comme les allemands. Les entreprises nippones, qui contrôlent à 90 % leur marché, peuvent l'utiliser comme tremplin pour, d'une part, s'imposer sur le marché mondial, et d'autre part, anticiper les évolutions de la demande.

L'industrie japonaise de la machine-outil qui rassemble une centaine d'entreprises a une structure très hétérogène. Six entreprises se classent parmi les dix premières mondiales. La production est très concentrée : quinze entreprises assurent les deux-tiers des ventes. Les plus performantes (Yamazaki, Mori et Makino) qui étaient à l'origine des PMI, sont spécialisées dans la machine-outil ; une dizaine de fabricants, sont intégrés dans des groupes, le plus souvent de l'automobile : Toyota est lié à Toyota, Hitachi Seiki est lié à Nissan ¹⁰. La sous-traitance est plus développée qu'en Europe (Nohara, 1987) et à l'instar de ce que l'on observe dans le secteur automobile, elle s'organise selon deux niveaux, le premier rassemble un millier d'entreprises intégrées aux constructeurs de machines-outils et parties prenantes au niveau de la conception des nouvelles machines ; le second rassemble dix fois plus d'entreprises. Cette organisation a facilité la diffusion des innovations.

L'industrie de la machine-outil japonaise s'était développée rapidement à partir de 1938 (Toshiaki Chokki, 1988) ; la défaite militaire et la fermeture des arsenaux ont fait disparaître son principal débouché. L'industrie de la défense n'a plus joué un rôle directeur pour orienter la production, et ce sont les PMI qui sont devenues les débouchés privilégiés de l'industrie. Les constructeurs indépendants ont fabriqué des machines universelles en choisissant une conception modulaire qui minimise le nombre de sous-ensembles et les coûts tandis que les constructeurs intégrés ont conçu des machines spéciales. A partir de 1952, l'Etat a encouragé la spécialisation japonaise dans les machines standards en offrant des crédits subventionnés ¹¹ et en mettant en œuvre une politique tarifaire discriminatoire : il a imposé des tarifs élevés assortis de barrières non tarifaires pour s'opposer aux importations de machines conventionnelles tout en libéralisant les importations de machines spécialisées (où la nécessité de relations étroites entre le constructeur et l'utilisateur sert de protection naturelle). Ces restrictions ont été levées à partir de 1970 et ce n'est qu'au début des années quatre-vingt que le marché a été totalement ouvert aux importations. Le Japon est alors devenu le second exportateur mondial : les importations représentent seulement 8 % du marché intérieur, machines de bas de gamme ou au contraire très sophistiquées, en 1990.

10. Mitsubishi et Mazda disposent de leurs propres départements de machines-outils.

11. La machine-outil aurait reçu le cinquième des crédits qui ont transité par la Japan Development Bank entre 1956 et 1962.

La place du Japon sur le marché de la MOCN

Entre 1960 et 1970, la production japonaise a été multipliée par sept, mais cette progression est surtout liée à l'élargissement du marché intérieur. Les exportations ont commencé à augmenter rapidement à partir de 1970 et en 1980 le Japon exportait la moitié de sa production, soit 12 % des exportations mondiales, un pourcentage qui augmentera constamment pour atteindre 20 % en 1989. Le Japon a dépassé la RFA en 1985 et 1986, mais depuis trois ans l'industrie japonaise qui est confrontée à un essor considérable de la demande intérieure a reculé sur les marchés extérieurs.

Les entreprises japonaises ont commencé par travailler sous licence d'entreprises occidentales, y compris françaises¹², et ont acheté les technologies de la commande numérique aux Etats-Unis. Ces technologies ont été absorbées et, à partir des années soixante-dix, les constructeurs japonais ont joué un rôle pionnier dans la diffusion à grande échelle de la commande numérique (graphique 5).

Leur percée dans la mécatronique (Takemochi Ishii, 1983) est le résultat des avancées réalisées par les entreprises de la mécanique de précision (Nippon Seiko dans les vis à bille et Fujitsu dans les moteurs pas à pas), de l'électronique (Fanuc) et des matériaux (téflon). Fanuc était à l'origine un département de Fujitsu dont il s'est séparé en 1972. Ce groupe de l'informatique avait une activité machine-outil et cette synergie a été mise à profit pour développer les systèmes de contrôle basés sur des microprocesseurs. Comme l'indique le PDG de Fanuc : « Nous avons appliqué la technologie des semi-conducteurs avant même l'industrie informatique »¹³. Encouragé par le MITI, Fanuc a occupé une position de monopole sur le marché japonais, assurant 80 % de la production japonaise dans les années soixante-dix. Cela a épargné aux Japonais les problèmes d'incompatibilité auxquels ont été confrontés les Américains. Un monopole sous surveillance, car paradoxalement les prix des systèmes de contrôle sur le marché intérieur ont diminué rapidement et FANUC s'est imposé sur le marché mondial où il assure 40 % de la production actuellement.

Les entreprises de la machine-outil ont fait preuve d'une remarquable capacité d'adaptation à cette nouvelle technologie. En proposant des MOCN, les constructeurs japonais ont répondu aux attentes des industriels de la mécanique et de l'automobile. Ils ont créé le marché (Jacobsonn, 1988) en sachant répondre aux besoins des PMI soucieuses d'automatisation et en innovant une stratégie de production en série (tours à commande numérique et de centres d'usinage...) ; dans un secteur marqué par les traditions artisanales, les japonais ont mis ces machines à la portée de leurs clients.

Mises en difficulté par la crise de 1975 et l'appréciation du Yen de 1977, les entreprises japonaises de la mécanique avaient en effet entrepris de rationaliser leur production. Les équipements d'automatisation flexible sont arrivés sur le marché à point

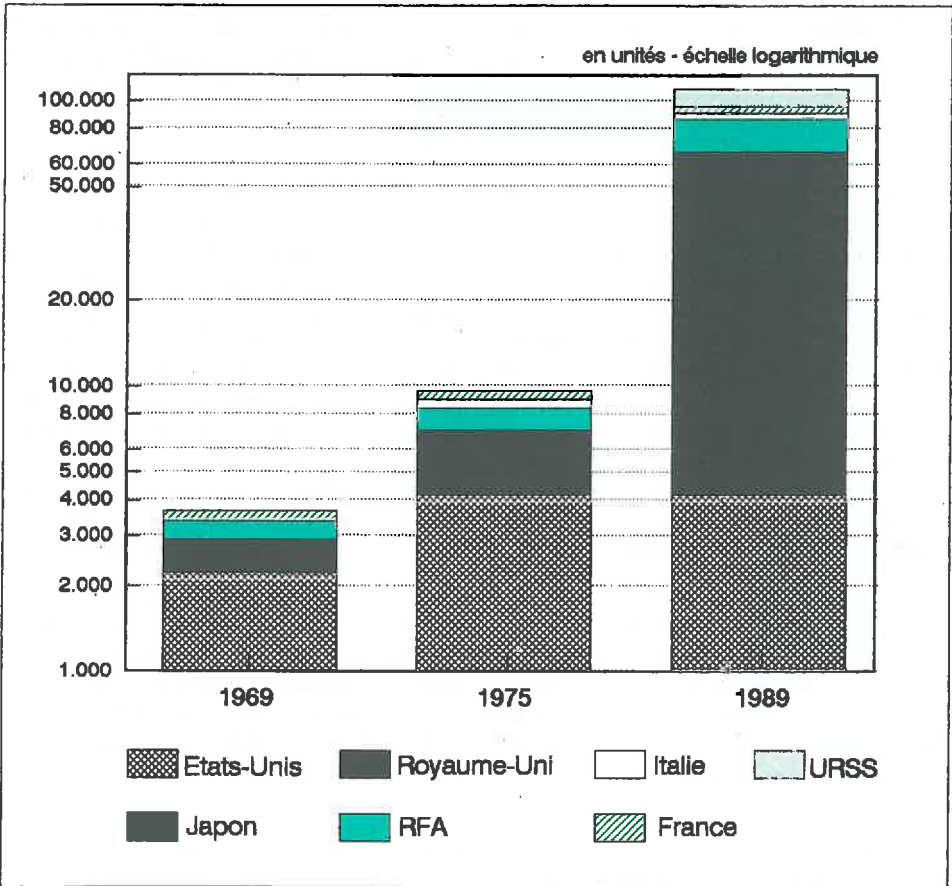
12. Ainsi Amada était sous licence de Promecan et a racheté l'entreprise française au début des années quatre-vingt.

13. Entretien avec le PDG de Fanuc rapporté dans Jacobsonn, 1988.

nommé : les ventes de MOCN ont augmenté considérablement à partir de 1978 et les PMI sont devenues les principaux clients (Watanabe, 1983). Ces acquisitions ont été fortement encouragées par le MITI qui a mis au point une panoplie d'incitations fiscales en mobilisant des ressources budgétaires et non-budgétaires (Prestowitz, 1988) ¹⁴.

GRAPHIQUE 5

La production de MOCN



Sources : CECIMO et statistiques nationales

14. Ainsi par exemple, des licences d'importations de sucre et plus tard des subventions cachées qui provenaient des revenus des courses de bicyclettes et de motocyclettes. Une loi a autorisé les municipalités à organiser ces courses et des paris et une partie des gains est allée dans les caisses de la Japan Bicycle Rehabilitation Association ; cette association a été créée par le MITI et son budget (2 milliards de dollars) a servi de source de revenus extrabudgétaires pour financer des projets parmi lesquels l'industrie de la machine-outil qui aurait ainsi reçu 1 milliard de dollars. Cette aide a été mise à jour à l'occasion d'une plainte de la société américaine Hourdailles (Clide V. Prestowitz, janvier 1988).

Les facteurs de compétitivité sur le marché des MOCN standards (fiabilité, délai, coût) correspondaient tout à fait au savoir-faire des entreprises japonaises passées maîtres dans l'art de la simplification ; elles ont en outre adopté des astuces de commercialisation (essai gratuit 90 jours..) qui ont ensuite contribué à leurs succès sur les marchés extérieurs.

Les concurrents des japonais ont été contraints de les suivre sur leur terrain, qu'il s'agisse de produits ou de service après-vente. Les Européens ont rattrapé leur retard dans la maîtrise de l'électronique et les MOCN standards japonaises sont concurrencées par celles fabriquées à Taiwan et en Corée, de qualité égale à meilleur prix. Confrontée à ces deux défis, la concurrence japonaise a-t-elle fait long feu ? Il semble plutôt qu'elle se déplace.

Anticipant l'évolution technologique, les industriels s'engagent dans deux directions. Ils enrichissent les machines (multipliant les axes, augmentant la vitesse) et, par ailleurs ils les intègrent dans des systèmes qui incorporent les travaux connexes à l'usinage, les manipulateurs, les robots de chargement-déchargement. Comme le faisait remarquer le président de Yamazaki-Mazak : « Que l'on continue de considérer Mazak comme un constructeur de MOCN me choque. Notre ambition est d'une autre nature, elle est de créer l'entreprise entièrement informatisée (...) un concept qui nous place dans une logique industrielle très différente de celle de la machine-outil »¹⁵.

Cette orientation devrait handicaper les producteurs éloignés de leurs clients, mais ayant été contraints de se rapprocher de leur marché d'exportation pour contourner les barrières tarifaires, les Japonais peuvent désormais anticiper leurs évolutions. Leur souci est d'accélérer les ventes de machines sophistiquées que les utilisateurs sont tentés de conserver le plus longtemps possible. Pour accélérer la rotation, certains envisagent des sortes d'« échanges standards » qui autoriseraient le recyclage des machines devenues obsolètes en les exportant dans le Tiers-Monde¹⁶.

L'offensive japonaise qui a privilégié les Etats-Unis dans les années quatre-vingt, s'oriente désormais vers l'Europe. Profitant des restructurations en France et en Grande-Bretagne, les entreprises nipponnes se sont implantées en Europe et renforcent leur position en prévision du Grand marché¹⁷ (encadré 4).

15. Interview de Teruyki à *l'Usine nouvelle* le 28 septembre 1989.

16. Interview du PDG de Yamazaki-Mazak au *Japan Economic Journal* du 19 janvier 1991.

17. C'est le cas de Fanuc dont l'usine du Luxembourg doit entrer en production au courant de l'année.

Un équipement stratégique ?

Les machines-outils équipent les arsenaux, et de ce fait elles ont été de tout temps considérées comme des biens d'équipement stratégiques. Sans remonter aux interdictions d'émigration imposées aux artisans britanniques, on peut rappeler l'embargo américain sur les exportations de machines-outils au Japon dès 1940, ou plus récemment encore à l'occasion du Voluntary Export Agreement celui imposé en 1987 au Japon, à la Suisse et Taiwan ¹.

Rosenberg (1978) considère les machines-outils comme stratégiques car d'après lui elles occupent une place centrale dans la diffusion des technologies et elles assurent le renouvellement des normes de production des grands secteurs utilisateurs. Avant lui, Lowe (1955) estimait que, les machines-outils étaient des biens d'équipement non spécifiques qui avaient la propriété de se reproduire, aussi occupaient-elles une place centrale dans la reproduction du capital. C'est en fonction de cette idée que certaines industries ont été lancées dans des pays du Tiers-Monde.

De fait et à l'exception notable du Japon, il n'existe pas de causalité directe entre la compétitivité d'une industrie nationale de la machine-outil et celle de l'industrie en général. Comme le fait remarquer Jacobson (1987) c'est de plus en plus l'industrie mondiale, et non les industries nationales, qui occupe une place centrale dans la diffusion des technologies.

Il semble difficile de parler d'enjeu stratégique à propos d'une machine vendue sur catalogue, par contre les choses ne sont pas aussi simples s'agissant d'équipement plus sophistiqué dont le développement exige une collaboration étroite entre l'utilisateur et le fabricant. La généralisation du *simultaneous engineering* dans l'industrie automobile amène les grands utilisateurs à souhaiter disposer d'offres performants et exclusifs (Frémeaux, 1990). Dans d'autres cas, s'équiper après un concurrent peut représenter un handicap, lorsqu'il est souhaitable d'incorporer avant les autres le progrès technique. C'est la constatation que fait un responsable de General Motors : « Si vous achetez le meilleur du Japon, il est déjà utilisé depuis deux ans chez Toyota, et si vous achetez en RFA, il équipe BMW depuis dix-huit mois » ².

¹ Un rapport de la commission de la Défense avait montré en 1987 qu'un très grand nombre de machines-outils utilisées pour la fabrication de systèmes de défense provenaient du Japon et l'administration américaine bloque actuellement la proposition de rachats par Fanuc de Moore Special Tool qui fabrique des machines utilisées pour l'assemblage d'armes nucléaires (*Asia Wall Street Journal*, 5 février 1991).

² *American Machinist* : « GM studies US machine tool firms : one problem is the way automakers buy », janvier 1986.

L'apport de la MOCN

La hiérarchisation internationale que l'on constate au niveau de la production d'équipements flexibles a-t-elle son corollaire au niveau de leur diffusion dans le tissu industriel ?

Rappelons tout d'abord l'enjeu. La MOCN est le premier exemple d'équipement d'automatisation flexible. Jusqu'alors, flexibilité et automatisation, étaient des objectifs contradictoires. L'automatisation était réservée aux processus intégrés ou à l'automobile du fait des grandes séries. Ailleurs, dans les industries liées à la mécanique, l'automatisation flexible était un luxe ¹⁸ que seuls pouvaient s'offrir les industries de la défense et de l'aéronautique où les entreprises avaient les moyens de s'offrir des machines à commandes numériques sophistiquées. L'industrie était confrontée au « dilemme de la productivité » (Abenaty, 1978). Le microprocesseur a permis de trouver un compromis entre les économies d'échelle et la flexibilité grâce aux économies d'opportunité (scope) ¹⁹. La MOCN est une première étape qui a été suivie par les cellules flexibles et les ateliers flexibles et qui pourrait se prolonger par la CIM (Computer Integrated Manufacturing). Les possibilités ouvertes par ces innovations ont amené à évoquer le nouveau « chemin de prospérité » (Piore, 1987) et l'entrée dans un nouveau paradigme technologique (Freeman, 1987).

L'accent mis sur le « hardware » ne doit pas masquer le fait que la flexibilité n'est pas seulement une affaire d'équipement. C'est ce qu'ont découvert les entreprises qui n'ont pas obtenu les rendements escomptés de leurs investissements en équipements flexibles ²⁰ ; comme le fait remarquer Bessant (Bessant, 1988) au terme d'une enquête portant sur l'introduction de l'automatisation flexible dans les entreprises anglaises : « Un ordinateur dans un environnement chaotique ne produit qu'un chaos informatisé ». Au Japon, bien avant l'introduction des MOCN, l'organisation de la production avait privilégié la flexibilité, attitude qui prédisposait les entreprises à absorber des technologies flexibles (Cohen, 1987 et Friedman, 1988). Pour tirer partie du potentiel offert par ces équipements, il faut qu'au préalable les entreprises se transforment en organisations flexibles ; inversement on constate que parfois les gains obtenus en réformant l'organisation ont été suffisants et ont fait faire l'économie d'investissements en équipement.

Une homogénéisation au niveau du « hardware »

Jusqu'en 1975, l'équipement en MOCN de l'industrie américaine dépassait de loin celui de tous les autres pays. Puis à partir de 1975, la diffusion des MOCN s'est accélérée au Japon et en Europe.

On assiste à un processus d'homogénéisation au sein des pays industrialisés et avec quelques années de retard ce processus pourrait se prolonger dans les NPI : le niveau d'équipement en MOCN augmente et, en proportion du parc installé, se rapproche d'un pays à l'autre.

18. La boutade attribuée à Ford : « les consommateurs peuvent choisir n'importe quelle couleur, du moment qu'elle est noire », signifiait que la flexibilité avait un coût élevé.

19. Les économies d'opportunité, l'effet Baumol, existent lorsqu'une entreprise qui produit simultanément deux produits est capable de les produire à un coût moindre que deux entreprises produisant séparément chacun de ces produits. Il faut pour cela que les économies d'échelle obtenues pour chacun des deux produits restent inférieures aux économies d'opportunité.

20. C'est ce que révèle une enquête du CETIM (1987).

L'analyse des inventaires de machines-outils, véritable recensement mené périodiquement dans la plupart des pays, permet de mesurer la diffusion des nouveaux équipements dans les stocks en place. Il s'agit d'une mesure plus pertinente que celle qui consiste à s'intéresser aux seuls flux et qui souvent ne sont disponibles qu'en valeur. L'évolution des « populations » de MOCN dans les principaux pays industrialisés montre que les Etats-Unis ont été des précurseurs ; c'est le Japon qui a ensuite impulsé le mouvement de diffusion qui s'est généralisé à l'Europe et aux NPI d'Asie. En 1990, on peut estimer qu'il y a 240.000 MOCN aux Etats-Unis, 100.000 au Japon et en RFA. Rapporté au nombre d'emplois industriels, le nombre de MOCN est de 14 pour 1000 emplois aux Etats-Unis, 10 au Japon, 13 en RFA, de 3 à Taiwan et 6 à Singapour.

Jusqu'où ira-t-on ? A l'instar de toutes les innovations techniques, la diffusion des MOCN suit une courbe en S en fonction du temps : un essor rapide et une inflexion vers une période de transition, avant d'arriver à saturation. Ce modèle peut être utilisé pour prévoir le point de saturation, sachant que la courbe caractéristique de l'évolution des ventes (elle-même en S) peut servir de « leading index ». Les corrélations effectuées à partir des données japonaises et que corroborent les données américaines, conduisent à un taux de saturation de l'ordre de 35 % qui sera atteint dans quinze ans.

Les MOCN sont les outils les plus utilisés. La diffusion des cellules et des ateliers flexibles a été beaucoup plus lente que certains l'envisageait. D'après la base de données développée à l'IIASA, il y aurait environ 1200 ateliers flexibles dans le monde et leur nombre atteindrait les 3000 en 2000, ce qui reste limité, équivalent à moins de 1 % de la capacité de MOCN installée dans le monde. La Computer Integrated Manufacturing apparaît davantage être un objectif à très long terme, voire un mythe, plutôt qu'une réalité (Ebel, 1990).

Des situations plus contrastées au niveau du « software »

Partout, les méthodes d'organisation à la japonaise, qui constituent « le software » des équipements flexibles, sont considérées comme la référence. Si l'on s'en tient à l'aune des seuls articles publiés dans les revues de management, on pourrait croire que toutes les entreprises se sont converties au *just in time* et pratique le *kan-ban*. Dans la construction automobile, le toyotisme aurait remplacé le fordisme.

La transformation au niveau de l'organisation est la plus difficile à mesurer et peu d'enquêtes ont été réalisées qui donneraient la possibilité de distinguer l'anecdotique du général. Celles qui sont disponibles conduisent à un certain scepticisme :

— en 1984, Jaikumar (Jaikumar, 1986, 1989) a comparé le fonctionnement de la moitié des ateliers flexibles installés aux Etats-Unis et au Japon. Les différences de performance en termes de productivité vont du simple au double pour des équipements très proches. Un écart qui s'explique par les modalités différentes de l'organisation du travail ;

— entre 1986 et 1988, les chercheurs de l'équipe du MIT (Womak, 1990) ont visité la moitié de la capacité de production automobile installée dans le monde. Ils concluent à des écarts de productivité très élevés entre les entreprises japonaises et les transplants qui pratiquent le toyotisme (« lean production ») d'une part, et les entreprises américaines et européennes d'autre part. Ce qui est en cause, ce sont les différences constatées dans les méthodes d'organisation de la production, à toutes les étapes, de la conception des voitures (design for manufacturing) à la production, sans oublier les relations avec les sous-traitants ;

— en 1989 le Boston Consulting Group ²¹ a enquêté auprès des sous-traitants de l'automobile en Europe. Son enquête met en évidence que le *just in time* des constructeurs automobiles consiste à transférer leurs stocks chez les sous-traitants où ils représentent en moyenne 14 % de la valeur des ventes (6 % au Japon). Un écart qu'expliqueraient les relations conflictuelles des sous-traitants et de leurs donneurs d'ordre.

La compétitivité dans l'industrie de la machine outil-repose à l'évidence sur la maîtrise technologique. La révolution mécatronique a assuré le succès du Japon qui maîtrisait l'ensemble des technologies qui ont fusionné ; mais cette révolution ne permet pas de faire l'économie de la mécanique, aussi n'a-t-elle pas bouleversé les « avantages acquis » par les industries qui avaient une longue tradition mécanicienne (en particulier l'Allemagne et la Suisse). Il n'en demeure pas moins que plus que par le passé, la compétitivité repose sur une coopération inter-industrielle réussie entre l'industrie mécanique et l'industrie électronique (soit au niveau de l'entreprise soit au niveau du tissu industriel). Autre facteur de la compétitivité : la qualité de la demande ²² : les industriels allemands et japonais doivent percer sur un marché exigeant, c'est une garantie de succès pour affronter les marchés internationaux.

Parallèlement, l'utilisation « compétitive » des équipements d'automatisation flexible ne s'invente pas. Elle exige des réorganisations qui concernent tout autant l'entreprise (remise en cause des hiérarchies, décloisonnements entre les services) que ses relations avec son environnement (et en particulier avec les sous-traitants). Le « hardware » doit fonctionner avec un software compatible... et les quelques enquêtes disponibles soulignent les difficultés sociales d'adaptation à un software qui permettrait de relever le défis de la compétitivité posés par la mécatronique.

21. *The Economist* : « For JIT read jitters », 16 février 1991.

22. L'ordre des causalités est difficile à percevoir : est-ce que ce sont les producteurs qui suscitent ces exigences ou l'inverse ?

Bibliographie

- Abernathy W. : *The productivity dilemma roadblock to innovations in the automobile industry*, John Hopkins Press, 1978.
- Artemis March : *The US machine tool industry and its foreign competitors*, Working papers of the MIT Commission on Industrial Productivity, 1989.
- Atkins : *Strategic study for the machine tool industry*, CEE, Bruxelles, 1990.
- Ayres Robert U. : *CIM : hypotheses*, IIASA, 1990.
- Bessant J. : *Integrated manufacturing*, ONUDI/IPCT, 1988.
- Boston Consulting Group : *Strategic study of the machine tool industry*, CEE Bruxelles, 1985.
- Bruggeman F. : « Industrie de biens d'investissements et crise », réflexions à propos de l'échec du plan machine-outil, *Revue d'économie industrielle*, 1^{er} trimestre, 1985.
- Cohen E. : *L'Etat brancardier*, Calmann Lévy, 1989.
- Cohen S., Zysman J. : *Manufacturing matters : the myth of post industrial society*, Basic books, 1987.
- Colletis G. : *Approches sectorielles des politiques d'aides à l'industrie : une comparaison France-Allemagne*, thèse pour le doctorat d'Etat, Université d'Aix-Marseille, 1987.
- Delmas Ph. : « Les faiblesses de l'industrie américaine », *Economie prospective internationale*, la Documentation française, n° 37, 1^{er} trimestre 1989.
- Dertouzos L., Lester R. K. : *Made in America*, MIT press, 1989.
- Ebel K. H. : *Computer integrated manufacturing, the social dimension*, International labor organization, Genève, 1990.
- Frémeaux M. : *Machine-outil 90 : les enjeux*, Bipe, 1990.
- Freeman Ch. : *Technology policy and economic performances, lessons from Japan*, Printer publishers, Londres, 1987.
- Friedman D. : *The misunderstood miracle, industrial development and political change*, Cornell University press, 1988.
- Hoffmann K. : *Technological advance and organizational innovation in the engineering industries*, Industry Series Paper, Banque mondiale, 1989.
- Jacobson S. : « Intraindustry specialisation and development model for the capital goods », *Weltwirtschaftliches Archiv*, 1988.
- Jacobson S. : « Flexible automation : the global diffusion of new technology in the engineering industry », Blakwell, 1988.
- Jaikumar R. : « Japanese flexible manufacturing system impact on the United States, Japan and the world economy », *International journal of theory and policy*, vol 1, n° 2, 1989.
- Jaikumar R. : « Post industrial manufacturing », *Harvard Business Review*, 1986.
- Judet P. : *L'industrie de la machine-outil en République de Corée*, ONUDI, 1990.
- Kodama F. : « Vers un nouveau paradigme technologique », *STI review* n° 7, 1990.
- Lowe M. : *Capital formation and economic growth*, Princeton University, 1955.
- Morice M., Sorge A. : *Dynamique industrielle et capacité d'innovation dans l'industrie de la machine-outil en France et en RFA*, document LEST 1989/1.

- Noble D. : « Social choice in machin design : the case of the automatically controlled machine-tools », *The Social shaping of technology*, D. Mac Kenzie ed., Open University Press, 1985.
- Nohara H. : « Innovation technologique, dynamique industrielle et transformation du travail. Le cas japonais du secteur de la machine-outil », Lest, CNRS, 1987.
- Okimoto D. : *Between MITI and the market*, Oxford University press, 1988.
- Piore M., Sabel C. : *The second industrial divide*, Basic books, 1984.
- Porter M. : *The competitive advantage of nations*, Free press, 1990.
- Pratten C. F. : « Economies of scale for machine tool production », *Journal of industrial economics*, vol. 19, 1970.
- Prestowitz C. : *Trading places*, Basic books, 1988.
- Real B. : *Technical change and economic policy the machine tool industry*, OCDE, 1980.
- Rosenberg N. : *Perspective on technology*, Cambridge University, 1976.
- Starr MK (edit) : *Global competitiveness, getting the US back on track*, Columbia University press, 1988.
- Ishii T. : *Mechatronics and japanese society*, Pinter, 1983.
- Chokki T. : « A history of the machine tool industry in Japan » in *Fransman : capital goods in developing countries*, 1988.
- Tournier P. : « L'industrie de la machine-outil à métal dans les mutations technologiques », *Revue de l'IREES*, printemps, 1990.
- Wanatabe S. : « Market structure, industrial organisation and technological development : the case of the japanese electronics based machine-tool industry », *World employment programme research*, International labor organization, Genève, février 1983.
- Womack J. : *The machine that changed the world*, MIT press, 1990.

