

La machine-outil

l'histoire succède à la préhistoire

Pierre BEZIER

Introduction

Les étapes de l'histoire de l'outil, dont le professeur Coppens nous a entretenues, s'exprimaient en millions d'années. Celle de la machine-outil couvre à peine trois millénaires, mais qui comptent beaucoup dans l'évolution de la race humaine.

Les dictionnaires donnent diverses définitions de la machine-outil ; les mécaniciens, au moins, sont d'accord pour admettre que c'est un appareil qui amplifie la force de l'homme et accroît sa précision.

La force et la puissance

1. La force musculaire

Il y a quelques décennies, les vieux formulaires attribuaient à l'homme une puissance «d'un septième de cheval», c'est-à-dire, en unités classiques, une centaine de watts, bien insuffisante pour actionner le moindre appareil ménager ; encore aurait-il fallu ajouter que, la gamme de vitesse disponible étant fort réduite, un transformateur est indispensable dès qu'il faut exercer un effort important ou, au contraire, obtenir une grande vitesse.

Le tour à perche, dont l'image apparaît sur les peintures murales datant de trois mille ans dans les sépultures égyptiennes, multiplie la vitesse relative de l'outil, mais sans augmenter évidemment la puissance disponible, ce qui permet cependant de travailler le bois, qui est un matériau tendre.

Le tour à archet en est une variante apparue en même temps ; il était naguère employé en Inde et c'était la reproduction exacte de celui des artisans égyptiens.

Le fonctionnement de la drille était fondé sur le même principe et elle était encore utilisée par des artisans horlogers il y a trente ans à peine.

Dans sa jeunesse, mon père a parfois actionné le volant d'une perceuse de l'atelier de mon grand-père, artisan mécanicien, et si j'ai jadis joué le même rôle, ce n'était qu'à titre d'exercice scolaire ; ailleurs, l'énergie était fournie par un gros chien trottant dans une roue d'écureuil. Peut-être entendez-vous parfois la cloche du rémouleur attirant l'attention de ceux qui veulent faire affûter couteaux ou ciseaux ; saluez-le, car c'est probablement le dernier représentant de ceux qui utilisent la puissance humaine pour actionner une machine, en l'occurrence une meule.

Lorsque la puissance humaine ne suffisait pas, on a utilisé des chevaux, mais c'était pour entraîner des machines agricoles, batteuses ou tarares, plutôt que des machines-outils proprement dites ; mais on a retrouvé, dans les carnets de dessins des ingénieurs de la Renaissance, des machines à forer des tuyaux de bois pour l'adduction d'eau, ou des canons. L'homme a souvent mis son ingéniosité au service de ses instincts guerriers.

2. La machine à vapeur

Vers 1670, le Français Denis Papin découvre la force de la vapeur d'eau ; il veut la domestiquer, mais la machine qu'il construit n'est pas réussie et c'est l'Anglais Newcomen qui parvient à faire fonctionner les pompes d'assèchement des mines de charbon ; devant le développement des commandes, il invente une machine pour forer les cylindres, qui est l'ancêtre des modernes aléseuses ; il promet à ses clients qu'entre le piston et le cylindre l'on ne pourra pas, tant l'ajustage est précis, engager une pièce de bronze d'un penny, et il précise «un penny usé».

La machine à vapeur va transmettre son énergie dans tout l'atelier par tout un système de poulies et de courroies, mais bientôt apparaît le régulateur, inventé par James Watt, qui surveille la distribution de la vapeur afin de maintenir une vitesse à peu près constante.

Il faut observer à cette occasion qu'à partir de ce moment la machine ne se borne pas à fournir de l'énergie mais qu'elle libère l'homme de l'obligation de porter une attention constante sur le fonctionnement de celle-ci. C'est une étape importante de la mécanique.

3. Le moteur électrique, les turbines.

Pendant quelques temps, les machines électriques ont été des génératrices dont le courant servait surtout à l'éclairage et parfois au chauffage ; mais en 1875 le Français Hippolyte Fontaine invente le moteur électrique et transporte l'énergie mécanique à longue distance ; le moteur va peu à peu remplacer la machine à vapeur qui, bien entendu, continuera d'actionner les génératrices.

On n'a guère d'exemple de machines-outils actionnées par une turbine pas plus que, auparavant, par des moulins à eau ou à vent, si l'on excepte toutefois les scies à grumes et les meules des couteliers de Thiers. Quant aux turbines à vapeur à la création desquelles sont attachés les noms de Hugoniot, de Barré de Saint-Venant, d'Auguste Rateau et de Casimir Monteil, elles entraîneront des génératrices et leur énergie sera distribuée exclusivement par voie électrique.

L'outil

1. Le silex

Retournant vers l'origine de l'industrie mécanique, nous constatons qu'après avoir façonné par percussion un outil de silex, l'homo faber l'a parachevé en le polissant ; ainsi, au choc et à la coupe succède l'abrasion comme moyen d'enlèvement de matière et ces deux méthodes resteront seules employées jusqu'à l'apparition, il y a une cinquantaine d'années à peine, des moyens dits physiques : électroérosion, électrolyse, ultrasons, émissions de faisceaux d'électrons ou de photons, laser, projection d'eau à haute pression.

2. Le métal

Aux outils en silex succède d'abord le bronze, dont la métallurgie n'exige pas d'aussi hautes températures que celle du fer ; on a trouvé, dans les sépultures égyptiennes, des instruments en bronze au glucinium employés par les chirurgiens et les embaumeurs.

Les outils en acier au carbone, resteront ensuite pendant plus de deux mille ans, après durcissement par trempe, les seuls employés.

L'évolution s'est accélérée depuis le début de notre siècle ; l'acier, alliage de fer et de carbone, s'enrichit d'additifs comme le chrome, le tungstène, le vanadium, qui augmentent sa dureté ainsi que sa résistance à l'échauffement ; ensuite sont apparus les carbures de tungstène et de bore, puis les céramiques à base d'alumine ; on utilise même le diamant pour couper les métaux tendres comme les alliages d'aluminium, de magnésium, d'étain et de plomb.

Les vitesses de coupe dans les métaux ferreux, qui étaient de dix à quinze mètres par minute pour les outils en acier au carbone, sont passées à trente avec les aciers alliés, dits rapides, à cent avec les carbures et trois cents avec les céramiques.

Les outils d'abrasion ont d'abord été constitués par des meules en grès, puis par des agglomérés d'émeri naturel ; ensuite sont apparus l'oxyde de fer, dit rouge

d'Angleterre, le carbure de silicium ou de bore, et même la poudre de diamant ; leur vitesse de coupe n'est plus guère maintenant limitée que par la résistance des meules à l'éclatement sous l'effet de la force centrifuge, et elle atteint plusieurs dizaines de mètres par seconde, mais on pratique également une abrasion à basse vitesse et à forte pression.

Ainsi, la technique a bouclé son cycle puisque, après être passée du minéral, si-lex au métal, acier et carbures, elle est revenue au minéral avec les céramiques ; quant à l'abrasion lente, dite pierrage ou rodage, c'est la forme moderne du polissage pratiqué par les hommes des cavernes.

La machine

1. Organes de guidage

La recherche de la précision passant très vite au premier plan des préoccupations, il faut réduire les causes d'usure. En conséquence, les surfaces de guidage des organes mobiles se limiteront aux plans et aux cylindres, puisque de telles surfaces restent en contact par rotation et par translation ; ainsi, les pressions de contact demeurent faibles, ce qui permet d'interposer entre elles une pellicule lubrifiante, huile, eau ou même air comprimé. C'est pourquoi les glissières sont prismatiques ou, parfois, cylindriques.

D'autres surfaces ont entre elles des contacts linéaires ou même ponctuels ; ce sont par exemple les flancs des dentures des pignons ; il faut alors porter une grande attention aux efforts de contact afin que le lubrifiant ne soit pas expulsé, ce qui entraînerait la ruine du mécanisme.

En dépit des soins, le frottement engendre toujours de la chaleur, et l'on doit en conséquence limiter les vitesses de déplacement.

Pour franchir cet obstacle, on substitue le roulement au frottement. Observons, à ce propos, que de très anciennes civilisations utilisaient la roue, ou au moins le rouleau, mais que le continent américain précolombien l'ignorait, les charges étant traînées et non roulées. La mythologie Hindoue a déifié l'empereur Ashok, inventeur de la roue, et l'image de celle-ci figure sur le drapeau indien ; à l'énorme progrès matériel

qu'elle représente s'attache la signification mystique de la réincarnation et de son cycle.

Beaucoup plus prosaïquement, on raconte que c'est un nommé Cardinet qui aurait eu l'idée ingénieuse de disposer des billes entre les faces de la butée du petit manège forain qu'il entraînerait à la force de ses jarrets ; de l'usage des billes, on est passé à celui des cylindres et des cônes, et il n'est plus guère aujourd'hui de mécanisme qui ne doive une bonne part de sa précision et de sa longévité à l'invention du propriétaire de l'humble manège de chevaux de bois. Ayez une pensée pour lui lorsque vous entendrez les turboréacteurs de votre avion tourner à la vitesse de plusieurs dizaines de milliers de tours par minute, et qui accomplissent plusieurs milliards de rotations avant de passer en révision.

2. La précision

Pour tous les techniciens, de l'ingénieur à l'opérateur, qui vivent dans le monde de la machine-outil, qu'ils la construisent ou qu'ils l'emploient, la précision demeure la préoccupation permanente, l'obsession, l'impératif catégorique.

Aujourd'hui, elle s'exprime en centièmes de millimètre, et plus souvent en millièmes ; pour prendre l'exemple d'une voiture de grande diffusion, des pièces telles que les axes de piston, les chemises ou les fusées ne varient pas de plus d'un centième ; pour les billes de roulement ou les injecteurs des moteurs Diesel, la limite est de l'ordre du millième, c'est-à-dire le double de la longueur d'onde de la lumière jaune ; les appareils qui les mesurent sont de véritables instruments de laboratoire.

3. Les vis.

Le mot de vis est souvent associé à celui d'Archimède, mais le génial ingénieur avait créé un appareil d'irrigation plutôt qu'un mécanisme de transmission. Les architectes et les bâtisseurs de l'Antiquité utilisaient couramment le plan incliné comme moyen de levage, mais ce n'est qu'au Moyen Age qu'émergea l'idée d'enrouler un plan incliné autour d'un cylindre afin d'engendrer un hélicoïde. Les premières vis furent fabriquées en enroulant un fil métallique autour d'un noyau d'acier ; quant à l'écrou, c'était une plaque de plomb martelée sur la vis ainsi réalisée, ou parfois un morceau de liège quand l'effort à transmettre était faible ; par corrections successives, on est arrivé à produire des vis de précision, telles que celles de la célèbre Société Genevoise d'Instruments de Physique, qui étaient exactes à une fraction de centième de millimètre près.

4. Les bâtis

Pendant longtemps, les bâtis ont eu la forme prismatiques ; ils étaient munis de vérins d'appui nombreux reposant sur de gros blocs de béton, car le sol n'est généralement pas assez stable pour garantir leur indéformabilité ; pour les machines précises, il a fallu les faire reposer seulement sur trois points d'appui.

5. Les moyens de mesure

Pour mesurer l'amplitude du déplacement d'un organe de machine, l'on s'est longtemps contenté de tenir compte de l'angle de rotation de la vis qui le commandait ; mais lorsque l'on a voulu atteindre un plus haut degré de précision, il a fallu supprimer les effets des efforts longitudinaux et de la torsion des vis ainsi que de l'imperfection géométrique de leurs butées.

Alors, on a dû considérer que la fonction des vis n'était plus que d'assurer les déplacements de translation ou de rotation, mais que la mesure de leur amplitude devait s'effectuer par des moyens optiques ou électroniques insensibles aux contraintes mécaniques ; par exemple, des règles graduées ou portant un code numérique sont lues à l'aide d'un système interpolateur faisant appel aux ressources de phénomènes d'interférences ou de self-induction et de capacité.

Pour le moment, ce perfectionnement s'applique seulement à la mesure des mouvements, mais on peut songer, pour ceux qui recherchent une précision encore plus poussée, à remplacer un jour le trièdre de référence, constitué par les glissières, par un système optique insensible aux contraintes, le bâti ne jouant plus que le rôle de support matériel.

L'avenir dira si ce rêve d'aujourd'hui, ou cette rêverie, deviendra réalité.

L'automatisme

1. La solution cinématique

L'application de l'automatisme aux machines-outils n'apparaît guère avant la fin

du dix-huitième siècle. Les réalisations de l'Antiquité, du Moyen Age ou de la Renaissance relevaient plus de l'amusement ou de la fantasmagorie que de l'industrie ; Vaucanson s'est d'abord rendu célèbre par des jouets animés qui témoignent d'une imagination et d'une habileté exceptionnelles ; nommé inspecteur des filatures royales, il a voulu appliquer, avec succès, son imagination au perfectionnement des machines textiles.

Son automatisme est principalement fondé sur des combinaisons cinématiques ; chaque programme est matérialisé par un jeu de cames, et une rotations de leur arbre correspond à l'exécution d'un cycle ; cette conception s'applique encore à certaines machines comme les tours à décolleter.

2. La commande séquentielle

La fabrication en grande série, si l'on excepte la clouterie et la cartoucherie, n'est véritablement apparue dans le monde que dans les premières années de notre siècle ; le phénomène n'est devenu capital qu'après 1945. Le système de l'arbre à cames n'était plus applicable à des machines dont la longueur dépassait parfois une trentaine de mètres et dont les organes mobiles se comptaient par dizaines ; alors, chacun étant muni de son propre moteur, on a supprimé entre eux toute liaison cinématique ; pour qu'un mouvement s'enclenche, il suffit que certaines conditions soient remplies ; chacune étant matérialisée par l'état d'un distributeur électrique, toutes les informations sont traitées par des relais auxiliaires, et la décision finale est signifiée, sous forme de courant, aux relais principaux commandant les moteurs concernés.

Il faut ajouter que les relais électromagnétiques employés à l'origine ont peu à peu cédé la place aux semi-conducteurs puis aux circuits intégrés ; le principe de base est resté identique, mais le prix et l'encombrement ont diminué alors que la sécurité progressait.

3. La servo-commande

Il faut parfois que les ordres donnés à une machine soient interprétés et adaptés en fonction de conditions imprévisibles ; l'opérateur qui sait son métier perçoit les vibrations, les échauffements, l'usure d'un outil, et il est indispensable parfois qu'il réagisse très vite ; on peut alors disposer des capteurs qui saisissent de tels phénomènes avec une sensibilité, une précision et une rapidité supérieures à celles d'un être humain,

et qui donnent immédiatement les ordres nécessaires ; c'est la commande adaptative ou servo-commande.

4. La commande numérique

L'apparition de l'ordinateur a bouleversé totalement les méthodes de l'industrie mécanique, et de bien d'autres aussi.

Pour qu'un outil parcoure une certaine trajectoire par rapport à une pièce en cours d'usinage, l'ordinateur calcule à tout instant, c'est-à-dire plusieurs dizaines de fois en une seconde, la position que doit occuper chaque organe mobile ; il connaît aussi la position exacte de chacun d'eux et il en déduit la vitesse et l'accélération qu'il faut imposer à chaque moteur ; en même temps, il tient compte des conditions résultant des consignes de servo-commande.

Si l'on ajoute que l'ordinateur, pour calculer ces données, doit intégrer dans ses calculs la pente et la courbure de la trajectoire ainsi que de la direction de la perpendiculaire à la surface en cours d'usinage et la forme géométrique de l'outil, on voit que la quantité des opérations arithmétiques élémentaires est proprement vertigineuse, et qu'elles se répètent parfois plus d'une centaine de fois par seconde ; seul l'ordinateur est capable d'accomplir une tâche aussi gigantesque.

Conclusion

Il faut observer que l'évolution de la machine-outil depuis un demi siècle ne s'est pas strictement bornée au domaine de la mécanique et de la physique, mais qu'elle a entraîné le développement de plusieurs branches de la mathématique : systèmes asservis, espaces paramétriques par exemple.

Si l'on examine de façon plus générale les rapports entre l'homme et la machine-outil, on observe que, dès ses débuts, la machine s'est montrée plus rapide, plus forte et plus précise que l'homme ; pour citer un ordre de grandeur, l'on peut dire que, pour actionner en permanence une broche d'une dizaine de kilowatts, il faudrait une troupe d'environ cinq cents hommes robustes, encore ne s'agit-il là que d'une puissance très moyenne.

Puis vint l'ère des travaux répétitifs ; la cinématique, concrétisée par l'arbre à cames, puis la commande séquentielle par relais ou par semi-conducteurs, ont libéré l'homme de l'obligation de porter une attention permanente au déroulement des cycles de travail ; ensuite, la servo-commande s'est substituée à l'opérateur pour prendre les décisions immédiates afin de maintenir les conditions optimales de sécurité et de rendement.

Maintenant, l'ordinateur montre de si extraordinaires possibilités que d'aucuns n'ont pas hésité à prédire qu'il supplanterait un jour le cerveau humain. C'est peut-être oublier bien vite que l'intelligence, en sa définition la plus sèche, est la faculté d'enregistrer, de coordonner et de déduire, que l'ordinateur ne fait jamais qu'exécuter ce que l'homme lui a enseigné, mais que celui-ci possède seul le privilège de l'imagination et de la véritable création.

N'y a-t-il pas quelque excès à employer parfois l'expression d'Intelligence Artificielle pour des inférences qui ressemblent plus à des réactions instinctives qu'à des décisions élaborées par des produits du raisonnement ? Dans la revue *Scientific American* parue en janvier 1990, on trouve deux articles fort intéressants qui traitent de cette question ; l'un est de John Searle ; son titre peut se traduire par : «Le cerveau n'est-il qu'un ordinateur ?» ; l'autre est signé par J. et M. Churchland ; il pose la question : «Une machine peut-elle penser ?» ; tous deux font référence aux célèbres machines de Turing et aux travaux, plus anciens, de Torres y Queveda.

Les grands inventeurs, ceux qui ont fait franchir à l'humanité des étapes capitales, sont tous des non-conformistes qui, à l'intelligence réduite à une définition désincarnée, ajoutent l'imagination et, pourquoi ne pas le dire ? un petit grain de folie, dont l'ordinateur sera privé à jamais.

Pour prendre une comparaison qui semble significative, on peut observer que la linotype, qui est une merveille de cinématique, travaille selon le même schéma qu'un compagnon de Gutenberg ; elle le fait bien plus vite et sans erreur mais le principe fondamental est resté immuable pendant des siècles. Au contraire, la photocomposeuse ou l'écran de traitement de texte ne possèdent, techniquement parlant, aucun point commun avec une linotype ; celle-ci est le produit d'une évolution, d'un perfectionnement poursuivis pendant un demi-millénaire ; en quelques années, la photocomposition a bouleversé de fond en comble toute l'industrie de l'imprimerie.

Contrairement à ce que certains ont écrit, la machine n'asservit pas l'homme ; c'est à lui de fixer les limites raisonnables de son emploi.

En évoquant ce monde de la machine-outil, je ne puis m'empêcher de songer à tous ceux qui ont contribué à son progrès ; Chambon, qui inventa la première machine à tailler les pignons coniques, Georges Cuttat, ses fraiseuses et ses tours automatiques, et puis Gambin, Henri Bruet, des tours Cazeneuve, Fernand Rouchaud, Alphonse, Marcel et Pierre Pégard, Charles Berthiez, Durrenbach, de Manurhin, les frères Huré, et tant et tant d'autres...

Les ingénieurs français ont donné assez de preuves de leur valeur pour que nul n'ait le droit de désespérer de l'avenir de la machine-outil.

Pierre BEZIER
Ingénieur des Arts et Méteirs
et de l'Ecole Supérieure d'Electricité