

Machine-outil

Exemples de machines

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 7 122 - 2
1.1 Règles constructives.....	— 2
1.2 Conclusions.....	— 2
1.3 Points communs aux machines futures	— 3
2. Centre d'usinage pour pièces polyédriques	— 4
3. Centre de tournage pour arbres	— 7
4. Machine-transfert	— 7
4.1 Gamme d'usinage	— 7
4.2 Structure des machines-transferts.....	— 8
4.3 Les machines spéciales sont-elles encore nécessaires ?	— 10
Pour en savoir plus	Doc. B 7 124

Nous avons montré en [B 7 120] et [B 7 121] que toutes les machines, à de rares exceptions près, tendaient vers un archétype commun : le centre d'usinage à 5 ou 6 axes. Beaucoup seront – et certaines le sont déjà – multi-processus.

Les machines pour « arbres et carters » (nous appelons ces derniers **pièces polyédriques**) utiliseront outils fixes et tournants, feront des traitements thermiques, la plupart par laser, et finiront des surfaces traitées, qu'elles soient planes ou de révolution, à l'« outil dur » et seront capables de faire la super-finition, généralement à la pierre oscillante, mais sans exclure d'autres procédés, tels que la bande abrasive. Comme déjà dit, le but visé avec ces machines sera la fabrication complète de pièces complexes en un très petit nombre de prises : très souvent une seule, quelquefois deux, rarement trois.

Avant d'aborder le traitement de quelques exemples, nous pensons indispensable de tirer quelques conclusions et règles constructives de la brève étude faite en [B 7 120] et [B 7 121]. Elles éclaireront critiques et propositions que nous allons faire.

1. Généralités

1.1 Règles constructives

L'alésouse de la figure 1 possède 4 axes. La colonne est fixe sur le bâti et la broche coulisse verticalement sur elle (axe Y). Les trois autres axes déplacent la pièce. Celle-ci est montée sur une table tournante (axe B), qui est elle-même sur un chariot se déplaçant en X, qui coulisse sur une traverse animée du mouvement en Z.

Le chariot intermédiaire (chariot en croix) possède donc deux éléments de glissières (plutôt une glissière et des surfaces de guidage) dont les plans principaux P (figures 44 et 45, en [B 7 121]) sont parallèles. Ce chariot croisé, qui ne peut pas être épais pour une question d'accèsibilité de la pièce à usiner à l'opérateur, ne pourra donc être rigide.

Règle 1 : un élément de structure ne devra jamais recevoir plusieurs éléments de guidage (glissière ou surfaces de chariot) dont les plans principaux sont parallèles.

Cette règle est une règle d'interdiction. On peut alors émettre la règle constructive correspondante.

Règle 1A : sur un même élément de structure devant recevoir deux ensembles différents de surface de guidage, ceux-ci devront être disposés sur des faces perpendiculaires.

Le centre d'usinage de la figure 4 donne un exemple d'application de cette règle. On voit en effet que les éléments de guidage des axes X et Y disposés sur des plans perpendiculaires de la colonne permettent de réaliser une structure massive, très rigide. Mieux encore, ce même type de construction permet d'établir entre les deux glissières tout un ensemble de sous-structures de rigidification assurant leur position relative et donc la qualité de la machine.

La même machine (figure 1) montre, comme nous venons de le mentionner, une table tournante (axe B) d'axe perpendiculaire à la glissière X. Il est bien clair que, dans ces conditions, la table tournante de l'axe B ne pourra pas être épaisse et sera peu rigide.

Règle 2 : un même élément de structure ne devra jamais recevoir un élément de guidage linéaire dont le plan principal sera perpendiculaire à l'axe de rotation d'un autre élément tournant porté par le même élément de structure.

Cette règle est une règle d'interdiction. On peut créer la règle constructive correspondante.

Règle 2A : si un même élément de structure doit recevoir un élément de guidage linéaire et un élément tournant, l'axe de rotation de l'élément tournant devra être parallèle au plan principal de l'élément de guidage linéaire.

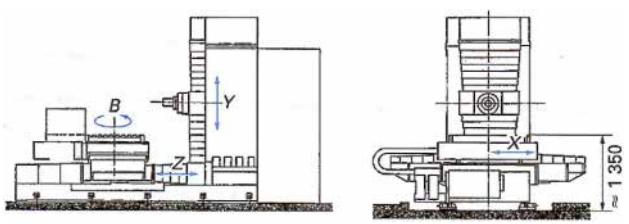


Figure 1 – Alésouse Dixi 400

La figure 4 fournit un exemple d'application de cette règle. Le chariot Z, dont le plan principal est horizontal, reçoit l'axe B qui lui est parallèle. Les figures 41 à 43 [B 7 121] et la figure 5 montrent qu'on peut alors créer un chariot de grande rigidité assurant à la machine la qualité désirée.

On peut bien évidemment avoir des solutions de compromis. La figure 2 montre un centre d'usinage de petites dimensions dont l'axe B est porté par un élément fixe de structure. Cette solution a été choisie, car elle permet une bonne évacuation des copeaux sans être aussi inhabituelle que la structure de la figure 4. Cependant, son inconvénient est qu'un chariot croisé doit porter deux ensembles de glissières. Afin de ne pas trop contrevenir à la règle 1, celui-ci est en forme de coin lui conférant une rigidité acceptable.

Sur le plan de la rigidité structurelle, la solution de la figure 3 eut été meilleure. Le chariot X, en accord avec la règle 2A, porte l'axe B. On voit cependant que le problème de l'évacuation des copeaux sera moins bien résolu que pour le centre d'usinage de la figure 2. La structure de la figure 4 est donc meilleure. Encore meilleure serait une structure totalement inversée. C'est la machine *pendue au plafond* qui s'imposera obligatoirement dans le futur.

1.2 Conclusions

Nous pouvons maintenant tirer quelques **conclusions** de l'étude des organes de machines faite en [B 7 121].

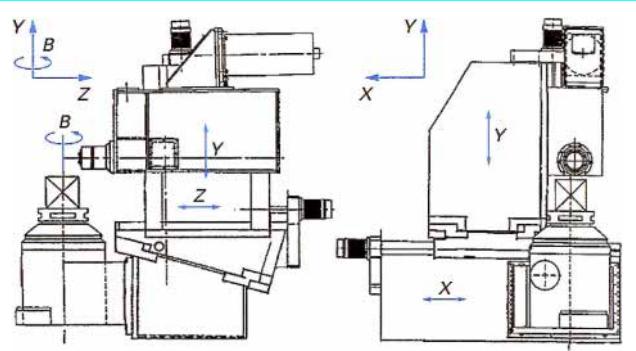


Figure 2 – Petit centre d'usinage EPF-L

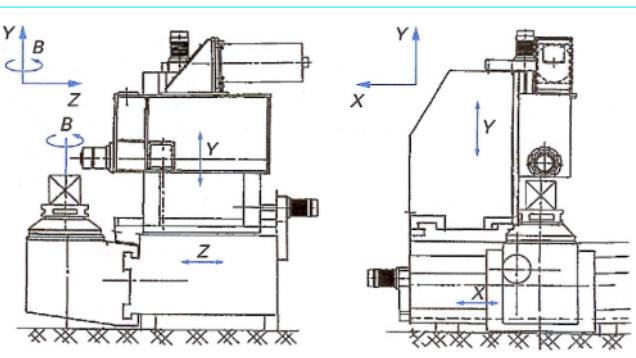


Figure 3 – Centre d'usinage EPF-L modifié

■ La **première**, qui nous semble la plus importante parce qu'appllicable à bien d'autres machines que la machine-outil, est qu'une véritable méthode d'étude rationnelle est possible et souhaitable.

● Le point que nous voulons d'abord mentionner concerne le *cahier des charges*. Celui-ci, quel que soit le produit à réaliser doit être purement fonctionnel, que ce produit soit une quelconque machine, un régulateur, un logiciel. Le cahier des charges doit naturellement spécifier les fonctions du produit mais aussi ses performances. En principe, il ne devrait mentionner aucun élément technique, et moins encore technologique du produit.

● Deuxièmement, le produit devant être de coût minimal et sa réalisation étant astreinte à des contraintes temporelles, il est bien évident qu'il devra le plus possible faire appel à un *standard* de l'entreprise réalisatrice. Ce standard dépassera largement le cadre des pièces et même des sous-ensembles. Il incluera bien d'autres choses telles que des méthodes de conception adaptées à chacun des organes, à des normes portant sur les formes, les dimensions, les tolérances, les matières, les traitements thermiques et physico-chimiques. Ces normes feront implicitement partie du cahier des charges. Il ne faut cependant pas qu'elles bloquent toute possibilité d'évolution. On devra donc s'efforcer de les faire évoluer *avant* que le besoin les impose. Nous espérons que l'exemple des broches, sur lequel nous nous sommes plus étendu que sur les autres composants, montre bien cette nécessité d'*anticipation*, qui permettra d'étudier, largement à l'avance, procédés et composants dont on sait qu'ils seront, un jour prochain, nécessaires.

● Le troisième point concerne la méthode d'étude. On traitera dans l'ordre cinématique, statique, dynamique, thermique, technologie et économie, comme on l'a vu (§ 2 en [B 7 121]). En allant du modèle le plus simple au plus complexe, cela permet d'éviter des oubliés, de prévoir et d'éviter des comportements que la méthode traditionnelle d'étude fait découvrir à la mise au point de la machine.

■ Une **seconde** conclusion, presque aussi importante que la première, a plus particulièrement trait à l'économie (et donc à la technologie). Comme chacun le sait sans forcément le mettre en pratique, une machine (au sens très large) doit non seulement être étudiée pour satisfaire à son cahier des charges formel, mais aussi en vue de sa fabrication ; c'est le *design for manufacturing* et le *design for assembly* des anglo-saxons, auxquels on doit ajouter, bien évidemment, le *design for service*.

Cela fait bien longtemps qu'on nous propose comme moyen de satisfaire à tout cela le *concurrent engineering*, l'ingénierie parallèle, souvent mal comprise et moins bien encore mise en œuvre.

Les raisons de l'échec actuel sont bien connues et tiennent à l'inertie des personnes et des institutions ; persistance d'habitudes dépassées ; inadaptation aux fonctions et connaissances lacunaires. Cette inadéquation commence dès l'école ; la formation n'est plus adaptée aux besoins ; elle se poursuit durant toute la carrière à tous les niveaux, depuis le niveau d'exécution jusqu'à la direction. En effet, la formation supérieure actuelle, dans les universités et écoles d'ingénieurs, met l'accent sur les sciences de base (mathématiques, physique, mécanique, thermodynamique, etc.), qui seules reçoivent un traitement réellement scientifique. Tout ce qui est constructif et technologique (dessins et études, organes de machines, projets de construction, etc.) n'atteint pas le niveau universitaire et reste basé sur l'expérience, l'empirisme. Créer de véritables sciences constructives, aux bases aussi fermement établies que les sciences analytiques, doit devenir un objectif prioritaire dans tous les domaines.

1.3 Points communs aux machines futures

La fabrication en très petit nombre de prises de pièces complexes des machines impliquera, de la part du projeteur, une excellente connaissance des procédés de fabrication. Toutes ces machines

seront aussi capables d'usiner des surfaces non analytiques, mais elles garderont la précision et la rigidité des machines usinant des *surfaces mécaniques*.

Ces machines seront nécessairement **multilogiciel**.

■ Beaucoup auront deux **broches**, ou plus. Celles-ci, les plus rapides, destinées à l'UTGV ([B 7 120] § 3.5), seront traitées comme des porte-outils et seront mises en place par le changeur d'outil normal avec leurs alimentations propres ; on peut montrer que les machines n'en seront pas plus compliquées. La complication (et donc le coût) supplémentaire sera uniquement portée par l'auxiliaire. On utilise déjà des machines **bibroche**, l'une des deux destinée à l'usinage conventionnel, l'autre à l'usinage à haute vitesse. Elles continueront certainement d'exister mais leurs coûts d'achat et d'exploitation seront plus élevés. Les deux broches, en particulier, ne peuvent pas utiliser le même standard de porte-outils, les outils rapides étant nécessairement plus petits (comme les broches le seront elles-mêmes) pour permettre des vitesses critiques plus élevées. Il faudra donc probablement deux magasins à outils différents, deux changeurs d'outils. La broche interchangeable, au contraire, prendra la place d'un outil fixe et arrivera toute équipée de son outil. Il est vrai que les deux types d'usinage ne sont pas destinés aux mêmes types de surfaces :

— les faces fraîsées, les alésages de précision, les simples trous percés, les taraudages, chanfreinages, les cylindres tournés se feront, pour longtemps encore, de façon traditionnelle ; rappelons que des fraîsages dans les alliages légers à des vitesses de l'ordre de 5 000 m/min (> 80 m/s) se font depuis plus de trente ans avec des broches et outils conventionnels ;

— à l'usinage à très grande vitesse seront réservées les surfaces de médiocre précision, les grands débits de matière, les surfaces non analytiques, qui ne sont justement jamais très précises.

■ Signalons enfin que l'usinage de **dentures** (cannelures et engrenages) est dès à présent à la portée d'un centre d'usinage moderne, ce qu'on pourrait appeler **centre de tournage**.

On peut montrer que l'usinage flexible de pignons de tous types (cylindriques droits et hélicoïdaux, coniques et spiroconiques) peut être fait sur ce même centre de tournage par génération à l'aide d'un très petit nombre d'outils simples standards équipés de plaquettes de coupe à hautes performances.

Le traitement thermique de ces dentures peut se faire par génération, au laser, avec exactement le même équipement utilisé pour traiter les cylindres de révolution. Le même centre pourrait aussi rectifier ces dentures mais on préférera, en général, pour les dentures très précises, résérer des machines à la seule rectification, liquide de coupe et protections devant être adaptés à la rectification.

Enfin, la superfinition par génération à la pierre oscillante des dentures peut être envisagée, auquel cas elle pourrait aussi se faire sur les centres de tournage.

■ Tout cela pourrait constituer un portrait assez réaliste de ce que seront, à brève échéance, les machines universelles, pour fabrication unitaire, petite et – peut-être – moyenne série. Pour la grande production, les machines au moins dans leur morphologie générale, resteront proches des machines-transferts actuelles. Certes, le besoin d'une certaine flexibilité se fera sentir (il le fait déjà d'ailleurs), mais de plus fortes évolutions ne seront possibles que si les pièces à usiner elles-mêmes évoluent vers une plus grande adaptation à la fabrication et à la flexibilité.

Notons un dernier point, très important. Les montages d'usinage pour fabrication unitaire ou de très petite série défient aujourd'hui l'idée de flexibilité. Dans la référence [3], on trouve une revue de ce qu'on essayait de faire, en fin des années quatre-vingt. Il semble que la solution ne soit pas encore trouvée aujourd'hui. Sans prétendre la donner, nous fournirons quelques indications sur des travaux très récents. La solution, après tout, n'est peut-être pas très loin, mais elle nécessite encore du travail, et surtout l'adaptation des personnes à des tâches vraiment nouvelles qui leur demanderont une beaucoup plus grande flexibilité... d'esprit.

2. Centre d'usinage pour pièces polyédriques

La courte description que nous allons faire va s'appuyer sur la figure 4 (ou 7 en [B 7 120]) et la figure 7.

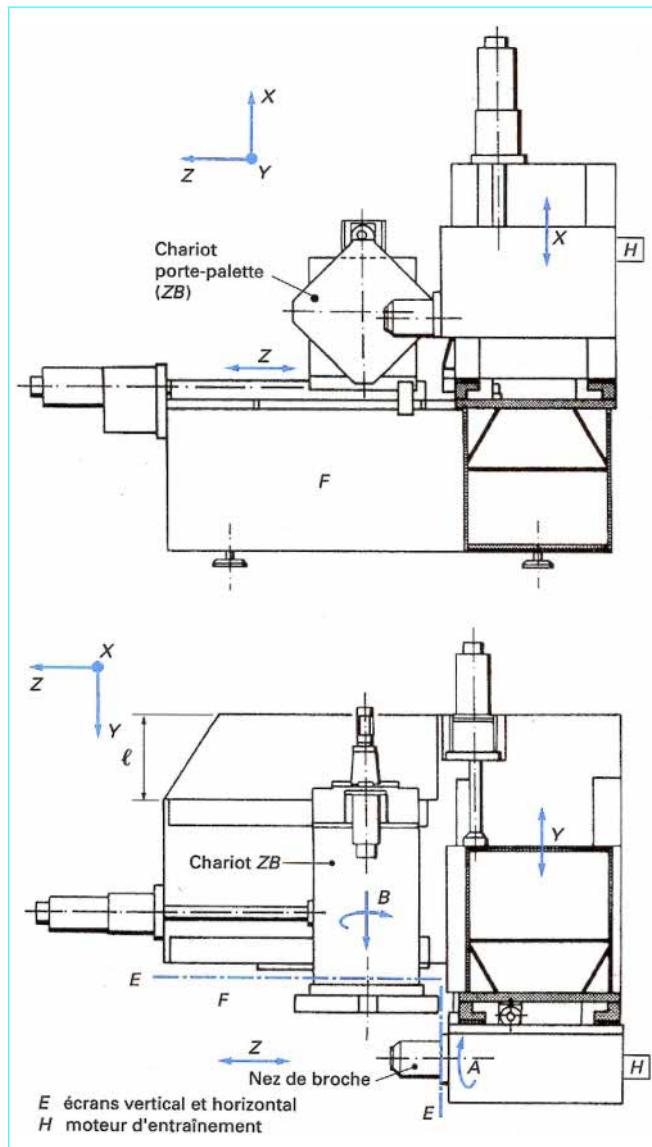


Figure 4 – Centre d'usinage LMO-EPFL

■ L'architecture de la machine représentée figure 4 est relativement classique, encore que non généralisée. L'axe *B* du chariot porte palette *ZB* et la portion horizontale de la broche, dont le chariot est situé sur la face avant de la colonne, présentent un grand intérêt.

■ Un avantage déjà signalé est qu'on peut disposer un **écran vertical coulissant** (repéré *E* sur la figure 4), qui évite pratiquement tout contact entre copeaux et liquide de coupe, d'une part, et machine, d'autre part. Ainsi, les espaces travail et machine sont-ils parfaitement délimités sans compliquer les opérations d'entretien ou de réparation. Le ramassage des copeaux et la récupération du liquide de coupe peuvent alors se faire dans la zone repérée *F*. L'écran *E* est simplement composé :

— pour la partie parallèle à *Y*, d'une plaque verticale terminée par un télescope de faible largeur autorisant le déplacement en *X* de la broche ;

— pour la partie *E* parallèle à *Z*, de plaques articulées autour de charnières verticales et coulissant dans un guide, et qui sont déviées parallèlement à l'axe *Y*.

● Le **capotage**, comme celui de la machine de la figure 8 (en B 7 120), est composé d'une coque pouvant s'enlever dans son intégralité vers le haut pour les opérations d'entretien/réparation. Pour le changement de pièce et d'outil, un capot partie (comme figure 8) permet un accès aisément.

● Comme on peut le voir, le **bâti** a, vu de dessus, une forme en L. Les deux systèmes de glissières *Y* et *Z* sont reliés par des toiles internes assurant une grande rigidité relative. Par contre, le calcul ayant montré une rigidité en torsion insuffisante, le caisson *Z* a été augmenté de la largeur *ℓ*.

● La **structure** de la colonne et du bâti **porte-broche** sont aussi conformes à ce qui a été vu en [B 7 121] § 4.5.

● La **broche** est entraînée par un moteur hydraulique volumétrique à cylindrée variable *H*, pouvant délivrer en continu 200 kW, et par une boîte de vitesses épicycloïdale à trois rapports pouvant délivrer une puissance de 90 kW, constante de 400 à 10 000 tr/min. Le moteur est alimenté par une pompe à cylindrée variable, l'ensemble formant une transmission hydrostatique de haut rendement, dont le moteur primaire, du type asynchrone, est situé à l'extérieur de la machine.

● Les **avances** se font par moteurs synchrones autocommutés et vis à billes.

Une variante, qui utilise crémaillères et pignons à rattrapage de jeu, permettant des vitesses de déplacement beaucoup plus grandes que les vis, a été étudiée.

Exemple : au total, l'ensemble de la structure (sans la broche) doit avoir une **rigidité entre pièce et outil** de 10^9 N/m, soit environ dix fois plus que les machines traditionnelles de mêmes dimensions.

Notons que tous, ou presque, les centres d'usinage actuels (figure 5) utilisent des colonnes doubles (figure 6), la poupe porte-broche coulissant entre les deux. Il est facile de démontrer que cette structure, adoptée car elle semble présenter une plus grande symétrie, conduit à des rigidités de torsion et de flexion beaucoup plus faibles que la colonne monobloc de la figure 4, deux colonnes de petites dimensions reliées par une table et un sommier de moyenne épaisseur, ne pouvant être d'une rigidité comparable à celle d'une colonne monobloc de mêmes dimensions extérieures.

- La machine de la figure 4 est équipée de **glissières hydrostatiques**. On remarquera, à ce propos, que les deux glissières représentées figure 47 (en [B 7 121]) sont incorrectement étudiées. En effet, l'équilibre de l'ensemble ne peut être obtenu que si un moment de flexion existe dans la structure séparant les deux glissières. Pour éviter cela, il faut respecter la règle 3.

Règle 3 : dans un ensemble de deux patins hydrostatiques enlevant un seul degré de liberté, les deux patins doivent être de surfaces égales et exactement opposées.

Nota : pour la glissière à queue d'aronde (figure 47b en [B 7 121]), une telle conception est donc impossible. Cette glissière est à proscrire absolument.

Pour la glissière de la figure 47a, on voit que la condition de la règle 3 ne peut être remplie du fait que les poches supérieures sont plus grandes que les poches inférieures et de centre de gravité déporté. On devra donc les réduire en surface et les mettre exactement en face des poches inférieures.

- La construction de la glissière de guidage en lacet est correcte.

On voit que la règle 3 est automatiquement respectée (sauf déséquilibre dû à l'hyperstatisme, que nous avons signalé en [B 7 121] § 5.2), pour les patins à recirculation de galets (figure 46 [B 7 121]). Pour les glissières de la figure 44 [B 7 121], le problème ne se pose pas, car elles ne peuvent être préchargées (autrement que par la gravité).

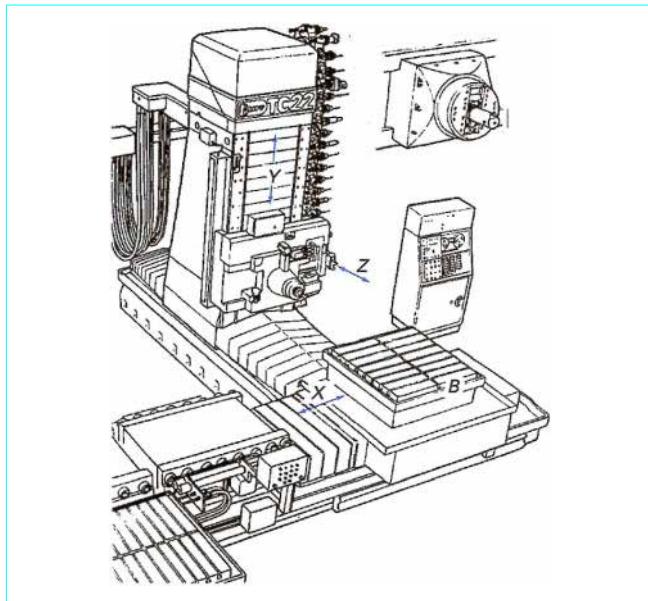


Figure 5 – Centre d'usinage Burr

(machine ancienne qui n'est plus en production)

- Quelques **particularités de l'axe ZB** sont signalées (figure 7).

Notons que ce centre peut recevoir un **cinquième axe**, une **rotation A** de la broche. Dans ce cas cependant, le mode d'entraînement en rotation de celle-ci est plus complexe et il devient difficile d'assurer une puissance aussi élevée qu'avec la machine à quatre axes.

Cette rotation A peut aussi être assurée par l'ensemble porte-palettes. On contrevente ainsi à la règle 2 (§ 1.1). Cependant, on peut alors trouver un mode de construction spécial qui en rend possible la réalisation : le chariot Z devient une simple plaque d'assez forte épaisseur (environ 100 mm) recevant les patins hydrostatiques de Z et sur laquelle l'ensemble de l'axe B tourne suivant A par l'intermédiaire d'autres patins hydrostatiques assurant une grande rigidité de liaison.

- Que peut faire une telle machine ?

• En **version 4 axes**, elle peut assurer l'usinage complet, ébauche et finition, d'une pièce polyédrique dont les faces d'usinage sont les faces latérales d'un prisme.

De plus, l'axe B tournant à grande vitesse permet la finition à l'outil fixe des faces perpendiculaires à l'axe B et d'alésages centrés sur l'axe B.

• En **version 5 axes**, elle permet l'usinage de toute pièce polyédrique dont les faces peuvent être vues dans un demi-espace limité par la face de la palette porte-pièce.

Une telle machine, *bien utilisée* (c'est-à-dire lorsque les pièces qu'elle usinera auront été conçues pour elle), permettra l'usinage de la plupart des pièces en une seule ou au plus deux prises. Elle sera la base d'un système d'usinage *juste-à-temps* de pièces polyédriques.

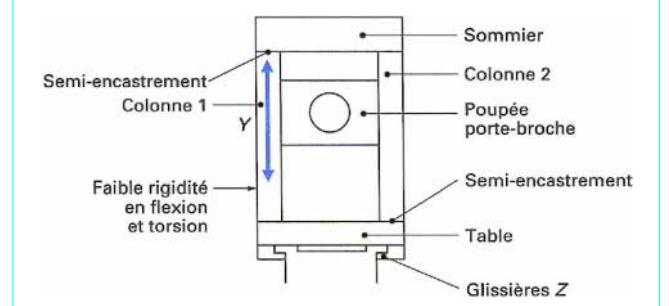
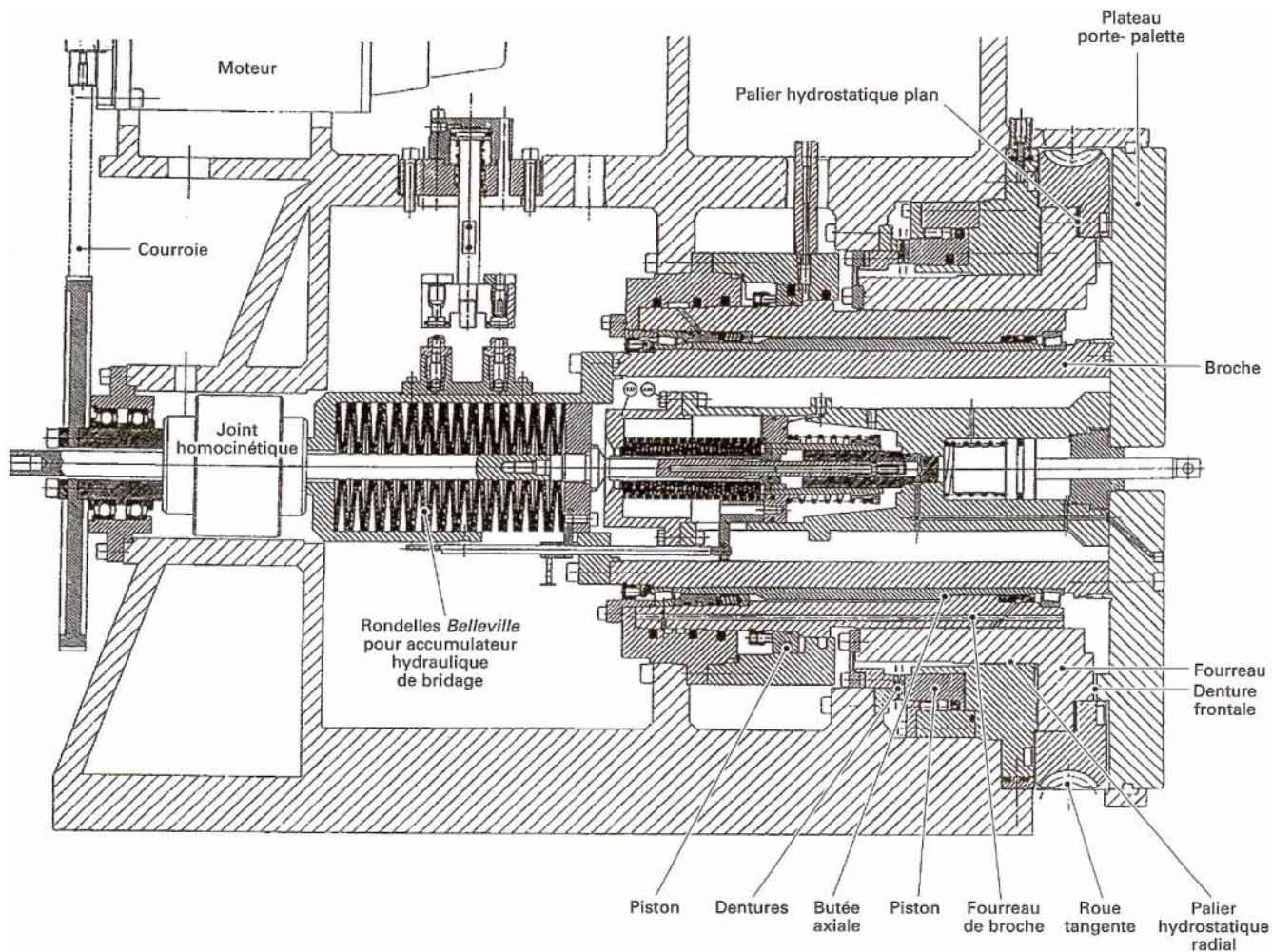


Figure 6 – Colonne double : schéma de principe



Le **plateau porte-palette** peut être entraîné à grande vitesse par la broche montée sur deux roulements à galets coniques préchargés élastiquement, le moteur, la courroie et le joint homocinétique. Le moteur de rotation à basse vitesse, qui sert au positionnement angulaire précis et à l'usinage à l'outil tournant, entraîne, par l'intermédiaire d'une vis sans fin, une roue tangente fixée sur un fourreau. Celui-ci est centré par un système de paliers hydrostatiques radiaux dans le corps (deux degrés de liberté enlevés). Un palier hydrostatique plan lui enlève trois degrés de liberté supplémentaires.

Pour la **rotation à grande vitesse**, le fourreau de broche est déplacé vers la droite par un piston. Il déplace le plateau dont la denture frontale se désen- grène de celle du fourreau et donc de l'entraînement à vis sans fin et roue tangente.

Pour la **rotation lente**, le piston agit en sens inverse et les roulements de broche sont déchargés. Il transmet la force axiale au fourreau de broche, qui transmet la force à la broche par la butée axiale. La denture frontale est alors engagée.

Comme nous l'avons mentionné en B 7 121 (§ 4.5), le plateau peut aussi prendre trois cent soixante positions angulaires discrètes grâce à des dentures frontales en trois parties, dont un élément est commandé par un piston.

Tout le système que l'on voit au centre de la broche est en fait un accumulateur hydraulique destiné à brider la palette porte-pièce sur le plateau. Il n'est alimenté en huile sous pression qu'à l'arrêt seulement et évite ainsi un joint tournant.

Figure 7 – Chariot ZB (centre d'usinage de la figure 4)

3. Centre de tournage pour arbres

Pour décrire cette machine, nous allons nous appuyer sur une étude faite mais abandonnée, le tour CTM25 de Georg Fischer GF (figure 8). Cette machine est un authentique centre d'usinage à 5 axes (X , Y , Z , B et C), utilisant outils fixes et outils tournants, qui trouvent place dans un magasin de grande contenance. À juste titre, le concepteur s'est donc débarrassé de l'encombrante tourelle, chère, peu rigide et portant un nombre insuffisant d'outils. De plus, ce tour a été muni d'une deuxième poupée porte-broche qui joue à la fois le rôle de contre-pointe, de lunette et de broche de reprise, permettant l'usinage complet de l'arbre.

C'est donc une machine très intéressante et novatrice, mais on peut facilement comprendre les raisons techniques de son échec. Du même coup, nous pouvons définir la machine *idéale* (au moins son cahier des charges). Il faut certes garder les axes X , Y , Z , B et il faut y ajouter l'axe de broche, A , qui pourra être interpolé avec les autres ; nous allons en voir l'utilité.

La construction choisie par GF est en contradiction avec la règle 1 (§ 1.1). Le déplacement en Z du chariot Y ne peut que conduire à une très basse rigidité car ce chariot croisé est plat. Les deux plans principaux des glissières sont parallèles. La correction est aisée. Il suffit de porter la translation Z sur la poupée. Celle-ci recevra alors un moteur à grande vitesse, pour la finition des surfaces de révolution à l'outil à une seule arête de coupe, et une commande à basse vitesse pour l'ébauche à la fraise de ces mêmes surfaces et pour les travaux de fraisage et de gravage.

La seconde poupée, mobile selon un axe Z' , paraît *a priori* une bonne idée. Cependant, on réalise vite qu'elle constitue sans doute le principal inconvénient de la machine : elle interdit les opérations d'alésage sur les pièces longues. De plus, elle empêche l'automatisation complète de la machine. En effet, on sait la difficulté qui a été rencontrée jusqu'à présent par les constructeurs de machines, pour changer le mandrin – ou ses mors – d'un tour. La présence de deux mandrins interdit presque définitivement cette opération. De même, l'axe B , d'après la figure 8, ne peut être orienté parallèlement à l'axe de broche.

La machine *idéale* et *réaliste* est donc un centre de tournage à poupée mobile, avec contrepointe et lunette autocentreuse à commande numérique dont l'axe B pivote de 90° . La broche porte-pièce est munie d'un mandrin à changement automatique de mors ; la broche porte-outils tournants, de grande puissance, reçoit des outils fixes qui ne prennent pas appui sur elle, mais utilisent les mêmes organes de bridage. Enfin, outils fixes et tournants prennent place dans le même magasin.

Cette brève description nous permet de voir la quasi-identité du centre d'usinage pour pièces polyédriques et du centre d'usinage pour arbres. Leurs seules différences sont une adaptation morphologique aux topologies différentes des pièces :

— la première priviliege l'usinage par outil tournant ; l'outil fixe n'est utilisé que pour des opérations concernant des surfaces de position et d'orientation particulières ;

— la seconde, adaptée à l'usinage d'arbres, priviliege au contraire l'usinage à pièce tournante, mais l'outil tournant devient néanmoins d'utilisation normale ; il assure durée de vie et fiabilité améliorées, et l'outil fixe n'est alors plus utilisé que pour la finition de surfaces de révolution centrées sur l'axe C ; l'axe A , interpolable avec les autres axes, permettra le taraudage et certains types de taillage par génération (en particulier roues tangentées).

Un dernier point commun entre ces machines concerne leur orientation spatiale. Nous avons depuis le début reconnu les avantages d'une architecture inversée ; nous avons aussi vu qu'elle se heurtait à des habitudes et des *traditions* difficilement surmontables. Pour les tours, les plus anciennes machines avaient le banc sous la pièce. Plus tard, on vit apparaître les tours à *banc incliné*. Cependant on a vu, à plusieurs reprises, des *bancs inversés*.

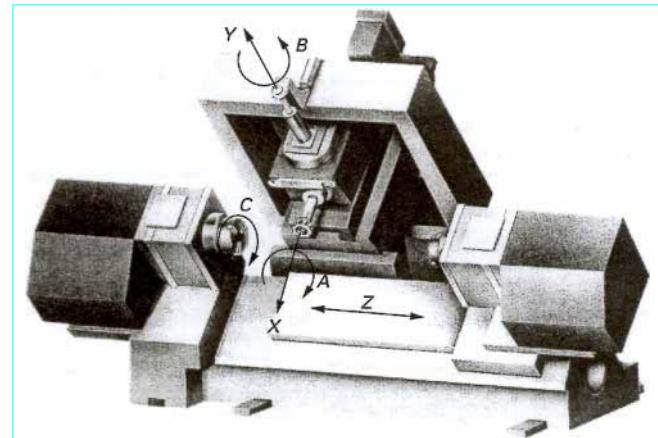


Figure 8 – Centre de tournage CTM25 de Georg Fischer

La machine que nous venons de décrire pourrait donc adopter cette architecture sans rencontrer une opposition sérieuse. On n'en est pas encore là pour les centres d'usinage.

4. Machine-transfert

Pour cette description, nous nous appuierons, au moins à titre de comparaison, sur la machine-transfert de blocs-cylindres Renault (figure 6, [B 7 120]). Cette machine, bien qu'ancienne (1961), possède de nombreuses caractéristiques des machines d'aujourd'hui. Nous essaierons de montrer les différences principales qui les séparent. Nous éviterons aussi de décrire les éléments qu'une machine-transfert a en commun avec les deux machines universelles décrites précédemment (§ 2 et 3) et que nous nous contenterons de signaler.

4.1 Gamme d'usinage

Une différence fondamentale entre une machine-transfert (ou, plus généralement, une machine spéciale) et une machine universelle, est qu'elle est conçue pour l'usinage d'une pièce particulière ou, au plus, d'une famille limitée de pièces présentant entre elles des différences faibles. Par exemple, on peut usiner sur la même chaîne-transfert des blocs-cylindres à 3, 4, 5 ou 6 cylindres en ligne. Ces mêmes blocs-cylindres peuvent présenter d'autres différences telles que des usinages présents sur l'un et non sur l'autre. On peut aussi changer quelques cotes : modifier la distance de deux plans parallèles fraisés, modifier des diamètres alésés, mais la condition *sine qua non*, à respecter absolument, est que la gamme d'usinage de chacune de ces pièces soit un sous-ensemble d'une gamme d'usinage unique, caractéristique de la pièce ou de sa famille. Il faut donc, avant d'aller plus loin, définir ce qu'est la gamme d'usinage d'une pièce (cf. [B 7 025]).

On peut citer comme **éléments importants des cahiers des charges** : la facilité d'intervention, la commande (automatique et manuelle), le type de dialogue opérateur-machine, le mode de surveillance, l'enregistrement des temps de marche, des temps de panne et l'heure de leur occurrence, des périodes d'arrêt pour cause extérieure (engorgement en aval, défaut d'alimentation en amont, arrêts induits), toutes fonctions que l'on caractérise généralement par le terme anglo-saxon *monitoring*.

Il y a bien **d'autres éléments** dans ces cahiers des charges, que nous ne pouvons citer ici.

La **gamme d'usinage** d'une pièce est la description ordonnée chronologiquement de toutes les opérations que doit subir la pièce, brute au départ, pour qu'à la fin elle satisfasse au cahier des charges.

Ce **cahier des charges** est, en général, composé des éléments suivants :

— un cahier des charges **technique** : il est composé des dessins et autres éléments techniques caractérisant la pièce : matière, traitements (thermiques, de surface...), etc. ;

— un cahier des charges **économique** : il fixe en particulier la production horaire, journalière, mensuelle, éventuellement annuelle ; on définira la production instantanée et la production réelle ;

— un cahier des charges **de gestion** : la machine-transfert doit en effet s'insérer dans un ensemble socio-économique qu'elle doit respecter.

Le prix de la machine n'est jamais spécifié. Il sert à départager d'éventuels concurrents.

■ La **gamme d'usinage** est une authentique **invention**, qui semble aujourd'hui impossible à trouver par des méthodes rationnelles. Le problème a été étudié par les mathématiciens, les logiciens, les spécialistes en recherche opérationnelle, en intelligence artificielle et, bien sûr, en usinage. Tous, jusqu'à une époque récente, sont arrivés aux mêmes conclusions : seules des **heuristiques** peuvent permettre la création des gammes d'usinage. Il n'y a pas possibilité de trouver scientifiquement la **gamme optimale** ; seules peuvent être trouvées des gammes **acceptables**. Cependant, des travaux récents montrent au contraire que la solution, dépendant naturellement du contexte, peut être trouvée. La raison des décennies précédentes d'échecs tient essentiellement au fait que, ne considérant que les éléments géométriques des pièces (appelés souvent *features*, terme anglo-saxon dont une traduction acceptable pourrait être *entités caractéristiques*), mais non les éléments logiques propres aux procédés d'usinage, aux montages porte-pièces, et encore moins aux possibilités logiques de création d'information, trouver la gamme d'usinage revient à résoudre un système d'équations dont le nombre est bien inférieur à celui des inconnues. On conçoit alors

qu'une solution rationnelle soit introuvable puisqu'il y a une infinité de solutions. Une recherche de solution par filtrage ne donne rien non plus, car on montre que les sous-ensembles de solutions ainsi obtenus sont aussi en nombre infini.

Au contraire, tenir compte de ces éléments logiques formels liés aux procédés revient à fixer des règles directes de création. Définir la **gamme optimale** (par exemple celle qui conduit au nombre minimal de prises de pièce ; mais on peut choisir d'autres critères d'optimisation) ne change pas le nombre de solutions, qui est toujours infini, mais permet de les *créer* dans un ordre d'optimalité décroissante. Signalons pour conclure ce paragraphe que le raisonnement par récurrence, l'*induction complète* (ou *mathematical induction*) d'Henri Poincaré, est un des moyens les plus puissants de création d'information. On a pu en trouver sept ; d'autres sont certainement à découvrir.

4.2 Structure des machines-transferts

■ Les machines-transferts anciennes étaient toujours basées sur le schéma de la figure 9. Une **épine dorsale** (figure 9a) portant les **moyens de transfert** (en particulier la barre de transfert et des rails de guidage des pièces ou des palettes porte-pièces) et les **moyens de positionnement et guidage** de ces mêmes pièces, recevait, de part et d'autre, des **bâti**s. Ceux-ci, fixés par des vis, pouvaient être horizontaux ou verticaux, et portaient eux-mêmes des unités d'usinage telles que celle qu'on voit sur la droite de la figure 6 [B 7 120]. Ces unités d'usinage comportaient un moteur d'avance rapide, entraînant en rotation une vis, dont l'écrou, solidaire du chariot porte-broche, pouvait lui-même être entraîné en rotation par le moteur de broche, ce qui donnait une avance par tour d'outil proportionnelle au nombre de tours de broche.

Nous ne décrivons ici qu'une machine-transfert électromécanique, dont on perçoit dès à présent l'immense avantage par rapport aux machines-transferts hydrauliques, dont les avances ne sont pas automatiquement liées à la rotation des broches.

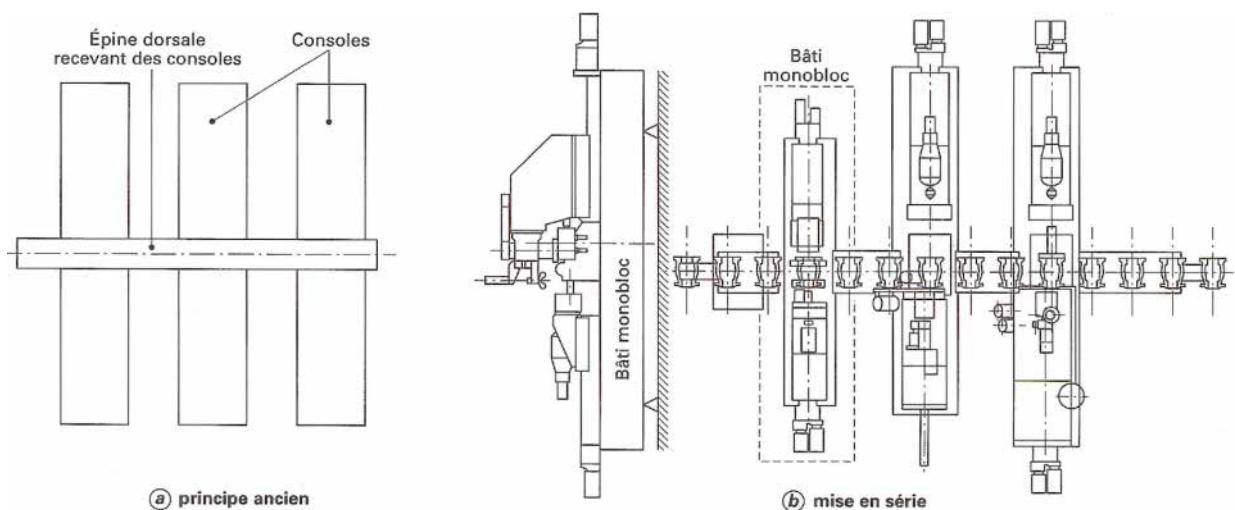


Figure 9 – Architecture de machines-transferts

Sur le chariot pouvait alors se fixer une tête multiple (cf. figure 6 en [B 7 120]) ou d'autres types d'éléments d'usinage. Ce système, très ancien, s'est vite trouvé démodé pour différentes raisons (difficulté d'adaptation à d'autres opérations que le perçage, chanfreinage, lamage, taraudage). Il fallait donc d'autres types d'unités spécialisées : unité de fraisage, unités spéciales d'alésage, comportant une table se déplaçant sur des glissières et pouvant recevoir une ou plusieurs broches d'alésage ou de fraisage ou de brochage (figure 10), unités de contrôle dimensionnel, unités de contrôle de présence des outils (présence indirecte : on vérifiait que l'usinage avait été fait et, en même temps, que l'outil n'était pas resté, cassé, dans le trou usiné), etc. De plus, toutes les unités existaient en différentes tailles et puissances. Cependant, la variété était telle que les garder toutes en magasin constituait une immobilisation considérable. Enfin, on peut comprendre que des tables porte-broches, par définition plates, et des glissières de faible hauteur comme celles, qu'on voit sur la figure 6 en [B 7 120] ne pouvaient être bien rigides. Il en résultait une grande difficulté d'usinage, un coût élevé et, malgré cela, une qualité médiocre. Les bâtis manquaient de rigidité et les machines devaient être posées sur des fondations rigides assurant une bonne partie de la rigidité de la machine.

■ Une étape importante fut franchie quand les machines-transferts ne furent plus qu'une **mise en série de bâtis monoblocs transversaux** (figure 9b) reliés par de simples règles de guidage des pièces sans nécessité aucune de rigidité ni de précision.

■ Le dernier pas pour les machines-transferts traditionnelles fut, enfin, de remplacer les glissières rapportées par des **glissières incorporées aux bâtis**. Il en résulta une rigidité élevée, un petit nombre de variantes (bâti à une seule unité, à deux unités opposées ; glissières perpendiculaires ou parallèles à l'axe de transfert ; deux dimensions de base pour les glissières, deux courses par dimension de glissière), qui permet une diminution d'inventaire, une qualité meilleure et un coût plus bas.

■ Le pas à faire pour arriver à la conception de **machines-transferts modernes** est alors facile à formuler.

- Sur le plan **architecture**, on gardera évidemment les bâtis monobloc transversaux. On ne conservera que des postes horizontaux (évolution déjà pratiquement accomplie à l'étape précédente), ce qui s'obtient par la conception de pièces pour la fabrication (*design for manufacturing*), et aussi en remarquant que l'axe de transfert, pour une machine-transfert, joue le même rôle que l'axe *B* d'un centre d'usinage conventionnel (figure 5, par exemple) ; on aime mieux faire tourner la pièce que les unités d'usinage.

- Le dernier point est mis en évidence figure 11 ; elle représente un tour bicroche à **structure inversée**, qui n'a été réalisé qu'à l'état de prototype. On voit que le fait de mettre le banc au-dessus de la pièce à usiner permet de se débarrasser définitivement des problèmes que pose l'existence du bâti sous les pièces pour l'évacuation des copeaux (évacuation imparfaite et bâti affaiblis par les passages nécessaires). On voit aussi que les problèmes de capotage et de récupération des copeaux et du liquide de coupe sont fortement simplifiés. Pour une machine-transfert, il est aussi facile de voir que l'accessibilité aux unités d'usinage, aux outils et à la pièce, est extrêmement simplifiée.

■ Le moyen de faciliter l'usinage des chariots porte-broches des **unités d'usinage** est évidemment de les **rigidifier**. Ils deviennent alors des boîtes parallélépipédiques dont la face avant peut recevoir le boîtier avant et la plaque intermédiaire d'une tête multiple (figure 12), et la face avant ou les faces latérales, des broches en boîtier de révolution (figure 13) beaucoup plus économiques, de fabrication et d'emploi, que les boîtier parallélépipédiques usinés sur toutes les faces de la figure 10. Naturellement, toutes ces unités d'usinage (têtes multiples ou broches d'alésage) sont entraînées par moteurs et courroies. Suivant les emplois, les moteurs peuvent être soit asynchrones, soit synchrones, alimentés à fréquence constante (réseau) ou variable.

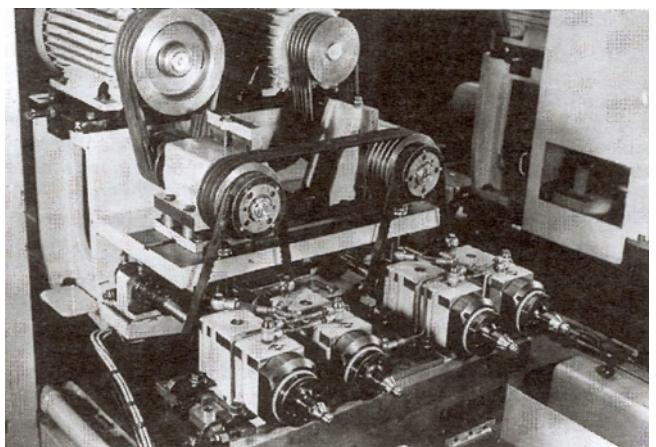


Figure 10 – Table électromécanique et broches d'alésage (Renault)

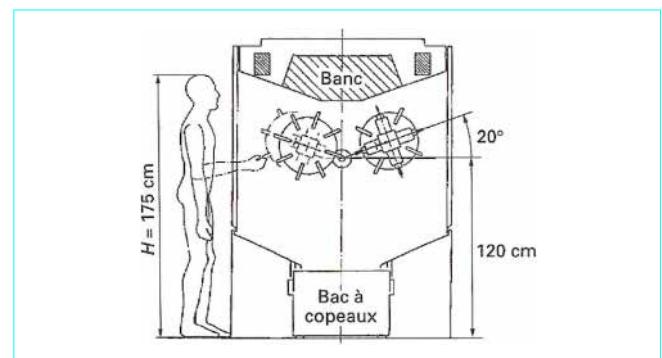


Figure 11 – Tour à structure inversée

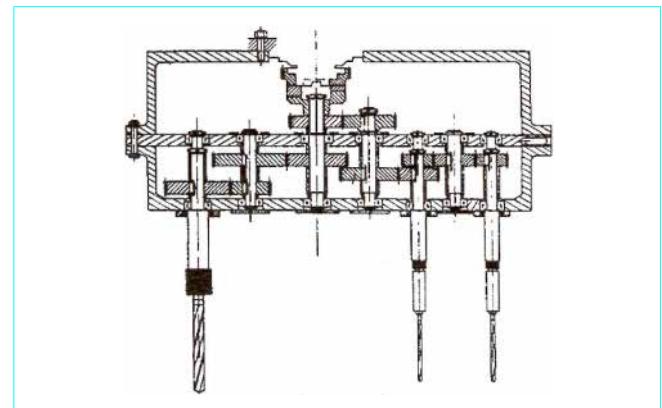


Figure 12 – Tête multiple conventionnelle

On peut alors remplacer l'entraînement à deux vitesses complexe de la figure 10, comprenant deux moteurs, de nombreuses courroies et un système à roue libre (alésage des guides et des sièges de soupapes) par un seul moteur. Naturellement, l'utilisation de moto-broches est entièrement compatible avec cette structure d'unité.

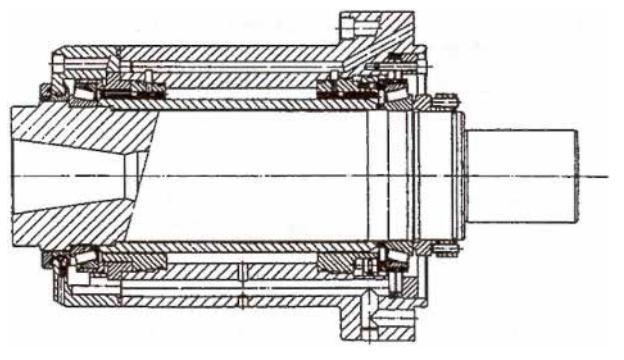


Figure 13 – Broche d'alésage-fraisage

■ Pour la **gestion/commande**, les machines modernes remplacent des « contacteurs électromagnétiques, actionnés par des axes et des tiges qui provoquent le déclenchement des différentes opérations suivant un cycle d'usinage préétabli » ([B 7 120] § 1), et les deux moteurs, de vitesse de travail et d'avance rapides, par un seul moteur à vitesse variable ; sa vitesse sera fixée par une commande numérique simple, basée sur l'équivalent des actuels automates programmables, qui déterminera aussi les positions successives du chariot porte-broches. Les positions seront alors mesurées par des émetteurs d'impulsions, linéaires ou tournants, selon la précision nécessaire. Tous les capteurs, actionneurs, fonctions auxiliaires seront alors reliés aux systèmes de commande par *bus série*, alors que les moteurs recevront la puissance d'un *bus de puissance*, les amplificateurs et autres moyens de commande leur étant directement intégrés.

■ Signalons que tous les éléments mentionnés ici fonctionnent déjà depuis des années. Leur emploi encore restreint est dû, pour la plus grande part, au conservatisme des fabricants et utilisateurs de machines. Nous reviendrons un peu sur ces points en [B 7 123], où seront abordés superficiellement les problèmes de détection des pannes, de dépannage, d'entretien, de *monitoring*.

Signalons un dernier point qui n'a pas, à ce jour, reçu de solution vraiment satisfaisante : on sait facilement changer automatiquement les outils sur centres d'usinage et centres de tournage. Des solutions voisines (plus simples car il n'y a pas besoin de magasin) permettent de changer fraises et outils d'alésage sur machines-transferts. Par contre, nous ne connaissons pas de solution générale pour le changement des outils des têtes multiples. Il est certain cependant que des solutions sont possibles.

4.3 Les machines spéciales sont-elles encore nécessaires ?

Depuis des décennies, certains prédisent la disparition de toutes les machines spéciales et en particulier des machines-transferts. Ces dernières seraient alors remplacées par des centres d'usinage qui permettraient, en quelques prises, l'usinage d'une grande variété de pièces (peut-être quand même d'une même famille) en un nombre et à une cadence quelconques. La chose est techniquement possible, parfois, mais il est facile de montrer qu'elle ne saurait être réaliste.

Exemple : les **cadences instantanées de fabrication** que l'on connaît aujourd'hui sont, pour des pièces de dimensions moyennes (bloc-cylindres ou culasse de véhicule automobile), de l'ordre de 300 pièces/heure (moins pour les moteurs plus gros). Cela signifie que cinq pièces sont produites à la minute, c'est-à-dire qu'une pièce est usinée toutes les 12 s (parfois moins). De ces 12 s, il faut en retirer environ la moitié pour les opérations de transfert, piétement, bridage, avance et retour rapides. C'est dire que l'usinage se fait en environ 5 s.

■ Déjà, pour des opérations délicates nécessitant des mouvements additionnels (par exemple alésage des lignes de vilebrequin ou d'arbre à cames), on est obligé de doubler ou tripler les machines. Or, un bloc-cylindres ou une culasse, même bien dessinés, comportent plusieurs centaines d'usinages élémentaires, dont chacun prend en général plus de 5 s. On se rappellera que la gamme d'usinage pour centre d'usinage est pratiquement identique à celle qu'on crée pour une machine-transfert. Toutes les opérations se font l'une à la suite de l'autre, à un poste fixe (centre d'usinage) ou à des postes répartis (machine-transfert). Si on ajoute à cela le problème des changements d'outils, une estimation non ridicule du nombre de centres d'usinage remplaçant une seule ligne transfert est d'environ 1 000. Ce nombre permet facilement au lecteur de conclure.

■ Il est cependant des cas plus intéressants et prometteurs. Toute l'ébauche d'un vilebrequin peut, après centrage, être faite sur une seule machine à fraiser à commande numérique, qui remplace les tours à vilebrequins très anciens et les machines à fraiser moins anciennes. De plus, elle peut alors fraiser les manetons correspondant à une course quelconque du piston aussi bien que les portées. Pratiquement, le temps de cycle d'une telle machine, presque universelle (mais néanmoins limitée à l'usinage de vilebrequins), serait sensiblement le même que celui des machines spéciales actuelles.

■ Nous tenons là le mot de la fin : non, les machines et systèmes flexibles ne fournissent pas **la solution** ; ils ne permettent en aucun cas d'envisager la disparition des machines spéciales, ni même des seules machines-transferts. Mais il est certain que celles-ci nécessitent plus de réelle **flexibilité** qu'elles n'en ont aujourd'hui. Enfin, des solutions plus récentes telles que le traitement laser, l'usinage à la bande abrasive, la commande numérique et les réseaux (les *bus*) permettent d'envisager une évolution sérieuse, et même, dans certains cas encore rares, une réelle révolution. Ce serait une faute grave de refuser *a priori* de l'envisager.

Machine-outil

par **François C. PRUVOT**

Ingénieur-docteur

Ancien Directeur technique de Renault Machines-outils

Professeur honoraire, Directeur du Lab
oratoire 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. Compteurs 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. Compteurs 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).