

MACHINES-OUTILS

L'expression « machine-outil » contient en elle-même sa définition : un matériel ayant pour but de faire mouvoir l'outil par une transmission actionnée au moyen d'un moteur, au lieu de la laisser manier par la main de l'ouvrier. D'une manière plus précise, la définition proposée par le Syndicat des constructeurs français de machines-outils à l'Organisation internationale de standardisation (I.S.O.) est la suivante : « Une machine-outil est une machine, généralement non portative en travail, actionnée par une source d'énergie et destinée à façonner des produits à l'aide de procédés physiques, chimiques ou autres. Le façonnage, qui porte sur des matériaux à l'état solide (métal, bois, verre, plastiques...), peut s'effectuer aussi bien avec ou sans enlèvement qu'avec ou sans apport de matière ou de produit. » De ces deux définitions, on ne retiendra que la première.

Les possibilités du travailleur, en possession d'un tel engin, se trouvent multipliées d'une façon considérable : sa puissance n'est plus limitée à un dixième de cheval-vapeur, et la machine peut fonctionner de façon continue.

On comprend ainsi tout ce qu'apporta à l'humanité le premier moteur commercial, susceptible d'être mis en œuvre à volonté, en tout temps, en tout lieu, sans limitation de durée, et d'une façon économique, c'est-à-dire avec un bilan positif. Ce fut en fait la machine à vapeur de Watt, surgie en 1775, qui marqua ce pas. Tous les progrès dans les moteurs (moteur électrique, moteur à explosion, moteur à combustion interne...) se sont répercutés sur la machine-outil, en la perfectionnant.

Dans son sens étymologique le plus large, le mot « machine-outil » englobe les matériels permettant de travailler les matières les plus variées, à savoir : métaux, bois, pierre, cuir, caoutchouc, fibres textiles..., et ceux qui sont utilisés pour extraire ces matières du sol dans les mines, les carrières, etc. Les matériels de travaux publics, du bâtiment, les machines agricoles en relèvent également. Mais dans tous les pays du monde, lorsque l'on parle de machine-outil, *machinetool*, *Werkzeugmaschine*, etc., sans préciser davantage, on entend désigner seulement la machine à travailler le métal, qui sera seule envisagée ici.

1. Importance de la machine-outil

Situées au cœur de l'équipement industriel, les machines-outils jouent un rôle fondamental dans le développement d'un pays.

Importance économique

L'importance économique justifie l'attention qu'on lui porte ; avec la machine à vapeur, la machine-outil a fait naître l'ère du machinisme, ou ère industrielle, dès le début du XIX^e siècle. Elle apporta une révolution économique et sociale sans précédent en substituant le travail d'équipe, collectif, à celui de l'artisan, solitaire et maître d'œuvre. Les usines gigantesques, les trusts en sont la conséquence.

Ce rôle important s'explique par le nombre très élevé des utilisateurs de machines-outils : tous les industriels qui ont des problèmes d'usinage parce qu'ils travaillent du métal, notamment l'acier et la fonte. Or, l'utilisation des métaux est actuellement massive dans d'innombrables biens d'équipement et de consommation. Un des exemples les plus frappants de matériels construits en très grande série, et exigeant des usinages nombreux et complexes, est donné par les moteurs thermiques des automobiles, des camions, des machines agricoles, des matériels de travaux publics, des navires (fig. 1), etc.

Importance politique

Pour un pays qui veut développer son industrie, la machine-outil est un secteur clé, car elle

constitue un moyen irremplaçable de s'équiper soi-même, en faisant le moins possible appel à l'étranger, et de promouvoir sa technique particulière.

Qualitativement, les machines-outils sont le fruit d'une imagination créatrice favorisée par le développement industriel. Le dialogue que recherchent les utilisateurs avec leurs fournisseurs (ils parlent le même langage technique) est une condition favorable à l'épanouissement de vertus mécaniciennes, qui sont l'une des forces industrielles d'un pays. S'il est souvent vrai que dans chaque utilisateur organisé sommeille un constructeur de machines-outils, il est évidemment préférable qu'il puisse s'adresser, pour la plus grande partie de ses besoins, à une industrie nationale ayant de solides références. C'est ainsi que se forment des générations de mécaniciens, ingénieurs et techniciens, qui font emploi de leur efficacité dans de nombreux secteurs.

Quantitativement, les machines-outils occupent une place importante dans les investissements des industries mécaniques et électriques. Elles constituent ainsi traditionnellement un des baromètres les plus sûrs du dynamisme de l'industrie en général. En période favorable, les industriels achètent du matériel neuf, dont les performances sont meilleures et qui permettent ainsi des gains de prix de revient. C'est ce qui explique que les progrès de productivité ne sont possibles qu'en période d'expansion.

L'industrie de la machine-outil est donc à la fois la cause et la conséquence du développement industriel d'un pays dans la fabrication des biens d'équipement et de certains biens de consommation, comme l'automobile. Les mécaniciens, que l'on trouve nombreux dans la construction électrique, les arsenaux, les industries aérospatiales et électroniques, sont avant tout des utilisateurs de machines-outils.

Il existe également, à certaines époques, un lien très fort entre l'industrie de la machine-outil et celle de l'armement en vue de la réalisation en quantités importantes de chars, canons, avions, bombes, obus, etc. Ce fut notamment le cas de l'Allemagne lors de la préparation de la Seconde Guerre mondiale.

2. Les origines de la machine-outil

L'histoire de la machine-outil est intimement liée au remplacement de l'homme par la machine pour l'exécution de différentes tâches. Par un cheminement persévérant, celui du progrès technique, la machine a de plus en plus aidé l'homme, accroissant au même rythme son efficacité et son pouvoir d'action, tout en diminuant sa fatigue et sa peine.

Les tâches à accomplir

Ainsi qu'il fut précisé dans l'introduction, les machines considérées ici sont exclusivement celles destinées au travail du métal. Ces machines réalisent la fabrication des pièces désirées, à partir du métal brut, soit par enlèvement de matière, soit par déformation. D'autre part, ces pièces se répartissent en deux catégories principales : celle des pièces de révolution, qui sont les plus nombreuses, et celle des pièces parallélépipédiques.

Les machines utilisées pour l'usinage des pièces de révolution sont essentiellement les tours, sur lesquels le travail est exécuté par des outils de coupe, et les rectifieuses cylindriques, sur lesquelles l'enlèvement de matière s'effectue par abrasion au moyen de meules.

Pour les pièces parallélépipédiques, on utilise de même des fraiseuses, des raboteuses, des aléseuses et des perceuses, qui font intervenir des outils de coupe, et des rectifieuses planes équipées de meules.

D'autres catégories de pièces et de travaux correspondent encore à d'autres types de machines. La figure 2 représente schématiquement ces différents types et leur mode d'action.

Les origines

L'origine du tour se perd dans la nuit des temps ; on sait seulement avec certitude que certaines

de ses applications se situent en Égypte plus de mille neuf cents ans avant notre ère. Le premier tour dont on ait connaissance servait à tourner le bois ; la pièce à tourner était placée entre deux pointes enfoncées dans deux troncs d'arbre placés à une distance convenable. Le mouvement de rotation était obtenu par une corde accrochée par une de ses extrémités à une branche suffisamment flexible, alors que l'autre extrémité, formée en œillet, était mue au pied par l'opérateur.

La mécanique s'est développée grâce aux mécaniciens grecs : Archytas de Tarente, Héron d'Alexandrie, Ctesibius, Archimède (287-212 av. J.-C.). Avec plusieurs autres, ces ingénieurs avant la lettre appartiennent au groupe dit des mécaniciens d'Alexandrie (cf. **MACHINISME**).

Pour trouver leurs véritables successeurs, il faut attendre l'extraordinaire ingénieur Léonard de Vinci (1452-1519) ; génie universel, il conçut à peu près toutes les machines de travail et en traça les dessins. Il faut citer aussi quelques autres mécaniciens de la Renaissance, notamment Cardan, Salomon de Caus (1576-1626), puis Roberval.

À l'aube du machinisme

Jusqu'au milieu du XVIII^e siècle, les outils resteront très rudimentaires, et les principales pièces des machines seront en bois, seule matière susceptible d'être façonnée avec les outils à main utilisés alors. Les petites pièces et certains renforts seront moulés ou forgés et ajustés à la main.

La seconde moitié du XVIII^e siècle va voir l'apparition de machines remarquables. C'est d'abord le grand tour en fer de Jacques de Vaucanson, construit vers 1745, puis la machine du Français Nicolas Forq, construite en 1751 pour raboter les douves de fer composant les corps de pompe de la machine de Marly, enfin la première machine à aléser de l'Anglais John Wilkinson, en 1775, conçue et réalisée pour aléser d'une manière précise et rationnelle les cylindres de machines à vapeur.

Ainsi donc, nées les premières, conjointement avec la machine à vapeur dont leur histoire est indissociable, les machines-outils à travailler le métal servirent à construire les machines propres à l'exercice de chaque profession.

Formation des premières industries de machines-outils

Si « la puissance d'une nation est conditionnée par l'outillage qu'elle produit », le volume de cette production a, tout au moins au début, dépendu de l'ampleur et de la rapidité de l'industrialisation de cette nation. Il est donc intéressant d'examiner, suivant un ordre chronologique, comment l'industrie de la machine-outil a débuté et s'est développée dans les pays qui ont été, précisément les premiers, touchés par l'industrie. Quelques étapes importantes de cette évolution sont rappelées sur le tableau.

Grande-Bretagne

La domestication de la vapeur étant réalisée, les Anglais commencèrent la construction des machines-outils au début du XIX^e siècle : ils sont les véritables créateurs de cette industrie.

L'histoire de l'industrie anglaise de la machine-outil a commencé avec Maudslay, déjà connu par le perfectionnement qu'il a apporté au tour parallèle (1798). Professeur remarquable, ce sont ses élèves, et en particulier Clement, Roberts, James Nasmyth et Joseph Whitworth qui sont avec lui à l'origine des premières machines-outils.

Clement imagina le dispositif d'embrayage de la vis mère des tours par un écrou en deux parties et construisit, en 1820, une raboteuse à deux outils travaillant l'un à l'aller, l'autre au retour. Cette dernière machine avait été précédée par celle que Roberts avait réalisée, trois ans plus tôt, à la lime et au burin.

Outre son marteau-pilon, Nasmyth créa la « limeuse » que Decoster transforma en étiau-limeur. Quant à Whitworth, il fut sans conteste le plus brillant de tous ; son nom est lié à la normalisation des filetages, le pas Whitworth ayant été adopté, dès 1860, par tous les

mécaniciens anglais avant d'être utilisé dans le monde entier.

L'avènement de la machine-outil eut des conséquences économiques remarquables. La possibilité de faire un travail précis à un prix de revient peu élevé donna une impulsion extraordinaire à l'industrie des constructions mécaniques. Le développement des chemins de fer et de la navigation à vapeur fut particulièrement rapide entre 1830 et 1850, le premier bateau à hélice ayant été lancé en 1836. Les besoins en machines-outils furent tels qu'ils ne purent être entièrement satisfaits.

Au milieu du XIX^e siècle, l'industrie anglaise de la machine-outil était en plein essor. Avec Whitworth et ses collègues, elle possédait les meilleurs constructeurs de machines-outils et les meilleurs fabricants d'outils. À l'Exposition universelle de Londres en 1851, les machines-outils anglaises étaient encore les plus nombreuses et les meilleures, mais, à l'Exposition universelle de 1862, on pouvait s'apercevoir combien les progrès avaient été faibles entre-temps.

Déjà, en 1855, le gouvernement britannique avait dû faire appel à l'industrie des États-Unis pour appliquer ses méthodes de travail et équiper son nouvel arsenal d'Enfield avec des machines Pratt & Whitney. Et, lorsque s'ouvrit l'Exposition universelle de Vienne en 1873, les machines-outils anglaises n'étaient plus en état de concurrencer les américaines.

France

C'est vers 1825 que les premières machines-outils britanniques furent importées en France pour équiper les ateliers de constructions mécaniques dont elle avait besoin, car elle entraînait alors dans l'ère industrielle. Toutefois l'Angleterre ne pouvant les fournir toutes, des mécaniciens entreprirent de construire pour leurs besoins propres, et en s'inspirant généralement de celles qu'ils avaient fait venir d'outre-Manche, les machines simples dont on se servait à cette époque.

Calva, F. Cavé, F. Decoster, E. Bourdon se révélèrent aussi ingénieux et aussi habiles que leurs illustres prédécesseurs du XVIII^e siècle. Leurs progrès auraient été cependant plus rapides encore, si les besoins avaient été plus grands. Les machines-outils étaient alors construites à l'unité, souvent sur mesure.

Enfin, comme aux États-Unis, ce furent des fabrications d'armement qui rendirent possible l'exécution de séries plus importantes : machines diverses construites par Decoster pour la manufacture d'armes de Châtellerauld (1856), tours parallèles Colmant pour le fusil Chassepot (1867), machines à fraiser Bariquand (inspirées des modèles Brown & Sharpe) d'abord pour le fusil Gras (1872), puis pour le fusil Lebel (1885), tandis que Elwell, puis Leflaive fournissaient aux arsenaux de la marine de très grosses machines. Cependant, en 1865, le gouvernement français créait l'atelier de construction de Puteaux, dirigé par F. G. Kreutzberger, établissement « destiné à la fabrication des machines-outils nécessaires aux arsenaux français et étrangers et précédemment livrées par l'industrie privée ».

États-Unis

L'industrialisation des États-Unis n'en était encore qu'à ses débuts avant 1840, mais, dès 1850, son industrie métallurgique prenait la seconde place dans le monde.

La population du pays, passant de 31 millions d'habitants en 1860 à plus de 76 millions en 1900, avec un niveau de vie de plus en plus élevé, exigeait des productions de biens de consommation considérables et la guerre de Sécession exigea d'importantes fournitures d'armes et de munitions.

De tels débouchés entraînaient un accroissement de la production des machines-outils ; dans le même temps, l'exécution de séries de plus en plus grandes de pièces de plus en plus précises faisait naître des machines semi-automatiques, puis des machines automatiques, ainsi que des machines de finition (machines à rectifier) et des procédés nouveaux d'usinage (brochage) ; le taillage des engrenages réalisait aussi d'importants progrès.

Tout cela se fit à l'abri d'un tarif douanier fréquemment majoré, entre 1860 et 1896.

Dans le même temps, pendant plus de vingt années, F. W. Taylor poursuivait ses études sur la coupe des métaux, études qui devaient aboutir, en 1898, à l'invention de l'acier rapide présentée à l'Exposition universelle de Paris de 1900 sous la forme d'un outil de tour.

Après avoir pris pied en Grande-Bretagne (équipement du nouvel arsenal d'Enfield) et en France à l'occasion de l'Exposition universelle de Paris en 1867, les constructeurs américains ravirent peu à peu, en Allemagne, la place qu'occupaient leurs concurrents anglais (rénovation de l'outillage des manufactures d'armes en 1872).

En 1877, on comptait 44 constructeurs de machines-outils ; les dix plus importants employaient, à eux seuls, 1 560 personnes et, en 1902, 9 845 (sur un total de 25 000 pour 150 entreprises).

En 1914, 285 usines, dont la moitié employaient moins de 50 personnes, occupaient 32 230 ouvriers et employés.

Allemagne

Il fallut presque attendre la seconde moitié du XIX^e siècle pour voir apparaître des industries allemandes ; les éléments des premières lignes de chemins de fer, avec leur matériel roulant, furent livrés par l'Angleterre ; en 1840, la longueur du réseau ferré n'atteignait pas 500 kilomètres.

La fabrication des machines à vapeur et celle des locomotives commença vers 1840 ; quelques années plus tard, les premières machines-outils sortaient de l'atelier Zimmermann, mais, en fait, ce ne fut que vers 1860 qu'une production faible mais régulière s'organisa pour concurrencer les fournisseurs étrangers.

À la fin de 1875, le parc de machines-outils de la Prusse formait un total de 41 000 machines environ. La plus grande partie de ces machines était d'origine étrangère, mais les exportations commencèrent peu après et, en 1900, elles avaient dépassé les importations.

Cependant, pour conserver leur marché intérieur, les constructeurs allemands avaient créé, en 1898, un syndicat dont l'un des objets était d'obtenir une protection douanière plus efficace. Cette protection permit d'obtenir la cession de licences de fabrication étrangères : en 1905, Loewe, par exemple, acheta à Norton les plans de sa machine à rectifier et à Rice ceux de sa machine à percer. Dès lors, la production des usines allemandes de machines-outils ne cessa de croître et cette industrie devint très vite une des branches les plus importantes et les plus actives de la mécanique allemande.

Leur production rattrapa d'abord celle de la France, puis celle de l'Angleterre et enfin celle des États-Unis. Leurs exportations montèrent en flèche, passant de 9 267 tonnes en 1900 à plus de 74 000 tonnes en 1913, soit 40 p. 100 des livraisons totales.

3. Répartition géographique

De nouveaux pays constructeurs de machines-outils se sont joints à ceux déjà cités pour en allonger la liste et en modifier l'ordre. Cet ordre subit d'ailleurs de fréquents changements et ne peut donc être considéré comme définitif. À titre d'exemple, trois pays, le Japon, l'Allemagne et les États-Unis, assuraient ensemble, en 1993, plus de la moitié de la production mondiale de machines-outils (en valeur).

En 1993, le Japon était à la fois le premier producteur et le premier exportateur mondial, suivi par l'Allemagne, deuxième producteur et exportateur, et par les États-Unis, troisième producteur mais cinquième exportateur (après l'Italie et la Suisse).

Toujours en 1993, les États-Unis étaient en revanche le premier importateur mondial, avec des achats à l'étranger représentant 76 p. 100 de sa production (21 p. 100 des importations mondiales).

Après les trois pays précédents, on trouvait dans l'ordre (de production), l'Italie, la Chine, la Suisse, Taïwan... La France occupait la dixième place sur le plan mondial avec 2 p. 100 environ de la production totale. On peut noter que l'ensemble des constructeurs européens de machines-outils assuraient environ 40 p. 100 de la production totale. La progression rapide du Japon a été favorisée par le niveau élevé du marché national, sur lequel l'industrie nippone de la machine-outil peut s'appuyer, car il absorbe près de 60 p. 100 de sa production. Cette situation est le résultat de la politique voulue par le gouvernement japonais (Ministry of International Trade and Industry ou « M.I.T.I. »), qui a pris les mesures destinées à développer et à accélérer les investissements sur le marché intérieur.

Une action similaire a été tentée par les pouvoirs publics français, qui ont établi un plan devant permettre le redressement de l'industrie nationale de la machine-outil (cette industrie, qui employait 27 000 personnes en 1976, en employait 35 300 en 1991). Le plan gouvernemental a prévu notamment, en plus de mesures destinées à encourager les recherches technologiques, une reconquête partielle du marché intérieur, afin que les importations ne représentent plus que 30 p. 100 des investissements au lieu de 60 p. 100.

4. Universalité ou spécialisation des machines

Jusqu'à l'apparition des nouvelles techniques qui s'efforcent de concilier des impératifs a priori incompatibles, les notions d'universalité et d'automatisme étaient plus ou moins contradictoires, les machines-outils universelles ne pouvant être automatiques, tandis que les machines automatiques étaient nécessairement spécialisées. Il existe, aussi bien pour les machines universelles que pour les machines spéciales, une très grande diversité de modèles, et l'on peut dénombrer plusieurs milliers de familles distinctes ayant chacune leurs caractéristiques spécifiques. Il est cependant possible de les regrouper en considérant le type d'usinage auquel ces machines sont destinées.

Machines universelles

En dehors de l'universalité, ces machines doivent posséder un certain nombre de qualités essentielles, telles que la puissance et la précision, afin de répondre aux impératifs de productivité et de respect de tolérances imposés. De plus, étant donné que ces machines, non automatiques, sont obligatoirement conduites par des opérateurs, les constructeurs doivent attacher une grande importance aux conditions de travail de ces opérateurs. L'ergonomie a pour buts de réduire la fatigue physique ou mentale du personnel, d'éliminer les risques d'accident, de supprimer certaines opérations pénibles ou fastidieuses lorsque celles-ci peuvent être exécutées par d'autres moyens.

Le tour parallèle

Le tour parallèle présente une caractéristique unique d'universalité. Il permet en effet d'effectuer non seulement des opérations de tournage et de filetage, mais encore de perçage, d'alésage et même de fraisage.

Le développement du tour parallèle a été lié à celui de l'outil de coupe à travers ses quatre phases successives : acier fondu, acier rapide, carbure métallique, céramique.

Au cours de cette évolution, les améliorations apportées à la machine, notamment par le montage de la broche sur roulements de haute précision, ont permis d'atteindre des vitesses de rotation très élevées, mais également une parfaite stabilité et une absence totale de vibration à n'importe quelle vitesse.

La machine de base, représentée schématiquement sur la figure 3, peut recevoir divers accessoires, mais elle reste toujours relativement simple.

Le tour à tourelle « revolver »

Moins universel que le précédent, ce tour est destiné particulièrement à l'usinage des pièces plates. Il est équipé d'une tourelle porte-outils à plusieurs postes, dite encore tourelle « revolver », dont la mise en œuvre est manuelle, tandis que certaines commandes peuvent être partiellement automatisées, d'où le nom de « tour semi-automatique » également utilisé pour désigner ce type de machine.

Les tours verticaux

Ces tours, qui permettent d'usiner des pièces de dimensions et de masses très supérieures aux précédentes, représentent de nombreuses familles, qui ont en commun l'existence d'au moins un chariot équipé d'une tourelle revolver.

Les fraiseuses

Après les tours, les fraiseuses représentent le groupe de machines-outils le plus répandu. Il est possible de les classer grossièrement en deux types : les fraiseuses d'outillage à console ou à table de hauteur variable, et les fraiseuses de production à banc et table de hauteur fixe. Les fraiseuses à console sont fréquemment équipées de têtes porte-broche orientables et se présentent ainsi sous la forme dite universelle, qui rassemble les avantages des fraiseuses à axe de broche vertical et de celles à axe horizontal. Les fraiseuses de production, dont le principe est représenté sur la figure 4, se caractérisent généralement par une capacité supérieure et une très grande stabilité, qui garantit la haute précision des travaux réalisés.

Les aléseuses et les fraiseuses-aléseuses

Les aléseuses ont une structure comparable à celle des fraiseuses à axe horizontal, si ce n'est que la broche porte-outil est montée à l'intérieur d'un fourreau déplaçable axialement, afin de pouvoir s'introduire à l'intérieur des logements des pièces à usiner. Ce degré de liberté supplémentaire augmente les possibilités des machines, mais généralement au détriment de leur puissance.

Cette restriction disparaît dans le cas des fraiseuses-aléseuses, machines de grandes dimensions, où le fourreau porte-broche est remplacé par un coulant prismatique extrêmement rigide, permettant de réaliser aussi bien les travaux de fraisage que d'alésage.

Les machines à brocher, à mortaiser et à tailler les engrenages

Il existe encore un nombre important de familles de machines sur lesquelles l'opération d'usinage est réalisée par un outil de coupe. Parmi celles-ci, les machines à tailler les engrenages ont atteint un haut degré de précision, tandis que les constructeurs se sont appliqués à automatiser les cycles d'usinage et de contrôle dimensionnel.

L'usinage par abrasion

Contrairement aux machines précédentes, les rectifieuses et les affûteuses n'utilisent plus des outils de coupe, mais des meules abrasives. L'usinage par abrasion correspond le plus souvent à une opération de finition ; la meule, en effet, à la différence de l'outil qui a un contact ponctuel avec la pièce à usiner, a un contact linéaire si bien que, en admettant par ailleurs des conditions de travail équivalentes (précision des machines et qualification des opérateurs), l'obtention d'un état de surface plus fin et, par suite, le respect de tolérances dimensionnelles plus sévères sont assurés plus facilement. Toutefois, la rectification peut également être considérée comme une opération d'usinage au même titre que les autres, permettant en particulier la réalisation de profils complexes au moyen de meules de forme qui sont, contrairement aux outils de coupe, capables d'usiner des matériaux très durs, tels que les aciers et alliages spéciaux utilisés dans l'industrie aéronautique. En fonction des travaux à exécuter, il existe des rectifieuses cylindriques, extérieures ou intérieures, pour l'usinage des surfaces de révolution, des rectifieuses planes pour l'usinage des plans, des rectifieuses de dentures pour la finition des engrenages, etc. Les affûteuses sont destinées à la fabrication et à la retouche des outils de coupe. Les machines à roder permettent la finition des alésages avec des tolérances extrêmement serrées.

Autres procédés d'usinage par enlèvement de métal

En dehors des usinages au moyen d'outils de coupe ou de meules abrasives, on connaît différents procédés, dont certains sont déjà appliqués à la production industrielle, tandis que d'autres sont encore au stade expérimental.

L'usinage par électroérosion est réalisé par une décharge électrique dans un liquide non conducteur, la décharge étant provoquée entre la première électrode, constituée par l'outil, et la seconde, correspondant à la pièce.

L'usinage électrolytique s'effectue au contraire dans une solution saline conductrice de l'électricité, l'enlèvement de métal résultant de la dissolution anodique, l'outil étant la cathode et la pièce l'anode. Ce procédé, qui permet de réaliser des opérations d'ébavurage, de polissage et de rectification, présente l'avantage d'une absence totale d'usure d'outil.

L'usinage chimique consiste à recouvrir les parties de la pièce qui doivent rester brutes d'un enduit à base de néoprène, puis à la soumettre à l'action d'un produit chimique dont la nature est déterminée par la composition du métal.

Dans l'usinage par ultrasons, l'outil est constitué par un abrasif en suspension dans un liquide et qui est mis en action par des microvibrations engendrées par un générateur alimenté en courant alternatif.

Enfin, sans que cette énumération soit exhaustive, on peut citer l'usinage par laser, qui consiste à bombarder une cible avec des photons provenant d'un laser à impulsion. Il est possible notamment de réaliser par ce procédé des perçages de formes ou des soudures sur circuits imprimés.

Usinage par déformation

L'usinage par déformation, qui fut à l'origine le domaine du forgeron, du tôlier et du chaudronnier, a bénéficié de progrès techniques, qui expliquent la concurrence faite aujourd'hui par le formage à l'enlèvement de métal. Ces progrès ont permis en particulier de respecter, sur les machines travaillant par déformation, des tolérances de plus en plus serrées et voisines de celles réservées jusque-là à l'usinage par enlèvement. Les presses, telles que celles utilisées dans l'industrie automobile, peuvent être dotées de coulisseaux multiples permettant de réaliser des pièces à profils très complexes par avance, formage et découpage de la bande.

Le fluotournage permet la déformation plastique des métaux par extrusion rotative, à froid, sous des pressions de molettes très élevées (fig. 5). Les cintreuses et plieuses sont destinées à l'usinage des tubes et des tôles. Les progrès réalisés dans le domaine du soudage ont permis de développer la construction mécano-soudée, qui, dans de nombreux cas, coûte moins cher, à caractéristiques mécaniques équivalentes, ne serait-ce que par l'absence de copeaux importants en cours de fabrication, ainsi que par la disparition des modèles de fonderie, dont l'exécution entraîne des frais difficiles à amortir pour des pièces unitaires.

Il existe encore d'autres procédés, tels que le formage électromagnétique ou le formage par explosion, dont l'emploi est limité à des applications particulières.

Machines automatiques

La généralisation des fabrications en grandes séries, avec les impératifs de productivité qui y sont associés, a conduit dès l'origine les constructeurs à concevoir et à réaliser des machines automatisées, fût-ce au détriment de leur souplesse, c'est-à-dire de leur capacité de s'adapter plus ou moins rapidement à des travaux différents.

Les tours à copier à cycles automatiques

Les familles de machines de cette classe sont nombreuses et diversifiées. Le copiage est une technique consistant à obliger l'outil à suivre une trajectoire déterminée, généralement définie et matérialisée par le profil d'un gabarit. Il suffit donc a priori, pour exécuter une pièce différente, de remplacer le gabarit par un autre. En réalité, les tours à copier sont des machines sensiblement plus complexes que les tours parallèles, car elles utilisent, conjointement au copiage, l'ensemble des possibilités qu'apportent la commande-programme et le tournage par outils multiples. Les temps d'usinage sont ainsi très fortement réduits par la simultanéité des opérations ou mouvements effectués par les différents chariots. Utilisés dans les industries de grandes séries comme l'automobile, ces tours sont insérés dans des chaînes de fabrication et reliés entre eux ou aux machines voisines par des dispositifs assurant automatiquement l'alimentation, le chargement des pièces à usiner et leur déchargement.

Les tours automatiques travaillant dans la barre

Il s'agit de machines destinées au décolletage, qui sont justifiées dans les cas de très grande production, car elles présentent généralement l'inconvénient d'être très complexes à régler, autrement dit, lors de changement de fabrication, d'avoir des temps improductifs très élevés.

Les tours automatiques multibroches

Les tours multibroches sont des machines beaucoup plus importantes et complexes que les tours monobroches ; ils fonctionnent par succession d'usinages partiels en faisant passer la pièce devant des postes d'usinage spécialisés. L'emploi de ces machines, qui ont une productivité très élevée, est réservé aux entreprises de très grandes séries, telles que celles de l'automobile et du motocycle, celles de l'industrie des roulements et de l'armement.

Les fraiseuses à programme

Les fraiseuses à programme, dérivées des fraiseuses de production, sont équipées de dispositifs électromécaniques, permettant de réaliser des cycles automatiques linéaires, carrés ou cubiques. Ces dispositifs se composent généralement de butées, qui commandent les arrêts successifs des différents mouvements, et d'éléments d'information déterminant le programme, c'est-à-dire l'ordre dans lequel ces mouvements doivent s'enchaîner. Le réglage de ces dispositifs, et notamment des butées lorsque l'on doit réaliser des travaux très précis, est une opération assez longue, qui ne peut être confiée qu'à un personnel soigneux et doué d'une certaine dextérité.

Machines spéciales et machines-transfert

C'est de la préoccupation permanente de produire plus, plus vite, avec moins de manipulations et en obtenant une qualité constante du produit fini que sont nées les machines spéciales et les machines-transfert.

On désigne sous le nom de « machines spéciales » des machines composées d'une ou plusieurs unités d'usinage distinctes, chacune d'elles étant autant que possible normalisée. Ces machines ont une grande productivité grâce à l'emploi combiné d'un outillage multiple et peuvent être conduites par une main-d'œuvre non spécialisée, ces deux éléments contribuant à la réduction du coût de l'usinage. De telles machines se rencontrent surtout dans les lignes d'usinage automatique, appelées « machines-transfert », qui comportent, par définition, une série de machines reliées entre elles par des moyens assurant les transferts successifs de la pièce d'une machine à l'autre (fig. 6). Les machines-transfert sont employées surtout à des travaux de fraisage, alésage, perçage, mais peuvent parfois effectuer d'autres opérations, telles que soudures, traitements chimiques et thermiques, ou même assemblages. Certaines sont munies de systèmes de vérification des produits après usinage partiel et en fin d'usinage ; la qualité des pièces usinées devient ainsi plus uniforme et leur précision plus élevée tandis que les pièces défectueuses sont éliminées. La fabrication par machines-transfert (en chaîne) se caractérise par l'installation des éléments d'équipement suivant l'ordre des opérations du processus d'usinage, de vérification et d'assemblage des pièces, tandis que celles-ci se déplacent d'une position à l'autre à des intervalles déterminés par le cycle de fabrication. Elle correspond donc à la production régulière du même type de pièce suivant une cadence donnée et constante.

Il en résulte qu'une modification de la pièce à usiner exige une transformation profonde, parfois impossible, toujours coûteuse, de la chaîne de machines-transfert, avec une durée d'immobilisation importante de celle-ci.

5. Techniques récentes d'usinage

On a vu que, dans de nombreux cas, l'universalité et l'automatisme semblaient difficilement conciliables. Les recherches des constructeurs, au cours des dernières décennies, ont eu parmi leurs principaux objectifs celui de surmonter cette incompatibilité.

La commande numérique

L'irruption de l'informatique dans la machine-outil, qui a donné naissance aux machines à commande numérique, a entraîné un profond bouleversement de leur conception, aussi bien mécanique qu'électrique, les machines traditionnelles s'adaptant difficilement à cette nouvelle technique et ne permettant pas d'en exploiter toutes les possibilités. Une machine-outil à commande numérique est capable de se commander elle-même et de mesurer avec une extrême précision les déplacements de ses organes mobiles, porte-pièces ou porte-outils. Cet automatisme est rendu possible par un système informatique gardant en mémoire la description

précise des différentes opérations à effectuer sur une pièce, qui constituent le programme. Il existe donc un travail préalable de programmation, qui consiste à décrire les opérations prévues dans un langage codé assimilable par un ordinateur ou un micro-ordinateur ; cette programmation, manuelle lorsque les opérations sont simples, peut elle-même être partiellement ou totalement automatisée grâce à des dispositifs d'aide à la programmation permettant d'enregistrer au préalable, une fois pour toutes, certaines « macro-instructions », afin de réduire au minimum les instructions spécifiques à chaque cas particulier.

La description du programme sous la forme d'instructions codées utilisables par la machine à commande numérique peut être matérialisée sur un support, tel qu'une bande magnétique, la machine devant alors comporter un lecteur de bande, ou être conservée en mémoire dans le micro-ordinateur qui commande directement la machine.

Ce micro-ordinateur offre des avantages supplémentaires, en évitant par exemple les incidents dus à une détérioration de la bande magnétique. On peut ainsi n'utiliser cette bande qu'une seule fois pour enregistrer le programme dans le micro-ordinateur et adopter ensuite la commande directe pour l'exécution de la série de pièces. De plus, si ce programme doit pour une raison quelconque être modifié, on peut, sans refaire toute la bande, se contenter d'enregistrer la modification dans le micro-ordinateur qui est d'ailleurs capable, s'il possède le système convenable et s'il s'agit d'une modification définitive, d'élaborer automatiquement une nouvelle bande mise à jour.

Les équipements de commande numérique se caractérisent par le nombre d'« axes », c'est-à-dire de mouvements, qu'ils permettent de contrôler, successivement ou simultanément.

Dans le cas de contrôle successif des mouvements, les trajectoires obtenues ne peuvent être qu'une suite de déplacements rectilignes parallèles aux axes de la machine. Cette solution, valable pour les travaux de perçage et certaines opérations d'alésage, permet de réaliser deux types d'usinage : le positionnement point à point et l'usinage paraxial. Le contrôle simultané de plusieurs mouvements est nécessaire pour réaliser avec précision une trajectoire curviligne quelconque dans le plan (contrôle de deux axes) ou dans l'espace (contrôle de trois axes). La commande numérique comporte alors des dispositifs d'interpolation automatique linéaire (pour obtenir une trajectoire rectiligne inclinée par rapport aux axes) et circulaire. L'axe sous contrôle de la commande numérique peut correspondre à un mouvement de translation ou un mouvement de rotation. Il faut alors prévoir une interpolation polaire, qui permet par exemple de réaliser l'usinage d'une came sur un tour, les deux mouvements contrôlés étant la rotation de la broche, sur laquelle est montée la came à usiner, et le déplacement transversal du chariot, sur lequel est fixé le porte-outil. Enfin, le contrôle de quatre axes ou davantage est nécessaire lorsque la machine comporte plusieurs organes mobiles que l'on désire faire travailler simultanément. La figure 7 représente par exemple un centre de tournage (tour FLS 40) possédant deux unités de tournage et pouvant recevoir en supplément une unité de fraisage et un dispositif automatique de chargement, ce qui exige le contrôle de huit axes, dont au moins trois simultanés, et quatre simultanés pris deux par deux.

Tours à commande numérique

La réalisation de pièces à profil curviligne correspond à une opération de contournage, qui exige le contrôle simultané, avec interpolation circulaire, des deux axes du tour : le mouvement longitudinal du traînard sur le banc et le déplacement transversal de la coulisse sur le traînard, cette coulisse recevant le chariot ou la tourelle porte-outils. Par ailleurs, l'exécution de filetages sur un tour exige une relation exacte entre l'avance de l'outil et la rotation de la pièce ; il est alors nécessaire de prévoir un asservissement entre l'axe correspondant au mouvement du traînard et celui de rotation de broche, qui constitue un troisième axe numérique. La facilité de modifier le programme de la commande numérique, par rapport au temps nécessaire et à la dépense correspondant à la réalisation d'un nouveau gabarit sur un tour à copier, a entraîné d'abord le développement de la commande numérique pour les fabrications en petites ou moyennes séries,

tandis que le copiage, moins coûteux, conservait sa place pour les grandes séries.

Cette répartition est de moins en moins valable actuellement, d'une part parce que le développement de la commande numérique a permis d'en réduire le prix dans une proportion appréciable, et d'autre part parce que les adeptes traditionnels du copiage, tels que l'industrie automobile, sont obligés de modifier fréquemment leurs modèles et de les diversifier, n'ayant plus par conséquent l'assurance de pouvoir fabriquer la même pièce en quantités très importantes pendant une longue période.

Les tours numériques, lorsqu'ils se substituent à des tours à copier, doivent alors répondre aux mêmes impératifs de productivité ; ils comportent des équipements additionnels permettant notamment le chargement automatique des pièces et leur déchargement après usinage. Les outils sont montés sur des tourelles à postes multiples, dont la rotation, l'indexation et le blocage pendant le travail sont automatiques, des outils différents intervenant successivement pendant le cycle ; le changement des outils sur ces tourelles peut être manuel ou motorisé, les légères différences de cotes entre l'outil usagé que l'on démonte et l'outil neuf de remplacement étant compensées par la commande numérique, soit en tapant sur un clavier les corrections souhaitées, soit grâce à l'intervention automatique d'un ordinateur central assurant la gestion de ces outils (fig. 7).

Fraiseuses et fraiseuses-aléseuses

Les observations faites à propos des tours numériques s'appliquent également aux fraiseuses et fraiseuses-aléseuses, si ce n'est qu'en règle générale le nombre d'axes à contrôler numériquement est plus élevé. La machine de base comporte en effet trois axes (au lieu de deux) dans le cas de la fraiseuse, et quatre dans celui de la fraiseuse-aléseuse. Un axe supplémentaire est à prévoir si l'on utilise une table tournante pour fixer la pièce à usiner et si l'on désire contrôler la rotation de cette table. D'autres axes correspondraient à l'évolution d'une tête de fraisage orientable, ou encore au mouvement de l'outil lorsque, dans le cas d'une aléseuse, le porte-outils est fixé sur un plateau possédant un déplacement radial. La mise en œuvre obligatoire d'un grand nombre d'outils pour l'usinage d'une même pièce, sans démontage, a amené les constructeurs à pourvoir ces machines de mécanismes automatiques changeurs d'outil, également placés sous le contrôle de la commande numérique. Par ailleurs, la « palettisation » a permis d'automatiser le chargement et le déchargement des pièces, qui sont fixées sur des palettes, en temps masqué, en dehors de la zone de travail, tandis que l'introduction d'une palette et son évacuation sont automatiques. L'opérateur peut donc, pendant qu'une pièce est en cours d'usinage sur une palette, démonter sur une autre palette la pièce finie et monter à sa place une nouvelle pièce brute.

Perceuses et perceuses-fraiseuses

La simplicité des travaux à exécuter sur les perceuses, et dans une certaine mesure sur les perceuses-fraiseuses, correspond à des opérations de positionnement ou d'usinage paraxial. Les machines de base et leurs commandes numériques peuvent donc être également simplifiées au maximum, et leurs prix ne sont guère supérieurs à ceux des machines conventionnelles, sur lesquelles les positionnements exigent l'emploi, soit de butées dont le réglage est long et aléatoire, soit de gabarits dont la réalisation est coûteuse.

Autres machines

La commande numérique a fait de tels progrès, tant en performances qu'en prix, que son emploi s'est généralisé, au point que rares sont les familles de machines où elle n'est pas encore introduite. On trouve cette commande numérique sur les rectifieuses, sur les machines d'électro-érosion et sur celles travaillant par déformation. On la rencontre également, au fur et à mesure que la programmation se simplifie, sur les machines dites d'« outillage », c'est-à-dire habituellement destinées aux travaux unitaires non répétitifs. Cette évolution s'inscrit dans un

cadre plus général, qui tend vers une amélioration permanente de la qualité du travail et une élimination des aléas dus à des facteurs humains.

Les chaînes flexibles

La flexibilité désigne la propriété consistant à concilier l'automatisme d'un moyen de production et la diversification, au moins relative, de cette production. Cette qualité peut s'appliquer aussi bien à des machines indépendantes qu'à des ensembles de machines enchaînées, étant entendu qu'une chaîne ne peut être flexible que si les machines qui la composent le sont elles-mêmes, cette condition nécessaire n'étant d'ailleurs pas suffisante. Une autre condition, souhaitable sinon nécessaire, est de prévoir, autant que possible, pour constituer cette chaîne, des machines multifonctionnelles, qui possèdent précisément les éléments leur permettant d'exécuter des travaux variés. On a déjà signalé l'exemple d'un centre de tournage, c'est-à-dire d'une machine essentiellement conçue pour le tournage, mais dotée d'une unité auxiliaire permettant de réaliser, sans démontage de la pièce, des opérations annexes de fraisage ou de perçage. Un tel centre possède généralement deux tourelles indépendantes de tournage pouvant travailler simultanément, l'une exécutant, si la forme de la pièce l'autorise, l'usinage de l'extérieur pendant que l'autre assure celui de l'intérieur (fig. 7). Les centres d'usinage sont au contraire des centres de « fraisage », c'est-à-dire des machines destinées d'abord aux travaux de fraisage et d'alésage, auxquels peuvent s'ajouter des opérations de perçage, taraudage, etc. Ces centres sont soit à broche horizontale, ce qui permet d'usiner les quatre faces verticales d'une pièce cubique, soit à broche verticale, pour l'usinage de la face horizontale supérieure (fig. 8, centre d'usinage FVN 40).

Les équipements réalisant l'enchaînement de tels centres doivent également être sélectionnés en fonction de leur flexibilité. Parmi ceux fréquemment utilisés, on peut citer les chariots filoguidés, transportant les pièces d'un centre à un autre ; ces chariots commandés par des conducteurs électriques noyés dans le sol, peuvent parcourir différents chemins, déterminés automatiquement en fonction des travaux restant à effectuer.

De même, le chargement et le déchargement des pièces peuvent être assurés soit par des dispositifs incorporés dans les centres eux-mêmes, soit par des robots, qui sont des bras articulés dotés d'une logique de commande. Les centres sont commandés par des micro-ordinateurs reliés à un ordinateur central chargé de la gestion de l'ensemble de la chaîne. Cet ordinateur doit, entre autres tâches, être capable de reconnaître les pièces, puisque la chaîne est destinée par hypothèse à l'usinage de pièces différentes, conserver en mémoire les programmes correspondants et, en fonction de la pièce reconnue, adresser le programme convenable au centre concerné. La reconnaissance des pièces, lorsqu'elles sont placées sur des palettes, peut se faire en prévoyant sur celles-ci des dispositifs électromécaniques permettant de les identifier. Si, au contraire, ces pièces sont prélevées à partir d'un stock tampon en vrac ou semi-ordonné, l'organe de préhension doit comporter les capteurs permettant de les distinguer en comparant certaines de leurs dimensions spécifiques.

La figure 9 représente le schéma type d'une telle installation.

L'« atelier sans homme »

L'expression « atelier sans homme » correspond au stade final de l'évolution amorcée par le développement de la commande numérique et la réalisation des chaînes flexibles. Cette évolution se traduit en effet par une réduction progressive de l'intervention humaine, les opérateurs devenant moins nombreux et ayant surtout un rôle de surveillance. L'étape suivante consiste donc à rendre cette surveillance inutile, au moins pendant un certain temps, pour permettre par exemple à une chaîne flexible de fonctionner seule pendant la nuit, en préparant à l'avance un stock suffisant de pièces à usiner. Parmi les problèmes à résoudre, on doit régler celui de la gestion et du changement des outils. Une solution simple consiste à définir la durée de

vie de chaque outil, afin que, lorsque cette durée est atteinte, l'ordinateur adresse l'ordre de remplacement au centre qui possède déjà les organes permettant de réaliser automatiquement le démontage de l'outil usé et le remontage de l'outil neuf.

Toutefois, les solutions procurant les meilleures sécurités sont celles qui répondent aux inévitables aléas risquant, à la suite d'un incident mineur et localisé, de provoquer soit un accident plus grave, soit une immobilisation générale de l'installation. La détection de tels aléas passe généralement par l'emploi de palpeurs, effectuant les mesures électroniques se substituant aux contrôles visuels ou tactiles d'un observateur humain.

Les palpeurs sont utilisés pour mesurer les cotes des pièces après usinage, déterminer les corrections à introduire dans la commande numérique si les erreurs mesurées restent inférieures à certaines limites admissibles et, au contraire, adresser à l'ordinateur, si ces limites sont dépassées, le signal qui déclenchera l'ordre de remplacement de l'outil incriminé. De même, après montage d'un outil neuf, un palpeur mesure la cote exacte de celui-ci, qui est introduite à son tour dans la commande numérique. Les palpeurs peuvent également être utilisés pour assurer la détection automatique des ruptures accidentelles d'outils. On peut en effet, au moyen d'une boucle de courant créée par le contact entre la pièce et l'outil (un foret par exemple), détecter à l'aide d'un palpeur la position de la pièce correspondant à ce contact ; si celui-ci s'effectue en dehors d'un intervalle admissible, la commande numérique considère que le foret est cassé et ordonne son remplacement, tandis que la pièce usinée avec l'outil brisé est automatiquement mise de côté.

Il existe encore de nombreuses applications des palpeurs, parmi lesquelles on peut citer :

- les outils à compensation automatique ; c'est ainsi qu'un outil d'alésage muni d'un palpeur peut exécuter un préalésage, mesurer son diamètre et corriger la position de la pointe de l'outil en fonction de la différence entre le diamètre préusiné et celui prévu ;
- les corrections automatiques de positionnement ; un palpeur détecte sur la pièce à usiner une face choisie comme référence, la machine assurant ensuite le recalage de l'origine du programme en tenant compte de la différence entre la face réelle de la pièce et la face programmée.

Ces exemples illustrent la diversité des tâches qui, sur les machines conventionnelles, sont confiées aux opérateurs et qui, pour être réalisées automatiquement, exigent la mise en œuvre de techniques nombreuses et complémentaires, les moyens modernes de production n'étant plus seulement composés d'éléments mécaniques, pneumatiques, hydrauliques et électriques, mais bénéficiant de plus en plus largement de l'apport de l'électronique et de l'informatique.