

La fondation des machines modernes : des dessins.

Eugene S. Ferguson.

LE moteur automobile est une machine de la vie quotidienne dont il est impossible d'imaginer l'existence en 1500. Pourtant, à part les pièces électriques (bobine d'allumage et bougies), tous ses éléments étaient connus du vivant de Léonard de Vinci (1452-1519). Ce moteur se compose de cylindres et de pistons, d'un vilebrequin, de soupapes coniques, de cames, d'engrenages, de roulements, de courroies articulées et d'autres combinaisons mécaniques élémentaires. Certains de ces éléments comme les cylindres et les pistons remontent aux Grecs d'Alexandrie. D'autres ont une origine plus tardive, mais on est stupéfait de voir que le répertoire actuel des éléments mécaniques était pratiquement complet lorsque Léonard de Vinci en remplissait ses carnets de dessins. Et Vinci n'inventa pas non plus les éléments qu'il combina avec tant d'originalité. Il se familiarisa avec eux en travaillant comme ingénieur militaire et comme architecte, grâce à des machines déjà en usage et aux dessins qu'il trouva dans les carnets manuscrits d'autres ingénieurs de la Renaissance.

L'imagination mécanique de l'ingénieur ou du technicien est presque entièrement orientée par les dessins, les modèles ou les machines réelles qu'il a observés.

Le langage, lorsqu'il est nécessaire, sert à nommer, à spécifier les matériaux ou à énoncer une séquence d'opérations mécaniques. Lorsqu'il conçoit une machine nouvelle, l'ingénieur fait appel à des éléments mécaniques familiers, qu'il réarrange souvent, mais modifie rarement en profondeur. Au XV^e siècle, les jeunes gens pouvaient constituer leur répertoire de pièces en observant attentivement les horloges municipales, les pompes qui alimentaient les fontaines, les moulins à grain, les treuils et autres appareils permettant de manipuler les matériaux lourds dans la construction. Ils pouvaient aussi, s'ils avaient des relations, étudier les dessins figurant dans les dizaines de carnets d'ingénieurs rédigés durant ce siècle.

Au cours des siècles suivants, les dessins de machines proliférèrent dans les livres imprimés jusqu'à ce qu'au début du XX^e les lecteurs intéressés par la technique puissent les trouver à des millions et des millions d'exemplaires. Les modèles de machines, moins nombreux mais plus éloquents que les dessins, accrurent également les réserves mondiales de connaissances mécaniques. Tout en se multipliant, les dessins et modèles se perfectionnèrent grâce aux idées nouvelles ajoutées à celles déjà répertoriées. Finalement, au XIX^e siècle et au début du XX^e, la nature des dessins et leur utilisation prirent des voies nouvelles, offrant des possibilités sans précédent de produire des machines complexes en grandes quantités ; en 1922, l'usine Ford de Detroit débitait plus d'un million d'automobiles par an¹.

Si l'efficacité technique a atteint un niveau qualitativement différent de celui de la Renaissance, ce n'est pas à cause d'un quelconque Grand Partage qui séparerait nos capacités de celles de Vinci et de ses contemporains, mais plutôt grâce à l'accumulation des dessins et modèles et à l'avènement progressif de techniques nouvelles. Je souhaite montrer dans cet article que cet avènement ne se fit pas par grands bonds, mais grâce aux innombrables actions quotidiennes et prosaïques de ceux qui inventèrent et modifièrent les machines et qui développèrent, enregistrèrent et diffusèrent les connaissances mécaniques².

Dans les pages qui vont suivre, je tracerai une voie entre le XV^e et le XX^e siècle pour montrer que les techniciens ont disposé de sources d'informations et d'idées de plus en plus riches grâce aux dessins et modèles de machines. Je m'efforcerai de démontrer l'importance croissante des dessins aux XVIII^e et XIX^e siècles et leur rôle essentiel dans la production en série de machines complexes au XX^e. Enfin, j'évoquerai brièvement la façon dont les dessins ont progressivement fait passer le pouvoir de décision de l'atelier au bureau d'études.

ACCROISSEMENT DU STOCK DE CONNAISSANCES.

Beaucoup de pièces mécaniques courantes à la Renaissance remontent à l'Antiquité grecque et romaine. Héron d'Alexandrie, qui vécut au I^{er} siècle après J.-C., nous a laissé entre autres héritages cinq idées de systèmes pour soulever les charges lourdes : le treuil (roue et essieu), le levier, la poulie, le coin et la vis³. Cependant, le traité de mécanique de Héron, où

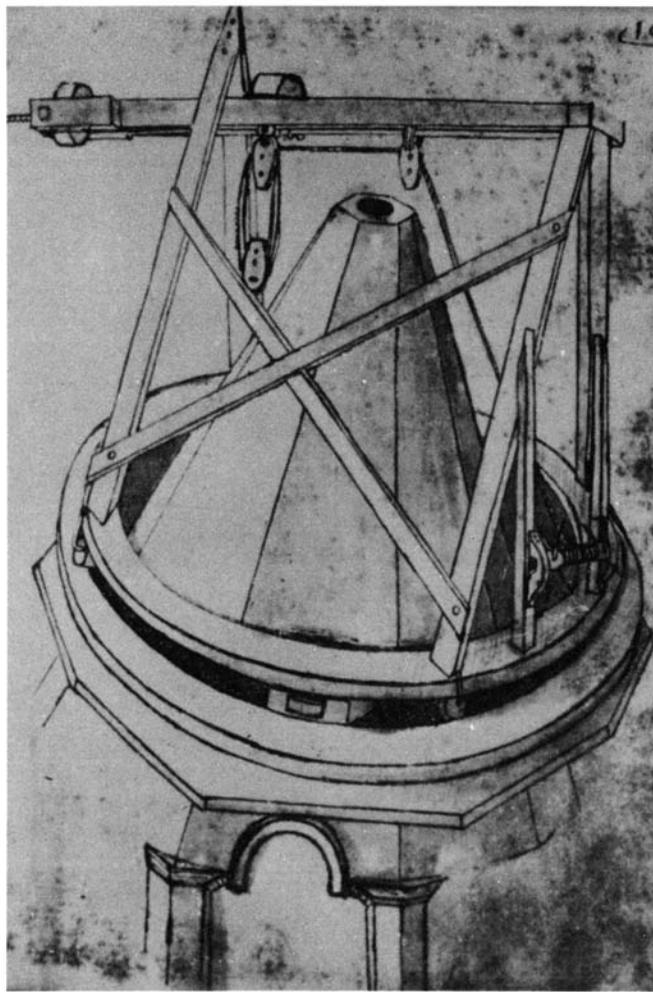


Figure 1

apparaissent ces cinq multiplications de force, est surtout connu par une traduction arabe du IX^e siècle⁴. Les systèmes de Héron étaient sans doute employés si couramment au Moyen Âge qu'ils survécurent sans dessins ni modèles. L'ingénieur romain Vitruve utilisa des engrenages dentés au I^{er} siècle avant J.-C. et décrivit des grues munies de cordes et de poulies. Des exemplaires de son traité d'architecture et de mécanique circulèrent sans doute durant le Moyen Âge, même si aucun dessin de machine n'accompagne les manuscrits de ce traité qui survécurent jusqu'au XV^e siècle. En tout cas, lorsque son ouvrage fut imprimé, les graveurs purent y ajouter immédiatement des dessins, car le traité décrivait des moulins et des machines bien connus et largement utilisés⁵.

Sur le plus ancien dessin qui nous est resté de la manivelle ordinaire, vers 830 après J.-C., dans le psautier d'Utrecht, on voit un homme affûter une épée sur une meule, tandis qu'un autre tourne la manivelle. Si l'on en juge par les dessins de machines qui ont survécu, l'adoption de la manivelle se fit lentement, et son utilisation courante ne date que du XV^e siècle⁶. Mais une fois répandue, elle trouva des centaines d'utilisations avant la fin du siècle. L'engrenage à vis sans fin fut décrit par Héron dans son traité du I^{er} siècle, mais l'idée resta en sommeil jusqu'à la Renaissance, pour réapparaître dans un certain nombre de carnets d'ingénieurs que Gustina Scaglia a étudiés et mis en corrélation. Scaglia note la répétition dans ces carnets d'un nombre limité de

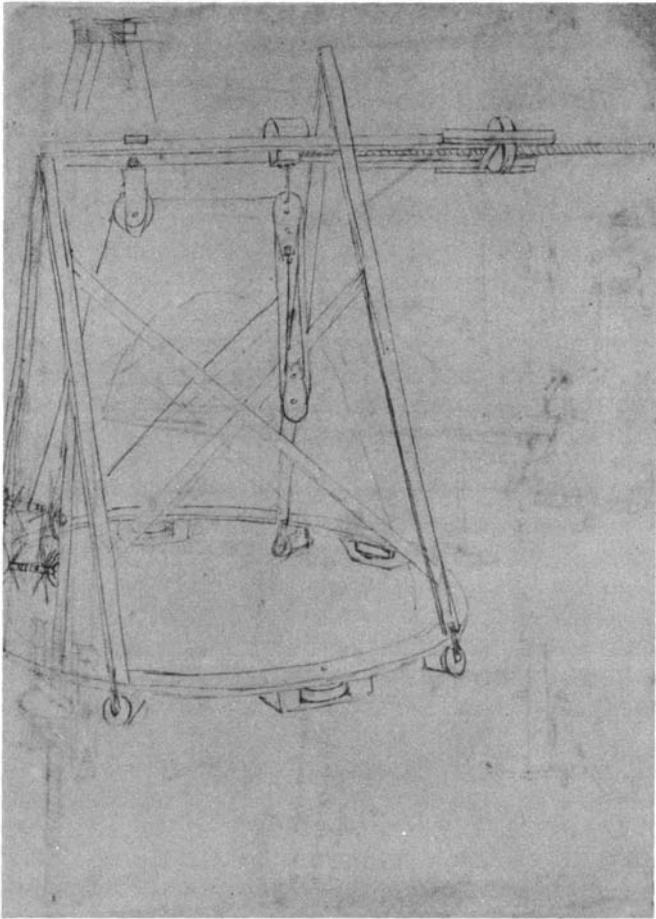


Figure 2

types de machines servant à soulever et à déplacer les matériaux lourds utilisés dans la construction de monuments. Ces machines, qui reviennent selon diverses configurations, comprennent des vis, des engrenages, des crémaillères, des vis sans fin, des treuils, des poulies et des cordes, et parfois des roulements à billes⁷.

De nos jours, les carnets de la Renaissance les plus célèbres sont ceux de Léonard de Vinci. Grâce à d'innombrables ouvrages spécialisés et populaires, ses croquis séduisants avec leurs notes explicatives écrites en miroir donnent aujourd'hui l'impression qu'on peut faire remonter toute la technologie moderne à Vinci. On souligne rarement qu'un grand nombre des idées contenues dans ses croquis n'étaient pas les siennes. Certes Vinci fut le premier à étudier de façon systématique la nature d'éléments séparés tels que les engrenages, ressorts, chaînes et cames, mais les pièces qu'il choisit pour ses études n'étaient pas nouvelles⁸. Les recherches assidues de Scaglia, Reti, Hall, Prager, Gille et d'autres n'ont pas seulement attiré l'attention sur les carnets des premiers ingénieurs, elles ont aussi détruit le mythe du Léonard de Vinci omniscient en faisant remonter l'origine de ses dessins à des carnets plus anciens⁹.

Les systèmes de levage ne furent que l'une des nombreuses préoccupations des ingénieurs de la Renaissance. Les machines militaires ont toujours mobilisé les efforts des ingénieurs et autres techniciens. Héron d'Alexandrie conçut des machines de jet et les inclut dans son traité de mécanique au chapitre intitulé

«Engins de guerre¹⁰»; Archimède et Vitruve inventèrent eux aussi des machines de guerre. Si l'on en juge par les carnets du XV^e siècle, les ingénieurs passaient beaucoup de temps à réfléchir à des systèmes plus efficaces pour massacrer leurs congénères. Parmi les autres sujets qui les absorbaient, il y avait la montée de l'eau destinée aux fontaines et la conception de moulins à grain, scieries et autres équipements industriels utilisant la force hydraulique¹¹.

On s'aperçoit donc qu'avant même la publication du premier livre imprimé de technologie mécanique — le traité militaire de Roberto Valturio daté de 1472 — un stock impressionnant de connaissances mécaniques, en grande partie non verbales, s'était accumulé dans les carnets des ingénieurs. Ces connaissances pouvaient traverser les pays et les âges, car elles étaient graphiques et ne requéraient qu'un minimum d'explications. Pourtant, ce n'étaient pas des connaissances simples et superficielles; elles s'exprimaient par des dessins parce que aucune description verbale ne permet d'expliquer correctement les configurations et les contours précis qui peuvent être saisis par une plume et un papier.

LE POUVOIR DE L'IMPRESSION.

Les livres imprimés illustrés de gravures sur bois ou sur cuivre augmentèrent considérablement le nombre d'exemplaires qu'on pouvait tirer des dessins techniques. Dans le premier demi-siècle de l'imprimerie — c'est-à-dire avant 1500 — seuls quelques ouvrages techniques furent imprimés, mais les possibilités de ce nouveau média pour la diffusion des idées se révèlent clairement lorsqu'on sait que durant ces cinquante années quelque 40 000 éditions de livres de toutes sortes furent publiées. A raison de 250 exemplaires par édition en moyenne, cela donne dix millions de livres imprimés en 1500¹². Et ce n'était que le début.

Les livres imprimés ne permirent pas seulement de diffuser les dessins techniques en grand nombre; le procédé d'imprimerie lui-même apporta l'uniformité, caractéristique indispensable pour rendre les copies de dessins exploitables. Il y a une trentaine d'années, William N. Ivins, conservateur des imprimés au Metropolitan Museum of Art, soulignait que les reproductions imprimées de dessins furent particulièrement importantes parce qu'elles multiplièrent les «énoncés graphiques exactement reproductibles» des idées articulées par les dessins. On peut copier et recopier un texte à la main avec une assez grande exactitude, mais les copies manuscrites de dessins techniques sont inévitablement et rapidement altérées, surtout si le copiste ne connaît pas les machines ou les systèmes qu'il transcrit¹³. Ivins situait les énoncés graphiques exactement reproductibles « parmi les instruments les plus importants et les plus puissants de la vie et de la pensée modernes ». Il estima de façon tout à fait raisonnable que les dessins imprimés furent essentiels au développement et à la diffusion de la science et de la technologie occidentales¹⁴.

Vers la fin du XVI^e siècle, on publia un certain nombre de livres avec de grandes gravures représentant

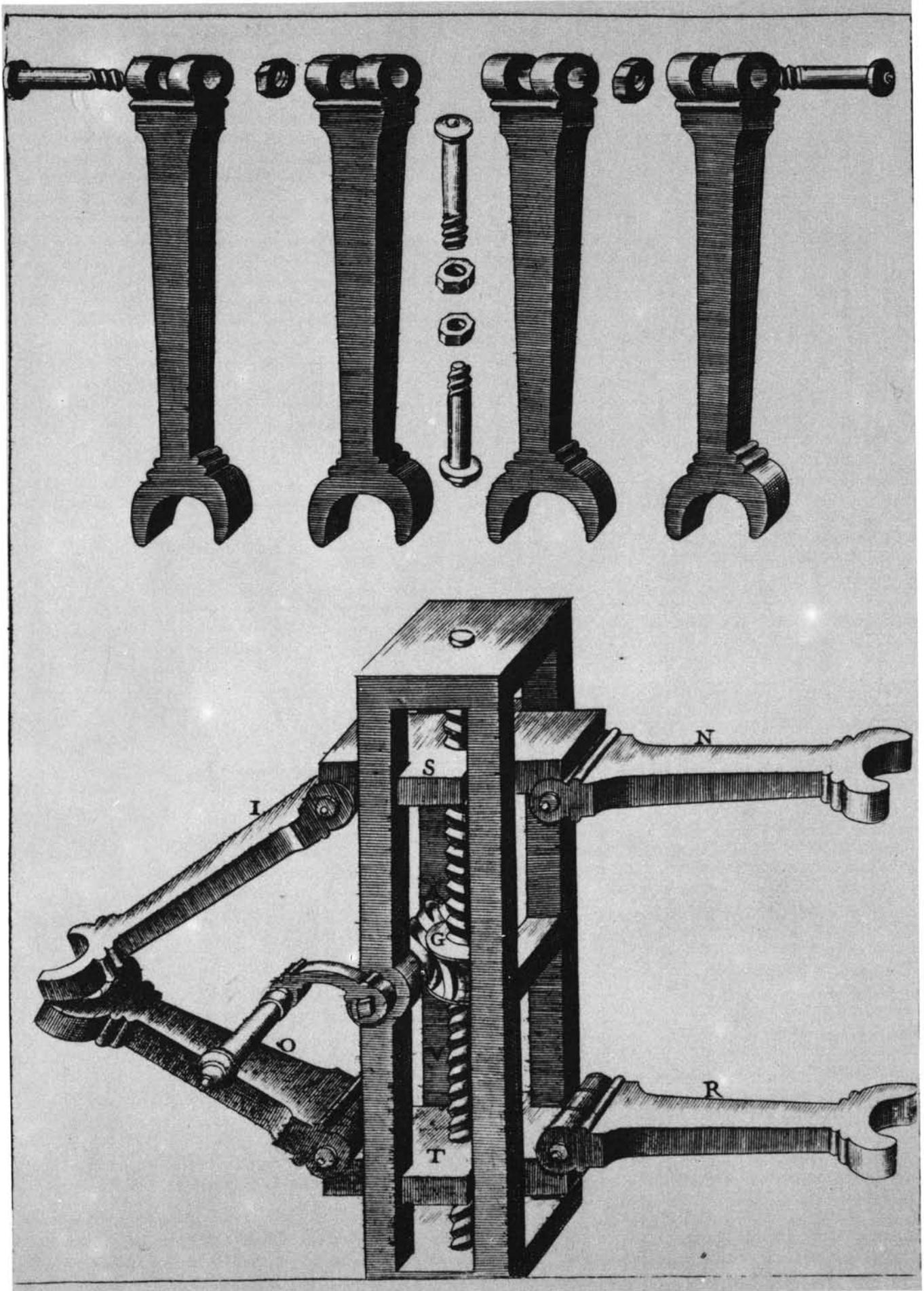


Figure 5a

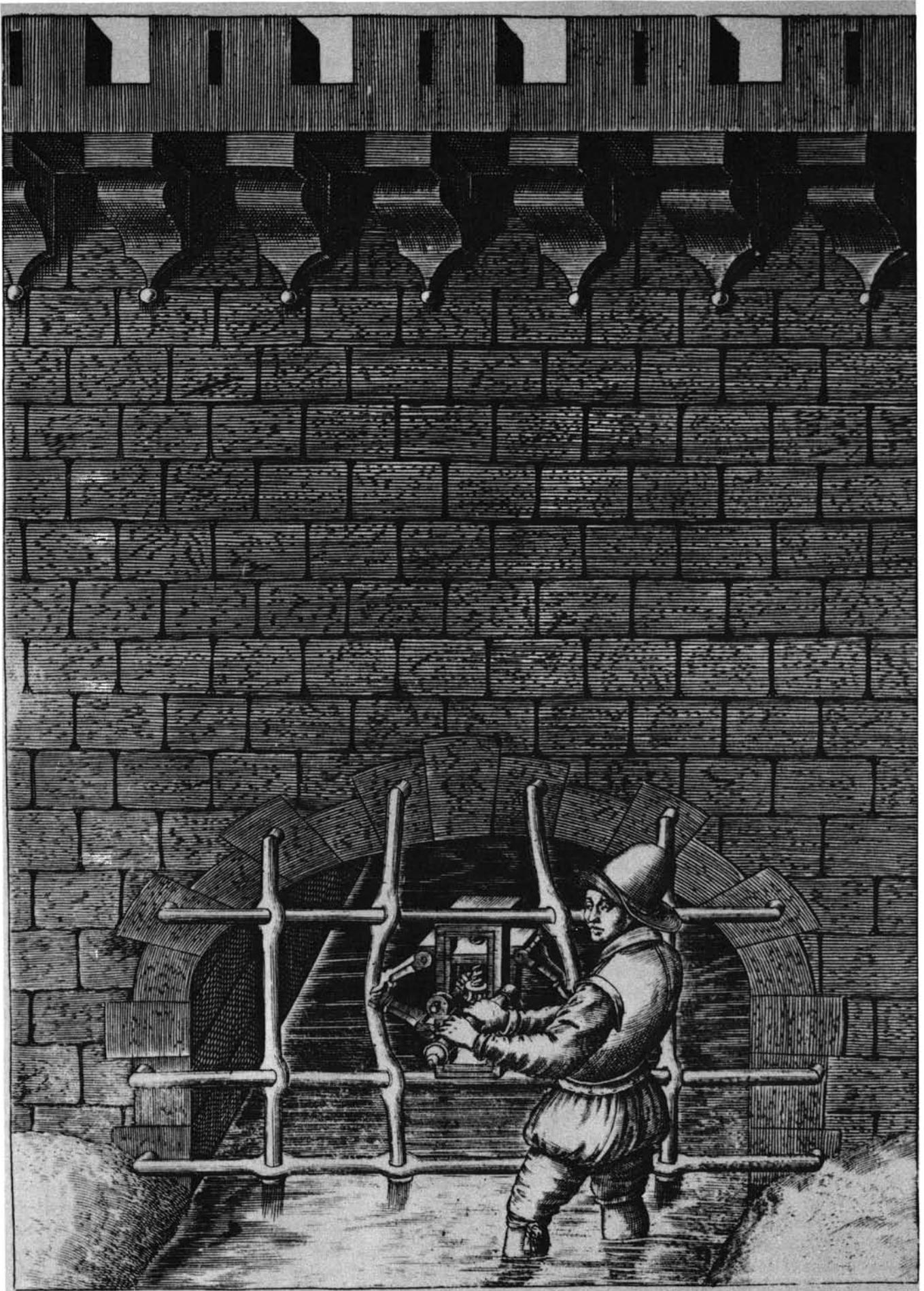


Figure 5b

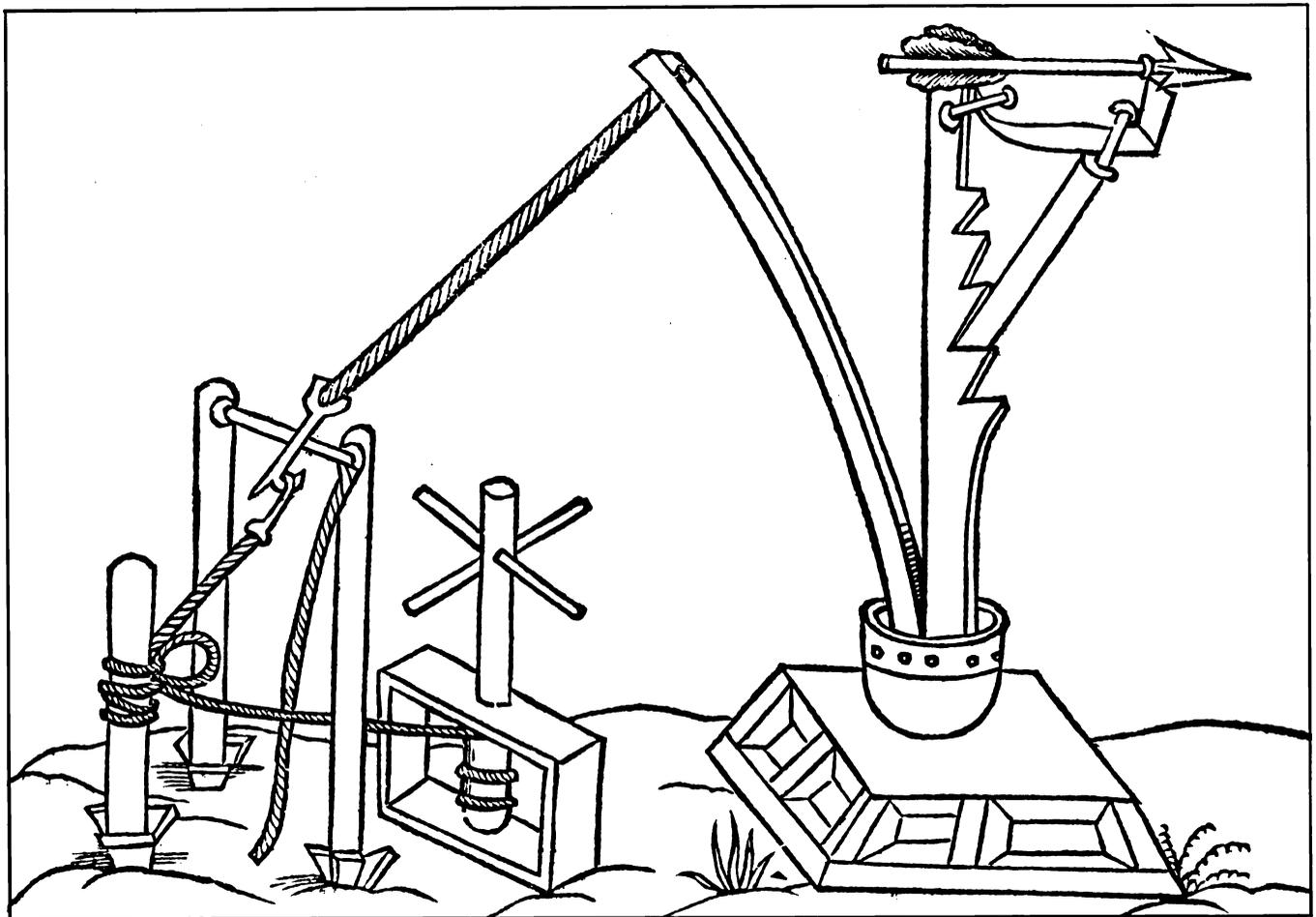


Figure 3

toutes sortes de machines ingénieuses et complexes. Ces livres furent appelés « théâtres de machines », un genre qui resta florissant jusqu'au XVIII^e siècle. Parmi les premiers, il y eut le livre de Jacques Besson qui comportait 60 planches et fut réédité onze fois en cinquante ans. D'autres écrits de Ramelli, Zonca, Branca et Böckler exposaient des centaines de machines avec suffisamment de précision pour que des artisans habiles puissent les construire en grandeur nature. Si les « théâtres de machines » renfermaient toutes sortes de machines, leurs sujets se rassemblaient autour des trois mêmes sortes de systèmes que ceux des carnets plus anciens : les pompes, les moulins et les machines militaires¹⁵.

Dans les années 1720, une impressionnante collection de livres de machines fut éditée par Jacob Leupold, un fabricant d'instruments mathématiques de Leipzig. Cet ensemble qui compta onze volumes — huit de Leupold et trois de ses successeurs — rassembla des idées contenues dans les dizaines de livres parus depuis l'époque de Besson (1569)¹⁶. De plus, Leupold ne se contenta pas de copier les travaux de ses prédécesseurs, il les critiqua en décrivant et en illustrant souvent les améliorations qui lui venaient à l'esprit lorsqu'il étudiait les diverses machines. Dans ses livres, Leupold classait, illustrait et expliquait les éléments de base des machines, comme Vinci l'avait fait dans ses carnets manuscrits. Au cours de la génération précédente, quelques auteurs avaient commencé à exposer de nombreuses variations des multiplicateurs de force de Héron

dans des traités de mécanique didactiques destinés aux lecteurs capables d'apprendre directement dans les livres sans l'assistance d'un maître instruit¹⁷.

Les pièces étudiées par Leupold dépassaient le stade des cinq « machines simples¹⁸ » et comprenaient des engrenages, des cames, des soupapes, des dispositifs pour transformer le mouvement rotatif en mouvement alternatif et vice versa, ainsi que d'autres éléments¹⁹. Les ouvrages de Leupold étaient destinés à des lecteurs ayant une instruction limitée mais décidés à apprendre ce que les livres pouvaient enseigner. Ils étaient notamment conçus pour apprendre aux artisans comment construire les systèmes et machines illustrés en leur donnant des informations graphiques précises, des conseils utiles et des principes généraux. Une remarque traduit bien le renom et l'utilité des théâtres de machines de Leupold, celle que fit John Robison à propos de son ami et confrère James Watt : « Il [Watt] apprit l'allemand pour étudier le *Theatrum Machinarum* de Leupold — et moi aussi pour savoir à quoi il s'intéressait²⁰. »

Les rayons du XVIII^e siècle se remplirent de plus en plus de livres contenant toutes sortes de dessins techniques. Le *Lexicon Technicum* (1710), une encyclopédie technique de deux volumes éditée en anglais par John Harris, fut suivi de plusieurs éditions d'un autre ouvrage anglais, la *Cyclopaedia* de Chambers, puis par la grande *Encyclopédie* de Diderot et d'Alembert, par diverses autres encyclopédies qui pirataient plus ou

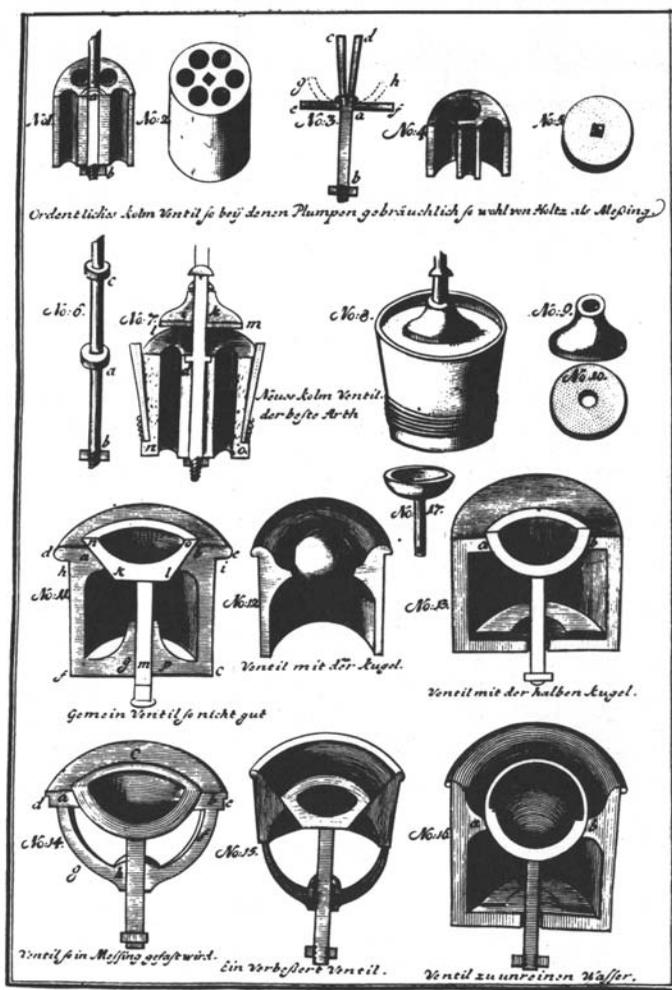


Figure 6

moins les précédentes et par la collection richement illustrée des *Descriptions des arts et métiers* en 45 volumes publiée entre 1761 et 1788 par l'Académie des sciences française. Cette collection fut traduite en allemand dès le début de sa parution et une revue anglaise en publia des extraits²¹.

LES OUTILS D'ANALYSE.

Au XVIII^e siècle, on commença à enseigner en Angleterre les fondements de la mécanique, de l'hydraulique et de l'aérostatique à des auditoires payants. Ce mouvement fut accompagné par la publication d'un certain nombre de livres où les cours étaient retranscrits et illustrés, ce qui permettait de les étudier à loisir. Plusieurs centaines de personnes assistaient à cet enseignement de douze cours ou plus dans les villes industrielles et à Londres ; les cours étaient animés et illustrés par des démonstrations des principes physiques réalisées grâce à d'importantes réserves de modèles ingénieusement construits²². Ces modèles furent très vite adoptés par les professeurs de philosophie naturelle des collèges et gardèrent leur utilité jusqu'au milieu du XX^e siècle²³.

A la fin du XVIII^e siècle, on trouvait des dessins de machines imprimés à des millions d'exemplaires²⁴. Les éditeurs entreprenants copiaient des centaines de dessins dans les livres plus anciens, mais des milliers de variations originales vinrent se joindre aux exemples traditionnels, créant un réservoir très vaste d'informa-

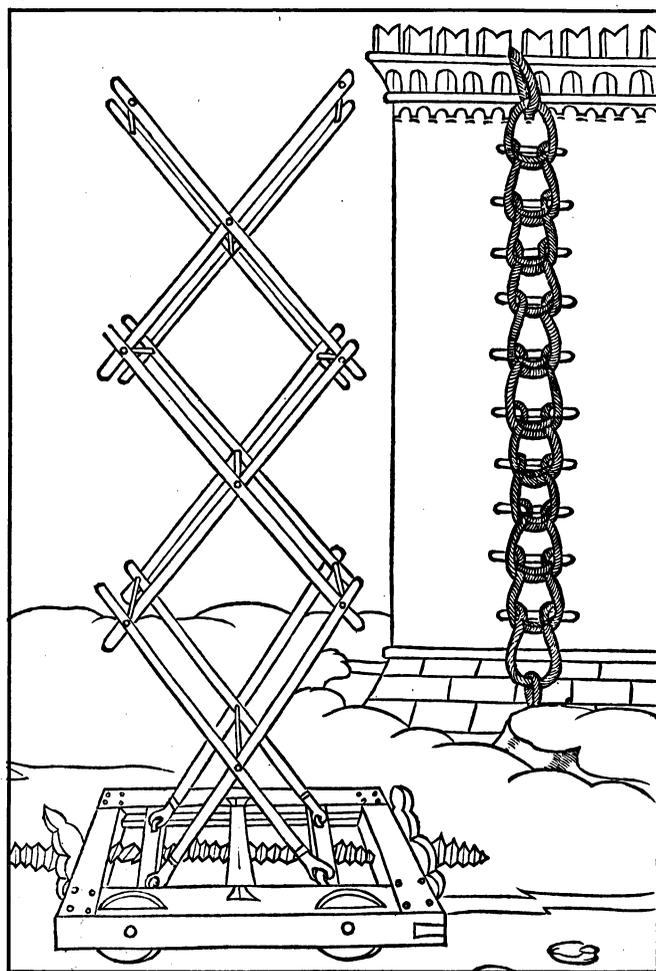


Figure 4

tions mécaniques spécifiques. Bien que les révolutions industrielles des XVIII^e et XIX^e siècles ne fussent pas uniquement dues aux exemplaires mobiles de dessins techniques, il est impossible d'imaginer qu'elles aient pu se produire sans ces dessins. Le XIX^e siècle vit une nouvelle progression géométrique : le nombre des dessins imprimés doubla sans doute tous les dix ans jusqu'à être multiplié par mille, passant des millions aux milliards. L'invention d'un papier meilleur marché en pâte de bois fabriqué en bandes continues sur des machines toujours plus rapides accéléra la diffusion des dessins, tandis que le prix de revient des livres et des magazines chutait spectaculairement.

L'ORGANISATION DES CONNAISSANCES NON VERBALES.

Juste après 1800, l'université commença à s'intéresser sérieusement à la classification des machines, un peu sur le mode de la classification biologique de Linné. Mais jusqu'en 1875, les différents systèmes de classification existants n'eurent que peu de pouvoir analytique et servirent plutôt comme des principes heuristiques qui favorisaient la recherche de toutes les combinaisons possibles de pièces capables de produire le résultat souhaité²⁵.

La première classification, élaborée à l'École polytechnique de Paris, fit partie d'un cours sur les éléments

Cours de Géométrie Descriptive, Par. M. Hachette
Tableau des Machines Élémentaires.

		A B C D E					
Le Mouvement Rectiligne Continu ou	Continu	1.					
	Alternatif	2.	[Empty]				
	Continu	3.					
		3 ^a					
Circulaire	3 ^b						
	4.					[Empty]	
Les Machines Élémentaires Ont Leur Objet de Changer	Rectiligne Alternatif	5.					
		5 ^a					
		5 ^b					
		5 ^c					
		5 ^d			[Empty]	[Empty]	[Empty]
		6.					
Continu	6 ^a						
	6 ^b		[Empty]	[Empty]	[Empty]	[Empty]	
Circulaire	7.						
	7 ^a						
Alternatif	7 ^b						
	7 ^c			[Empty]	[Empty]	[Empty]	
Le Mouvement Rectiligne Alternatif ou	Circulaire Alternatif	8.	[Empty]				
		9.					
Le Mouvement Circulaire Alternatif ou	Circulaire Alternatif	9 ^a					
		10.					

Figure 8

des machines esquissé par Gaspard Monge. Monge considérait que l'une des fonctions premières des mécanismes était de transformer le mouvement rotatif en mouvement rectilinéaire et vice versa. Les mouvements rotatif ou linéaire pouvaient être soit continus, soit alternatifs : cela donnait quatre mouvements fondamentaux. Comme chaque mouvement fondamental pouvait être transformé en n'importe lequel des trois autres, le nombre des combinaisons possibles était de six ; et comme tout mouvement fondamental pouvait être transféré sans être transformé — par exemple, un engrenage rotatif continu transfère un mouvement rotatif continu à un engrenage adapté — cela donnait quatre combinaisons supplémentaires. A partir de là, Jean Hachette, chargé de cours à l'École polytechnique, prépara un tableau détaillé indiquant plusieurs façons de réaliser chaque transformation ou transfert de mouvement. Ce tableau fut important moins pour le système de classification qu'il mettait en place que pour les fascinants dessins de combinaisons mécaniques contenus dans les petites cases. Le tableau à petites cases fut adopté par les imitateurs d'Hachette et, pendant plus d'un siècle, de nombreux auteurs publièrent ce genre de tableaux²⁶.

J.A. Borgnis publia un système différent de celui d'Hachette dans son *Traité complet de mécanique* richement illustré. Borgnis distinguait six « organes » dans une machine. Le premier est le « récepteur » qui reçoit l'élan initial du moteur ayant donné naissance à la machine. Le récepteur est suivi d'un « communicateur » qui transfère le mouvement, d'un « modificateur » qui change la vitesse, d'un « support » pour les organes en mouvement, d'un « régulateur » qui corrige les irrégularités et d'un « opérateur » qui produit l'effet final²⁷.

Aucun des systèmes élaborés par Hachette et Borgnis ne fut généralement adopté, mais leurs dessins furent sans cesse recopiés au cours du siècle. La revue hebdomadaire *Scientific American* publiait à ses débuts un ou deux « mouvements mécaniques » chaque semaine avec une ou deux cases tirées des tableaux d'Hachette ou de Borgnis, suivis d'une brève description²⁸. *American Artisan* qui était, comme *Scientific American*, une revue hebdomadaire éditée par un avocat spécialisé dans les brevets, publia pendant des années de nombreux « mouvements mécaniques ». A partir de cette série, Henry T. Brown, rédacteur en chef d'*Artisan*, rédigea un petit livre intitulé *507 Mechanical Movements* publié en 1868 et réédité jusqu'en 1896. En 1874, lorsqu'elle rédigea son *Dictionary of Engineering*, la compagnie londonienne E. and F.N. Spon emprunta 379 des 507 dessins que contenait le livre de Henry Brown, en reprenant mot pour mot ses descriptions²⁹. Les dessins continuèrent d'être piratés jusqu'en 1952 au moins, date à laquelle fut publié aux États-Unis un *Engineers' Thesaurus* contenant encore des dizaines de petits dessins de machines dont l'origine remontait à Hachette et à ses prédécesseurs³⁰.

Dans les années 1860, Franz Reuleaux se rendit compte que tout système de classification était à la fois arbitraire et sans grande utilité pour comprendre les principes généraux de la mécanique. Il développa une approche analytique du mouvement des machines, publiée en 1875, qui fut universellement adoptée sous le

nom de son titre, *Cinématique*, et qui guide encore aujourd'hui notre façon de penser la cinématique des machines³¹.

LE CHARME DES MODÈLES.

Les modèles sont utilisés depuis presque aussi longtemps que les dessins et à peu près dans le même but. Le modèle exige moins d'interprétation de la part de l'observateur, car le dessin représente en deux dimensions un objet qui en a trois, alors que le modèle ne laisse aucun doute sur les rapports dans l'espace de ses différentes pièces. Si le modèle bouge — c'est-à-dire s'il fonctionne — l'observateur n'a pas besoin d'imaginer le changement de configuration des pièces lorsque la machine est en marche, exercice qui peut mettre à rude épreuve les capacités de ceux qui ne connaissent pas la mécanique. En outre, le dessin exige que le « lecteur » comprenne en partie les conventions utilisées dans cet art, alors qu'avec le modèle les connaissances formelles nécessaires pour saisir ce que l'inventeur a voulu faire sont réduites au minimum. Je ne suis pas en mesure de faire un exposé complet des modèles depuis la Renaissance, mais j'évoquerai quelques événements disparates qui témoignent de leur utilisation.

En 1418, une vingtaine de maquettes au moins furent proposées par des architectes et des constructeurs candidats à la réalisation d'un dôme au sommet de la cathédrale de Florence³². En 1585, lorsque le pape voulut déplacer l'obélisque du Vatican pour le mettre en meilleure position place Saint-Pierre où il se trouve encore aujourd'hui, plusieurs centaines de propositions furent soumises à une commission nommée par le souverain pontife. Certaines étaient faites de textes, d'autres comprenaient des dessins et quelques-unes s'appuyaient sur des modèles réduits. Domenico Fontana, qui gagna le concours, proposa de soulever l'obélisque avec des appareils suspendus à l'extérieur d'une tour en bois légèrement plus haute que celui-ci. La maquette de son obélisque était en plomb et mesurait environ soixante centimètres ; la tour était en proportion. Il montra comment il ferait descendre l'énorme monolithe sur un chariot, le tirerait grâce à des rouleaux sur une chaussée en pierre spéciale et l'érigerait sur son nouveau lieu de destination³³. Les membres de la commission n'eurent qu'à adapter la démonstration à la taille réelle ; ils ne furent pas obligés de visualiser à partir seulement de mots et de dessins les déplacements successifs soigneusement mis au point par Fontana.

En 1610, on pouvait voir dans les houillères de Wollaton (Nottinghamshire) des « modèles de toutes les machines hydrauliques ayant un intérêt en Italie, en Allemagne ou aux Pays-Bas³⁴ ». Lorsque les mines de charbon s'enfoncèrent plus profondément dans la terre, il devint indispensable de recourir à ces « machines hydrauliques » pour pomper l'eau des niveaux inférieurs. En 1683, un inventeur français fit une exposition publique de modèles rue de la Harpe, en plein centre du Quartier latin. Dans son catalogue, Jean-Baptiste Picot prévoyait d'ajouter tous les quinze jours

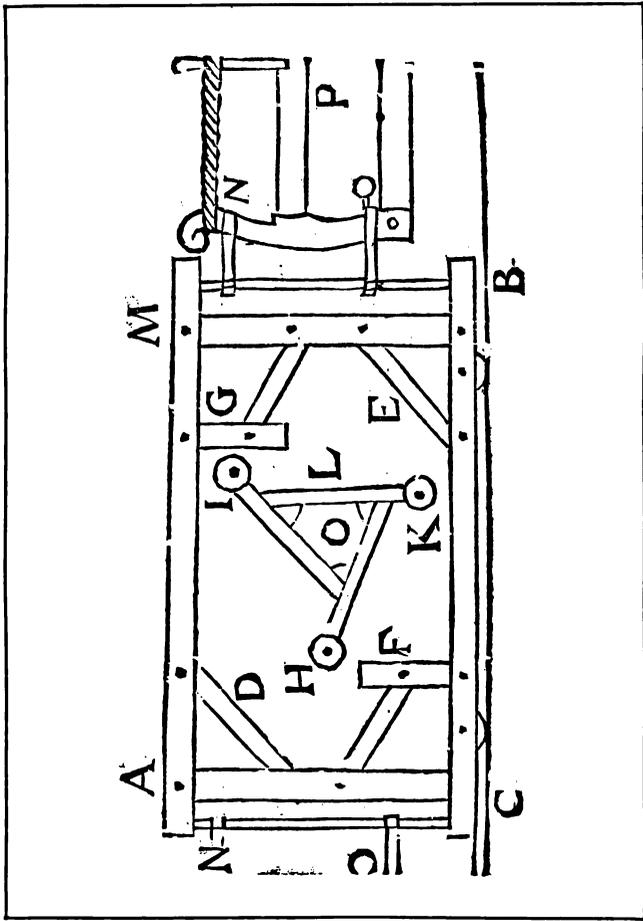


Figure Aa

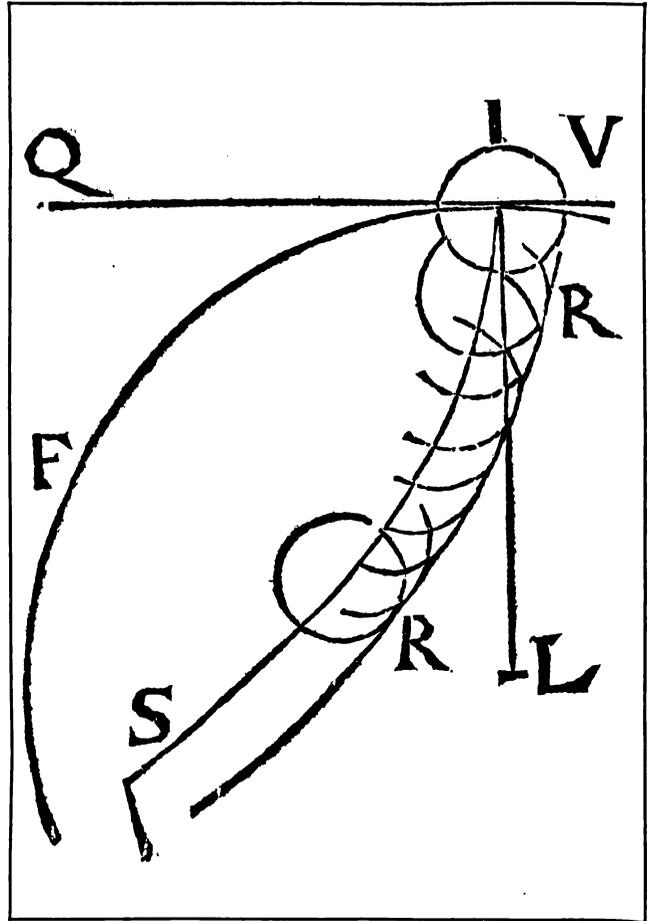


Figure Ab

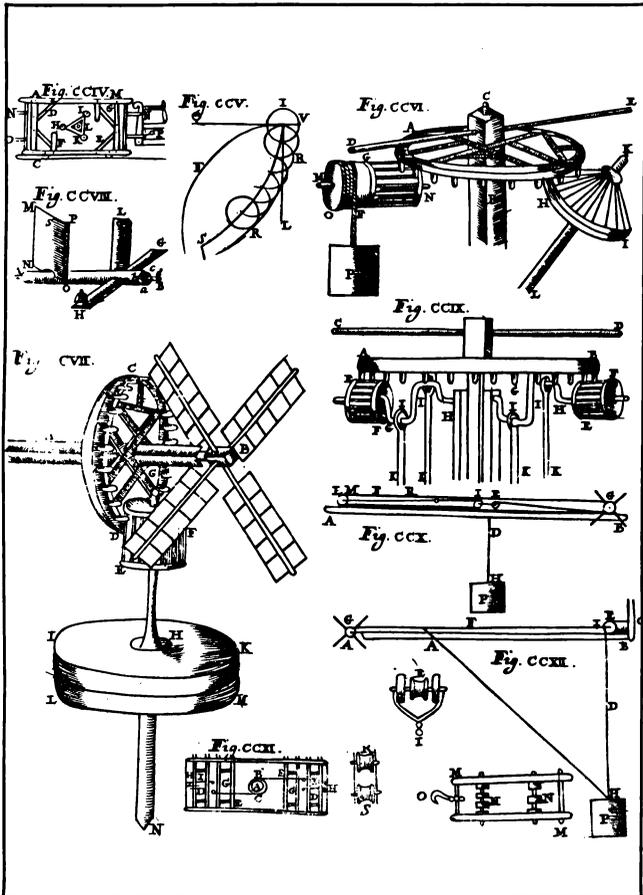


Figure C

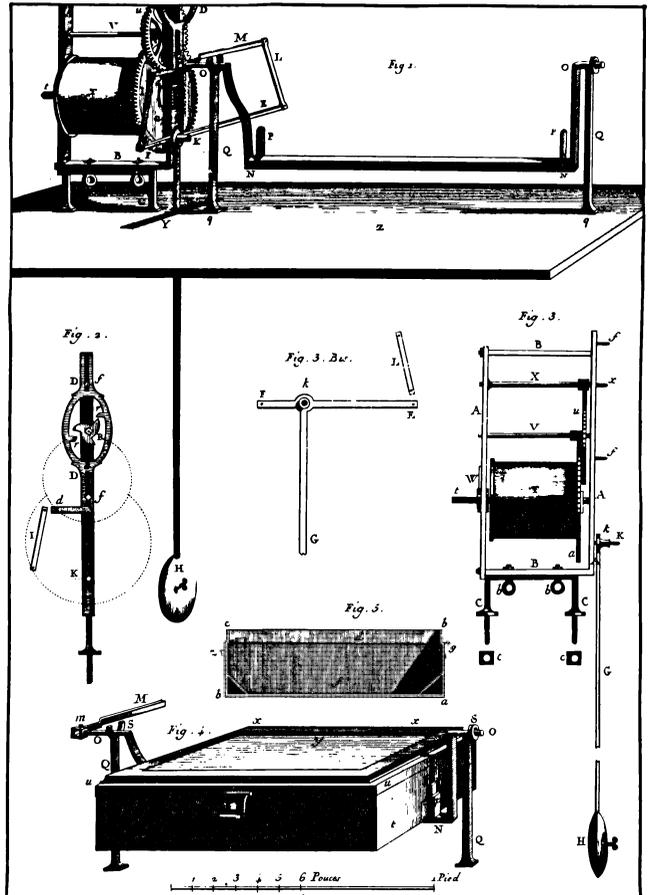


Figure D

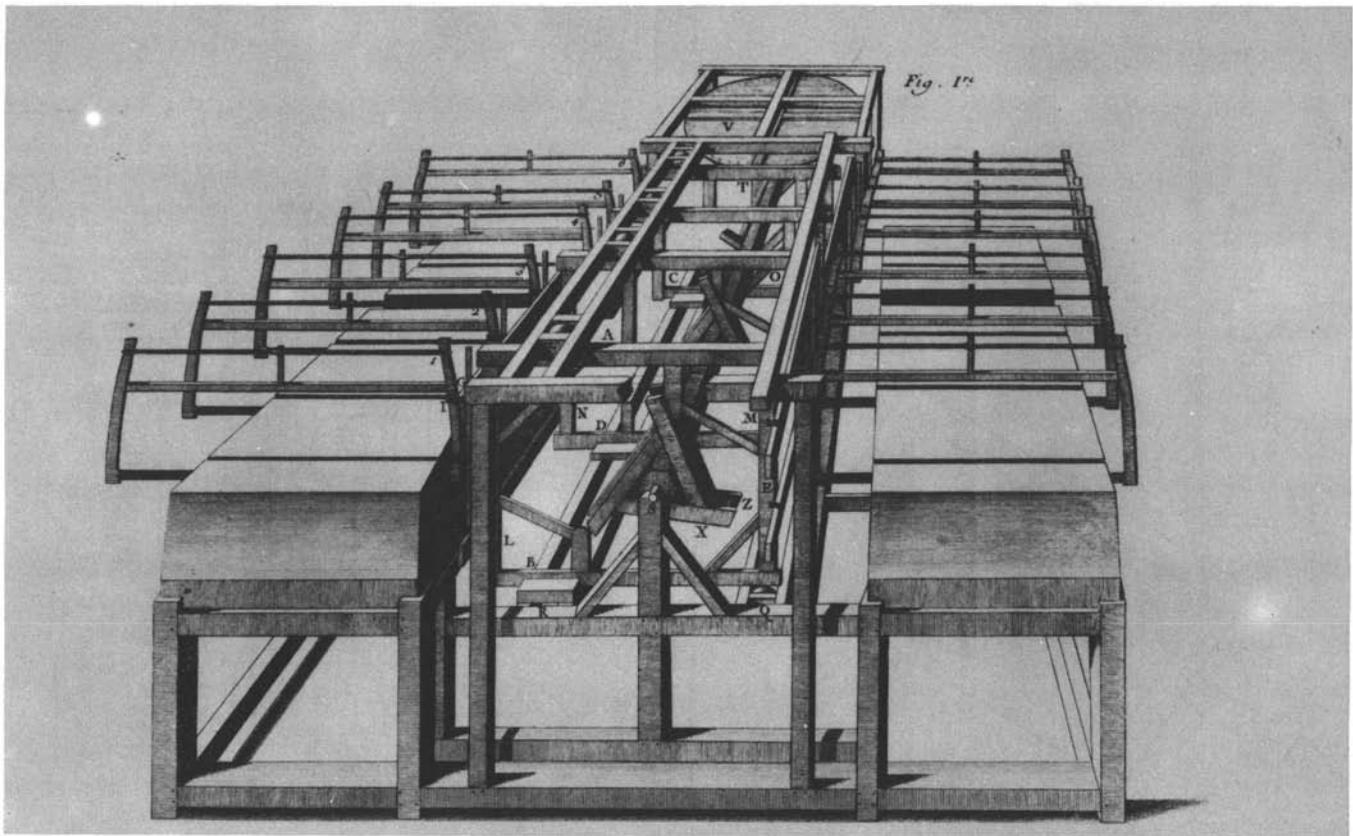


Figure B

ESSAI ICONOGRAPHIQUE LA PERSISTANCE DES IDÉES ET LEURS MODIFICATIONS

Les figures A et H montrent comment les idées, bonnes ou mauvaises, persistent et comment elles se modifient.

Figure A. Convertisseur de Philippe de La Hire servant à transformer le mouvement rotatif en mouvement rectilinéaire alternatif, 1695. Ce mécanisme fut conçu pour actionner des scies à pierres, comme le montrent le dessin et la figure B. L'élément ILKH, tournant dans le sens des aiguilles d'une montre (et non réversible), poussait alternativement le support de la scie vers la droite et vers la gauche. Outre les chocs produits par le contact avec les bras I, K et H, les scies atteignaient leur vitesse maximum au début du mouvement, ce qui imposait un effort inutile aux membres de la machine. Pour faciliter l'opération, La Hire proposa de remplacer les blocs F et G par des surfaces courbes de manière à former une épicycloïde (dessin de droite). La Hire, *Traité de mécanique* (Paris, 1695).

Figure B. Machine utilisant le convertisseur de la figure A. La force motrice actionnant les scies à pierres était fournie par un cheval qui faisait tourner un « moteur » à engrenage situé à l'extrémité arrière de la machine. Aucun nom d'inventeur n'était mentionné. *Académie des sciences, Machines et inventions*, vol. 1 (Paris, 1735).

Figure C. L'invention et le dessin de l'épicycloïde de La Hire furent recopiés dans le livre de Mandey et Moxon, *Machanick-Powers* (Londres, 1696), avec une traduction anglaise du texte.

Figure D. Agitateur pour gravure à l'eau-forte (vers 1772). Un pendule fait osciller la boîte (fig. 4) sur son support et la secoue chaque fois que le mécanisme de La Hire, ici sous forme d'échappement, s'immobilise. Diderot, *Encyclopédie* (1751-1780), vol. de planches n° 5, gravure pl. VI.

Figure E. Détail des tableaux 5aC d'Hachette et H7 de Lanz et Bétancourt, in op. cit. note 26.

Figure F. Page extraite des 507 *Mechanical Movements* de Henry Broun (1868). Le mécanisme de La Hire figure sous le n° 128, avec les explications suivantes : « Le mouvement rotatif continu de l'arbre muni des trois bras produit un mouvement rectilinéaire alternatif du cadre rectangulaire. L'arbre doit tourner dans le sens indiqué par la flèche pour que les pièces se trouvent dans la position représentée. »

Figure G. Mécanismes inspirés du n° 128 de la figure précédente. Les n°s 306 et 307 sont des échappements, modifiés de nouveau aux n°s 310 et 311. Le n° 428 est un « moteur rotatif au caoutchouc » à déplacement commandé. La vapeur, agissant entre la garniture de la pompe et le caoutchouc, faisait tourner les bras AAA, entraînant l'arbre B.

Figure H. Page extraite de l'*Engineers' Illustrated Thesaurus* (1952). Le mécanisme de La Hire est en F. En G se trouve une version modifiée appelée « échappement mécanique pour machines lourdes ». D'autres échappements empruntés au livre de Brown figurent aux pages 193 et 195 (non reproduites).

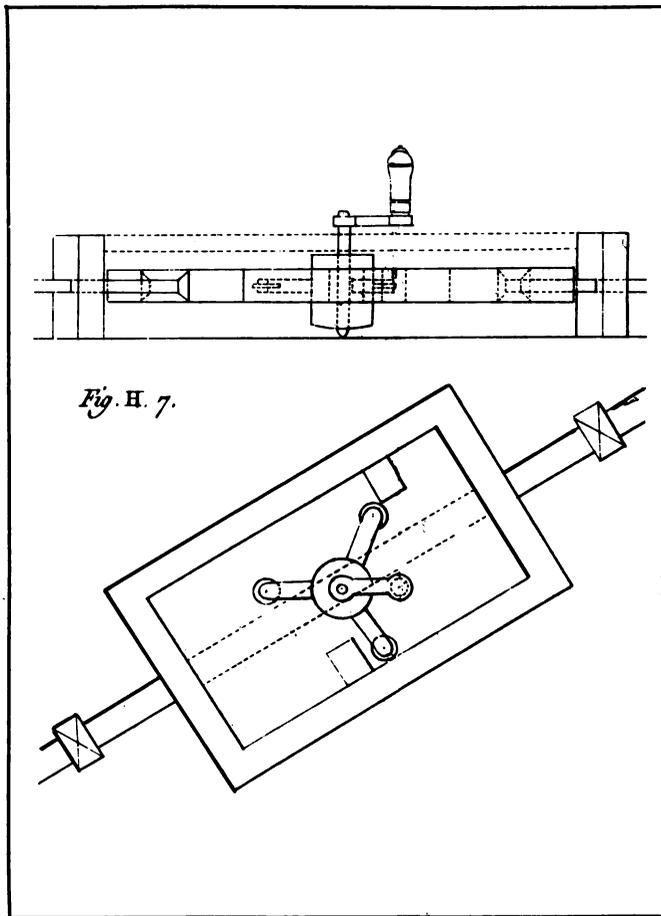


Figure E

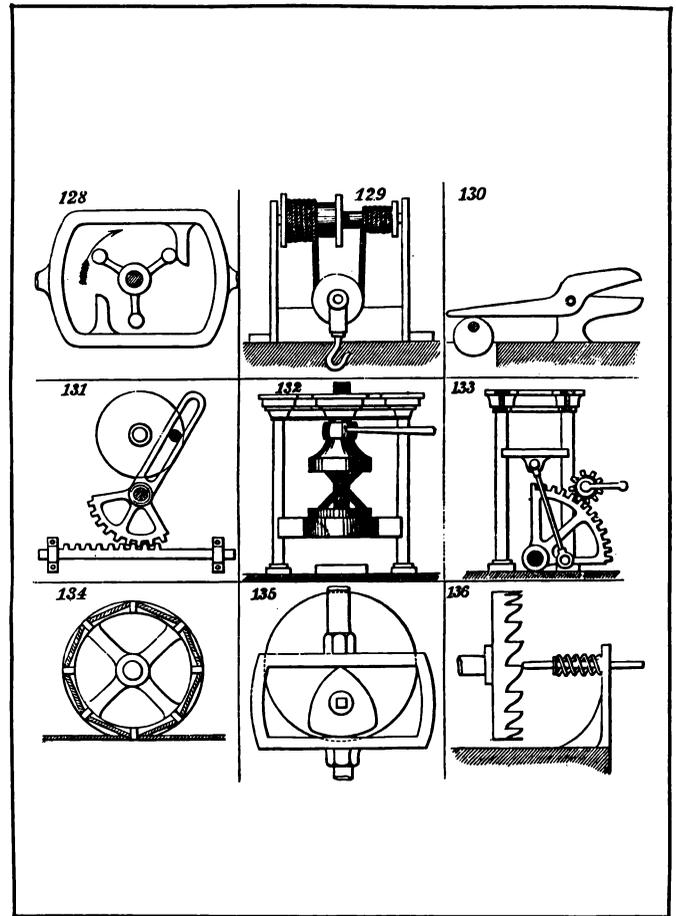


Figure F

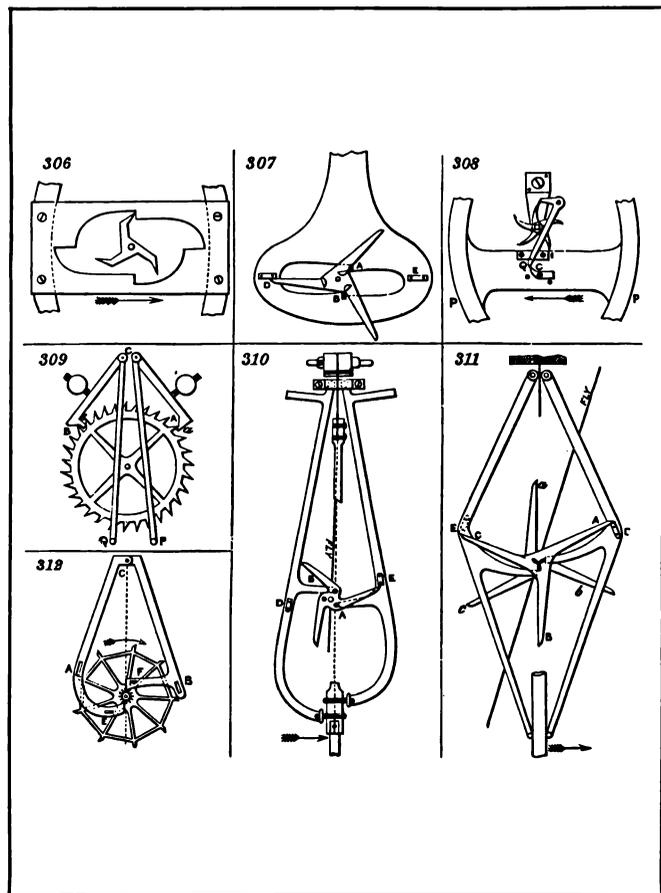


Figure Ga

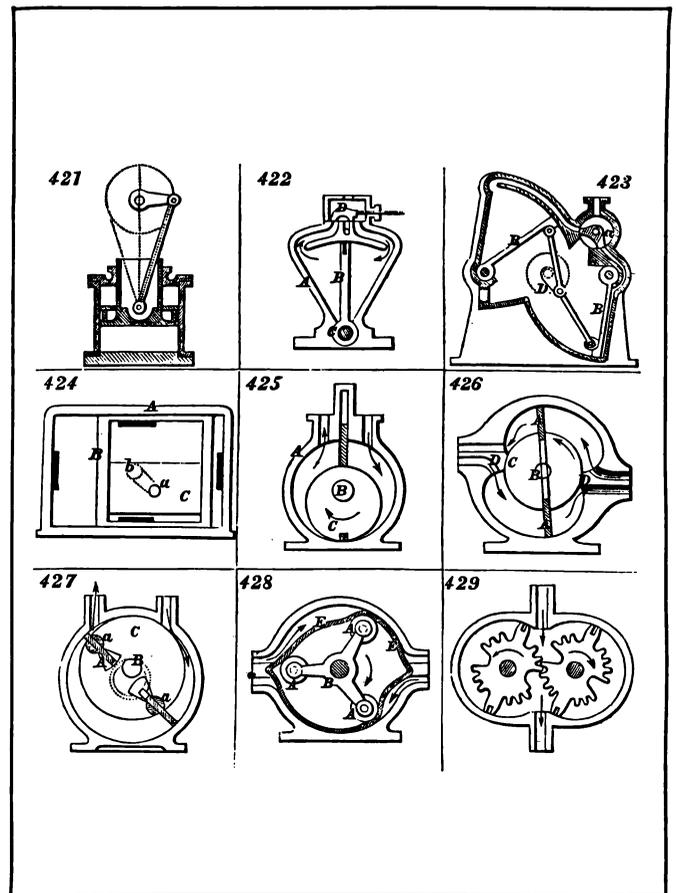


Figure Gb

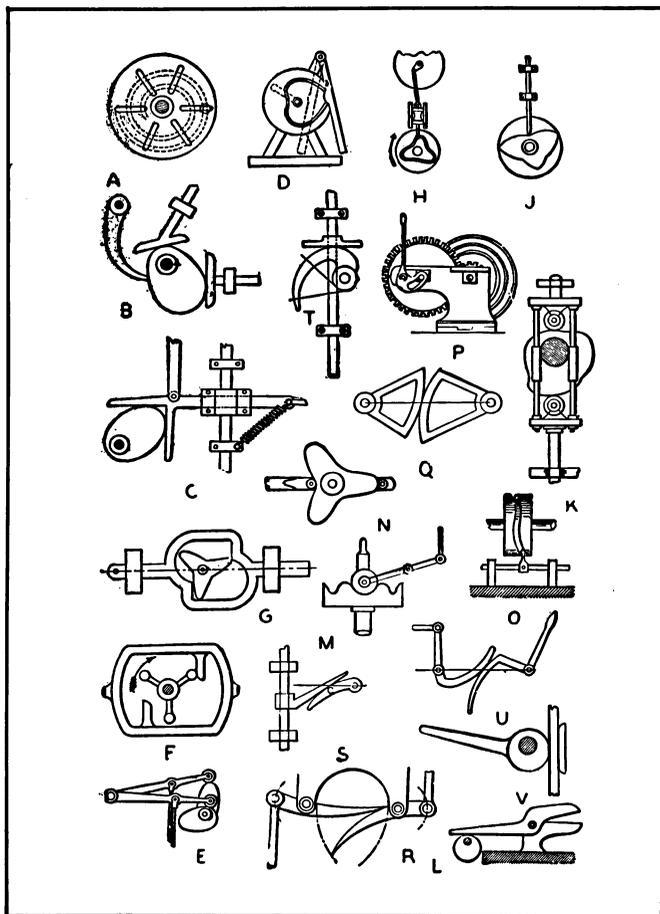


Figure H

quatre modèles à son exposition. Ces modèles étaient de grande dimension — deux mètres de haut — et il devait y avoir un démonstrateur pour les faire fonctionner. Plusieurs d'entre eux s'inspiraient de gravures tirées des livres de mécanique de Besson, Ramelli, Böckler et d'autres. Dans le catalogue, quatre inventions de Picot, dont une machine multiple à fabriquer des limes et une machine à monter l'eau, étaient illustrées et expliquées très en détail³⁵.

La création de sociétés scientifiques à la fin du XVII^e siècle favorisa et standardisa dans une certaine mesure la construction et l'exposition de toutes sortes de modèles de machines. Ainsi, peu après sa création en 1666, l'Académie des sciences de Paris engagea des artisans pour constituer un cabinet de modèles de «diverses machines les plus en usage». Ce cabinet était nécessaire, car l'«utilité visible et palpable de la mécanique» était telle que l'Académie devait «cultiver cette science avec un soin particulier³⁶». On encouragea les académiciens et autres gentilshommes à enregistrer leurs inventions dans les annales de l'Académie et à fournir un modèle de chaque invention pour le cabinet. Parmi ces modèles, il y avait des grues et autres appareils permettant de soulever des charges lourdes, des ponts flottants, des horloges, des moulins à grain, des scieries, une scie multiple pour les pierres, un chariot à voile, des dragues, une machine à tailler les plumes d'oie, des instruments mathématiques et un lanceur de grenades, ainsi qu'un ensemble hétéroclite et peu original de machines. Ces inventions furent ensuite publiées dans un ouvrage de sept tomes, illustré de plus de 500 planches³⁷.

À la Royal Society de Londres, il n'y avait aucune collection de cette sorte, mais la Royal Society of Arts créée à Londres en 1754 fit de grands efforts pour promouvoir les arts appliqués en décernant des prix chargés de récompenser des inventions originales conçues pour résoudre des problèmes précis comme ceux d'extraire l'eau et les gaz dangereux des mines, d'améliorer les outils agricoles, d'accroître l'efficacité du métier à bas et de fabriquer du papier avec d'autres matières que les chiffons de lin ou de coton. Les concurrents devaient présenter des modèles, ce qui aboutit à créer une collection complète. Le «magasin» où l'on entreposait ces modèles était parfois ouvert au public, mais jamais en permanence³⁸.

À Stockholm, la Chambre royale des modèles créée en 1756 fut pendant des années un haut lieu pour les visiteurs étrangers de marque. Dans une série de salles situées au dernier étage de l'ancien Palais royal était exposée une collection de 200 modèles de machines agricoles, minières et textiles, de ponts, de barrages et de cheminées conçues pour économiser le bois, que le capitaine Carl Knutberg du corps des Fortifications expliquait aux visiteurs. Cette collection devait former les jeunes gens qui avaient des ambitions en mécanique et inspirer aux inventeurs des améliorations utiles pour l'économie. En outre, les modèles devaient servir de témoins à la postérité, afin que les réalisations de l'époque viennent s'inscrire dans une évolution historique. Le cœur de la collection provenait du *Laboratorium mechanicum* de Christopher Polhem créé vers 1700 pour promouvoir l'étude des machines capables de

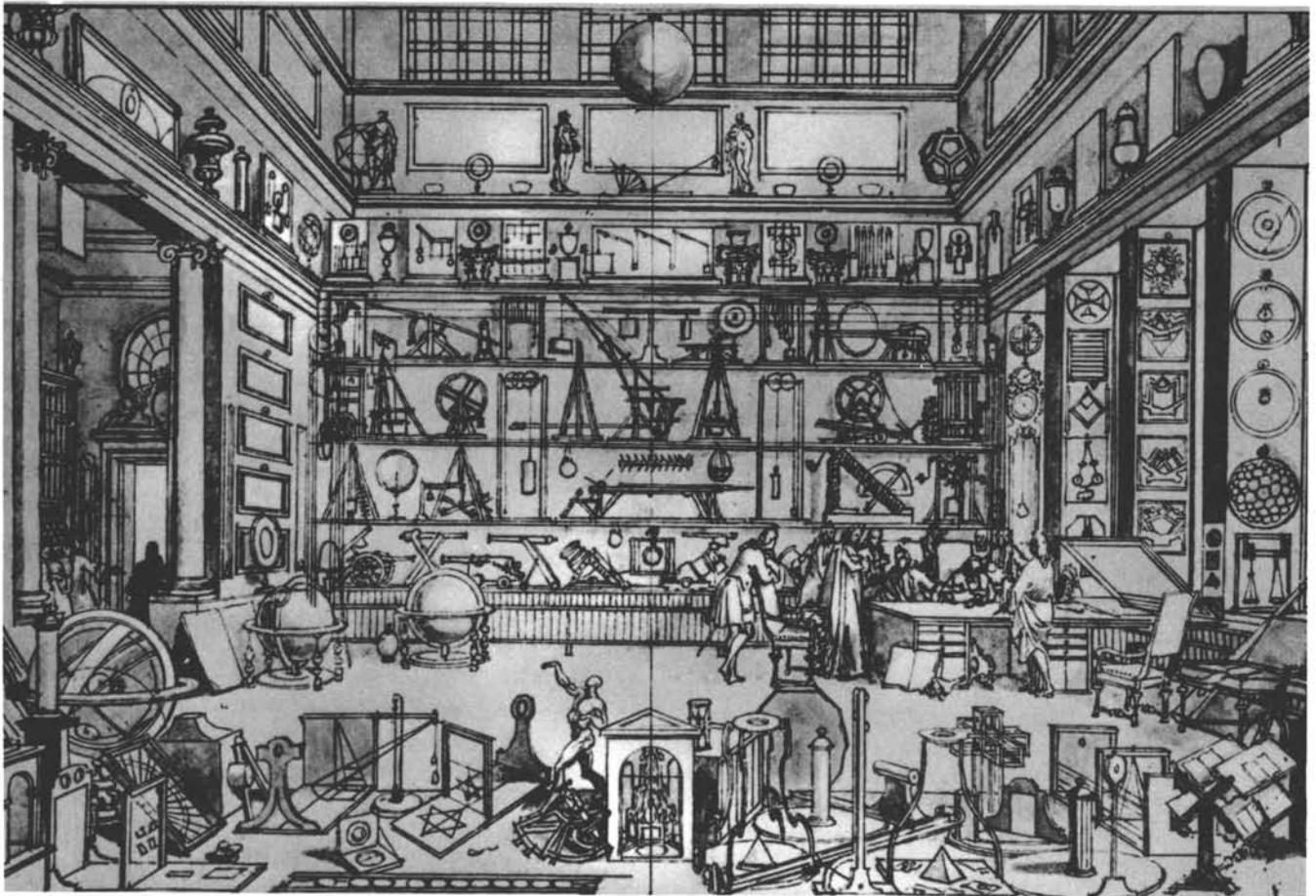


Figure 9



Figure 10

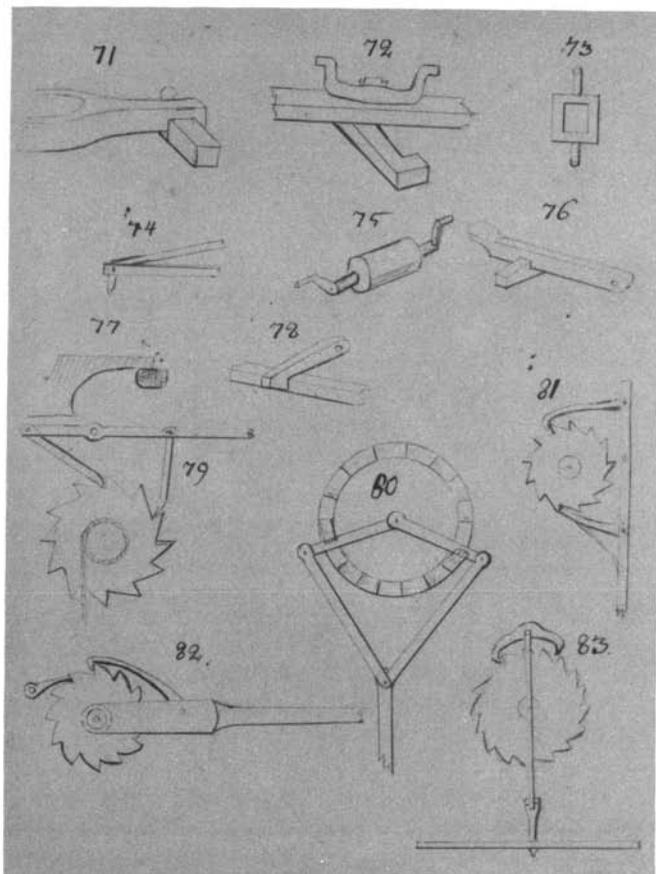


Figure 11b

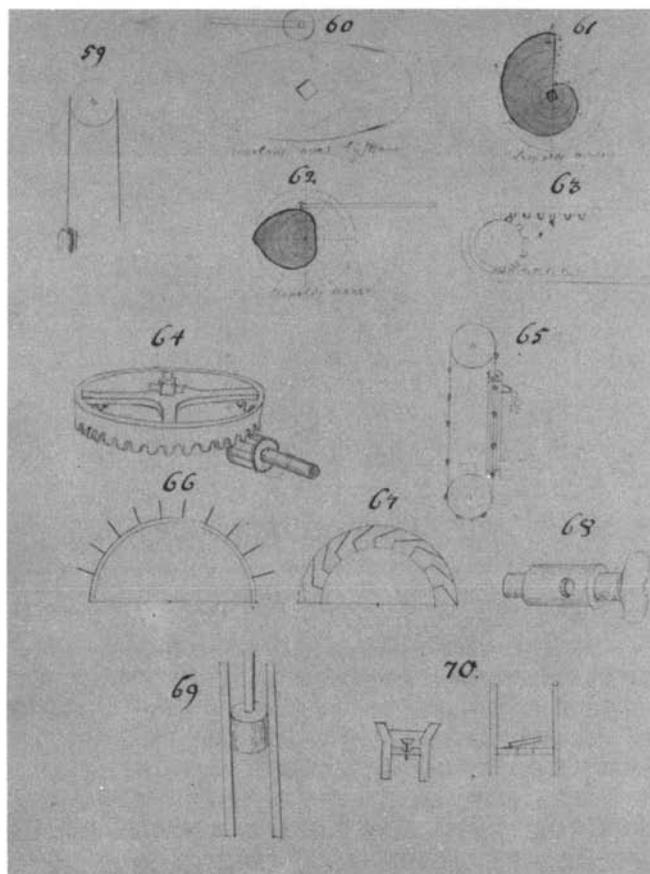


Figure 11a

contribuer au développement économique de la Suède ; d'autres modèles avaient été transférés des collections du bureau des Mines, du bureau du Commerce, de l'office de la Guerre, du corps des Fortifications, de l'Académie royale des sciences suédoise et de l'association des Maîtres de forge suédois³⁹. Certains modèles présentaient un intérêt particulier, tel l'« alphabet mécanique » de Polhem : il s'agissait d'une série de modèles de mouvements mécaniques dont Carl Cronstedt, un protégé de Polhem, disait qu'elles étaient aussi indispensables à connaître et à retenir pour un « mechanicus » qui concevait des machines complexes que pour un écrivain les mots qui lui servaient à rédiger une phrase. Polhem voyait dans les cinq forces de Héron les voyelles de son alphabet mécanique. « Aucun mot ne peut être écrit sans voyelle, notait-il ; de même, aucun mécanisme ne peut être mis en mouvement sans dépendre de l'une d'elles [les cinq forces]⁴⁰. »

Le Conservatoire des arts et métiers, créé durant la Révolution française et situé depuis 1799 dans le prieuré confisqué de St-Martin-des-Champs, s'appuya beaucoup sur les modèles pour mener à bien sa mission d'information technique, d'enseignement et d'inspiration pour les artisans et les petits entrepreneurs. Un grand nombre de ses modèles et de ses machines furent construits par Jacques Périer, qui introduisit en France la machine à vapeur de Watt. Avant la Révolution, Périer avait réalisé des maquettes pour les enfants du duc d'Orléans, dont plusieurs ateliers miniatures très précis qui donnèrent naissance aux planches de l'*Encyclopédie* de Diderot. En 1794, ces modèles revinrent à

l'État ; ils furent ensuite confiés au musée du Conservatoire. Périer réalisa aussi des modèles des machines les plus modernes. Plus tard, les modèles de Jacques Vaucanson, constructeur d'automates et de machines-outils, vinrent s'ajouter aux collections du Conservatoire⁴¹.

Les modèles servirent beaucoup dans les écoles techniques jusqu'à la Seconde Guerre mondiale. Le maître à penser de Franz Reuleaux à l'École polytechnique de Karlsruhe avait créé un cabinet de modèles illustrant les mouvements mécaniques et Reuleaux conçut près de 300 modèles destinés à être utilisés avec son traité sur la *Cinématique*. Ces modèles en fer et en laiton furent vendus à des écoles d'ingénieurs d'Europe et d'Amérique⁴².

La plus grande collection de modèles jamais réunie fut sans doute celle de l'Office des brevets américain. Jusqu'en 1880, toute demande de brevet devait être accompagnée d'une maquette, « si la nature de l'invention s'y prêtait ». Cette maquette ne devait pas mesurer plus de 30 centimètres de côté. Entre sa création en 1790 et la destruction par un incendie de toutes ses archives et modèles en 1836, l'Office accumula plusieurs milliers de modèles. Un autre incendie survenu en 1877 détruisit environ 75 000 modèles, mais 150 000 survécurent⁴³.

Contrairement à la plupart des collections d'Europe, celle de l'Office des brevets américain était ouverte au public⁴⁴. Elle fut pendant toute une période l'une des curiosités de Washington. Elle recevait bien sûr la visite des mécaniciens intéressés, mais les gravu-

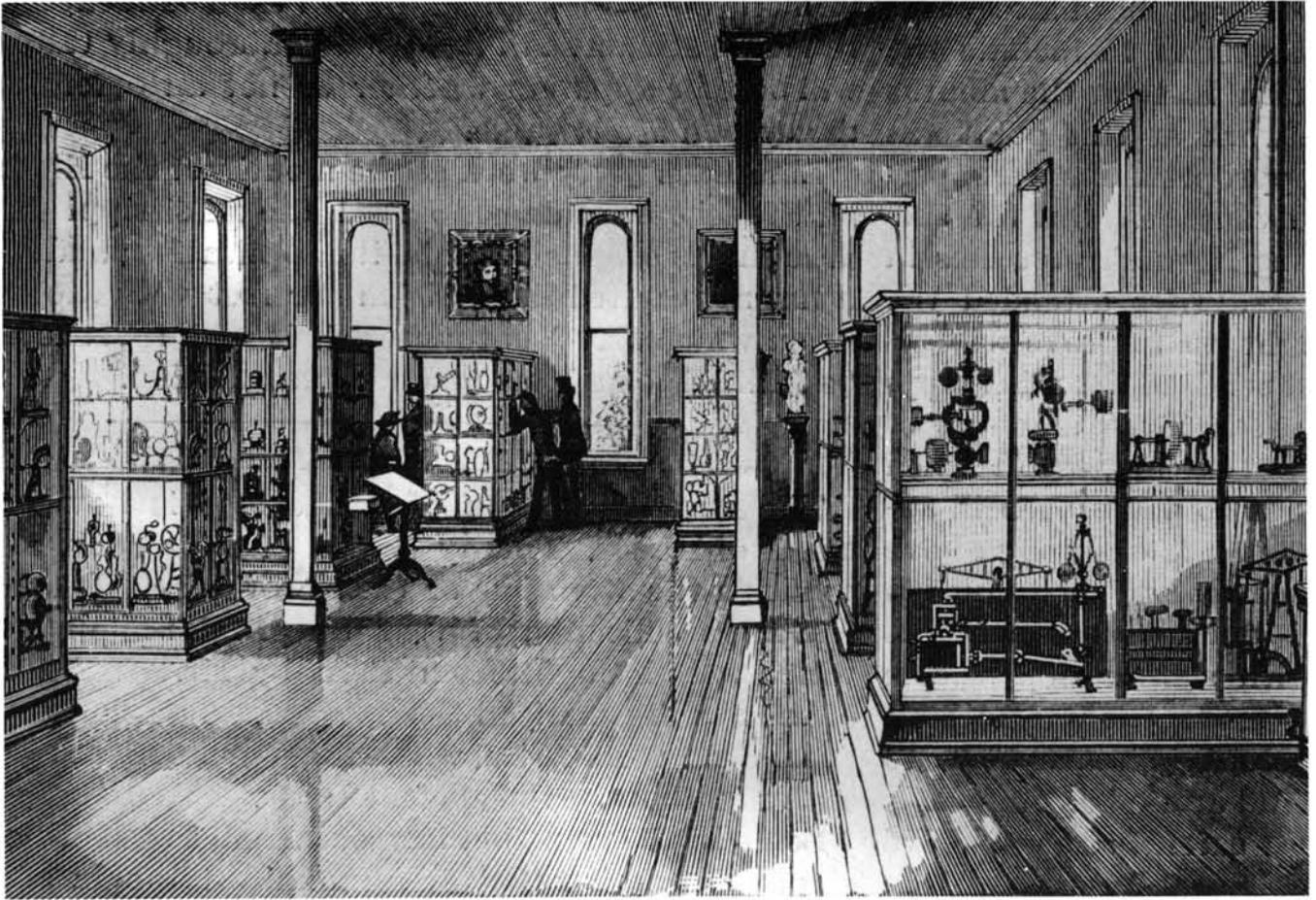


Figure 12



Figure 14

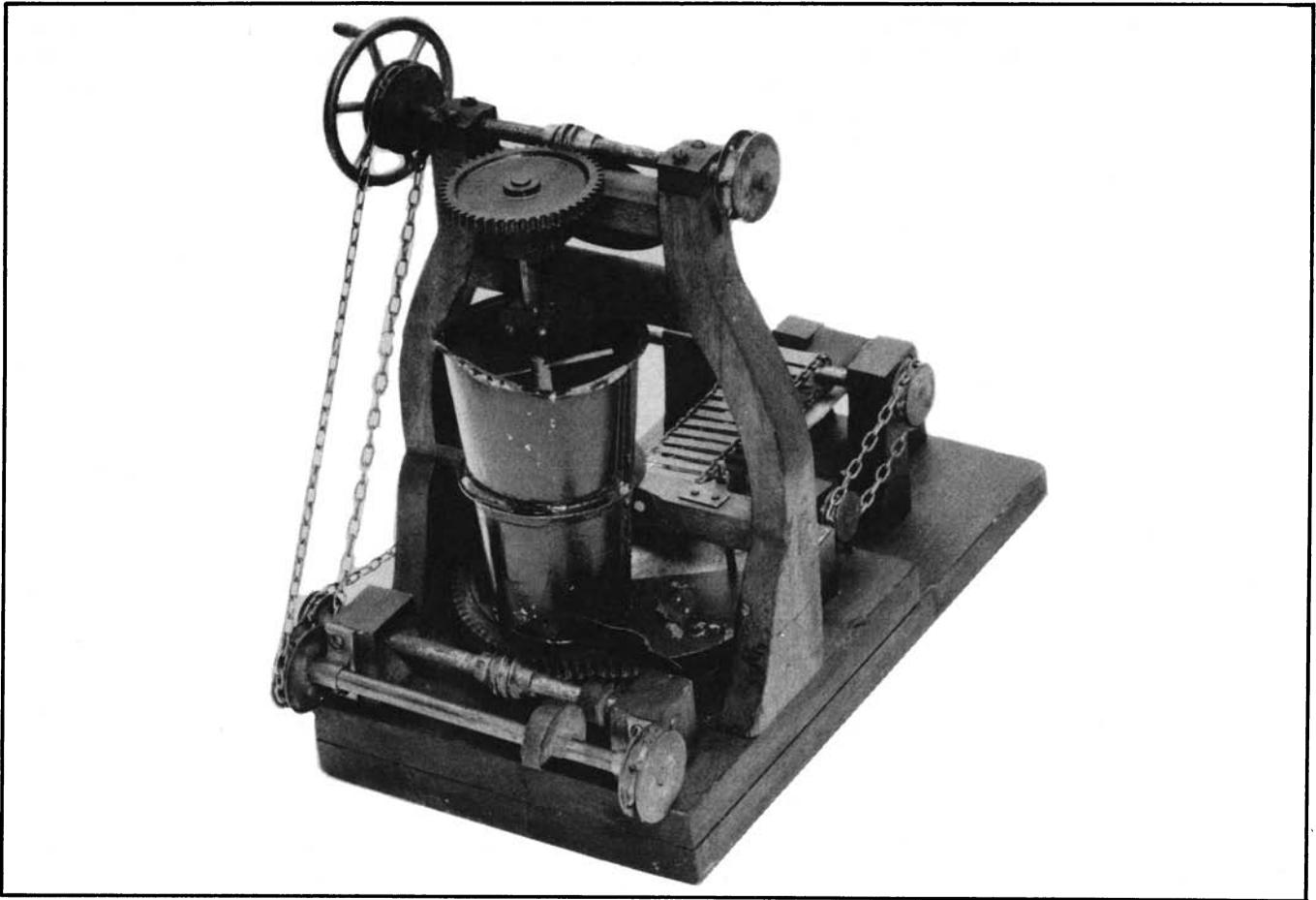


Figure 13

res de l'époque montrent aussi des messieurs, des dames et des enfants circulant à travers les galeries avec l'intention manifeste de faire leur visite à eux. En revanche, la venue d'un visiteur « sérieux » fut ainsi relatée dans les années vingt par une revue d'inventeurs privée, le *Mirror of the Patent Office*: « Mr. Brewster, l'habile mécanicien, après avoir passé quelque temps à l'Office des brevets, où il examina les modèles, dit au docteur Thornton, le directeur, que ceux-ci valaient des millions de dollars, qu'ils représentaient un intérêt inestimable pour les vrais mécaniciens, qu'il avait vu là des mouvements et des combinaisons dont il n'avait aucune idée et qu'il était dès lors en mesure d'améliorer les machines à filer la laine de manière à réduire le coût de la filature de 8 à 1%. Ceci, déclara le docteur Thornton, se vérifia effectivement trois mois après⁴⁵. »

LE PROBLÈME DE L'ACCÈS.

Jusqu'ici, j'ai montré que l'expansion considérable du réservoir d'informations techniques remonte aux dessins imprimés et aux modèles. J'ai souligné l'importance de ce réservoir, mais je n'ai pas encore montré dans quelle mesure il était accessible à tous ceux qui pouvaient y trouver intérêt. Jusqu'en 1800, le mécanicien ordinaire, l'artisan ou l'apprenti n'avaient pratiquement pas accès à ces informations, bien que leur métier leur donnât l'occasion de voir et d'utiliser certains outils et certaines machines. Les livres du XVIII^e siècle étaient très chers, notamment en France. Les cabinets de

modèles en France et en Angleterre n'étaient généralement ouverts qu'à quelques privilégiés. Certains ouvriers économes et déterminés suivaient bien des cours du soir après leur travail et achetaient le livre publié par le professeur, mais la majorité des artisans manquaient de livres et de modèles et n'y avaient pas non plus accès, ni en bibliothèque ni dans les réserves⁴⁶. Le Conservatoire des arts et métiers de Paris et la Royal Institution de Londres se voulaient au service des mécaniciens et des artisans, mais leur influence était limitée. Peu d'artisans de province pouvaient se rendre dans la capitale et y rester assez longtemps pour étudier les modèles exposés ou faire des recherches en bibliothèque. Les instituts de mécanique créés dans les années vingt en Angleterre et aux Etats-Unis engendrèrent des bibliothèques techniques dans de nombreux centres urbains⁴⁷; mais c'est l'avènement des revues techniques bon marché qui fit la différence pour la plupart de ceux qui habitaient les petites villes ou la campagne. *Scientific American* fut à partir de 1845 la première revue technique populaire et bon marché. Son succès encouragea les imitateurs et, à la fin des années 1880, il y avait une très grande variété de revues techniques à la disposition des gens modestes.

Bien que l'accès à l'Office des brevets américain fût apparemment aisé, les informations sur les brevets restèrent difficiles à obtenir jusque dans les années 1870. On pouvait demander une copie imprimée de n'importe quel brevet déposé depuis 1836, mais aucun brevet ne fut imprimé avant 1860, et les copies imprimées ne furent d'abord déposées que dans quelques grandes bibliothèques

ques. Avant l'apparition des brevets imprimés, on pouvait se procurer une copie manuscrite du texte d'un brevet auprès de l'Office moyennant une somme de dix cents les cent mots et une copie du dessin contre deux dollars supplémentaires, ce qui faisait déjà très cher pour un seul des milliers de brevets enregistrés⁴⁸. Durant les années 1850, on imprima de petits dessins — entre dix et vingt par page — dans les comptes rendus annuels de l'Office des brevets. Un court paragraphe de texte énonçait les principales prétentions de l'inventeur. A partir de 1872, l'*Official Gazette of the Patent Office* publiée chaque semaine (et qui continue de paraître aujourd'hui) fournit les mêmes informations. En outre, durant les années 1870, on put obtenir des copies imprimées plus grandes des dessins et le texte entier d'un brevet moyennant un droit symbolique⁴⁹.

DESSINS GÉNÉRIQUES ET DESSINS DE PROPRIÉTAIRES.

Au XVIII^e siècle apparut une nouvelle sorte de dessin : l'inventeur dessinait le plan d'une machine ou d'un système qu'il comptait faire exécuter prochainement. Ainsi, à partir de 1775, James Watt fit régulièrement des dessins des machines à vapeur qu'il vendit avec Matthew Boulton. Il faisait un dessin spécial pour montrer comment une machine précise devait être construite. Ces dessins servaient de plan aux ouvriers qui travaillaient dans les ateliers de Boulton et Watt et donnaient aux entrepreneurs extérieurs les dimensions des pièces telles que condensateurs et cylindres que Boulton et Watt achetaient au lieu de les fabriquer eux-mêmes. Ils guidaient aussi les monteurs de l'entreprise envoyés chez le client pour superviser l'assemblage des pièces et leur servaient de document faisant foi en cas de contestation. Les dessins de Watt comportaient certaines dimensions et ils étaient faits à l'échelle, de sorte qu'en les mesurant un artisan pouvait déterminer les dimensions non spécifiées⁵⁰.

Ces dessins concernant des machines spécifiques que l'inventeur voulait faire construire et voir fonctionner, nous les appellerons des dessins de propriétaires. Tous les autres dessins imprimés que nous avons décrits précédemment, nous les appellerons des dessins génériques ou dessins de travail⁵¹. Un dessin imprimé pouvait éventuellement représenter une sorte particulière de machine ou montrer comment était agencée une pièce, mais aucun dessin générique ne contenait suffisamment d'instructions pour permettre à un artisan inexpérimenté de construire l'objet directement à partir du dessin. Celui qui voulait réaliser l'une des « nombreuses et ingénieuses machines » de Ramelli, par exemple, devait sans cesse faire des choix de taille et de proportions, de matériaux, de fixation et de finition pour que la machine terminée puisse fonctionner correctement. Il en était de même pour les dessins de brevets, qui n'étaient pas conçus comme des dessins de travail, mais comme des informations génériques à interpréter par les « gens de l'art », ceux qui étaient spécialisés dans la branche technologique à laquelle appartenait le brevet⁵². Les dessins de propriétaires, en revanche, étaient conçus pour répondre sans équivoque à toutes les questions que

pouvaient se poser les artisans. Leur but, comme le précise un manuel de dessins de 1887, était de donner « toutes les dimensions d'un objet de sorte que l'objet pût être reproduit ou construit à partir du dessin⁵³ ».

Le dessin de propriétaire était aussi très utile pour préciser les détails d'une idée. Même si l'inventeur avait en tête les grandes lignes et toutes les caractéristiques de la machine qu'il représentait pour la première fois sur le papier, le dessin lui renvoyait toujours des avertissements qui l'amenaient à modifier au moins certains détails. Il aurait très bien pu se dire, même s'il ne le pensait pas vraiment : « Comment saurais-je à quoi ressemble la machine avant de l'avoir dessinée ? » De même que l'écrivain modifie et récrit en se battant pour faire dire aux mots ce qu'il veut dire, de même l'ingénieur lutte avec le dessin de travail avant que celui-ci ne trouve sa forme finale.

LE CONTROLE DE LA PRODUCTION.

Ceux qui aujourd'hui conçoivent des machines destinées à être fabriquées en grand nombre entendent spécifier tous les détails de forme et de dimension de toutes les pièces ; ils entendent faire fabriquer les pièces dans l'atelier de leur société ou se les procurer auprès d'un sous-traitant. En un mot, le créateur entend orchestrer tout le processus avec des dessins et les spécifications qui s'y rapportent, et en avoir la maîtrise à tout instant. De notre point de vue actuel, il semble évident qu'il a fallu des dessins précis pour fabriquer les centaines de milliers de mousquets et de fusils, de machines à moissonner le blé et de machines à coudre fabriqués au XIX^e siècle. Pourtant, les recherches menées récemment par David Hounshell sur les industries américaines spécialisées dans ces produits ont montré que nos hypothèses dans ce domaine étaient fausses. Bien que les principes qui régissent la production en série de machines à pièces interchangeables soient maintenant tout à fait établis, il a fallu de longs tâtonnements avant d'arriver aux dessins permettant de fabriquer des automobiles en grandes quantités⁵⁴.

Un siècle auparavant, en 1821, le service du Matériel de l'U.S. Army avait dû insister à plusieurs reprises auprès de ses fabricants d'armes et fournisseurs privés pour qu'ils fabriquent tous des mousquets à peu près identiques et réparables sur le terrain par simple substitution des pièces endommagées. Cette année-là, les fabricants d'armes de Springfield et Harpers Ferry collaborèrent pour produire un « modèle » amélioré de mousquet, c'est-à-dire une norme d'après laquelle tous les autres mousquets devaient être jugés. Les artisans qui fabriquaient les pièces et assemblaient les mousquets n'avaient aucun dessin pour guider leur travail. Ils utilisaient des gabarits en métal et des pièces fixes qui leur servaient à positionner la pièce par rapport à un outil coupant. En 1823, on distribua pour la première fois aux fabriques d'armes et aux fournisseurs de l'armée des jeux de calibres « passe-passe pas » permettant de vérifier les dimensions critiques des pièces de mousquets au fur et à mesure de leur fabrication⁵⁵.

Un armurier qui fabriquait un mousquet exécutait

une pièce à la fois et l'ajustait aux autres en faisant appel à son jugement pour répondre à la question : « De combien cette pièce doit-elle être plus grande ou plus petite pour s'ajuster aisément mais pas trop dans l'assemblage ? » En revanche, dans une fabrique d'armes nationale, ce n'était pas le jugement des artisans qui pouvait décider si les pièces d'un mousquet étaient trop ou pas assez ajustées, puisqu'ils ne travaillaient que sur une seule pièce. En fabriquant des mécanismes interchangeables, on ne fait pas seulement des pièces qui s'ajustent ; pour être satisfaisant, l'ajustage doit n'être ni trop large ni trop étroit. Les calibres passe-passe pas fixaient les limites de cette marge. L'idée d'indiquer des marges d'ajustement sur les dessins n'avait toujours pas été adoptée en 1825, si tant est que quelqu'un l'ait eue.

Dans les premières années de l'industrie de la machine à coudre américaine, on utilisa quelques dessins. En 1858, les propriétaires des brevets Willcox et Gibbs demandèrent à Brown & Sharpe de construire leurs machines. Brown & Sharpe firent des dessins de la machine, commandèrent des modèles et des moules à une fonderie locale et réalisèrent des gabarits et des pièces fixes pour assurer l'unité du façonnage des pièces. En revanche, la Compagnie des machines à coudre Singer, leader incontesté de la branche en 1875, n'utilisait pas de dessins ; elle fournissait ses modèles et fit construire toutes ses machines par des mécaniciens qualifiés jusqu'après 1880. En 1886, un spécialiste de la production de Singer en déplacement à la nouvelle usine de Kilbowie en Écosse, emportait encore avec lui des modèles de machines et des calibres, perpétuant le système créé deux générations plus tôt par le service du Matériel de l'armée⁵⁶. La Compagnie des machines agricoles Mc Cormick, une autre société qui vient à l'esprit lorsqu'on évoque le développement de la production en série, connut la réussite sans utiliser de dessins ni de modèles jusqu'en 1880, date à laquelle elle construisit un modèle et fournit des gabarits, des pièces fixes et des calibres permettant de fabriquer des répliques uniformes du modèle⁵⁷.

L'étape décisive qui mena à l'utilisation des dessins pour contrôler la production fut franchie au début du XX^e siècle par l'industrie automobile américaine. Lorsqu'ils préparèrent la fabrication de la Ford T, dont la production démarra en 1908, les dessinateurs firent des schémas détaillés de toutes les pièces de la voiture. Ces schémas devinrent la référence ultime en cas de contestation au sein des ouvriers et des sous-traitants. Autre élément tout aussi important pour assurer une production réussie : les « feuilles d'opérations » qui, à raison d'une par pièce, répertoriaient la séquence des opérations d'usinage, les machines-outils sur lesquelles elles devaient être exécutées et les gabarits, pièces fixes et calibres nécessaires à la production de la pièce. En 1922, alors que la production annuelle de voitures atteignait un million, Ford avait mis en place une formidable organisation qui assurait chaque jour la fabrication d'un nombre suffisant de pièces capables d'être assemblées avec toutes les autres sans modifications durant l'assemblage.

Un million de voitures par an, cela faisait environ trois mille par jour, soit deux toutes les minutes si l'usine fonctionnait vingt-quatre heures sur vingt-quatre.

Chaque voiture comportait plusieurs centaines de pièces, de sorte que le nombre de pièces à fabriquer et à assembler chaque jour se comptait par millions. Beaucoup de ces pièces étaient complexes, nécessitant plusieurs opérations d'usinage, avec de fréquents passages au feu pour entretenir la malléabilité ou assurer la dureté du métal. Il fallait donc un ensemble inimaginablement complexe d'actes faits en des lieux et à des instants précis dans l'usine Ford pour pouvoir sortir chaque jour trois mille voitures des chaînes d'assemblage. Les dessins, qui servaient d'arbitres en cas de désaccord sur les intentions des créateurs, indiquaient les dimensions, tolérances, calibres, matériaux et finitions. Ils étaient orchestrés par les feuilles d'opérations. En outre, aucun changement n'était admis dans les dimensions, tolérances et autres spécifications à moins que les dessins eux-mêmes n'aient été changés. Afin de tenir les services techniques, ceux de la production et ceux du contrôle au courant des éventuels changements, une « lettre de l'usine » était publiée chaque semaine, ou plus souvent si nécessaire⁵⁸.

On peut se demander pourquoi la progression des usines mécaniques vers le contrôle ferme de la production se fit aussi lentement. Tant de procédés nous paraissent aujourd'hui simples et, rétrospectivement, évidents. Pourtant, la myriade d'actes à faire exécuter par des milliers d'ouvriers en temps voulu et avec précision ne pouvait être prévue assez clairement pour éviter le traumatisme fréquent de voir tomber à l'eau des plans soigneusement établis. Les variables étaient trop nombreuses pour être traitées selon les procédures traditionnelles en atelier. Les nouvelles règles d'organisation de l'industrie furent nécessaires parce que des milliers d'opérations exécutées jusque-là à un rythme fixé par les artisans durent dès lors être coordonnées et programmées dans le temps afin de parvenir à une production continue et élevée⁵⁹. Les bénéfices procurés par les méthodes modernes sont impressionnants et connus de tous ; ceux qui contrôlent les procédés de production ne manquent pas une occasion de les célébrer. Quant aux inconvénients, ils les ignorent tranquillement, tandis que la migration et la « déqualification » de la main-d'œuvre apparaissent comme le prix inévitable du progrès⁶⁰.

LA PUISSANCE SOCIALE DES LIGNES SUR LE PAPIER.

Les changements techniques qualitatifs qui séparent la Renaissance du XX^e siècle furent accompagnés par des changements sociaux qui passèrent aussi par les dessins de machines. En dépit des hommages de pure forme rendus par la culture occidentale aux travailleurs, le statut de ces derniers a toujours été inférieur à celui des gens qui gagnent leur vie sans se servir de leurs mains. Néanmoins, une partie de cette distance sociale fut compensée par l'équilibre intellectuel qu'on accordait autrefois à l'artisan.

Quand les dessins de travail n'étaient pas encore utilisés dans les ateliers, celui qui voulait faire construire une machine décrivait son idée à un ouvrier. Grâce à son

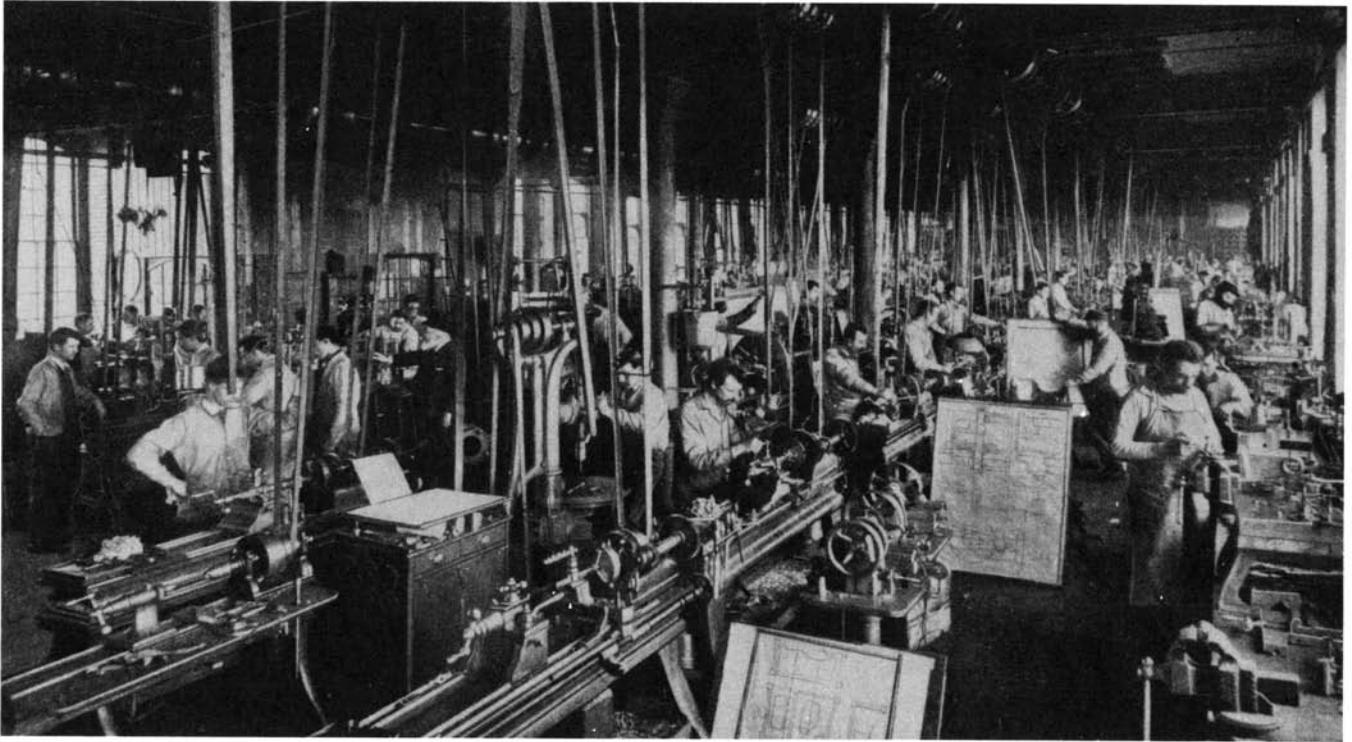


Figure 15

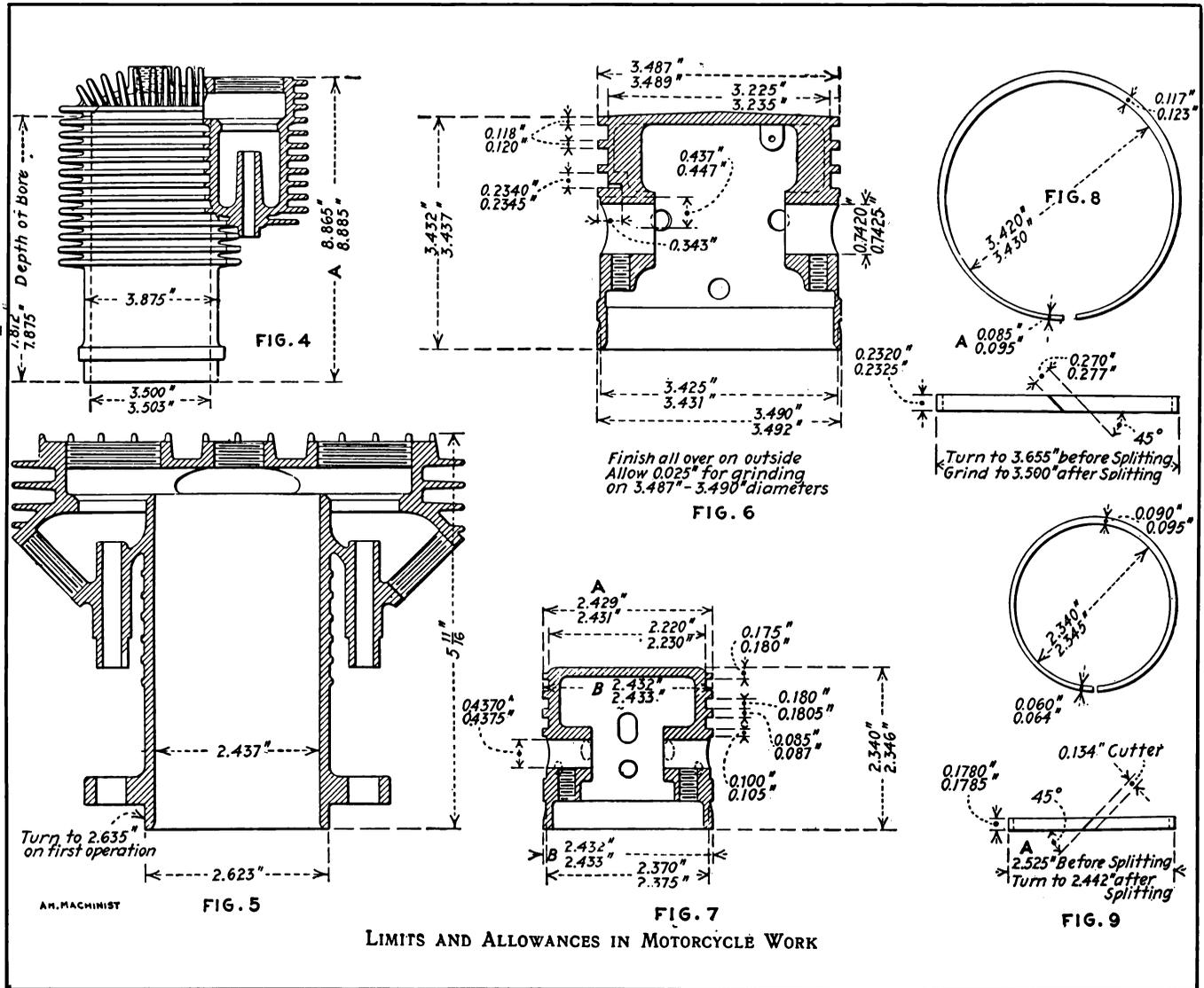


Figure 17

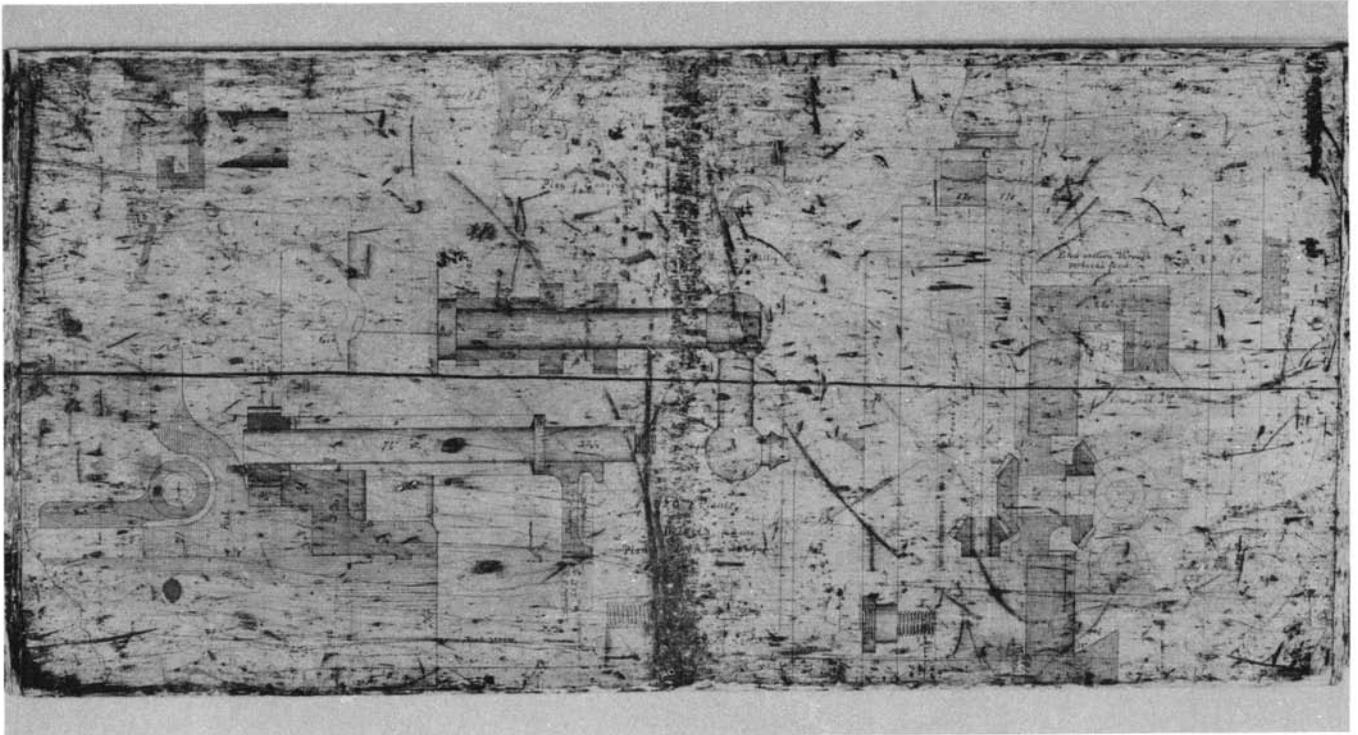


Figure 16

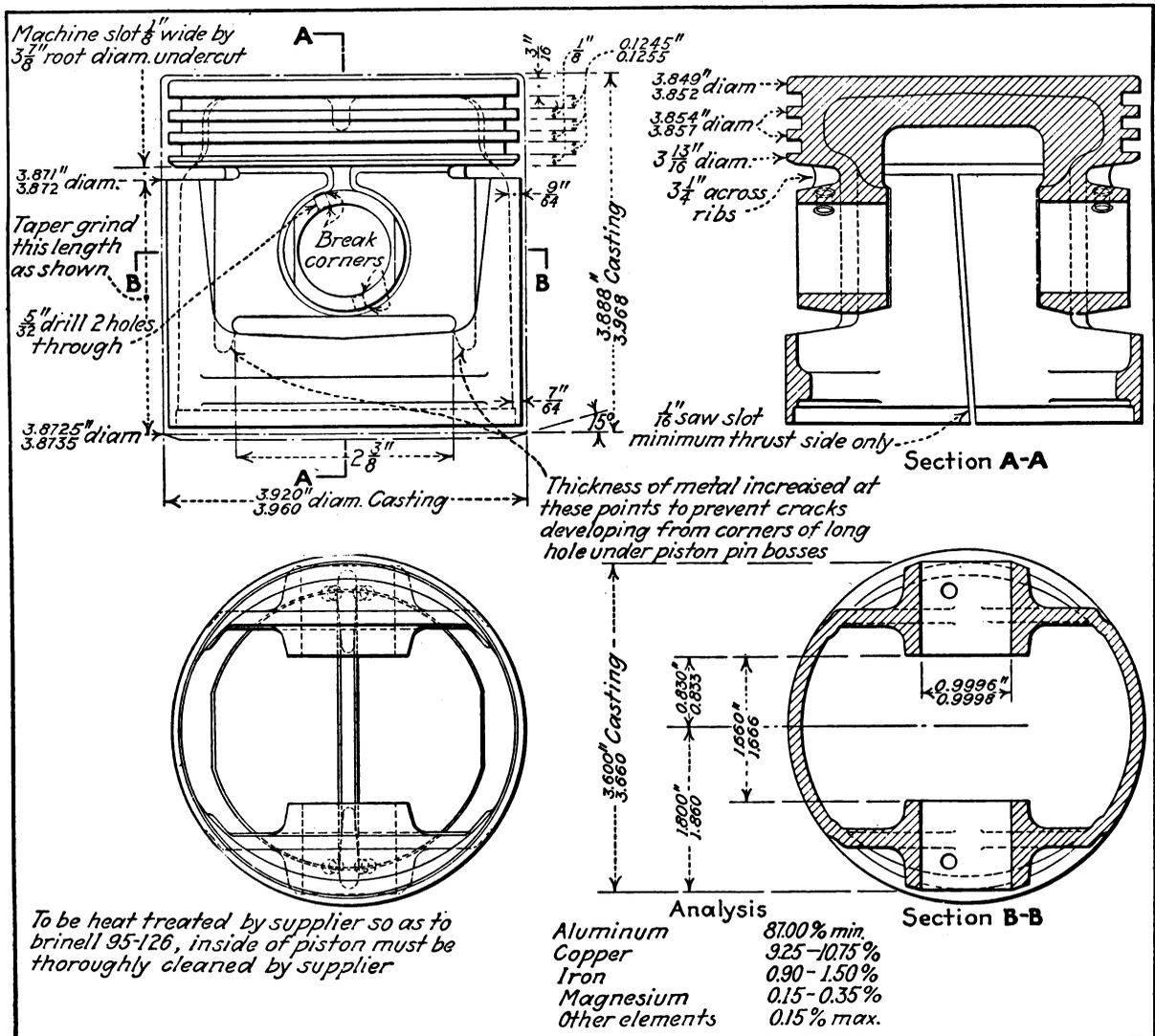


Figure 18

expérience de constructeur de machines, celui-ci décidait des pièces nécessaires et de la manière dont il fallait les fabriquer et les assembler. En revanche, lorsque les dessins précis pénétrèrent dans l'atelier, l'inventeur qui les exécutait put exiger qu'on suive strictement ses plans. Il put aussi diviser le travail et spécifier que telle pièce serait faite par un ouvrier et telle autre par un autre⁶¹.

Le passage du pouvoir de l'ouvrier au technicien rendu possible par les dessins techniques ne fut que la dernière étape d'un processus qui commença avec les premiers croquis d'autrefois. Au début, seul l'ouvrier détenait les connaissances indispensables pour concevoir et construire une machine. Quand les dessins se multiplièrent, un autre groupe de gens de plus en plus divers put commencer à comprendre les machines uniquement par l'intermédiaire des dessins. Ces gens prirent de l'influence sur les ouvriers parce qu'ils purent accumuler sur leurs bureaux des informations concernant de nombreuses machines ; ils purent les comparer, les changer d'un trait de plume et concevoir des arrangements nouveaux sans pénétrer dans un atelier.

Tandis que le capital écrit — réuni au hasard mais avec cohérence — des énoncés graphiques exactement reproductibles grossissait aux XVII^e et XVIII^e siècles, la tendance générale s'éloignait d'un monde où les connaissances mécaniques de l'individu dépendaient de son expérience pour aller vers un monde où l'inventeur d'une machine pouvait utiliser dans son dessin presque toute l'expérience des autres — expérience qui lui parvenait grâce justement au capital écrit. Il n'était plus nécessaire d'assembler la compréhension des forces, tensions, vitesses et accélérations tirées de son expérience avec des objets palpables. En étudiant les théorèmes mécaniques exposés dans les manuels ou les encyclopédies, le technicien pouvait acquérir une compréhension abstraite des principes de la mécanique suffisante pour concevoir des machines qui eussent des chances de marcher. L'ouvrier qui construisait la machine devait souvent corriger les défauts de ces connaissances abstraites (et il le fait toujours), mais la capacité de faire marcher une machine se situe, dans la hiérarchie sociale, bien en dessous de celle de la concevoir. L'aptitude que le capital écrit conférait à l'inventeur de faire des analyses sur le papier, c'est-à-dire vite et à peu de frais, fut une étape décisive dans le processus qui arracha le contrôle intellectuel à l'artisan et rendit ce dernier dépendant de l'inventeur pour tout sauf pour l'habileté manuelle nécessaire à la fabrication des pièces et à l'assemblage de la machine.

CONCLUSION.

De même que l'existence du moteur automobile est impossible à imaginer en 1500, de même la production d'un million de moteurs par an au XX^e siècle est inconcevable sans le déluge de papier dont nous venons de parler. Les fondements écrits sur lesquels reposent les machines modernes sont indispensables pour deux raisons. Il y a d'abord l'énorme quantité de connaissances non verbales qui s'est accrue et a été diffusée grâce aux dessins imprimés. Les modèles complétaient les

dessins et amélioraient la compréhension des quelques personnes qui les étudiaient, mais celles-ci étaient peu nombreuses par rapport aux gens qui pouvaient étudier les dessins. Ensuite, il y a la masse des informations et des instructions explicites, dont la plupart n'étaient transmissibles que par les dessins et qu'il a fallu tenir à la disposition de l'armée de travailleurs, directeurs, dessinateurs et autres qui produisit ce million de moteurs modernes par an. Bien qu'au XIX^e siècle on ait utilisé avec succès les modèles pour uniformiser les armes à feu, machines à coudre et moissonneuses, la complexité du processus de fabrication par millions dépassa les capacités du modèle relativement immobile à coordonner et à arbitrer la fabrication de produits interchangeables.

Ainsi, grâce à une série d'actes prosaïques qui s'étendirent sur de nombreuses, très nombreuses années, ceux qui maîtrisaient les arts graphiques et mathématiques élaborèrent un système de contrôle qui rendit possible l'existence des industries de production en série au XX^e siècle. Ce faisant, ils remportèrent aussi une victoire, peut-être inévitable, mais en tout cas irrévocable, de statut et de pouvoir sur ceux qui n'avaient que leur connaissance intuitive des matériaux et leur habileté manuelle pour fabriquer les machines.

Notes.

1. Les chiffres de production de Ford figurent dans Allan Nevins and Frank E. Hill, *Ford: Decline and Rebirth, 1933-1962* (New York, Scribner's, 1962), p. 478.

2. Le présent article a été influencé et guidé par celui de Bruno Latour, « Les "Vues" de l'esprit » (ce numéro). Voir aussi Jack Goody qui, dans son ouvrage *Domestication of the Savage Mind* (Cambridge University Press, 1977), démolit la notion de « Grand Partage » entre les autres cultures ou époques et « nous » qui sommes supérieurs et bien domestiqués.

3. A. G. Drachmann, *The Mechanical Technology of Greek and Roman Antiquity* (Copenhagen, Munksgaard, 1963), p. 21, 32, 50-52. Le nom courant qui désigne ces « cinq forces » ou multiplicateurs de force est celui de « machines simples ». L'idée selon laquelle toutes les machines sont composées de ces éléments est sans doute une invention du XVII^e siècle, mais elle est aujourd'hui fermement ancrée dans le folklore des machines. Voici par exemple une phrase récente tirée du livre de Herbert Harkimer *Engineers' Illustrated Thesaurus* (New York, Chemical Publishing Co., 1952), p. IV : « Il est notoire que les machines les plus compliquées sont simplement faites de la combinaison de six machines fondamentales... » Harkimer a ajouté le plan incliné aux cinq forces de Héron. Il poursuit en exposant des dizaines de mécanismes et autres systèmes comportant des ressorts, pistons et cylindres, cames, engrenages, chaînes, organes de transmission, etc., dont aucun ne constitue une « machine fondamentale ». Dans sa *Cinématique* (trad. A. Debize, Paris, Savy, 1877), Franz Reuleaux a tenté de régler le problème. Il a expliqué en détail pourquoi « l'affirmation selon laquelle toutes les machines remontent à celles qui ont reçu le nom de "simple" ne se justifie d'aucun point de vue ».

4. Drachmann, *op. cit.* note 3, p. 19-21.

5. La première édition imprimée de Vitruve fut publiée en 1486.

6. Lynn White, Jr., *Medieval Technology and Social Change* (Oxford, Clarendon Press, 1962), p. 110-115.

7. En comparant dix carnets, Scaglia constate que vingt-trois dessins différents apparaissent 129 fois ; c'est-à-dire que chaque carnet répète en moyenne 13 des 23 machines ; Gustina Scaglia, « Drawings of Machines for Architecture from Early Quattrocento in Italy », *Journal of the Society of Architectural Historians*, XXV, 2 (mai 1966), 90-114. Voir aussi Frank D. Prager et Gustina Scaglia, *Brunelleschi: Studies of His Technology and Inventions* (Cambridge, MIT Press, 1970).

8. Ladislao Reti, qui dirigea la rédaction de *The Unknown Leonardo* (New York, McGraw-Hill, 1974), écrivit dans ce livre un chapitre intitulé « Elements of Machines » où il compara vingt-deux pièces répertoriées dans la *Cinématique* de Reuleaux avec celles trouvées dans les manuscrits de Madrid rédigés par Vinci. Vinci avait utilisé 21 de ces 22 pièces. La 22^e était un rivet que Vinci connaissait d'après les armures du XV^e siècle. Les dessins de Vinci semblent toujours nouveaux et originaux, mais cette originalité tient à la façon dont l'auteur représentait, observait et combinait les éléments et non aux éléments eux-mêmes.

9. Gustina Scaglia, «Drawings of Brunelleschi's Mechanical Inventions for the Construction of the Cupola», *Marsyas*, X (1960-1961), 45-48; Scaglia, *op. cit.* note 7; *idem*, *Alle origini degli studi tecnologici di Leonardo*, XX, Lettura Vinciana, 20 avril 1980 (Vinci, Biblioteca Leonardiana, 1981); Doslao Reti, *Tracce dei progetti perduti di Filippo Brunelleschi nel codice Atlantico di Leonardo da Vinci*, IV Lettura Vinciana, 15 avril 1964; Bertrand Gille, dans *Les Ingénieurs de la Renaissance* (Paris, Herman, 1964), a fortement insisté sur le fait que Vinci n'inventa pas tout ce qui figure dans ses carnets. Ce faisant, il s'est attiré les foudres de plusieurs spécialistes de Vinci.

10. Drachmann, *op. cit.* note 3, p. 186-191; Barton C. Hacker, «Greek Catapults and Catapult Technology: Science, Technology, and War in the Ancient World», *Technology and Culture*, IX, 1 (janvier 1968), 34-50.

11. Frank D. Prager and Gustina Scaglia, *Mariano Taccola and his Book De Ingeis* (Cambridge, MIT Press, 1972). Un certain nombre de carnets d'ingénieurs du xv^e siècle ont été réédités récemment, par exemple: Conrad Kyser, *Bellisforis* (1495), Götz Quarg (Düsseldorf, V.D.I. Verlag, 1967); Mariano Taccola, *De Ingeis* (1433), Gustina Scaglia (Wiesbaden, Reichert Verlag); Mariano Taccola, *De Machinis* (1449), Gustina Scaglia (Wiesbaden, Reichert Verlag, 1971); Francesco di Giorgio, *Trattato* (1475), Maltese (Milan, Hoepli, 1967); Bert S. Hall, *The Technological Illustrations of the So-Called «Anonymus of the Hussite Wars»* (1474-1495) (Wiesbaden, Reichert Verlag, 1979). Quelques carnets illustrés plus anciens ont également été publiés: Villard de Honnecourt, 1250; trois traités arabes ont été traduits jusqu'ici par Donald R. Hill et publiés à Dordrecht par Reidel; le *Texaurus* de Guido da Vigevano (1535) a été traduit par A. Rupert Hall et publié dans Bert S. Hall and Delano C. West (eds), *On Pre-Modern Technology and Science* (Malibu, Udena Publications, 1976), p. 11-52.

Gille, *op. cit.* note 9, donne une liste des bibliothèques d'Italie, de France, d'Allemagne, d'Autriche, de Grande-Bretagne et du Lichtenstein où se trouvent actuellement 123 carnets. Voir aussi Bert S. Hall, «Technical Treatises 1400-1600: Implications of Early Non-Verbal Thought for Technologists», article non publié, résumé dans *Technology and Culture*, XIX, 3 (juillet 1978).

12. Alfred W. Pollard, «Incunabula», in *Encyclopaedia Britannica*, XI ed. (1910-1911), vol. XIV, p. 369-370. Pollard, conservateur au British Museum, table sur un tirage moyen de 500 exemplaires, ce qui me paraît très élevé.

13. William N. Ivins, Jr., *Prints and Visual Communications* (Cambridge, Harvard University Press, 1953; MIT Press, 1969); voir aussi l'article de ce numéro. On trouvera des exemples frappants d'erreurs introduites dans les copies de dessins dans Samuel Y. Edgerton, Jr., «The Renaissance Artist as Quantifier», in Margaret A. Hagen (ed), *The Perception of Pictures*, vol. 1 (New York, Academic Press, 1980); pages 197, 200, 202-206, Edgerton montre comment la gravure d'un livre de Ramelli daté de 1588 fut transformée lors de sa reproduction par un copiste chinois en 1627. Cette copie fut reproduite par un autre copiste chinois en 1726, de sorte que le mécanisme décrit par Ramelli devint inintelligible.

14. Ivins, *op. cit.* note 13. Elizabeth Eisenstein, dans son ouvrage magistral *The Printing Press as an Agent of Change* (Cambridge University Press, 1979), met l'accent sur l'aspect transportable des livres et sur la possibilité de rassembler en un même lieu et de comparer dans le calme de l'étude des informations venant d'endroits et d'époques très différents.

15. A. G. Keller donne une brève présentation des théâtres de machines dans *A Theatre of Machines* (Londres, Chapman & Hall, 1964), 52 planches. Theodor Beck, dans *Beiträge zur Geschichte der Maschinenbaues* (Berlin, Springer, 1899), passe systématiquement en revue plus d'une douzaine de théâtres de machines; il consacre également plusieurs chapitres à Héron, Vitruve et Léonard de Vinci. Voir aussi Agostino Ramelli, *The Various and Ingenious Machines* (1588), Martha Teach Gnudi and Eugene S. Ferguson (London, Scolar Press, 1976). Un «glossaire graphique» inspiré de Beck donne une classification des mécanismes figurant dans les 194 planches de Ramelli. Une bibliographie répertorie l'essentiel des écrits relatifs aux théâtres des machines. Ramelli expose 110 pompes, 25 moulins et 34 engins militaires.

16. Eugene Ferguson a fait une très brève synthèse de l'œuvre de Leupold dans *Technology and Culture*, XII, 1 (janvier 1971), 64-68. Evald Rink donne dans son article «Jacob Leupold and His *Theatrum Machinarum*», *The Library Chronicle of the University of Pennsylvania*, XXXVIII, 2 (printemps 1972), des informations bibliographiques complètes et résume le contenu de chaque volume. Rink publia aussi une édition microfilmée des onze volumes, disponible chez Eleutherian Mills Historical Library, Box 3630, Wilmington, Delaware, 19807; le film est accompagné par un volume de résumés et d'index.

17. Je pense que c'est Jacques Ozanam (1640-1717) qui fut à l'origine des traités de mécaniques didactiques apparus sous de nombreuses formes au xviii^e siècle. Voir par exemple son *Cours de mathématique...*, Paris, Jombert, 1683. Près de 200 planches expliquent la géométrie, la trigonométrie, les fortifications, la mécanique, l'hydraulique et la géographie. Aucun spécialiste n'a encore traité les origines et le développement des ouvrages de

mécanique didactiques.

18. Je n'ai pas trouvé l'origine du terme de «machines simples». Dans *Mechanick-Powers, or, the Mystery of Nature and Art Unvail'd* (Londres, 1696), Venturus Mandey et James Moxon consacrent cinq chapitres à des «engins de type simple» (c'est-à-dire les cinq forces de Héron) et quatre à des «engins composés». Ozanam, dans son quatrième volume, traite de «machines simples et composées».

19. Ramelli, *op. cit.* note 15, décrit environ quarante façons de transformer le mouvement rotatif en mouvement alternatif et vice versa, mais chaque système était noyé dans une machine complète et il ne s'en occupait pas en tant que catégorie.

20. James P. Muirhead, *The Life of James Watt* (Londres, 1859), p. 49.

21. Arthur H. Cole and George B. Watts, *The Handicrafts of France as Recorded in the Descriptions des Arts et Métiers 1761-1788* (Boston, Baker Library, Harvard Business School, 1952). De courts extraits illustrés de l'*Art de faire le papier* de Lalande parurent dans l'*Universal Magazine* de Londres en 1762 et 1763.

22. A. E. Musson and Eric Robinson, *Science and Technology in the Industrial Revolution* (Manchester University Press, 1969); voir aussi «Scientific lectures» dans l'index.

23. Certains de ces modèles achetés au professeur de Londres Benjamin Martin par le collège de Harvard au xviii^e siècle sont illustrés avec d'autres dans David P. Wheatland, *The Apparatus of Science at Harvard 1765-1800* (Harvard University, 1968). Après que Yale eut reçu de Londres un «appareil philosophique», le *Massachusetts Magazine* de janvier 1790 écrivit: «L'université dispose ainsi d'un ensemble complet d'instruments et de machines permettant de faire une série entière d'expériences en philosophie naturelle et en astronomie.»

24. L'*Encyclopédie* de Diderot comportait 3000 planches. Dans *The Business of the Enlightenment, A Publishing History of the Encyclopédie 1775-1800* (Cambridge, Harvard University Press, 1979), Robert Darnton indique qu'il existait 25000 exemplaires de cet ouvrage avant la Révolution française. Bien que de nombreuses éditions renferment moins de planches que l'original, le nombre total de gravures en circulation dépassait à coup sûr les 25 millions.

25. Eugene S. Ferguson, «Kinematics of Mechanisms from the Time of Watt», U.S. National Museum, *Bulletin* 228 (Washington, Smithsonian Institution, 1963), p. 185-230.

26. Ecole impériale polytechnique, *Programme du cours élémentaire des machines*, par M. Hachette et *Essai sur la composition des machines* par MM. Lanz et Bétancourt (Paris, 1808). L'*Essai* fut traduit et publié en anglais vers 1817. Dans la préface de la traduction, l'ouvrage était qualifié de «grammaire de la science mécanique... parfaitement intelligible pour la classe pré-cieuse de la société que sont les artisans appliqués» et de «volume de référence utile aux classes instruites». En 1811, Hachette publia son propre *Traité élémentaire des machines*, beaucoup plus volumineux. Richard S. Hartenberg m'a parlé d'un traité de 1936 sur les *Mouvements mécaniques* de G. Vander Haeghen, publié à Bruxelles, qui utilisait encore le système de classification Monge-Hachette et contenait plus de 750 mécanismes différents illustrés par des figures dessinées avec soin.

27. J. A. Borgnis, *Traité complet de mécanique appliquée aux arts* (8 vol., Paris, 1818-1820), vol. 1, p. VII-VIII.

28. *Ibid.*, vol. 2 et 3.

29. Voir mon compte rendu sur la réédition (1981) du livre de Brown dans *Technology and Culture*, XXIV, 4 (octobre 1983).

30. Herkimer, *op. cit.* note 3.

31. Ferguson, *op. cit.* note 25, p. 213-215.

32. Prager and Scaglia, *op. cit.* note 7.

33. Bern Dibner, *Moving the Obelisks* (Norwalk, Conn., Burndy Library, 1952).

34. John U. Nef, *The Rise of the British Coal Industry* (2 vol., Londres, 1932), vol. 1, p. 242.

35. Walter G. Endrei, «The First Technical Exhibition», *Technology and Culture*, IX, 2 (avril 1968).

36. Académie des sciences, *Histoire...* vol. I, 1666 à 1686 (Paris, 1733), p. 70. Les maquettes étaient «standardisées» — c'est-à-dire qu'on voit de nombreuses maquettes connues sur les gravures de diverses salles de modèles — parce qu'elles étaient souvent copiées et parce que la plupart des fabricants de modèles semblent s'être accordés pour décider qu'une maquette devait mesurer moins de 30 cm de côté et de hauteur.

37. Académie des sciences, *Machines et inventions approuvées par l'Académie Royale des Sciences, depuis son établissement jusqu'à présent* (7 vol., Paris, 1735-1777). Dans *The Anatomy of a Scientific Institution, The Paris Academy of Sciences, 1666-1803* (Berkeley, University of California Press, 1971), p. 23, Roger Hahn cite le règlement de 1699 qui obligeait à faire approuver une maquette pour chaque machine.

38. Derek Hudson and Kenneth W. Luckhurst, *The Royal Society of Arts 1754-1954* (Londres, John Murray, 1954); William Bailey, *The Advancement of Arts, Manufactures and Commerce...* (Londres, 1776). Voir aussi Kenneth W. Luckhurst, *The Story of Exhibitions* (Londres et New York,

Studio Pubs., 1951), p. 63.69. Dans *Oliver Evans*, de Greville and Dorothy Bathe (Philadelphie, 1935), on trouve reproduite une lettre écrite en 1793 à Evans par Robert Leslie : « J'ai fait la connaissance de plusieurs membres de la Société et j'espère être bientôt admis à voir leur collection de machines et de modèles qu'on dit être la plus grande au monde. » Leslie était un horloger de Philadelphie.

39. Svante Lindqvist, *Technology on Trial : The Introduction of Steam Power Technology into Sweden, 1715-1735* (Uppsala, sous presse).

40. Carnets de Carl J. Cronstedt, III^e partie (1729), Tekniska Museet, Stockholm. Je remercie Torsten Althin de m'avoir fait connaître Cronstedt et Svante Lindqvist de m'avoir donné accès aux carnets. Lindqvist m'a aussi parlé des remarques de Polhem sur les cinq forces et m'a traduit un passage du suédois.

41. R. Tresse, « Le Conservatoire des arts et métiers et la Société d'encouragement pour l'industrie nationale au début du XIX^e siècle », *Revue d'histoire des sciences et de leurs applications*, V, 3 (juil.-sept. 1952).

42. Reuleaux, *op. cit.* note 3. A.B.W. Kennedy fit connaître ces modèles aux lecteurs anglais dans *Engineering*, XXII (1876).

43. Eugene S. Ferguson and Christopher Baer, *Little Machines ; Patent Models in the Nineteenth Century* (Wilmington, Del., The Hagley Museum, 1979).

44. Ceci est vrai à partir de 1825. Dans *Philadelpbia's Philosopher Mechanics : A History of the Franklin Institute 1824-1865* (Baltimore, Johns Hopkins University Press, 1974), Bruce Sinclair raconte avec quelle ténacité le Franklin Institute combattit le règlement du commissaire des brevets Thornton qui interdisait de communiquer des informations sans le consentement de l'inventeur. Le secrétaire d'Etat Clay ayant refusé d'intervenir, l'Institut plaida sa cause auprès du président Adams, qui fit annuler le règlement.

45. *American Journal of Improvements in the Useful Arts and Mirror of the Patent Office*, I (1828), 13.

46. Dans son livre *Le Graphisme technique, son histoire et son enseignement* (Seysssel, 1981), p. 148, Yves Desforges, citant une source de 1772, confirme que « les encyclopédies sont chères, difficilement accessibles et pas assez générales, que les cabinets de modèles sont privés et que les cours académiques ne sont ouverts qu'aux élèves avancés ».

Comme il faut un certain temps — de quelques minutes à une heure ou plus — pour comprendre un seul modèle ou dessin, le fait de posséder des modèles ou des dessins, ou d'y avoir fréquemment accès était lourd de conséquences. On connaît mal la nature de l'apprentissage visuel, mais mon confrère Charles Haines m'a convaincu que l'apprentissage visuel « fonctionne très différemment de l'apprentissage verbal au point de vue du temps. Souvent des images restent en sommeil pendant de longues périodes jusqu'à ce qu'elles soient associées ou juxtaposées à un passage écrit ou à une autre image. Lorsqu'on demande à un visiteur quittant une exposition ce qu'il a appris et qu'il répond "rien", c'est peut-être juste, mais il se peut qu'il n'ait pas terminé ». (Article non publié.)

47. Sur les instituts de mécanique en Grande-Bretagne, voir Thomas Kelly, *A History of Adult Education in Great Britain* (Liverpool, The University Press, 1962). Sinclair, *op. cit.* note 44, donne une brève esquisse des mouvements anglais et américains, puis propose une superbe étude de cas de l'un des principaux instituts.

48. Karl B. Lutz, « Evolution of U.S. Patent Documents », *Journal of the Patent Office Society*, XIX, 6 (juin 1937) ; sur le coût des copies, voir *ibid.*, XVIII, 7 (juillet 1936), 99.

49. Sur les dessins de brevets, voir *Scientific American*, XVII, 21 (nov. 1872), 327.

50. Jennifer Tann, « Boulton and Watt's Organization of Steam Engine Production Before the Opening of the Soho Foundry », *Newcomen Society, Transactions*, XLIX (1977-1978), 41-56.

51. C'est George Basalla qui m'a donné l'idée de « dessin générique ».

52. L'expression « les gens de l'art auquel appartient l'invention » est tirée de *General Information Concerning Patents* (Washington, Government Printing Office, 1978), p. 15.

53. On constate avec surprise que l'indication courante des dimensions est une évolution récente. Elle n'apparut aux Etats-Unis que dans les années 1880-1890.

54. David Hounshell, *From the American System to Mass Production 1800-1932. The Development of Manufacturing Technology in the United States* (Baltimore, Johns Hopkins University Press, 1984).

55. Merritt Roe Smith, « Military Entrepreneurship », in Otto Mayr and Robert C. Post (eds), *Yankee Enterprise : The Rise of the American System of Manufactures* (Washington, Smithsonian Institution Press, 1981), notamment p. 76. Hounshell, *op. cit.* note 54, p. 25-28, souligne l'influence importante des Français sur l'U.S. Army dans le domaine de l'uniformité. Comme exemple de calibre passe-passe pas, on peut citer une pièce de fer en forme de C destinée à calibrer les cylindres, avec une ouverture à crans. Le premier cran donne la limite maximum du diamètre, et le second la limite minimum. Les pièces trop larges ne passaient pas le premier cran, les pièces trop petites passaient les deux crans, et les pièces correctes passaient le

premier mais pas le second.

56. Hounshell, *op. cit.* note 54.

57. *Ibid.*, p. 180.

58. *Ibid.*, p. 223, 270-273. La campagne de normalisation du dessin apparut dans l'industrie automobile américaine vers 1910. Voir George W. Dunham, « The S.A.E. Standardization of Drawings », *American Machinist*, XXXVIII, 15 (10 avril 1913).

59. Deux livres d'Earle Buckingham, qui travailla pour Pratt & Whitney durant la période où Ford apprenait à contrôler la production, nous font pénétrer dans la complexité d'une organisation qui produit un très grand nombre de machines identiques. Il s'agit de *Principles of Interchangeable Manufacturing* (New York, Industrial Press, 1941), à peu près inchangé depuis la première édition de 1920, et de *Dimensions and Tolerances for Mass Production* (New York, Industrial Press, 1954). Dans ce dernier ouvrage, l'auteur insiste sur la nécessité de fabriquer et d'assembler des modèles en préproduction, car il était quasiment impossible de prévoir les interférences et les ajustages trop larges qui pouvaient résulter de l'accumulation de tolérances allant toutes dans le même sens.

60. Dans son article « Social Choice in Machine Design : The Case of Automatically Controlled Machine Tools », in Andrew Zimbalist (ed), *Case Studies in the Labor Process* (New York, 1979), David F. Noble montre le zèle avec lequel les ingénieurs patronnés par l'U.S. Air Force favorisèrent durant ces dernières années le développement de machines-outils qui obligeaient à des migrations de main-d'œuvre. Le besoin chez les ingénieurs d'arracher aux ouvriers qualifiés le contrôle des ateliers a été beaucoup plus fort que le désir de réduire le prix de revient des pièces.

61. Dans *The Art of the Engineer* (Londres, Lund Humphries and Woodstock, 1981), Ken Baynes et Francis Pugh signalent, mais ne soulignent pas assez, le rôle des dessins dans la « séparation entre la pensée et la fabrication ». La thèse non publiée de James Edmonson « From Mécanicien to Ingénieur : Technical Education and the Machine Building Industry in Nineteenth Century France », University of Delaware, 1981, est une étude de cas sur le passage du contrôle de l'atelier au bureau d'étude dans la firme parisienne Desrosne et Cail entre 1836 et 1850.

Légendes

Figure 1. Grue conçue par Filippo Brunelleschi pour construire la coupole de la cathédrale de Florence, 1420-1436. Le dessin fait apparaître des roulements à billes destinés à soutenir et à orienter la grue en rotation. Manuscrit de Buonacorso Ghiberti, B.R. 228, fol. 105 recto, Biblioteca Nazionale Centrale, Florence.

Figure 2. Grue de Brunelleschi telle qu'elle figure dans un carnet de Léonard de Vinci (vers 1480). Le dessin de Vinci est une image en miroir de l'original. Leonardo da Vinci, Il codice Atlantico (édition en fac-simile) (12 vol., Florence et New York, Harcourt Brace Jovanovitch, 1973-1975), fol. 808, recto.

Figure 3. Catapulte, 1472. Le treuil placé au centre tire le crochet et bande l'arme. A la détente, la grande tige courbe vient frapper la base de la flèche, qui peut être réglée au moyen des pièces supérieures gauches. Valturio fut le premier à faire imprimer des illustrations techniques. Dimensions originales : 14 x 10 cm. Roberto Valturio, De re militari, Libris XII (Vérone, 1472, 1483 ; Paris, 1532).

Figure 4. « Pince à zigzag » pour escalader les murs des châteaux forts, 1472. Une vis unique formée d'un filet à gauche et d'un filet à droite monte ou descend l'échelle. C'est l'un des nombreux appareils qui furent copiés et recopiés dans les livres imprimés durant trois siècles. Dimensions originales : 14 x 20 cm. Valturion, op. cit., fig. 3.

Figure 5. Articulation à engrenage servant à écarter les barreaux des forteresses. Ces deux illustrations sont des exemples des grandes gravures très claires qui figuraient dans les « théâtres de machines ». Dimensions originales de chaque gravure : 15 x 21 cm. Ramelli, Various and Ingenious Machines (1588-1976).

Figure 6. Soupapes coniques et sphériques pour pompes, classées et décrites par Jacob Leupold dans son Theatri machinarum hydraulicarum, tome I (Leipzig, 1724), planche 38. Une autre planche est consacrée aux soupapes à clapet et une troisième aux pistons de pompes.

Figure 7. Modèles d'engrenages, de cames, d'encliquetages, de manivelles et de joints universels. Fac-simile du modèle de démonstration de l'université de Harvard (datant probablement des années 1820 ou 1830). Les dessins explicatifs du haut font partie d'un ensemble exposé au Hagley Museum.

Figure 8. Tableau des « machines élémentaires » servant à convertir le mouvement rotatif en mouvement rectilinéaire selon diverses combinaisons (Jean Hachette, 1808). Publié aussi dans le Traité élémentaire des machines d'Hachette (Paris, 1811).

Figure 9. Chambre des modèles de l'Académie des sciences de Paris, 1711 ; gravure de Sébastien Leclerc (1637-1714). Remarquez les nombreuses grues et appareils de levage à cordes et à poulies sur les étagères supérieures, l'artillerie sur l'étagère inférieure, les instruments scientifiques au premier plan et la lanterne magique dans le coin gauche. The Illustrated London News, 21 mai 1938.

Figure 10. Modèles provenant de la Chambre royale suédoise des modèles au XVIII^e siècle et exposés au Tekniska Museet de Stockholm en 1937. Lors de la création de l'Institut royal de technologie vers 1825, les modèles furent transférés dans cet établissement. Un siècle plus tard, Torsten Althin les accueillit dans son nouveau Tekniska Museet. Selon une lettre écrite par Althin en 1972, « sur les quatre-vingts modèles de l'alphabet original, à peine vingt ont été conservés ». Ils sont disposés de part et d'autre de la colonne centrale.

Figure 11. Extrait de l'alphabet mécanique de Polhem tel que Carl Cronstedt l'enregistra dans ses carnets vers 1729. Cronstedt copia cent-trois mécanismes sur huit pages à la file. Il nota l'origine des n^{os} 60 (S. Morland), 61 et 62 (Leupold).

Figure 12. « Musée des mécanismes » du Sibley College, 1885. Ce collège d'ingénieurs appartenant à l'université de Cornell exposa sa collection de modèles cinématiques de Reuleaux (au fond et à gauche), de régulateurs, de machines à vapeur (au premier plan), ainsi que d'autres systèmes mécaniques. Scientific American, 17 oct. 1885.

Figure 13. Modèle breveté américain. Machine à fabriquer des briques inventée par Casper S. Bigler, Harrisburg, Pennsylvanie, 1^{er} fév. 1876 ; brevet n^o 172864. Dimensions : 30 x 18 x 30 cm.

Figure 14. Salle des modèles de l'Office des brevets américain, Washington, D.C., vers 1884. Avant l'incendie de 1877, les vitrines contenaient plus de 200 000 modèles. Ceux qui survécurent et les autres reçus par la suite, soit un total d'environ 150 000, furent rangés dans un entrepôt en 1893. Joseph W. Moore, Picturesque Washington (1884).

Figure 15. Atelier de fabrication des outils de la Singer Manufacturing Company à Elizabethport, New Jersey, 1896. Notez l'absence de dimensions sur les dessins de travail fixés aux tableaux dans l'allée centrale. Catalogue of Singer Sewing Machines, Illustrating Their Construction (New York, 1896).

Figure 16. Dessin de travail indiquant les détails d'une planeuse, et utilisé dans les années 1870 par l'atelier de la New Haven Machine Company. Ce dessin a été tracé à l'encre de Chine sur une planche en pin de 40 x 85 x 2 cm. Des baches très soigneuses indiquent la profondeur et la forme des pièces décrites. Les dimensions sont spécifiées, de sorte que les ouvriers n'étaient pas obligés de mesurer le dessin.

Figure 17. Dessins de travail représentant des cylindres, des pistons et des joints de piston, 1912, Pierce Cycle Company, Buffalo, New York. Il s'agit d'un des premiers dessins spécifiant les dimensions limites (tolérances) de pièces qui s'adaptent les unes aux autres. American Machinist, 5 déc. 1912.

Figure 18. Dessin de travail pour les pistons de la Ford A, 1928. Bien que les ingénieurs de Ford aient commencé à spécifier les tolérances des pièces sur leurs dessins plusieurs années avant la date de celui-ci, je n'ai trouvé aucun exemple plus ancien. American Machinist, 10 mai 1928.