

Machine-outil

Systemes de fabrication

par **François C. PRUVOT**

Ingénieur-docteur

Ancien Directeur technique de Renault Machines-outils

Professeur honoraire, Directeur du Laboratoire de productique et de machines-outils

École polytechnique fédérale de Lausanne

1. Généralités	B 7 123 - 2
2. Gestion de production	— 3
3. Conclusions	— 5
Pour en savoir plus	Doc. B 7 124

La notion de système de fabrication, bien qu'implicitement connue depuis longtemps, n'a pas été explicitement très bien comprise, en particulier en France, jusqu'à une période récente (début des années quatre-vingt-dix en France, fin des années soixante-dix aux États-Unis et au Japon). Cela se voit au fait qu'on a gardé le découpage taylorien, alors que, s'il était indispensable au début du siècle, il n'en est pas moins hautement contestable aujourd'hui.

Sans parler du domaine des **études produit**, où l'on montre encore souvent une grande ignorance des procédés et méthodes de fabrication, on voit ce manque de compréhension dans la séparation des méthodes et des études de machines, des services outillage, du service implantation, sans même parler de la fabrication elle-même, généralement non consultée pendant la phase de conception et de réalisation du système de fabrication.

1. Généralités

La figure 1 montre un atelier flexible qui a été réalisé (sauf la partie assemblage) à l'École polytechnique fédérale de Lausanne en Suisse. En regardant ce schéma, on prend parfaitement conscience de ce que doit être un **système de fabrication**, même si des raisons de coût ont fait relier des éléments qui auraient dû être séparés.

On voit des machines (centres de tournage CT et centres d'usinage CU) capables d'usiner de façon *flexible* des pièces *a priori* non définies appartenant à deux familles (ce regroupement n'aurait sans doute pas été fait dans l'industrie) : des carters ou boîtiers, avec leur sous-ensemble (au plan géométrique et informationnel), les couvercles ; et des arbres, comportant toutes les pièces de base de révolution et leur sous-ensemble, les pièces de base de révolution courtes (c'est-à-dire pouvant toujours être usinées en l'air) ou disques.

Les **machines** ont été créées pour les pièces à usiner (cf. [B 7 121] pour le centre d'usinage), et les **règles de dessin des pièces (mais non les pièces)** ont été créées en fonction des éléments du système de fabrication.

Le **cahier des charges** de l'ensemble a pu être schématisé par un slogan très simple : **quatre heures de la commande à la livraison d'un produit** (pièce ou ensemble monté) **nouveau**, c'est-à-dire qui n'a pas été précédemment réalisé, ni même étudié, sauf dans sa structure.

■ Pour arriver à cela, il a fallu de nombreuses **études**, certaines tout à fait originales ; citons pour mémoire :

— normalisation des diamètres et de leurs tolérances : une trentaine de diamètres différents ; trois tolérances précises par diamètre ;

— normalisation des procédés d'usinage : définition du nombre de passes, des paramètres de coupe et des tolérances correspondantes ;

— normalisation des outils : normalisation permise par les deux points précédents ; on a ainsi pu ramener le nombre d'outils différents à quelques dizaines ;

— procédés de conception et réalisation en temps réel de montages d'usinage ;

— utilisation généralisée de réseaux (*field bus*) sur machines et pour la commande générale du système de fabrication ;

— convoyeurs et manipulateurs automatiques de pièces et d'outils permettant d'alimenter chacune des machines, y compris les machines à mesurer (MM sur la figure 1) ;

— création d'organes de machines-outils adaptés à l'automatisation intégrale (en particulier les porte-outils) ;

— création automatique des gammes d'usinage des pièces (réalisé uniquement pour les pièces de base de révolution, Kronos [4]).

D'autres éléments auraient pu être réalisés, leur étude étant en bonne voie et des prototypes fonctionnant parfaitement :

— nouveaux types de commande numérique, à interpolation dite monoaxiale ;

— système d'assemblage flexible ;

— système de préparation-réglage des outils ;

— système de gestion de la production et des outils.

■ On a pu tirer de toutes ces études et réalisations de nombreux **enseignements et conclusions** :

● Le fait de participer à la création d'un ensemble d'avant-garde et de grande dimension est pour les étudiants une motivation puissante.

Nota : ils en tirent des éléments importants pour mener ensuite leur carrière professionnelle. En particulier, ils ne se sentent plus désemparés devant les affirmations de leurs premiers chefs dans l'industrie.

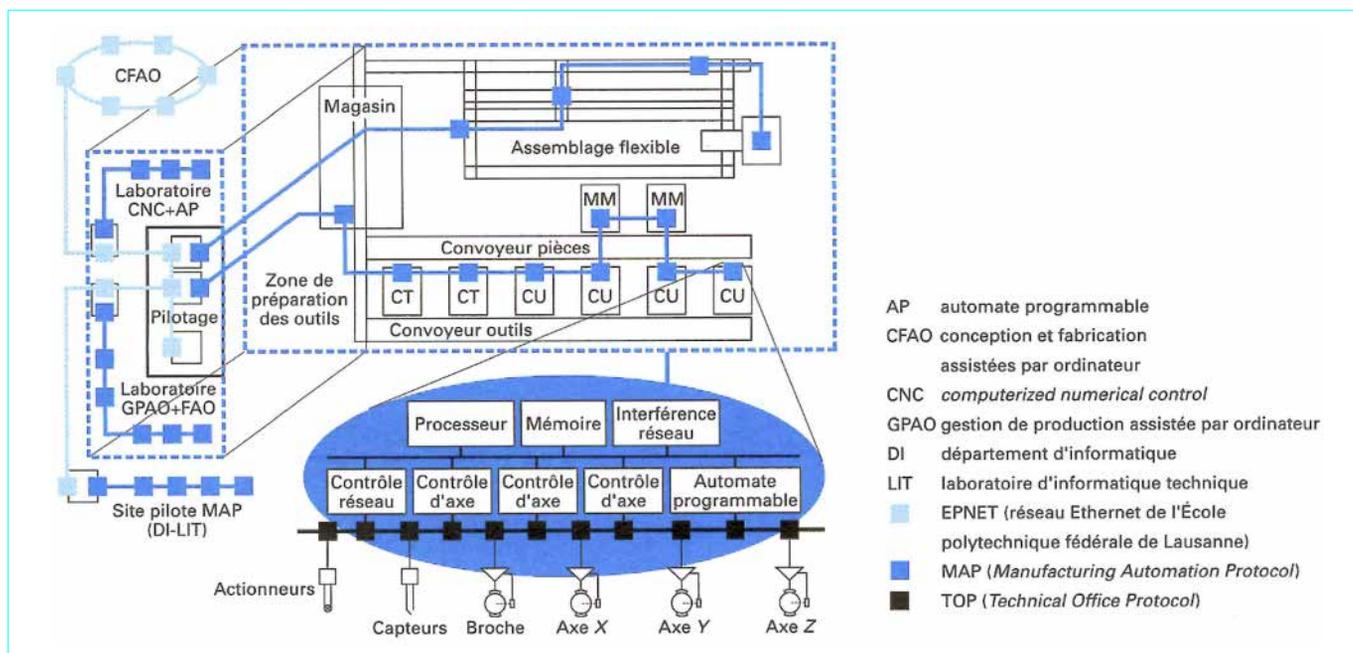


Figure 1 – Atelier flexible de l'EPFL

● Il est tout à fait possible (mais cela demande des efforts importants de la part du corps enseignant) de faire participer à une étude complexe des étudiants de différentes orientations. Pour l'atelier flexible de l'EPFL ont ainsi participé :

— le laboratoire de Machines-outils et Automates du Département de mécanique, pour l'étude de tous les éléments mécaniques, la création automatique des gammes d'usinage et la conception d'ensemble du système de fabrication ;

— le laboratoire d'Informatique Technique du Département d'informatique, pour les problèmes de réseaux, d'automates programmables et de commande numérique ;

— les laboratoires d'Électromécanique et le laboratoire de métrologie, du Département d'électricité, pour les moteurs électriques et les règles de mesure de position (règle incrémentale et absolue, utilisant un code pseudoaléatoire) ;

— le Département de mathématique pour la gestion de fabrication ;

— le laboratoire de Techniques d'Assemblage du Département de microtechnique, pour les problèmes de montage automatique.

Nous avons vu dans les fascicules précédents que la plupart des machines-outils se ramenaient sans difficulté à un archétype unique. Il en va absolument de même pour les systèmes de fabrication. Fabrication unitaire, petite série, moyenne série, grande série ressortissent à un même modèle, *quand on les met en œuvre correctement*.

Cette dernière remarque va nous guider pour ce fascicule qui traitera très superficiellement de la gestion des systèmes de fabrication.

2. Gestion de production

■ La gestion de production en temps réel des systèmes de **fabrication en très grande série** peut sembler à première vue élémentaire. Mis à part les problèmes d'approvisionnement, qui ne sont pas traités par les responsables du système de fabrication, elle se ramène essentiellement à la gestion des arrêts des éléments du système.

Le fait d'avoir de nombreux postes d'usinage en série fait que le rendement du système de fabrication peut être très bas, malgré une fiabilité relativement élevée de chaque poste. En effet, trente postes en série de rendement unitaire 0,95 donnent un rendement global à peine supérieur à 20 %

On pourrait bien sûr mettre des stocks entre tous les postes d'usinage, mais on se heurterait alors à d'autres problèmes. Par exemple, si les stocks entre postes sont assez grands pour n'être jamais ni saturés ni vides (la théorie des files d'attente montre d'ailleurs que c'est théoriquement impossible, mais, dans la pratique, on peut s'approcher assez bien d'un tel fonctionnement), on voit que le coût de pièce sera, à la limite, proportionnel à la dimension du stock. Et comme le coût de pièce est élevé quand le stock est nul, il y a nécessairement un optimum correspondant à un stock donné (figure 2).

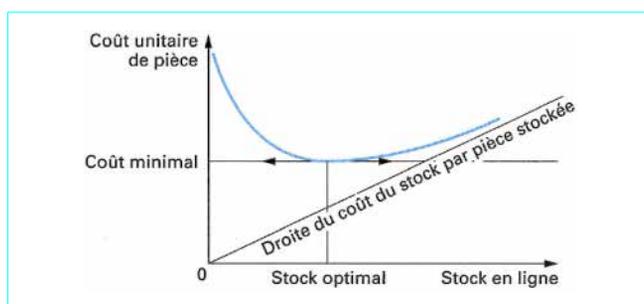


Figure 2 – Coût unitaire en fonction du stock en ligne

Les **arrêts** étant dus à des **causes propres** à la machine **ou** à des **causes induites** (défaut d'alimentation et engorgement), les causes propres pouvant être programmées (entretien), semi-programmées (changements d'outils) ou non programmables (pannes, ruptures d'outils), la figure 3 montre que le rendement du système de fabrication peut grandement varier en fonction des stocks en ligne et du mode de gestion des arrêts. On voit, alors, que la principale difficulté de la gestion de fabrication en très grande série sera d'abord de définir la dimension et la position des stocks dans le système de fabrication. Pour ce faire, il faut connaître les paramètres statistiques de fonctionnement de chacun des composants du système. Cette connaissance ne peut être acquise que par expérience et à l'aide de la méthode de relevé des arrêts et de leurs causes. Enfin, un point tout à fait fondamental sera de faire en sorte que le **modèle de comportement** du système et le système réel lui-même aient sensiblement les mêmes performances. Cela conduira à identifier puis à corriger certaines causes du dysfonctionnement. À l'opposé, on pourra être amené à réviser le modèle quand il s'est montré peu réaliste : en bien (tant mieux pour le rendement, tant pis pour le coût initial du système qui aurait pu être allégé) ou en mal (la plupart des cas).

■ Pour les **systèmes flexibles de fabrication unitaire et de très petite série**, puisqu'il y aura en principe plusieurs machines identiques, une panne de machine n'arrêtera en général pas la production. Seule une panne des éléments généraux du système (chariots de transport, magasins de stockage, machines à mesurer, etc.) pourra conduire à l'arrêt complet. Par contre, les pannes auront une forte influence sur les coûts unitaires.

La gestion de fabrication elle-même est extrêmement simple : les programmes machines sont mis, au fur et à mesure de leur création, dans un FIFO/registre à décalage. Les priorités, les incidents de fourniture, la synchronisation avec les autres pièces à fabriquer et à approvisionner, conduisent uniquement à décaler les pièces dans le FIFO (*First In First Out*). Le choix de la machine se fera en général par le nombre minimal d'outils à changer dans le magasin d'une des machines capables de produire la pièce.

■ Pour la **fabrication en petite ou moyenne séries**, les moyens de production seront intermédiaires entre chaîne transfert et atelier flexible de production unitaire. La figure 4 montre un centre d'usinage identique à celui de la figure 5 en [B 7 122] mais muni d'un carrousel à broches permettant d'utiliser des têtes multiples, des broches de fraiseage à grande puissance, mieux adaptées à la production que le centre de la figure 5 [B 7 122].

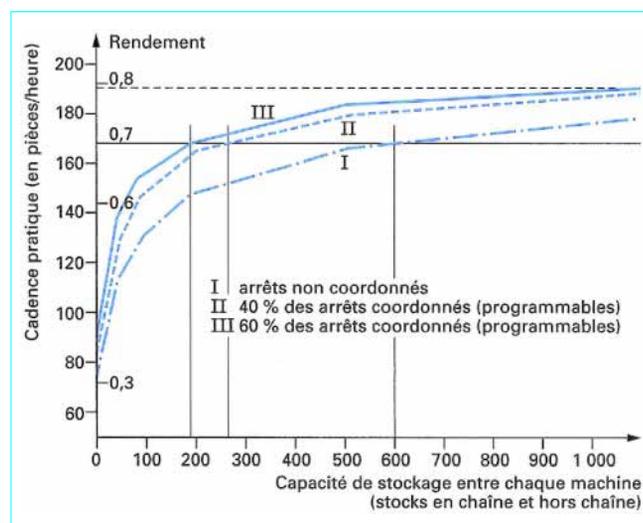


Figure 3 – Cadence de production et rendement en fonction du stock en ligne pour divers modes de gestion des arrêts

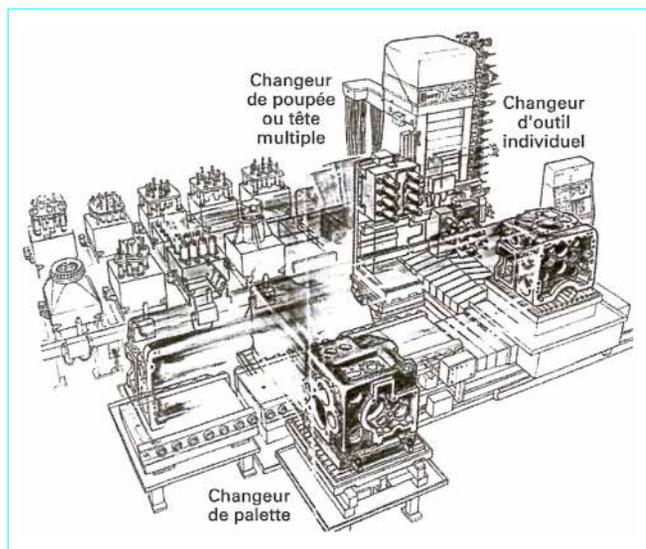


Figure 4 – Centre d'usinage équipé pour la petite et moyenne série (Burr)

Les problèmes de gestion de la production seront aussi intermédiaires. La gestion des arrêts et la modélisation prendront de l'importance par rapport à la production unitaire.

■ Dans tous les cas, le problème de la **détection** et de la **réparation des pannes** s'avérera fondamental.

● Les pannes de **commande**, de **traitement d'information** et de **puissance** sont maintenant facilement détectables grâce aux programmes de diagnostic inclus dans toute commande moderne.

Le dépannage automatique n'est possible, aujourd'hui, que pour le traitement de l'information. L'utilisation de bus/réseaux de terrain à grand – ou même moyen – débit permet le chargement des programmes d'une commande en panne dans un ordinateur/commande numérique/automate programmable de secours, situé au niveau de la chaîne ou du groupe de machines. Le bris d'un outil, toujours facile à détecter, ne nécessite plus l'arrêt de la machine, en production en grande série. La pièce dont on ne peut finir l'usinage termine son parcours sans que les unités d'usinage qu'elle va successivement atteindre se mettent en marche. Il suffit de savoir changer automatiquement l'outil cassé.

Pour les commandes de puissance, alimentation ou moteur, le diagnostic automatique est aussi facile à faire. Par contre, aujourd'hui, l'échange standard de l'appareil en panne ne peut se faire automatiquement de façon rentable. Le robot allant le changer est certes facilement réalisable mais, dans des conditions industrielles normales (espace ouvert, peu ou pas pollué, accessible à un être humain sans équipement spécial), on ne peut aujourd'hui le justifier économiquement.

● L'opération la plus compliquée, aujourd'hui, est la **détection des pannes mécaniques**. On ne peut, en effet, rentablement mettre un ou des capteurs capables de détecter le bris ou le simple défaut de fonctionnement (par exemple, un bruit de roulement à billes un peu trop fort, une température un peu trop élevée, etc.) de tous les organes mécaniques susceptibles de dysfonctionnement. Il y a bien des solutions techniques mais elles sont rarement rentables. Appliquer aux systèmes de fabrication les études de fiabilité faites pour les systèmes aérospatiaux est simplement inconcevable ; le coût en est beaucoup trop élevé (de plusieurs ordres de grandeur). Il reste essentiellement trois voies :

— la première consiste à éviter au maximum les pannes, en programmant le changement d'organes susceptibles de détérioration à conséquences sérieuses ; il y faut néanmoins une bonne connaissance statistique de la fiabilité des appareils ;

— la seconde, applicable dès maintenant, consiste à *repérer*, grâce à l'ordinateur de surveillance, *le point du cycle où la panne s'est produite* ; si elle n'est pas détectable (il ne s'agit donc pas d'une panne de commande), l'instant de son occurrence peut alors pointer directement vers l'organe mécanique qui en est la cause **probable** ; au fil du temps, un tel système deviendra un réel **système expert**, dont on peut montrer qu'il ne ressortit pas à l'intelligence artificielle (il n'en a en tous cas nul besoin) ;

— enfin, le troisième procédé est la **redondance** ; pour les cas les plus sérieux, comme l'initialisation de position d'une unité d'usinage, un capteur double permettra d'éviter toute panne si le système de commande exige un dépannage rapide du capteur fautif et signale à la hiérarchie tout dépassement du temps alloué à ce travail.

● Dans le cas des organes mécaniques purs, le problème du changement automatique est le même que pour le changement d'organe de commande de puissance. Il est certes aujourd'hui possible mais il n'est pas (encore) rentable.

■ Nous voudrions terminer cette étude des systèmes de fabrication par quelques considérations sur les **montages d'usinage** ou **montages porte-pièces**. Ils posent un problème aujourd'hui non résolu pour tous les types de fabrication mécanique.

● Pour la **très grande série**, que les montages soient fixes ou mobiles, il faut les surveiller, les mesurer, de façon à s'assurer qu'il ne peut y avoir de dérive de l'un à l'autre, ce qui est particulièrement délicat pour les transferts *avec montages*, où ceux-ci se déplacent avec la pièce de poste en poste ; dès qu'il y a nécessité de changer de montage, les risques graves de dérive se renforcent. Il faut donc une politique de maintenance rigoureuse afin d'éviter une chute de la qualité des produits au fil des mois et des années.

● Pour la **très petite série** et la **pièce unitaire** fabriquée automatiquement, le problème est dans l'étude et la réalisation du montage, pour une seule pièce parfois, pour un coût acceptable et dans un délai compatible avec son temps de fabrication, dont on a vu qu'il pouvait descendre à quelques heures. [3] traite de ce problème mais sans y apporter de vraie solution. Que peut-on faire ? Les règles de conception des pièces doivent inclure les méthodes et les moyens de positionnement et de brigade.

De nombreux fournisseurs (cf. figure 5) proposent des systèmes universels censés résoudre tous les problèmes. En fait, il n'en est rien. Ils permettent de traiter quelques cas particuliers, sans plus. Que peut-on alors espérer ?

● Pour un **atelier flexible**, la seule solution est de fixer la pièce à une palette standard, identifiée par une pastille transpondeur permettant de la suivre partout et par laquelle on a accès à toute l'histoire de la pièce transportée :

— pour les **centres de tournage**, la palette et le montage qui tient la pièce ne serviront qu'au transport ;

— pour les **centres d'usinage**, par contre, comme cela se fait depuis longtemps (figure 5 en [B 7 122], par exemple), la pièce est positionnée et bridée sur la palette et celle-ci, à son tour, est positionnée et bridée sur la machine.

La palette donne donc à des pièces quelconques un **format standard**.

Bien évidemment, il n'est pas question d'usiner la palette pour l'adapter à une nouvelle pièce. On doit donc fixer sur elle un **bloc intermédiaire** qui recevra les usinages d'adaptation à la pièce. Mais quels usinages et comment les faire ? Ces usinages correspondent évidemment à des pièces d'appui et à des brides standards. Seule leur position variera d'une pièce à l'autre. On peut alors imaginer le mode de réalisation du montage. On aura dans un système informatique la liste de tous les blocs intermédiaires neufs et déjà utilisés et ré-utilisables. En fonction de la nouvelle pièce à usiner, on choisira un bloc neuf ou non, dans lequel on pourra faire les usinages correspondant aux appuis et brides standard. Cela se fera avec récupération ou non de surfaces déjà utilisées pour des pièces précédentes. Ensuite, le bloc sera monté, manuellement ou automatiquement, sur une palette. Sa gamme d'usinage étant faite automatiquement (et simplement, du fait de la standardisation), l'ensemble palette/bloc intermédiaire partira dans le système de

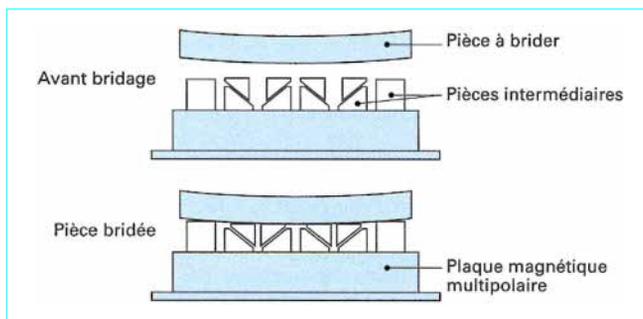


Figure 5 – Système magnétique universel de montages porte-pièces (Gühring Peritex AG)

fabrication comme s'il était un produit. Toute l'opération, depuis le choix du bloc jusqu'à son retour, pourra donc être réalisée en moins d'une heure.

Quand la palette et le bloc usiné reviennent, ils sont automatiquement équipés des éléments standards de montage ; puis ils reçoivent la pièce à usiner et repartent dans le système de fabrication. Au retour, la pièce finie est démontée et les éléments de montage remis dans leur magasin tampon pour une très prochaine réutilisation.

Cette description semble montrer que la chose est aisée. En fait, elle ne l'est pas du tout et personne, à notre connaissance, ne l'a jamais réalisée. Dans la référence [3] le principe est établi, mais ce stade n'est pas dépassé. La réalisation du seul système informatique ne saurait être considérée comme très simple. Certains y verront une nécessité d'intelligence artificielle. Le choix et la création des éléments de montage est encore beaucoup plus complexe. Enfin, et c'est sans doute cela le plus facile à faire – ce qui ne veut pas dire très facile –, il faut réaliser tout l'appareillage d'automatisation de manutention des différents éléments et leur mise en œuvre.

- Pour la **moyenne série**, le problème des montages est relativement plus simple que pour la grande série et pour la production unitaire. Comme pour la production unitaire, on est pratiquement dans l'obligation d'utiliser des montages porte-pièces sur palettes, mais ils n'ont pas besoin d'être réalisés en temps réel. Ils sont quasi permanents, ré-utilisés périodiquement et leur faible nombre en rend la surveillance aisée.

La seule conclusion que nous puissions tirer à ce stade est que le problème des montages d'usinage est sans doute le plus complexe qui se pose à un utilisateur et à un fabricant de machines-outils. C'est bien pour cela qu'il n'a toujours pas reçu de solution universelle.

3. Conclusions

Nous voudrions conclure cet ensemble sur les machines-outils par quelques considérations sur leur **futur**. Quel est-il ? En restera-t-il ? Si oui, quels types ? Quels procédés utiliseront-elles ? Et les systèmes de fabrication, comment évolueront-ils ? Nous n'avons parlé que de machines-outils d'usinage, mais elles ne sont pas les seules. Qu'advient-il des autres procédés ? Que penser du prototypage rapide ? Permettra-t-il de faire des pièces de forme complexe sans usinage ?

Évidemment, nous sommes incapables de répondre à toutes ces questions de façon raisonnée ; aussi allons-nous seulement donner quelques idées, quelques impressions.

- Il y a pourtant quelques certitudes. Une de celles-ci est que les **machines d'assemblage**, les **machines de conditionnement** sont appelées à un développement beaucoup plus important que les machines d'usinage. Ces dernières sont indispensables depuis longtemps ; cela fait plus d'un siècle qu'elles savent faire des opérations qu'un homme ne sait pas réaliser avec ses mains, même munies d'outils spéciaux. L'homme n'a ni la précision – sauf pour quelques opérations spéciales –, ni la puissance. Par contre, l'assemblage, le conditionnement automatiques se sont développés beaucoup plus tardivement, et presque tout reste à construire. Cela tient au fait que ces opérations pouvaient se faire avec une main-d'œuvre non qualifiée, souvent immigrée.

Nota : cela dure depuis la tablée des manufactures du XVI^e siècle. Les problèmes de chômage, jusqu'à un passé très récent (fin des années 70), étaient jugés peu importants, voire utiles. Ils permettaient d'avoir une main-d'œuvre obéissante et bon marché. Les ouvriers eux-mêmes et les syndicats encourageaient, juste après la dernière guerre mondiale, la venue de travailleurs du tiers-monde. Mais le chômage a changé de dimension, en même temps que les salaires plus élevés des manœuvres les rendaient à la fois plus exigeants et moins rentables.

L'automatisation de ces tâches n'exigeant pas une qualification élevée s'impose alors car elle diminue les risques du fait des grèves, tout en améliorant rentabilité et qualité.

- Où en est la **machine-outil d'usinage** ?

Une chose est certaine, elle restera indispensable pendant de nombreuses décennies pour les opérations de haute précision. Les procédés d'usinage évolueront mais l'outil coupant, à arête de coupe unique ou multiple, ou encore meule ou pierre, restera quand même la base. Les procédés *nouveaux* (usinage par électroérosion, électrochimique, laser, etc.) sont encore trop lents et trop fortement consommateurs d'énergie [B 7 120].

- Les machines deviendront cependant de plus en plus **multiprocessus**, la règle de base étant qu'on essaiera toujours de ne pas lâcher la pièce avant qu'elle ne soit finie. C'est la saisir, la positionner, la brider, la stocker qui coûte cher, pas l'usiner.

Les machines de formage continueront cependant d'évoluer. Machines de fonderie, de forge à froid, de découpage fin, de frittage, livreront des pièces toujours plus proches de la cote finale. C'est donc l'usinage d'ébauche qui diminuera d'importance, au moins pour la grande série, mais non l'usinage de finition. Pour la petite série et la fabrication unitaire, on aura souvent intérêt à ne plus passer par un brut coulé ou forgé ; les délais d'obtention sont trop longs, les fournisseurs pas assez fiables ; ils interdisent le vrai *juste-à-temps*. On aura alors intérêt à tirer les pièces de la masse, de la barre, quitte à faire beaucoup de copeaux en ébauche.

- Le **prototypage rapide** ne permettra-t-il pas, alors, de faire des pièces à l'unité, qui auront l'apparence de pièces coulées ou forgées ? Cela se fait déjà, mais il ne semble pas aujourd'hui que les procédés trouvés permettent de dépasser le stade des prototypes dans les industries où le prix de revient n'est pas prioritaire. Si notre vision s'avère juste, le prototypage rapide, tout en se développant, ne pourra pas avant longtemps (sans doute des décennies), prétendre à pénétrer les marchés vraiment concurrentiels, les applications grand public.

- La machine-outil d'usinage ne va pas disparaître, dans tout futur aujourd'hui prévisible, mais il ne faut pas non plus en attendre un développement spectaculaire. Les productions croîtront sans doute lentement, mais la disparition des sociétés incapables de s'adapter aux changements – nous avons essayé d'en décrire certains, inéluctables – est plus que prévisible. Rien n'est écrit ; il est sans doute très optimiste de songer à une réaction, à un sursaut de nos sociétés européennes, mais il est techniquement possible si on le veut.

Machine-outil

par **François C. PRUVOT**

Ingénieur-docteur

Ancien Directeur technique de Renault Machines-outils

*Professeur honoraire, Directeur du Laboratoire de productique et de machines-outils
École polytechnique fédérale de Lausanne*

Références bibliographiques

- [1] PRUVOT (F.). – *Conception et calcul des machines-outils*. Vol. 1. *Généralités. Morphologie. Plan général*. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne (1993).
- [2] ISO Organisation Internationale de normalisation. – *Recueil des normes ISO 6 machines-outils*.
- [3] HOSHI (T.). – *Fixture CAD/CAM research program for future FMS*. German-Japanese Symposium, Shortening of set-up time (1986).
- [4] PRUVOT (F.). – *After cad : automatic design. Dream or reality*, 1993. Compeurs Proceedings (IEEE), Computers in design, manufacturing and production. Paris-Évry, 24-27 mai 1983.
- [5] VAN GRIETHUYSEN (J.-P.). – *Synthetic Intelligence. Application to the automatic design of automotive transmissions*, 1993. Compeuro Proceedings (IEEE). Computers in design, manufacturing and production. Paris-Évry, 24-27 mai 1983.
- [6] DEL PEDRO (M.) et PAHUD (P.). – *Mécanique vibratoire*. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne (1989).