



TOGETHER
for a sustainable future

OCCASION

This publication has been made available to the public on the occasion of the 50th anniversary of the United Nations Industrial Development Organisation.



TOGETHER
for a sustainable future

DISCLAIMER

This document has been produced without formal United Nations editing. The designations employed and the presentation of the material in this document do not imply the expression of any opinion whatsoever on the part of the Secretariat of the United Nations Industrial Development Organization (UNIDO) concerning the legal status of any country, territory, city or area or of its authorities, or concerning the delimitation of its frontiers or boundaries, or its economic system or degree of development. Designations such as “developed”, “industrialized” and “developing” are intended for statistical convenience and do not necessarily express a judgment about the stage reached by a particular country or area in the development process. Mention of firm names or commercial products does not constitute an endorsement by UNIDO.

FAIR USE POLICY

Any part of this publication may be quoted and referenced for educational and research purposes without additional permission from UNIDO. However, those who make use of quoting and referencing this publication are requested to follow the Fair Use Policy of giving due credit to UNIDO.

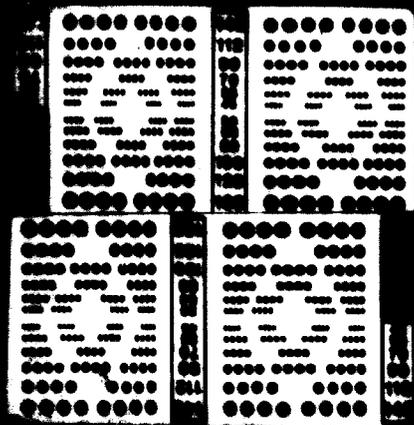
CONTACT

Please contact publications@unido.org for further information concerning UNIDO publications.

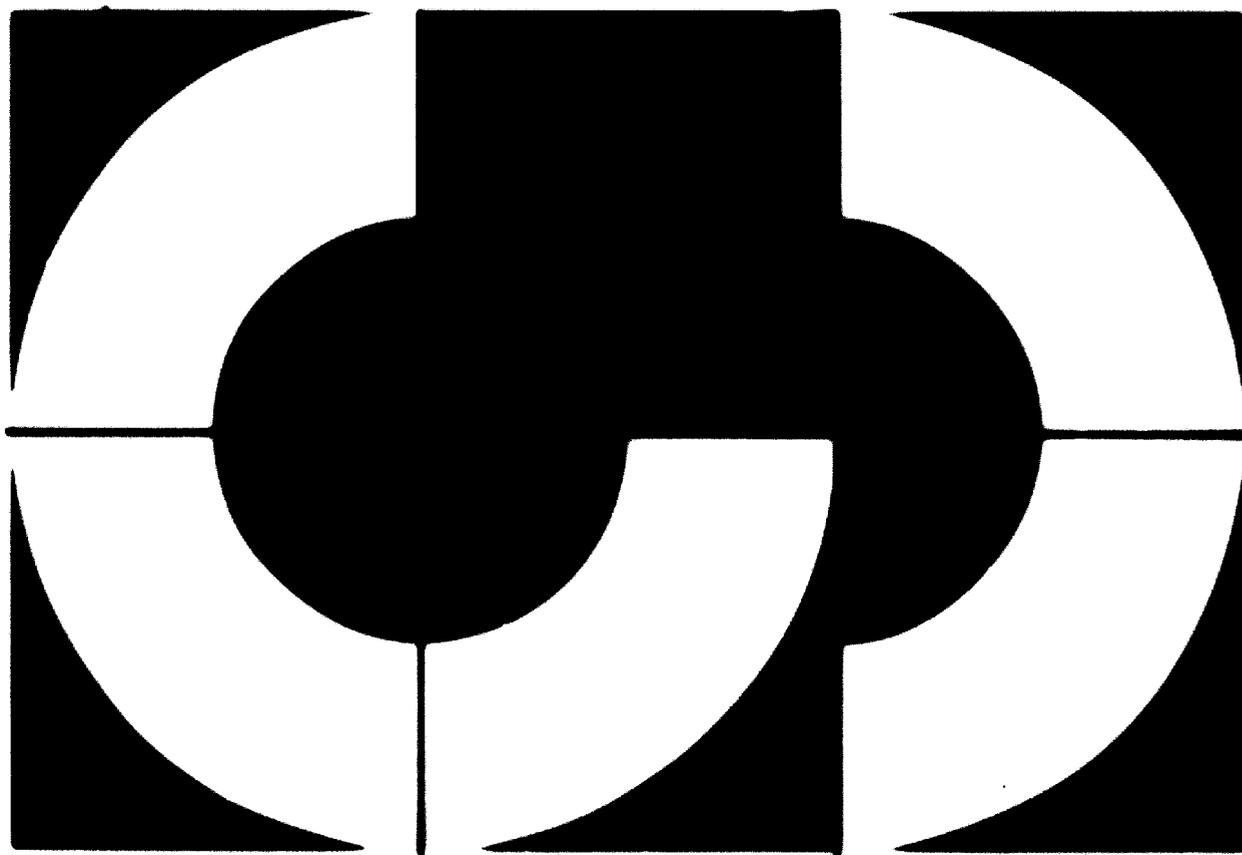
For more information about UNIDO, please visit us at www.unido.org

1/2

74ST0057

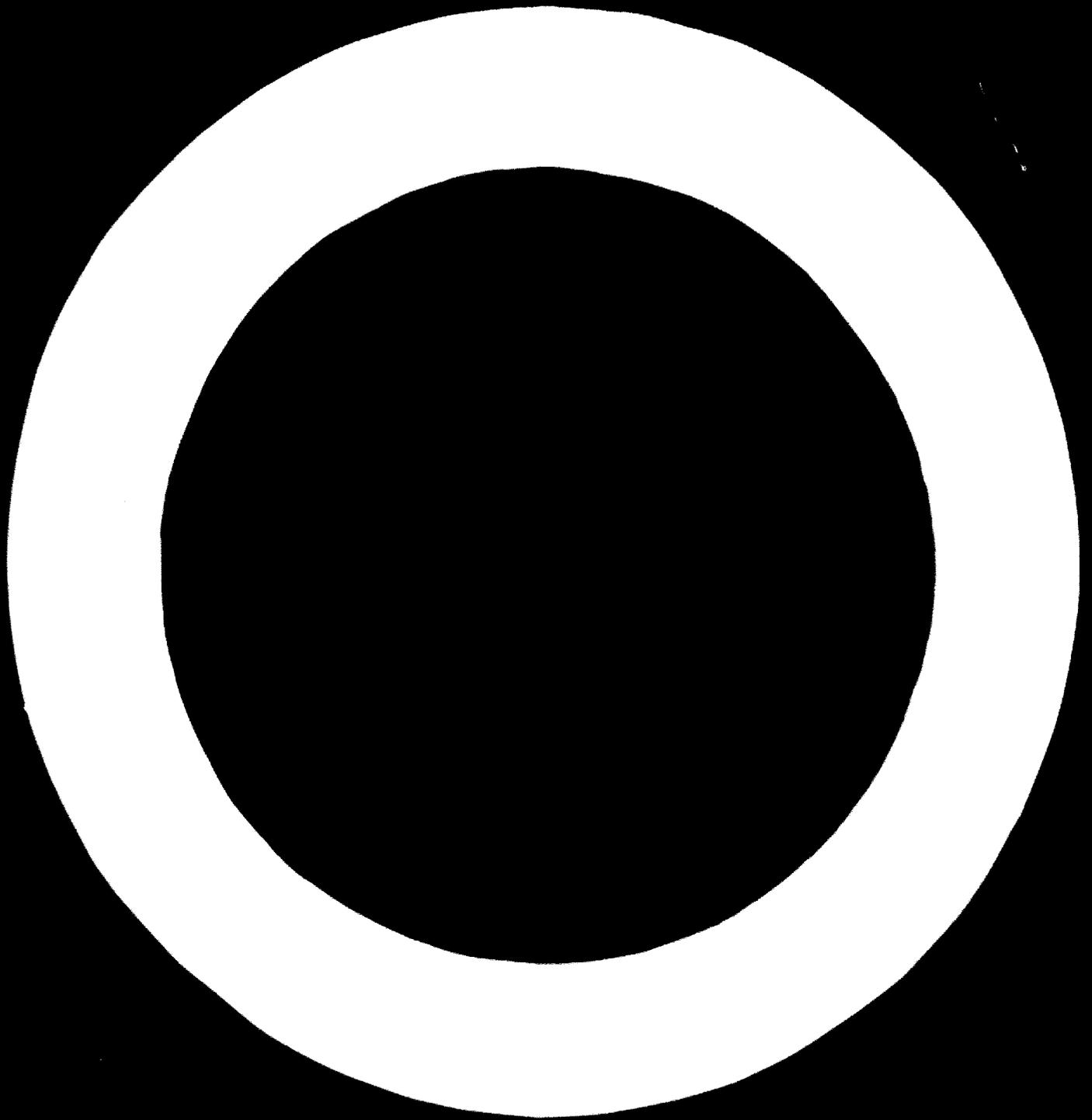


**LE RENDEMENT DANS
L'UTILISATION
DES MACHINES-OUTILS
ET LES ASPECTS CONNEXES DE LA GESTION
DANS LES PAYS EN VOIE
DE DEVELOPPEMENT**

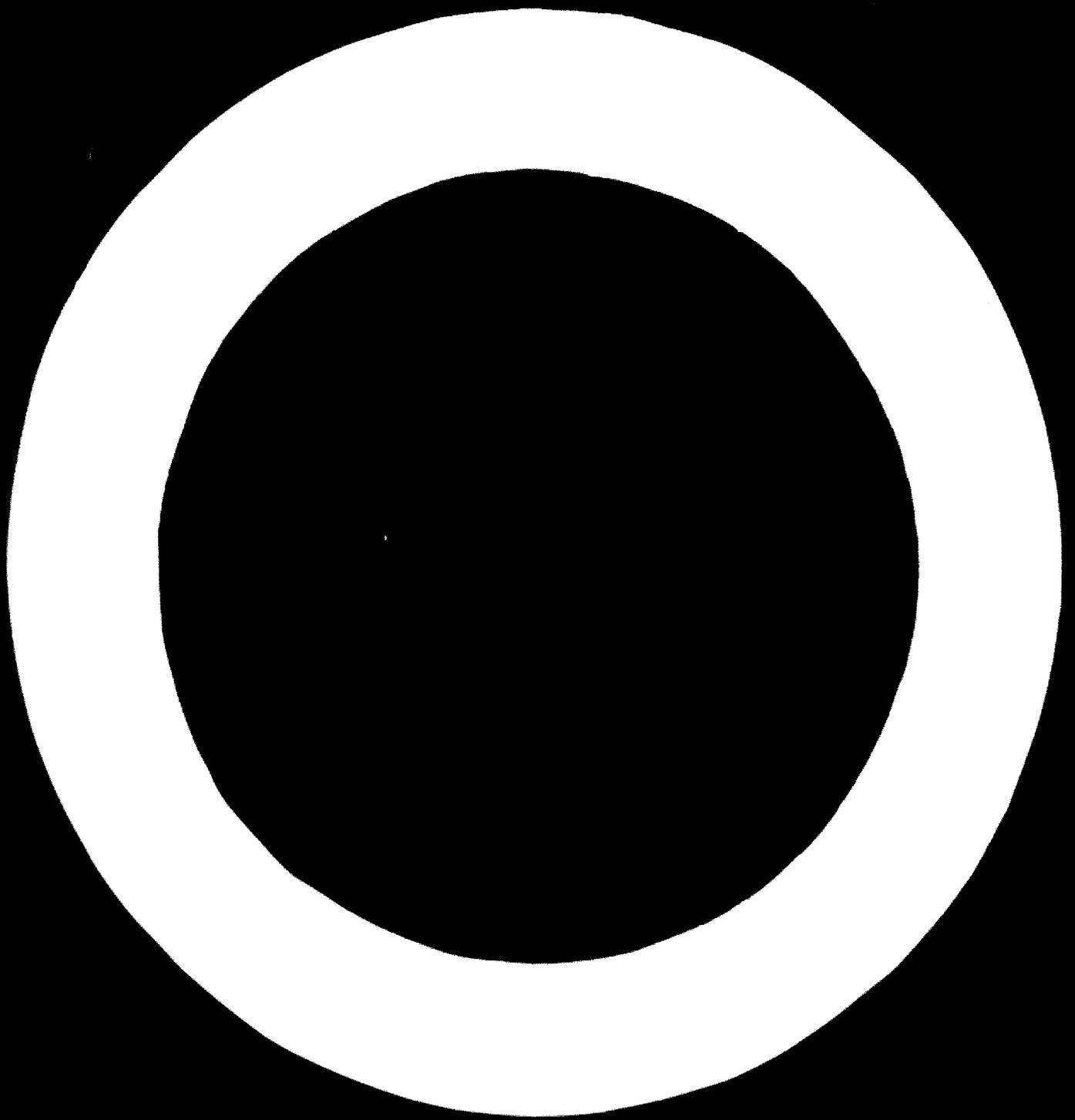


NATIONS UNIES

(101 p.)



**LE RENDEMENT DANS L'UTILISATION DES MACHINES-OUTILS
ET LES ASPECTS CONNEXES DE LA GESTION DANS LES PAYS
EN VOIE DE DEVELOPPEMENT**



ORGANISATION DES NATIONS UNIES POUR LE DEVELOPPEMENT INDUSTRIEL
Vienna

***Le rendement dans l'utilisation
des machines-outils
et les aspects connexes
de la gestion dans les pays
en voie de développement***



NATIONS UNIES
New York, 1979

La reproduction, en tout ou en partie, du texte de la présente publication (à l'exception des extraits reproduits par l'ONUDI avec l'autorisation d'autres auteurs ou éditeurs) est autorisée. L'Organisation souhaiterait qu'en pareil cas il soit fait mention de la source et que lui soit communiqué un exemplaire de l'ouvrage où sera reproduit l'extrait cité.

IB/77

PUBLICATION DES NATIONS UNIES

Numéro de vente : F.72.II.B.6

Prix : 1,75 dollar des États-Unis
(ou l'équivalent en monnaie du pays)

Préface

L'industrie des machines-outils a été l'un des principaux thèmes de travail du Colloque interrégional sur le développement des industries transformatrices de métaux dans les pays en voie de développement, réuni à Moscou en 1966 sous l'égide de l'Organisation des Nations Unies. Les machines-outils jouent un rôle décisif dans l'expansion des industries de transformation, en raison de la place occupée par le travail des métaux dans le secteur économique, dans presque tous les pays où s'est installée la production industrielle. Aux tout premiers stades du développement industriel, il est très important de choisir avec soin les machines-outils et d'en assurer efficacement l'exploitation et l'entretien. Bien que ceux des pays en voie de développement qui peuvent trouver avantage à fabriquer des machines-outils soient relativement peu nombreux, la plupart sont intéressés à la question en tant qu'utilisateurs.

Un ouvrage publié antérieurement¹ a traité du choix et des essais de réception des machines-outils. La présente publication est un manuel qui traite du rendement dans l'utilisation de ces machines, au sens large du terme : il s'agit non seulement d'assurer l'efficacité technique de l'exploitation des machines-outils (ce qui suppose des méthodes d'entretien correctes), mais aussi d'exercer les fonctions connexes de la gestion dans la recherche des coûts minimaux de production et de la mise au point de produits acceptables par les services de production et les marchés de l'entreprise.

La présente étude est le fruit de la collaboration de trois consultants avec le secrétariat de l'ONUDI : le professeur A. O. Schmidt, Department of Industrial Engineering, The Pennsylvania State University ; le professeur Frank B. Bacon Jr., Graduate School of Business Administration, Michigan State University, et M. Robert Krammer, vice-président et associé de Seatech Engineering Inc., Southfield, Michigan. M. Schmidt a une longue expérience pratique de la construction et de l'exploitation des machines-outils dans des pays où l'industrie mécanique s'est développée à des degrés divers. M. Bacon a 20 ans d'expérience de la commercialisation et de la recherche en matière de fabrication de produits des industries mécaniques dans les petites et les grandes entreprises, aux Etats-Unis et dans d'autres pays. M. Krammer a longtemps été ingénieur spécialisé dans le développement, puis ingénieur principal dans le domaine de la manutention des matériaux, et aussi consultant ; il a aussi travaillé dans d'autres pays que les Etats-Unis.

¹ Organisation des Nations Unies pour le développement industriel (ONUDI) (1971), *Choix et essais de réception des machines-outils pour le travail des métaux : manuel à l'intention des pays en voie de développement* (numéro de vente : F.71.II.B.3).

Les auteurs remercient les organisations ci-après, qui les ont autorisés à reproduire des documents, et notamment des illustrations :

1. *American Industrial Hygiene Association Journal*, Smithfield, Michigan ;
2. *Bank Administration Institute* (anciennement *National Association of Bank Auditors and Controllers*), Park Ridge, Illinois, éditeur d'*Auditgram* ;
3. *Conover-Mast Publishers, Inc.*, New York, éditeur de *Mill and Factory* ;
4. *Conveyor Equipment Manufacturers Association*, Washington, D.C. ;
5. *Crane Manufacturers Association of America, Inc.*, Pittsburgh, Pennsylvania ;
6. *Liberty Mutual Insurance Company, Research Centre*, Hopkinton, Massachusetts ;
7. *Monorail Manufacturers Association*, Pittsburgh, Pennsylvania ;
8. *Morgan-Grampian, Inc.*, New York, éditeur de *Factory* ;
9. *Rapistan, Inc.*, Grand Rapids, Michigan ;
10. *Society of Manufacturing Engineers* [anciennement *American Society of Tool and Manufacturing Engineers (ASTME)*], Dearborn, Michigan ;
11. *The American Society of Mechanical Engineers*, New York.

TABLE DES MATIERES

		<i>Page</i>
<i>Introduction</i>		1
Chapitre premier	LES DEVERS TYPES DE MACHINES-OUTILS ET LEURS APPLICATIONS	5
	L'évolution récente des machines-outils et de leur outillage	5
	Précision et rendement	6
	Machines-outils spécialisées	10
	Machines programmées et machines à commande numérique ..	11
	Procédés d'usinage non classiques	14
Chapitre II	FACTEURS TECHNIQUES DE L'EXPLOITATION DES MACHINES-OUTILS	17
	Capacité d'usinage	17
	La vitesse de la meule dans les opérations de meulage	22
	Le rôle des liquides de refroidissement	25
	Entretien et réparations	27
Chapitre III	GESTION DE LA PRODUCTION	31
	L'économie des investissements dans l'équipement productif	31
	Emplacement de l'atelier	35
	Construction des bâtiments d'atelier	38
	Aménagement de l'atelier	38
	Manutention des matériaux	42
	Planification de la production	52
	Ordonnement de la production	59
	Calcul du coût des matériaux et de la main-d'œuvre	61
	Calculs du rendement de la production	62
	Méthodes de contrôle	62
Chapitre IV	L'ORGANISATION SUR LE PLAN COMMERCIAL ET TECHNIQUE ...	70
	Problèmes spéciaux des pays en voie de développement	70
	La contribution de la conception-crétion des produits à la stratégie commerciale	71
	Les marchés d'exportation	75
	Précision des dimensions et tolérances	76
Annexe I	MÉTHODE RATIONNELLE DE SÉLECTION ENTRE LES DEVERS TYPES DE MATÉRIELS DE MANUTENTION	82
Annexe 2	NOTE SUR LE CALCUL DES COURSES D'APPRENTISSAGE	91
Références		91

LISTE DES TABLEAUX

	<i>Page</i>
1. Capacité d'usinage en relation avec la puissance en chevaux-vapeur et vitesses de coupe recommandées, pour certains matériaux	18
2. Fentes minimales pour les transporteurs à rouleaux	46
3. Poids du rouleau et capacité de transport	47
4. Résistance des chariots roulant sur des revêtements horizontaux	49
5. Poids maximaux que peuvent soulever et abaisser divers pourcentages d'ouvriers de l'industrie	50
6. Charges maximales que peuvent soulever et abaisser divers pourcentages d'ouvriers de l'industrie	50
7. Vitesses d'exploitation de grues à commande électrique, en pieds/mn..	53
8. Relation entre les gains de temps journaliers et le coût de l'équipement de manutention des matériaux au poste de travail	57

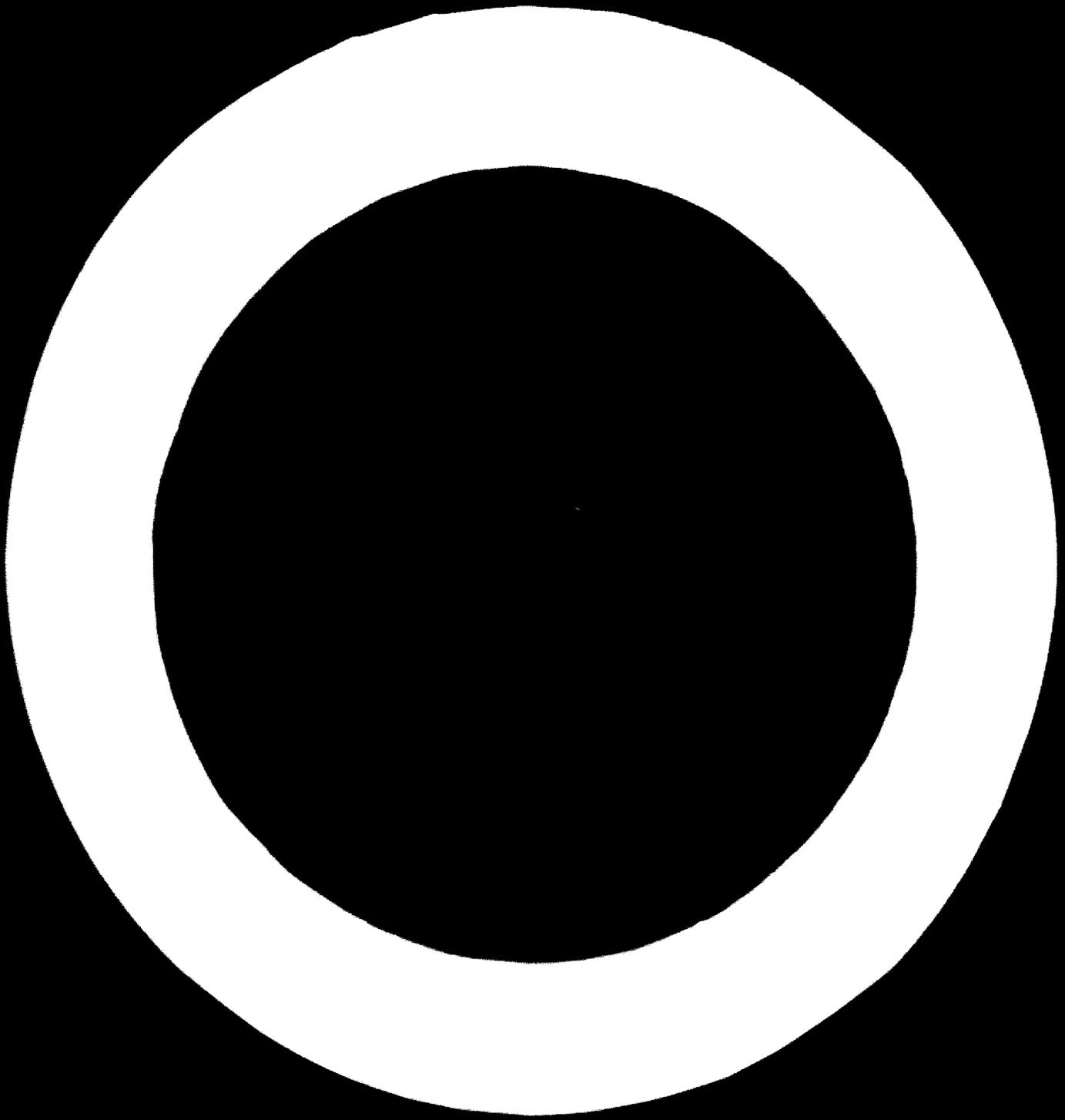
LISTE DES FIGURES

1. Rapport entre le type de machine-outil, le nombre de pièces fabriquées et le prix de revient	7
2. Détérioration et vieillissement des machines-outils	28
3. Aménagement de petit atelier de type courant	40
4. Aménagement amélioré de l'atelier de la figure 3	41
5. Largeur des transporteurs à rouleaux dans les courbes	45
6. Roulements sur monorail typique	48
7. Suspension d'un monorail	48
8. Relation entre le trafic horaire des chariots à propulsion manuelle, le poids et le coefficient de friction du roulement	50
9. Poids maximum transportable pour divers pourcentages de travailleurs de l'industrie (sexes masculin)	51
10. Quelques caractéristiques techniques des trains de rouleaux à propulsion électrique	52
11. Largeur minimale des couloirs pour les chariots-élévateurs à fourche...	55
12. Augmentation de la productivité concomitante à celle du nombre d'unités produites	65
13. Présentations ortho-linéaires des courbes d'apprentissage	66
14. Alésage, arbre, et leurs tolérances respectives	81
15. Comparaison entre un système à arbre normal et un système à alésage normal	82
16. Ajustements à alésage normal	83
17. Relation entre le temps d'alésage et la précision de la pièce	84
18. Relation coût/précision dans les opérations d'usinage, de découpage et de matriçage	85

NOTES EXPLICATIVES

Les abréviations suivantes sont utilisées dans la présente publication :

ASA	American Standards Association
DB	Dureté Brinell
UEC	Usinage électrochimique
UE	Usinage électrique
PEPS	Premier entré, premier sorti
ch	Cheval-vapeur
ACR	Acier à coupe rapide
ISA	International Federation of National Standardizing Associations
ISO	Organisation internationale de normalisation
mph	miles par heure
MQ	moyenne quadratique



INTRODUCTION

Dans un monde toujours plus ambitieux, tous les pays s'efforcent de progresser rapidement sur la voie du développement industriel. Pour ce qui est des industries du travail des métaux, cela implique l'exploitation au maximum des ressources disponibles en machines-outils aussi bien que des ressources humaines. Le stock disponible de machines-outils et de matériels connexes des usines et ateliers d'un pays en voie de développement représente un élément précieux de l'ensemble de ses ressources industrielles, en raison de la rareté des capitaux. Mais bien trop souvent on constate que les usines de constructions mécaniques des pays en voie de développement fonctionnent à un taux sensiblement inférieur à 100 % de leur capacité.

Les principales raisons de cet état de choses sont les suivantes :

Faiblesses d'ordre technique dans le processus de production, telles que l'utilisation défectueuse des outils, matrices, montages et appareils ;

Manque de matières premières indispensables, par exemple les aciers alliés spéciaux ;

Impossibilité d'importer du matériel de production, ou des outils et des instruments utilisés pour le service des machines-outils, parce que le pays souffre d'une pénurie de devises étrangères ;

Manque de personnel spécialisé capable de se servir des machines-outils ;

Planification médiocre et inefficacité de la gestion au niveau de la production ;

Caractère saisonnier du travail en rapport avec l'activité de l'agriculture, ce qui se traduit par un déséquilibre dans la répartition du travail ;

Machines-outils immobilisées en raison des délais de réparations pour cause de panne, ou parce qu'elles sont devenues périmées et attendent d'être remplacées.

Parmi ces raisons, il se peut que la deuxième et la troisième soient liées à des difficultés profondément inhérentes au développement économique du pays, difficultés dont l'examen sort du cadre de la présente étude. Les autres raisons sont étudiées dans les chapitres suivants, directement ou indirectement.

La situation des industries du travail des métaux dans les pays en voie de développement n'est en aucune façon uniforme. Il existe déjà, dans certains pays, une forte demande de divers types d'équipements industriels pour les secteurs agricoles et miniers, mais les moyens de production propres à satisfaire cette demande sont relativement peu nombreux. Dans d'autres pays, le problème consiste en ce que les moyens de production, y compris parfois la fabrication des machines-outils, ont été implantés avec une capacité supé-

rieure aux besoins du marché intérieur, de sorte qu'il serait souhaitable que les industries mécaniques développent leurs ventes à l'exportation. Il y a aussi des pays en voie de développement où la capacité de production pour le marché intérieur correspond dans l'ensemble à la demande d'une large gamme d'équipements industriels, mais où l'industrie ne peut soutenir la concurrence sur le plan international et recourt à l'application de tarifs douaniers pour se protéger contre la concurrence des importations. Il importe que la politique gouvernementale de chaque pays soit conçue en fonction de la situation particulière du pays, mais nous ne pouvons évidemment, dans la présente étude, que traiter des problèmes que posent les machines-outils sur le seul plan des principes généraux.

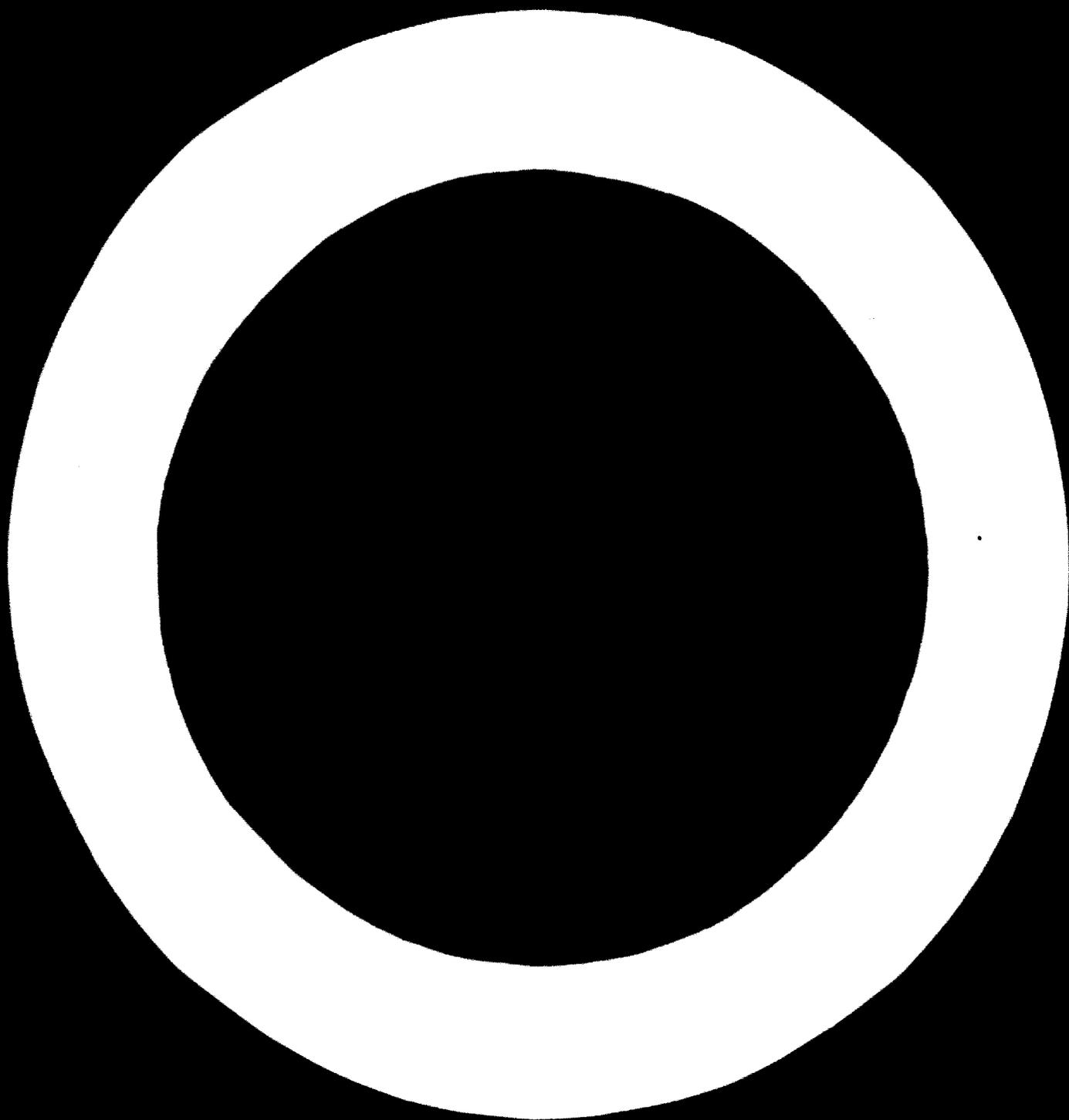
Les renseignements fournis dans la présente publication portent au premier chef sur des ateliers employant de cinq à cent personnes ; dans chaque pays, la plupart des entreprises ayant besoin d'une assistance disposent d'ateliers de cet ordre de grandeur.

Les entreprises qui recourent exclusivement à du matériel technique importé — par exemple, la plupart des filiales d'entreprises étrangères et des sociétés locales travaillant sous licence étrangère — fonctionnent souvent de la même façon que les usines principales de l'organisation mère et peuvent atteindre des niveaux de productivité équivalents. Nous n'attendons pas que la présente étude présente beaucoup d'intérêt pour ce genre d'entreprises ; en revanche, il est probable que l'entreprise indépendante qui a débuté en petit atelier pour devenir une fabrique de petite ou de moyenne importance pourra y trouver beaucoup d'utiles conseils.

Presque tous les produits métalliques fabriqués dans un pays en voie de développement le sont inévitablement aussi dans d'autres pays dont l'expérience porte sur un passé de plusieurs décennies et dont la technique est plus avancée. Peut-être tendra-t-on à croire que le pays en voie de développement ne pourra jamais soutenir la concurrence sur les marchés internationaux, en raison de la position avantageuse des autres pays. Cependant, les pratiques en vigueur dans les pays développés, en matière de fabrication, n'ont rien de magique. Le personnel de direction et les ingénieurs ambitieux, travaillant avec les contremaîtres et le personnel de production enthousiastes, que l'on trouve d'ordinaire dans les pays qui commencent à construire une économie industrielle, peuvent apporter aux usines des pays en voie de développement les améliorations nécessaires pour les rendre plus aptes à soutenir la concurrence.

Jamais on ne doit permettre que l'attention accordée aux caractéristiques techniques des machines-outils le soit aux dépens des facteurs humains dans les industries de transformation. Dans les pays industrialisés, la direction des entreprises met en œuvre de véritables programmes de formation à tous les échelons du personnel, afin d'améliorer la productivité de la main-d'œuvre dans ses diverses tâches. Si les machines-outils et autres biens d'équipement doivent remplacer le muscle dans les pays en voie de développement — parce qu'à long terme il n'existe pas d'autre moyen d'élever la productivité et le

niveau de vie —, le besoin d'y organiser la formation professionnelle du personnel s'y fait sentir plus encore que dans les autres pays. Le remplacement de l'homme par la machine ne tend pas à réduire les possibilités d'emploi, comme on le craint parfois. Au contraire, le niveau des aptitudes de la main-d'œuvre et aussi des cadres s'élève, ce qui se traduit par des progrès substantiels dans la productivité. C'est ce qui est arrivé dans les pays industrialisés. Les mêmes programmes, convenablement organisés dans les pays en voie de développement, ont donné des résultats tout aussi remarquables.



Chapitre premier

LES DIVERS TYPES DE MACHINES-OUTILS ET LEURS APPLICATIONS

L'ÉVOLUTION RÉCENTE DES MACHINES-OUTILS ET DE LEUR OUTILLAGE

La recherche constante d'un accroissement de la productivité humaine stimule les progrès dans la construction des machines-outils et en accroît les utilisations. C'est pourquoi, dans les pays industrialisés, nous voyons des machines-outils qui suppriment tout effort humain superflu. Cette mécanisation a permis d'accroître le rendement des fabrications. Le domaine principal de l'application des machines-outils spécialisées a été, jusqu'ici, la production en série, et il est généralement indéniable que des économies ont été réalisées. Mais, au cours des quinze dernières années, les fabricants de machines-outils ont surtout cherché à concevoir des machines-outils à toutes fins plus automatisées. Il est probable que cette tendance se révélera avantageuse puisque même dans les pays industrialisés les pièces produites en quantité de 5 à 100 — et non les pièces produites en grande série — représentent la part la plus importante de la production globale.

Dans les usines les plus récentes et les plus modernes de l'industrie aérospatiale, il ne s'agit pas de produire en grande série, mais de fabriquer en quantité limitée des pièces compliquées, faites à partir d'alliages spéciaux difficiles à travailler. Pour répondre à cette demande, il a fallu mettre en point des machines-outils éliminant la plus grande partie des temps morts, ainsi que la fatigue de l'ouvrier, génératrice d'erreurs. Dans ce processus, les éléments de contrôle des machines-outils ont pris de l'importance : les techniques de commande numérique et des ordinateurs permettent d'obtenir une définition mathématique des contours et de les reproduire ensuite automatiquement sans tracé préalable. Cependant, ces machines-outils, même si elles coûtent très cher, sont plus rentables que les modèles plus anciens utilisés dans beaucoup d'ateliers travaillant les métaux, à condition de les employer comme il convient. Toutefois, même aux États-Unis et en Europe, la plupart des machines-outils sont encore fabriquées conformément à des plans de type standard, sans intervention de la commande numérique. Pour utiliser de façon satisfaisante et profitable tous les types de machines-outils, il importe de prévoir la planification et les outils dans le détail. Il en est ainsi, particulièrement, des machines-outils à commande numérique, où l'usinage est souvent programmé pour un grand nombre de changements d'outils, intervenant automatiquement en cours de fabrication d'une pièce compliquée.

Il n'est pas possible de recommander sans réserves les machines-outils à commande numérique dans les pays en voie de développement. Les machines de conception moderne exigent que l'usine, la programmation et les services d'outillage soient solidement organisés, ce qui est rare dans les pays en voie de développement. Cependant, on a déjà produit en grandes quantités des machines-outils à commande numérique simple bi-axiale, et ces machines sont aussi robustes que rentables en service normal. Avant d'acquérir ce matériel, notamment en vue de son utilisation dans un pays en voie de développement, il est souhaitable de vérifier que les commandes ont été soumises à des épreuves pratiques dans des conditions de climat similaires.

L'utilisation générale des outils au carbure a introduit un renforcement des exigences en matière de puissance et de précision des machines-outils, ce qui a entraîné une amélioration de la qualité par rapport aux outils fabriqués à partir d'autres matériaux.

On peut observer que les machines-outils utilisées dans les pays en voie de développement sont en général de faible puissance, soit 3 ch au plus. On ne prête guère attention au fait qu'une machine-outil à grande puissance ne demande aussi qu'un opérateur et occupe la même surface, mais fournit une production plusieurs fois plus élevée (dans l'ensemble proportionnelle à l'augmentation de puissance) si on l'équipe avec un outillage au carbure convenablement choisi. Les progrès sans cesse accomplis dans la technique de l'usinage au carbure depuis plusieurs décennies ont créé une situation dans laquelle, souvent, les machines-outils d'usage courant, particulièrement dans les pays en voie de développement, ne sont pas celles qui conviennent le mieux aux besoins de la production.

On a cru à tort que l'on pouvait mécaniser même les opérations d'usinage de l'acier les plus difficiles en utilisant des outils au carbure avec un angle de dégagement négatif à des vitesses de coupe très élevées. Nombreux sont les rapports excessivement enthousiastes sur l'utilisation de cette technique, qui ont contribué à répandre cette impression fautive. On publie cependant actuellement beaucoup d'utiles renseignements tirés de l'expérience pratique de la production, et l'on procède, dans les laboratoires industriels, à l'étude expérimentale des outils.

Il existe un lien étroit entre une conception satisfaisante de l'outil et l'utilisation efficace des machines-outils. Ce n'est ni en combinant une machine puissante et bien conçue avec un outil faible et inadéquat, ni en combinant un bon outil au carbure avec une machine insuffisamment puissante et précise que l'on peut obtenir une production optimale.

Même la plus coûteuse des machines-outils peut produire à des prix très concurrentiels, à condition d'être convenablement outillée et exploitée en opération continue avec 3 équipes, 7 jours par semaine. Il faut, à cette fin :

Un plan de travail bien conçu ;

Un atelier organisé, notamment sur le plan des services de communications, de contrôle et d'emménagement ;

Des services d'entretien bien organisés.

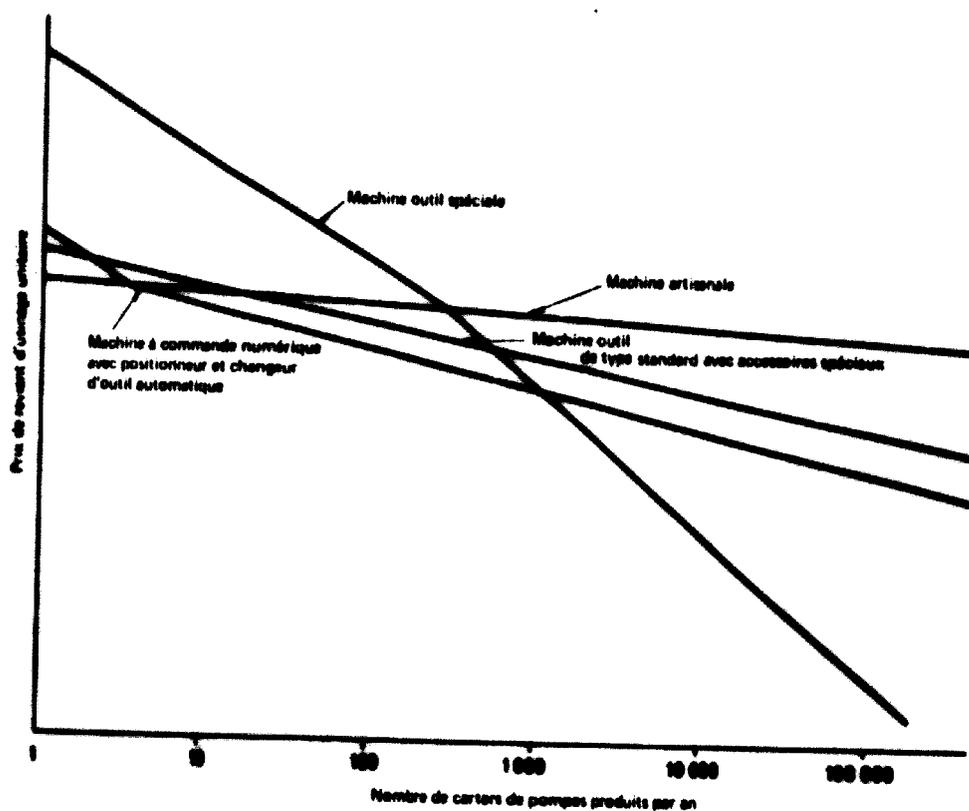


Figure 1. Rapport entre le type de machine-outil, le nombre de pièces fabriquées et le prix de revient

Si, cependant, ces trois conditions ne sont pas remplies, la machine risque de travailler à perte.

La figure 1 ci-dessus illustre, sous forme de graphique, les mérites comparatifs de divers types de machines-outils en prenant pour base les coûts unitaires de production de carters de pompes. Il s'agit de carters en fer malléable, qui demandent des opérations de fraisage, alésage, usinage, perçage et filetage dans diverses positions et dans des tailles diverses. Il faut, au total, 30 outils pour réaliser autant d'opérations.

C'est le nombre de pièces à fabriquer qui détermine le choix de la meilleure machine. S'il s'agit de ne produire qu'un ou deux carters de pompes, les techniques d'atelier utilisant des machines-outils standards sont généralement préférables. On peut déjà envisager de créer un modèle et d'accoupler des accessoires spéciaux à des machines-outils de type standard lorsqu'il faut fabriquer au moins 10 carters. Si l'on dispose d'une machine à commande numérique avec changeur d'outils automatique, on réduira les coûts d'usinage pour une série de plus de 5 pièces. Une demande plus forte peut justifier l'utilisation d'une machine spéciale. Plus élevé est le nombre de pièces produit par an, et plus bas est le coût unitaire de l'usinage. Même en recourant aux méthodes artisanales, les frais d'usinage baisseront régulièrement un peu au fur et à mesure qu'augmentera la production, parce que, avec le temps, l'opé-

rateur apprendra à mieux utiliser la machine-outil et l'outillage, mais les coûts resteront relativement élevés.

Dès que le nombre de pièces à produire justifie l'achat d'appareils spéciaux, le prix de revient unitaire peut être fortement réduit. Mais, pour de petites quantités, les machines à commande numérique sont encore plus rentables que les machines-outils de type standard équipées avec des accessoires spéciaux.

S'il s'agit d'une pièce unique de grande valeur, il ne peut même que l'utilisation d'une machine à commande numérique soit justifiée pour ne produire qu'une seule pièce, parce que cette machine supprime totalement les erreurs humaines et le risque d'envoi de la pièce usinée à la ferraille. Après avoir programmé toutes les opérations, il peut être nécessaire de les vérifier du point de vue de la séquence, des dimensions et de la précision, par comparaison avec un modèle. Il vaut mieux appliquer cette technique que de courir le risque de gâcher une pièce dans la confection de laquelle plusieurs milliers de dollars ont été investis sous forme de matériel et de frais d'usinage. Cependant, pour ce qui est de la production en quantités vraiment élevées, une machine-outil spéciale sera la solution la plus rentable, qu'il s'agisse de carters de pompes ou de toute autre pièce.

PRÉCISION ET RENDEMENT

Les nombreux types de machines-outils standards peuvent se classer comme suit :

- Catégorie 1** Machines-outils de haute précision pour la fabrication des instruments et l'atelier. Certaines de ces machines doivent être installées dans des locaux climatisés, et être montées sur des isolateurs ou des fondations spéciales, faute de quoi il pourrait être difficile d'en maintenir l'extrême précision.
- Catégorie 2** Machines-outils de précision pour l'atelier et pour la production à tolérance étroite.
- Catégorie 3** Machines-outils pour l'atelier d'entretien et les productions accessoires.
- Catégorie 4** Machines-outils pour réparations à l'extérieur et pour l'atelier d'assemblage.

Il se peut qu'à première vue les machines-outils de ces quatre catégories se ressemblent et présentent les mêmes caractéristiques, avec la même puissance. Elles diffèrent dans la qualité de leur production ainsi que dans le travail fourni pour leur construction, et il ne faut les employer que dans les strictes limites de leur précision. L'obtention de pièces de précision avec une machine de la catégorie 4 exigerait de la part de l'opérateur une habileté extrêmement rare, et le produit obtenu serait d'un prix de revient supérieur à celui du même travail effectué par la machine-outil de la catégorie 2. En revanche, la machine de catégorie 2 coûterait deux fois plus qu'une machine de la catégorie 4, de dimensions et de puissance identiques, pour une fonction semblable.

La nécessité de maintenir un niveau élevé de précision entraîne l'élaboration d'un programme d'entretien précis, en ce qui concerne les accessoires et l'outillage ainsi que les machines-outils. Le chapitre II traite de l'organisation de l'entretien et des réparations. Il importe aussi de prendre des mesures propres à réduire l'usure au minimum. On devra notamment veiller à éviter des travaux dépassant la capacité de la machine-outil pour ce qui est des dimensions et du poids.

L'émission incontrôlée de limaille a vite fait de détériorer les machines-outils. Souvent on installe les rectifieuses-surfaceuses, les rectifieuses pour cylindres et les affûteuses sans prendre les dispositions nécessaires au ramassage de la poussière de meulage, qui se dépose ensuite sur les autres machines de l'atelier. On ne distingue pas de dégâts au début mais, en un an, toutes les machines-outils de précision sont affectées au point que les surfaces de glissement s'usent et que les paliers prennent du jeu. Les fines particules de poussière de meulage se mélangent au lubrifiant et agissent comme une pâte à roder.

Les mêmes dégâts peuvent se produire dans un atelier de précision situé dans une zone désertique, ou même exposé à des vents provenant d'un lointain désert. On observe alors que des machines-outils de précision peuvent, dans un délai relativement court, être détériorées au point de n'être plus réparables. Il importe donc de veiller tout particulièrement à faire en sorte qu'aucune ouverture dans les murs, les toits ou les fenêtres ne laisse pénétrer un air chargé de poussières abrasives.

Les machines-outils sont le principal investissement dans un atelier de travail des métaux. Il importe donc de comparer avec le plus grand soin les normes de rendement de divers modèles avant d'acheter une machine-outil et de vérifier très soigneusement aussi que la machine finalement achetée correspond aux normes indiquées par le fabricant¹.

La production d'une machine-outil se juge surtout à sa capacité d'ébarbage (mesurée en pouces cubes par minute) et à sa précision en travail à pleine charge. Pour les rectifieuses et les finisseuses, le rendement peut s'exprimer par le fini obtenu (mesuré en micro-pouces) sur un certain nombre de pouces carrés de surface par minute. Les machines à pointer et autres machines de haute précision sont définies par la dimension des pièces et par les tolérances que l'on peut obtenir.

Lors de l'achat d'une nouvelle machine-outil, il convient d'obtenir du fabricant un rapport d'essai. Ce rapport comprend des données sur la précision de fonctionnement, des porte-outil et des outils, et sur le comportement des outils. Les données figurant dans ces rapports d'essais sont très standardisées. Une bonne machine-outil peut supporter sans dommage une surcharge occasionnelle de 100 %.

Lorsqu'une nouvelle machine-outil a été installée dans la chaîne de production, il convient de l'observer de temps à autre pour en vérifier le

¹ Voir ONUDI (1971), *Choix et essais de réception des machines-outils pour le travail des métaux* (numéro de vente : F.71.II.B.3).

fonctionnement en atelier. Beaucoup d'entreprises s'abstiennent de mettre en place une nouvelle machine immédiatement, car elles préfèrent l'installer pendant quelque temps dans une section expérimentale. On peut ainsi mieux évaluer son rendement et avoir l'occasion de mettre au point des méthodes de production améliorées, en tenant compte des possibilités de la machine. Pendant la période expérimentale, il est préférable de confier la machine à l'opérateur qui l'utilisera par la suite à l'atelier de production. Il doit connaître à fond le mode d'emploi publié par le fabricant. En l'absence de telles instructions, ce qui est fréquent dans le cas des machines de seconde main, il importe de les demander par écrit au fabricant.

MACHINES-OUTILS SPÉCIALISÉES

Lorsque le nombre de pièces à produire est suffisamment élevé, il peut être justifié, du point de vue de la rentabilité, d'investir soit dans une machine-outil spécialement conçue à cette fin, soit dans un ensemble de machines-outils standards, usinant un seul type de pièces dans une série d'opérations successives. Dans l'un ou l'autre cas, il est indispensable de prévoir une certaine période d'essai et de « dépannage » après la mise en place. L'opération demandera plus de temps que l'essai en atelier d'une machine-outil standard.

Lorsqu'il s'agit d'une machine-outil spécialisée construite par le fabricant pour constituer une unité mécanique, il convient de demander un essai de réception complet avant l'expédition, et de faire usiner un grand nombre d'échantillons. Une machine-outil spécialisée présente inévitablement des caractéristiques nouvelles, non vérifiées, à la différence d'une machine-outil standard, construite uniquement avec des éléments qui se sont révélés sûrs au cours de nombreuses années de service en atelier. Il sera beaucoup plus facile de corriger un quelconque défaut chez le constructeur, avant l'expédition, que d'attendre que la machine soit installée dans l'atelier de l'acheteur.

Dans la plupart des cas, l'outillage de service des machines-outils spécialisées est standard. S'il faut des outils spéciaux, il convient de consacrer autant de travail et d'attention aux caractéristiques des outils qu'à celles de la machine. Lorsqu'il s'agit d'accessoires plus compliqués ou d'un outillage de mise en forme, il convient que l'outillage soit conçu, construit et essayé avant de passer au stade de la conception de la machine-outil. Il est déjà arrivé qu'une machine-outil spécialisée ne fournisse pas le rendement attendu parce qu'il était impossible d'utiliser les outils prévus pour cette machine. La mise au point des outils est aussi primordiale dans les cas où il faut mettre au point une broche spéciale ou lorsque le reste de la machine doit être construit autour de l'outillage spécial.

Entre autres points à examiner de près dans la structure des machines-outils spécialisées, figurent la facilité du graissage et du service des servomécanismes hydrauliques, pneumatiques et électriques, qui doivent aussi être accessibles pour les contrôles de routine. Il doit être possible de réparer sans démonter toute la machine. Une négligence des besoins du service au stade de la conception des appareils se traduit par un coût très élevé des répara-

tions, même les plus petites, et oblige à arrêter toute la machine pour procéder à ces réparations.

La meilleure des machines-outils, qu'elle soit de type standard ou spécial, peut devenir inefficace si son socle est mal posé. Lorsque le plancher de l'atelier repose sur de la terre ferme, il doit être possible de placer la machine directement à niveau avec du ciment ou des vis de calage, et l'on peut en général s'attendre à un fonctionnement satisfaisant. Il ne faut toutefois pas perdre de vue que les vibrations du plancher et des bâtiments, dues par exemple au fonctionnement des marteaux-pilons, au passage des camions sur une route voisine, ou même au fonctionnement des grues, peuvent affecter la qualité du fini superficiel et la précision dimensionnelle. Il est alors possible, en général, d'améliorer la suspension de la machine-outil grâce à des montures élastiques en caoutchouc ou en fibre de verre, ou à des ressorts ou éléments pneumatiques. Il conviendra de prendre des précautions spéciales si le sol de l'usine repose sur un fond marécageux ou sur du sable instable. Peut-être le constructeur de machines-outils pourra-t-il faire des recommandations au sujet du type de fondations nécessaires dans des situations difficiles, afin de stabiliser la machine-outil en cas de perturbations extérieures, et aussi d'isoler les vibrations provenant de l'intérieur de la machine. Cependant, l'installation de fondations spéciales augmente le prix de revient et se traduit d'ordinaire par une réduction de la mobilité de la machine, qualité qui, cependant, pourrait être souhaitable en cas d'évolution de la production.

Lorsqu'il faut utiliser un immeuble à plusieurs étages, les machines les plus lourdes doivent, pour des raisons évidentes, être installées au rez-de-chaussée. Les machines les plus légères peuvent aller aux étages supérieurs, qui fléchissent toujours un peu sous le poids des machines. Tout plancher de type courant est sujet à des vibrations de basse fréquence — environ 20 périodes par seconde. Si l'on utilise des montures souples, il faudra qu'elles aient une fréquence propre différente de celle du plancher, afin de supprimer la résonance. En installant des montures spéciales sous les machines-outils, il devient possible de trouver des solutions de rechange au problème de l'installation de l'usine.

MACHINES PROGRAMMÉES ET MACHINES À COMMANDE NUMÉRIQUE

Le fait que la plupart des machines-outils ne travaillent effectivement qu'à 20 ou 50 % de la durée d'exploitation disponible a posé un énorme problème aux constructeurs de machines-outils modernes. L'utilisation plus fréquente des outils au carbure a rendu plus précieux encore le temps d'exploitation perdu dans les opérations de montage, de changement des outils, de manutention et de mise en place des pièces. Les constructeurs ont réagi en mettant au point des dispositifs d'alimentation à commande mécanique, des réglages de vitesse pour les broches, des vis anti-recul, des dispositifs de translation, d'arrêt et de déclenchement rapides. Après avoir bénéficié de ces progrès, les machines-outils programmées ont évolué pendant et après la Seconde Guerre mondiale. Au nombre des caractéristiques des premiers

modèles, figuraient le démarrage et l'arrêt automatiques de la broche principale ; des plateaux à mandriner munis d'un dispositif mobile de bloeage et de translation rapide ; et des dispositifs d'avance dans le sens longitudinal, vertical et transversal. Les séquences d'opération nécessaires étaient généralement programmées grâce à l'insertion de fiches en certains points d'enclenchement du tableau programmeur dans le dispositif de commande.

Une autre technique, consistant à adjoindre des groupes d'analyse à la machine, s'est développée au cours des dernières années, principalement parce que le besoin de matrices en plus grand nombre et de plus grande taille se faisait sentir. Dans ce type de machines-outils, le trajet de l'outil est guidé par un gabarit ou forme-maitresse. Cette technique a progressé en même temps que l'industrie de l'automobile après la Première Guerre mondiale et la rareté relative des bons constructeurs d'outils et de matrices a contribué à en répandre l'emploi.

Pendant et après la Seconde Guerre mondiale, l'industrie aéronautique s'est rapidement développée, pour ce qui est du volume et des raffinements techniques. Il a fallu fabriquer quantité de pièces compliquées, faites de matériaux à haute résistance, et usinées avec une grande précision. Il a donc fallu concevoir de nouvelles machines-outils permettant d'obtenir un degré élevé de précision automatiquement ou tout au moins sans avoir recours à un mécanicien hautement spécialisé pour servir d'opérateur. Telle a été l'origine des machines-outils à commande numérique. Comme c'est le cas pour la plupart des progrès techniques, le principe du fonctionnement des divers appareils de commande n'est pas nouveau. S'agissant de commande d'une machine par des valeurs numériques ou des symboles, on peut remonter au métier Jacquard et aux pianos mécaniques à rouleaux de carton perforés. Les avances automatiques et les chariots transporteurs de pièces existaient déjà dans certains types de tours-revolvers automatiques vers 1914. On avait aussi maintes fois essayé à cette époque de contrôler le déplacement de l'outil et les dimensions de la pièce en cours de fonctionnement par des commandes automatiques et numériques. Dans la plupart des cas, les machines-outils n'avaient pas le degré élevé de précision et de reproductibilité requis, parce que les servomécanismes d'alors n'étaient pas en mesure de répondre à ces besoins. Cependant, de petits servomécanismes électrohydrauliques puissants ayant été adoptés pour l'aviation, les constructeurs de machines-outils les ont adoptés, en même temps que les commandes électroniques.

Les systèmes de commande numérique transforment des symboles qui se trouvent sur des cartes ou des bandes perforées, ou qui sont inscrits sur des rubans magnétiques et fournissent des impulsions électriques qui commandent les diverses fonctions mécaniques de la machine-outil. De nos jours, la plupart des systèmes de contrôle numérique utilisent une bande de papier perforée, standardisée, large d'un pouce, à huit pistes, qui entre dans le boîtier de commande de la machine-outil. La commande numérique est une forme d'automatisation qui réduit la durée de la mise en place, choisit les outils en vue des opérations successives et commande leur action. On y fait

généralement appel pour produire des pièces qui doivent être identiques. La bande porteuse des données de commande peut se conserver indéfiniment jusqu'à ce qu'on en ait besoin pour d'autres opérations de commande, ou peut être expédiée à distance, à une usine qui s'en servira pour produire des pièces de même forme et d'égale précision.

On peut maintenant réaliser mécaniquement et contrôler sur bandes, par l'intermédiaire d'un groupe de commande indépendant, tous les mouvements d'une machine-outil que l'opérateur provoquait autrefois en tournant une manivelle ou un volant. Avant de pouvoir perforer une bande, le programme doit déterminer toutes les opérations à effectuer, les outils nécessaires et leur montage, ainsi que tous les mouvements de la machine. Une broche ou un plateau se déplacent selon un, deux, ou trois axes. Une fraiseuse ou une perceuse a généralement des « commandes bi-axiales », c'est-à-dire que les mouvements du plateau sont commandés dans le sens longitudinal et dans le sens transversal. Si la broche d'une fraiseuse ou d'une perceuse verticale est aussi commandée pour ce qui est de la profondeur de la coupe ou du trou, on dit que la machine est à « commande tri-axiale ». Ces machines, dans lesquelles des commandes numériques peuvent imposer des changements de position à l'outil ou à la pièce dans un ordre préétabli, afin de faire certaines opérations en des points déterminés, sont dites « programmées en points fins ».

Il existe des machines encore plus compliquées, qui sont dotées de commandes à piste continue, permettant de faire suivre à l'outil une courbe déterminée, qui peut être définie en termes mathématiques, comme c'est le cas pour les cames et autres structures semblables. La machine-outil peut aussi disposer d'une commande de mouvement circulaire — par exemple, un mouvement autour d'un axe vertical —, auquel cas on peut dire qu'elle est à « commande quadri-axiale » ; et si elle commande aussi les mouvements d'un plateau ou d'une broche autour d'un axe horizontal, on peut dire qu'elle est à « commande penta-axiale ».

Pour les machines à commande numérique, la préparation des outils doit être minutieuse. Il importe de régler les outils avec précision, et les conditions du réglage sont énumérées en code, ainsi que toutes les opérations à effectuer, dans leur ordre optimal, sur un plan de travail qui sert de base à l'établissement de la bande perforée, les programmes les plus difficiles étant préparés avec l'aide d'une calculatrice numérique. Grâce à ces techniques, il est possible d'usiner des pièces compliquées avec une précision accrue, sur des machines fonctionnant en continu et avec des programmes spécialement conçus pour les fins poursuivies. Les machines les plus souples font le travail de plusieurs types de machines-outils — alésage, perçage, fraisage, filetage, tournage et finissage. Elles sont équipées de dispositifs automatiques pour les changements d'outils, et il importe que les outils utilisés soient bien construits et bien réglés. Ces conditions étant réalisées, une machine unique équivaut, du point de vue des investissements, à un ensemble de fabrication complet, et c'est sous cet angle que l'utilisateur doit la considérer. Dans un pays en voie de développement, l'utilisateur doit juger de l'utilité et de la valeur d'une machine-

outil moderne en partant de considérations qui diffèrent de celles qui inspirent son homologue en pays industrialisé. Celui-ci peut généralement prévoir de nombreuses commandes de pièces compliquées, il est rare en revanche que ce soit le cas pour le premier.

L'utilisation de la commande numérique ne se limite pas aux machines-outils qui enlèvent le métal en copeaux. Il existe d'autres exemples d'utilisation, notamment les presses multiples à pointer, les bobineuses, les machines à découper au chalumeau et les tréfiluses. Souvent, même les machines de transfert sont équipées de commandes numériques, et le nombre des applications augmente de jour en jour.

L'exploitation de machines-outils à commande numérique exige certaines connaissances nouvelles que l'on peut développer très efficacement et dans un temps relativement court en accordant une promotion à des ouvriers déjà employés à la chaîne de production. En règle générale, il est exigé moins de connaissances mécaniques de l'opérateur, qui devient alors le surveillant d'une production accrue provenant de la même surface d'atelier. Le bon ouvrier d'outillage, qui a été responsable de machines-outils de type classique, qui connaît les divers types d'outillage, de matériaux pour les outils et de porte-outil, et qui est au courant des rythmes d'alimentation et des vitesses de travail, peut devenir un bon programmeur de machines à commande numérique, après une mise au courant de relativement courte durée. Une fois formés, ces hommes représentent un précieux investissement en personnel, difficile à remplacer. Une entreprise doit donc veiller à leur assurer la continuité de l'emploi, faute de quoi elle subira des pertes difficiles à compenser.

PROCÉDÉS D'USINAGE NON CLASSIQUES

La technique traditionnelle ou classique selon laquelle une machine-outil enlève du métal consiste à enlever de minces lamelles ou des copeaux de la pièce travaillée. Au cours de la dernière décennie, l'on mit au point plusieurs procédés importants qui ne reposent pas sur la coupe mécanique : ils la remplacent par des actions chimiques et électriques. Collectivement, ces procédés sont désignés par le terme « usinage non classique ».

Pour le moment, l'usinage ressortissant à ces techniques représente une faible fraction de l'ensemble de ce qui est fait dans les pays industrialisés, et une part négligeable ou inexistante du travail fait dans la plupart des pays en voie de développement. Leur utilisation marque toutefois des progrès avec la demande de produits aux formes compliquées, fabriqués à partir de matières premières très résistantes. C'est le cas, particulièrement, dans les industries aérospatiales et dans l'électronique. Ces techniques tendent à s'appliquer dans les cas où des outils de coupe classiques ne fonctionneraient pas ou auraient une durée d'activité si courte que leur utilisation ne serait pas rentable, et aussi dans des applications pour lesquelles il n'existe pas d'outils de coupe. Plusieurs de ces procédés non classiques ont été développés jusqu'à pouvoir concurrencer les techniques traditionnelles d'enlèvement du métal et même, dans certaines circonstances, jusqu'à devenir plus rentables.

Le principe de l'usinage par décharge électrique (UDE) est bien connu et les premières applications en ont été faites en URSS. Il consiste à maintenir un faible écart entre l'outil (une électrode porteuse d'un courant pulsé à haute fréquence) et la pièce travaillée, les deux objets étant submergés dans un fluide diélectrique. La décharge électrique entre l'électrode et la pièce a un effet d'érosion sur cette dernière. On entretient la circulation des fluides afin d'éliminer les débris. L'UDE sert à faire de grosses matrices d'une seule pièce pour l'industrie automobile. Les électrodes peuvent être fabriquées dans certains métaux et alliages, ou en graphite. La pièce travaillée doit être conductrice. Lorsqu'il existe déjà une partie mâle, on peut la munir d'une pastille spéciale et l'utiliser pour le fraisage de la matrice. Le taux d'enlèvement du métal et le fini superficiel peuvent être commandés dans ce procédé qui permet de parvenir au même degré de précision qu'en atelier.

L'usinage électrochimique (UEC) est une technique complexe d'usinage électrolytique, qui a été appliquée pour la première fois au meulage de matériaux difficiles à usiner, et notamment aux aciers au carbure. Son principal avantage résidait dans une utilisation plus efficace de la meule de diamant, ce qui se traduisait par un abaissement du prix de revient. L'abrasif incorporé au métal dans la meule à affûter maintient un écart entre l'outil et la pièce à travailler. Le procédé lui-même est à l'opposé de l'électroplastique, et il n'y a pas d'usure de l'outil. On fait passer rapidement un courant continu dans un électrolyte entre l'outil (cathode) et la pièce à travailler (anode). L'UEC est aussi largement utilisé pour les opérations de détournage des matrices et pour obtenir des formes spéciales, telles que des pièces percées de trous allongés, non circulaires. La précision de la pièce achevée dépend de la précision dimensionnelle et de la qualité de la surface de l'outil (cathode), fabriqué en métal anti-corrosion, de la vitesse d'écoulement de l'électrolyte entre l'outil et la pièce travaillée pour évacuer la boue qui se forme, et de la capacité courante du matériel. Une autre application du procédé UEC consiste à fabriquer des pièces de forme géométrique irrégulière. La précision peut atteindre 0,0002 pouce dans des circonstances favorables. Il n'y a pas d'étincelles ou d'arcs provoquant un échauffement localisé de la surface usinée, et il ne se forme pas de bavures. En raison du prix élevé du matériel et de l'usinage, le procédé n'est généralement pas utilisé pour la petite série.

Le fraisage chimique est utilisé dans l'industrie depuis environ 30 ans et le matériel nécessaire à cette technique a été commercialisé au cours des dix dernières années. On utilise une solution acide ou alcaline, afin de graver un tracé déterminé sur la pièce à travailler ou à l'intérieur de celle-ci. On peut obtenir le tracé souhaité en recouvrant le reste de la pièce avec une pellicule résistant à l'action chimique et en n'exposant que les parties à graver. Un autre procédé de gravure utilise les techniques de la photographie, sous les noms de photoprofilage, photofabrication, découpe photographique ou même, ce qui peut prêter à confusion, d'usinage chimique. Dans ce procédé, on applique sur la pièce un revêtement photosensible, que l'on expose ensuite à la lumière à travers un négatif; on lave ensuite le revêtement de la partie

à graver dans un révélateur. On peut produire de petites pièces à partir de presque tous les métaux en tôles minces, en grandes quantités, relativement vite, et il est fréquent que le procédé puisse concurrencer l'étampage.

L'application des ultrasons à l'usinage de précision a progressé en même temps que les besoins en pièces percées ou profilées à un prix raisonnable, en matériaux non usinables tels que le carbure au tungstène, les céramiques, le verre et le quartz. L'élément principal de ce matériel est un transducteur à magnétostriction, qui transforme les vibrations électromagnétiques à haute fréquence en vibrations mécaniques. Le porte-outil est accouplé au transducteur et on fait ainsi vibrer à haute fréquence et à basse amplitude un outil de la forme cherchée en contact avec la pièce à travailler, dans une boue abrasive. L'outil est généralement en acier doux ou inoxydable, et l'abrasif le plus courant est le carbure de bore pulvérulent.

Dans le procédé d'usinage en faisceau d'électrons, les électrons sont accélérés et dirigés en un faisceau étroit sur un point déterminé, par le moyen d'un champ magnétique. Le faisceau d'électrons chauffe, fond ou vaporise un secteur déterminé de la pièce à usiner, qui se trouve d'ordinaire dans une chambre à vide. Le faisceau peut découper des trous et des fentes de l'épaisseur d'un cheveu, ou faire une soudure profonde et étroite. Certaines des premières applications ont consisté à percer de petits trous dans des bijoux et des buses pivotantes, et à souder les couvercles d'éléments de combustibles nucléaires.

Deux types de machines utilisant les rayons laser ont trouvé une application industrielle dans le micro-usinage et la micro-soudure. Le laser pulsé à rubis a été le premier commercialisé, et a été suivi récemment par le laser CO_2 à faisceau lumineux continu. Un faisceau laser peut vaporiser, fondre et souder tout matériel utilisé en mécanique ; il est possible de l'utiliser en plaçant la pièce à usiner sous un couvercle translucide plutôt que dans une chambre à vide.

FACTEURS TECHNIQUES DE L'EXPLOITATION DES MACHINES-OUTILS

CAPACITÉ D'USINAGE

L'acheteur d'une machine-outil tient à ce que le matériel acheté réponde à ses besoins en matière de production, à un prix de revient concurrentiel. Bien que l'on puisse distinguer un grand nombre de tendances nouvelles dans les modèles récents, la plupart des caractéristiques de base des machines-outils restent les mêmes.

Le dessin des machines-outils est le résultat de l'expérience en atelier aussi bien que de la recherche en laboratoire. Les tendances dans la conception des machines-outils ont été principalement orientées vers l'obtention de machines plus puissantes et plus solides, dotées d'une gamme élargie de vitesses d'avance et de fonctionnement. On a également développé la sécurité et la maniabilité, les commandes spécialisées et les mécanismes de transmission, et amélioré l'accessibilité pour l'entretien. Les vitesses de coupe avec un outillage au carbure sont pratiquement les suivantes : acier, 300 à 800 pieds par minute, fonte 200 à 500 pieds par minute, et aluminium et magnésium jusqu'à 20 000 pieds par minute. On peut obtenir des vitesses plus élevées lorsqu'il s'agit de couper des métaux légers, parce qu'ils demandent, par pouce cube usiné par minute, moins de puissance que n'en demandent l'acier et la fonte. Les températures des outils augmentent lorsqu'on s'en sert pour usiner des produits ferreux, ce qui entraîne une usure plus rapide.

La puissance nécessaire à la coupe pour enlever un pouce cube de matière par minute dépend au premier chef de la matière soumise à la coupe, et particulièrement de sa microstructure, mais la quantité offerte à chaque dent de l'outil et l'angle de coupe exercent une certaine influence. La consommation d'énergie n'est pas affectée notablement par la nature du matériau utilisé pour la partie active de l'outil (aciers à coupe rapide, carbures) ou par l'utilisation d'un liquide de refroidissement. Toutefois, le liquide de refroidissement augmente la durée d'utilisation de l'outil (nombre de pièces fabriquées) et peut aussi améliorer le fini des pièces.

La puissance nécessaire pour l'usinage est la somme de la puissance nécessaire à la coupe ou à l'enlèvement du métal, et de la puissance absorbée par les frottements dans la broche et les mécanismes d'avance. Le rendement optimal s'obtient avec des moteurs dont la puissance en chevaux-vapeur dépasse la puissance nécessaire. On peut faire marcher la machine ainsi que les moteurs à une puissance supérieure aux charges normales pendant quelque

TABLEAU I. CAPACITÉ D'USINAGE EN RELATION AVEC LA PUISSANCE EN CHEVAUX-VAPEUR ET VITESSES DE COUPE RECOMMANDÉES POUR CERTAINS MATÉRIAUX^a

Matériau à usiner	Quantité de métal enlevée, en pouces cubes par minute		Vitesse de coupe recommandées, en p.pds par minute	
	Machine 3 ch	Machine 15 ch	Aciers à coupe rapide	Aciers au carbure
Acier, doux	2	12	100 - 150	350 - 750
Acier, dur	1,0	6	30 - 60	150 - 300
Acier, mi-dur	1,5	9	80 - 100	250 - 400
Aluminium	5	30	600 - 2 000	1 000 - 8 000
Bronze	3	18	300 - 300	200 - 800
Bronze, dur	1,5	9	100 - 200	125 - 350
Fer doux	2	12	100 - 120	300 - 400
Fonte, douce	3	18	100 - 120	250 - 400
Fonte, glacée	1,5	9	50 - 70	150 - 250
Laiton, doux	5	30	500 - 1 500	350 - 1 000

^a Pour vérifier si un tour ou une fraiseuse de 3 ch peuvent être utilisés pour l'usinage d'une pièce d'acier, au carbone à 20 %, dureté Brinell 170, nous devons procéder comme suit. Ce matériau appartient à la catégorie des aciers doux, dont on peut, selon le tableau, enlever 2 pouces cubes par minute avec une machine-outil de 3 ch. Exprimé en pouces, le produit de la profondeur de coupe par la largeur de coupe et par l'avance par minute ne devrait pas dépasser 2. Cette quantité peut être enlevée sous forme de copeaux en exploitation continue. On notera qu'une machine de 15 ch enlèverait 6 fois autant de matière qu'une machine de 3 ch, du fait que le mécanisme moteur de la machine-outil plus puissante a un meilleur rendement.

temps, mais il n'y a pas intérêt à fonctionner continuellement en surcharge. Dans la plupart des cas, les machines-outils comportent des dispositifs de sûreté destinés à empêcher les graves dégâts que peut provoquer la surcharge — il s'agit notamment de goupilles d'arrêt et de mécanismes de débrayage.

Le tableau I contient des données sur la puissance nécessaire à l'outil de coupe pour usiner certains métaux, ainsi que les vitesses de coupe recommandées. Les valeurs indiquées correspondent à un rendement efficace ; elles reposent sur une coupe de $\frac{1}{8}$ de pouce en profondeur, avec un angle de dégagement de zéro degré à la coupe et une avance (charge d'ébarbage) de 0,010 pouce par tour.

Un angle de dégagement négatif de 10° à la coupe demande environ 10 % de puissance de plus que la coupe avec un angle de zéro degré. De même, la puissance nécessaire baisse d'environ un pour cent pour chaque degré d'angle de dégagement positif.

Si l'avance par tour dépasse 0,010 pouce, la puissance demandée par pouce cube et par minute diminue légèrement ; en revanche, elle peut augmenter de 20 % ou plus si l'avance par tour est réduite de 0,0002 ou 0,001 pouce. En fait, la recherche de copeaux fins est généralement la façon la moins rentable de procéder à l'usinage, pour ce qui est de la puissance en chevaux-vapeur nécessaire pour enlever un pouce cube de matière par minute, et du point de vue de l'usure des outils.

Une plus grande profondeur de coupe diminue légèrement la puissance nécessaire par pouce cube/minute, tandis qu'une profondeur moindre l'augmente légèrement.

Il convient de se souvenir que les outils s'usent sans arrêt en cours de fonctionnement et qu'ils s'éroussent. Même s'il n'y a pas de dents cassées, l'usure augmente la consommation jusqu'à 50 %, avant qu'advienne le moment de changer l'outil. C'est pourquoi il n'est pas souhaitable de monter une machine-outil pour produire un assez grand nombre de pièces dans des circonstances qui supposent une surcharge de puissance dès le début de l'opération.

Les machines-outils modernes sont construites avec des châssis très rigides afin d'être autant que possible exemptes de vibrations. Il existe toutefois d'autres éléments qui influencent la rigidité des montages dans son ensemble : les outils de coupe, les broches, la position de l'outil, le porte-outil, le dessin et la position des mannequins de serrage de la pièce à usiner. Ce sont là des points qui dépendent principalement de l'opérateur et de son chef. Nombreuses sont les sociétés qui ont jugé utile d'organiser, à l'intention de leur personnel spécialisé, un programme de formation professionnelle portant sur l'utilisation des machines-outils et des outils de coupe modernes.

Il est parfois possible d'améliorer le rendement des machines-outils anciennes en les soumettant à une révision générale, au cours de laquelle sont éliminés les roulements, glissières et engrenages qui ont du jeu. Il est fréquent que l'on « rajeunisse » les vieilles fraiseuses en y montant un volant qui doit toutefois être de la dimension convenable et correctement placé, faute de quoi il pourrait endommager la machine ou entraîner des gauchissements de certains de ses éléments, au détriment de la durée d'utilisation des outils. Les fraiseuses munies d'un volant disposent de commandes spéciales pour la mise en marche et l'arrêt de la broche et des dispositifs d'avance.

Les outils au carbure sont maintenant conçus pour donner des angles de coupe radiaux positifs et de petits angles de coupe radiaux négatifs variables à l'arête de coupe. Ces outils ont recueilli tous les suffrages de l'industrie et sont maintenant fabriqués par un certain nombre de sociétés. Ils permettent d'adapter facilement les outils à la coupe d'aciers de diverses duretés et d'autres matériaux. Ils demandent moins de puissance et ont une durée d'utilisation supérieure à celle de beaucoup d'autres outils de coupe. Du fait que leur poussée est moindre, il est apparu qu'il était avantageux de s'en servir pour le fraisage des charpentes d'acier soudé, qui se courbent et vibrent excessivement si on les fraise avec des outils de coupe au carbure de type courant. Les pointes d'outils au carbure, maintenues en place par des moyens mécaniques, que l'on peut disposer pour changer l'arête de coupe, ont aussi reçu un accueil favorable, parce qu'elles éliminent le coût du réaffûtage. Elles sont utilisées surtout pour les outils à pointe unique, mais aussi pour les fraiseuses.

Les vitesses de coupe et d'avance des machines-outils ont été augmentées à tel point que, dans la plupart des cas, le temps de coupe effectif n'est qu'une faible partie du temps passé dans les ateliers successifs. C'est la réduction du temps nécessaire pour charger, mettre en place et serrer la pièce à usiner, pour la disposer en vue de la coupe, pour manier les leviers

d'embrayage et d'arrêt, qui offre maintenant le plus de possibilités en matière d'abaissement des coûts d'usinage. La capacité de production des machines-outils peut s'accroître fortement par un réglage automatique de la coupe et par l'intervention de commandes itératives automatiques pour réduire les temps morts. L'adjonction d'un mécanisme itératif automatique permet de mieux adapter une machine standard à la production en grande série, car on épargne ainsi à l'opérateur de nombreux gestes générateurs de fatigue. Le mécanisme détermine la cadence horaire de production, même pour des opérations de courte durée. La commande numérique de la machine-outil peut permettre d'obtenir des résultats similaires.

Des dispositifs de serrage spéciaux sont nécessaires pour des pièces à usiner qui, à cause de leur forme, ne sont pas rigides, ou qui, pour d'autres raisons, sont difficiles à maintenir par les procédés de serrage courants. Il existe maintenant dans le commerce divers types de porte-outil universels et interchangeables. Ils offrent de larges possibilités de montage et assurent une tenue rigide ainsi qu'une manutention rapide de pièces à usiner de formes très diverses.

Si les outils au carbure permettent d'élever les cadences de production, ils tendent à s'émauser plus vite que les outils de coupe en acier à coupe rapide; toutefois, ils produisent un plus grand nombre de pièces par montage, ce qui est l'essentiel. Le nombre de pièces usinées produites par outil dépend aussi des caractéristiques des outils et de la machine-outil elle-même. Il devrait y avoir dans chaque atelier des monteurs expérimentés, chargés de choisir les vitesses d'avance optimales et d'interdire que l'on puisse travailler avec des accessoires mal fixés, avec du jeu dans les roulements, dans les glissières, etc. Des soins attentifs permettront généralement d'obtenir une amélioration progressive de la production quantitative, en passant à l'usinage au carbure. Des négligences dans le maniement des outils au carbure, des erreurs dans le choix du carbure, un affûtage défectueux, le fait d'utiliser des outils jusqu'à ce qu'ils s'écaillent ou s'ébrèchent sont des erreurs courantes et qui peuvent faire de ce type d'usinage une opération non rentable.

Pour la plupart, les machines-outils sont maintenant construites de façon à tenir compte des exigences rigoureuses de l'usinage au carbure. Il en est résulté un accroissement de la puissance et de la solidité, ce qui a permis aussi d'augmenter les cadences d'avancement et les vitesses avec des outils en acier à coupe rapide (ACR) et en matériaux alliés. (Ces derniers ne sont absolument pas tombés en désuétude, car ils ont été améliorés au cours des dernières années, et il en existe une large gamme de qualités diverses.) Pour ce qui est du fraisage de forme, notamment, les aciers à coupe rapide et en alliages spéciaux ont la préférence, parce qu'il est plus facile de les profiler et de les réaffûter. On est parfois obligé de se servir d'outils au carbure et d'outils en ACR sur la même machine. Des qualités de carbures ont été mises au point pour l'emploi aux basses vitesses d'utilisation des ACR, parce que les types courants d'outils au carbure ont tendance à s'écailler et à s'ébrécher à ces vitesses.

Etant donné que les grandes vitesses de coupe produisent généralement un meilleur fini superficiel, l'outillage au carbure permet d'usiner les surfaces des paliers avec une précision accrue. Une réduction de l'avance par tour de moteur permet aussi, dans certaines limites, d'améliorer le fini superficiel. Il convient de tenir compte de cette donnée lorsqu'on prépare une opération d'usinage. Si, par exemple, nous procédons à un surfacage à la fraise au carbure, sur une grosse pièce d'acier avec une avance de 0,015 pouce par dent, une vitesse de coupe de 350 pieds par minute, et une profondeur de coupe de 0,300 pouce, le fini de la surface est relativement grossier — environ 80 micropouces, moyenne quadratique (MQ) au profilomètre. Une avance de 0,005 pouce par dent, une vitesse de coupe de 500 pieds par minute, et une profondeur de coupe de 0,060 pouce seulement donneraient un meilleur fini superficiel — environ 45 micropouces MQ au profilomètre.

La dureté Brinell de la pièce à usiner peut servir à évaluer au préalable les avances et les vitesses requises. Si donc il est rentable de couper de l'acier à 200 unités Brinell avec un outil au carbure, à 500 pieds par minute et avec une vitesse de 0,010 pouce par tour, le même matériau traité à la chaleur et présentant une dureté Brinell de 300 unités exigerait une réduction de la vitesse de coupe à environ 300 pieds par minute, et une diminution de la vitesse d'avance à environ 0,008 pouce par tour. Si la dureté est portée à 400 unités Brinell, il devient plus difficile de procéder à l'usinage ; non seulement il importe d'abaisser la vitesse de coupe à environ 140 pieds par minute, et la vitesse d'avance à 0,004 pouce par tour, mais les règles d'emploi de la machine-outil deviennent plus rigoureuses.

Le resurfacement des matrices usées exige des machines horizontales extrêmement rigides, fonctionnant à des cadences d'avancement et à des vitesses relativement peu élevées.

Il est rentable de réaffûter un outil au carbure qui a perdu $1/64$ de pouce sur le côté, ce que l'opérateur peut facilement mesurer avec une règle graduée. En utilisant l'outil au-delà de cette limite, on augmente le risque de casse et le réaffûtage devient plus coûteux, au point de dépasser le gain de production obtenu en conservant le montage.

Un autre progrès récent est la technique dite de l'outil à rejeter : la pastille de carbure est fixée mécaniquement sur l'outil, et lorsque l'extrémité est usée elle est remise en place, et c'est un autre bord qui commence à couper. Une pastille carrée fournit 8 arêtes de coupe, une pastille triangulaire en fournit 6, avec un angle négatif. Il n'y a pas à arrêter la production pour réaffûter.

Les machines-outils modernes coupent les métaux sensiblement de la même façon que les premiers outils imaginés par l'homme pour les façonner, en séparant le métal grâce à un matériau plus dur. Cette action est restée la fonction essentielle de la plupart des machines-outils. Les nouveaux matériaux à forte résistance dont sont faites les pièces à usiner, et la demande de forte accélération de la production ont compliqué l'accomplissement de cette fonction. C'est dans la surface exigüe de l'arête de coupe, sur quelques

millièmes de pouce en profondeur et en longueur, que s'applique la force mécanique d'une machine-outil dans le processus de coupe. Plus dure est la pièce à usiner, et plus il faut de puissance pour enlever un pouce cube par minute, et plus fort est le dégagement de chaleur dans l'outil, le copeau et la surface de la pièce.

De nombreux facteurs contribuent à une exploitation rentable, le moindre de ces facteurs n'étant pas l'application correcte des principes de la mécanique à l'ensemble de l'outillage de la machine. On n'a pas encore découvert le liquide « miracle » de refroidissement, ni le matériau « miracle » pour outil, ni le « désintégrateur atomique », ni « l'angle magique » qui permettront d'obtenir une production élevée en quantité et en qualité, et d'en finir avec les exigences de la machine, de son outillage et du montage en vue de l'usinage.

LA VITESSE DE LA MEULE DANS LES OPÉRATIONS DE MEULAGE

On a longtemps considéré le meulage comme une opération ressortissant au finissage. Cependant, depuis quelques années, les vitesses des meules ont augmenté, dans le meulage grossier aussi bien que dans le meulage de précision, parce que l'accroissement des vitesses a permis, dans bien des cas, d'enlever le métal rapidement et à peu de frais.

On s'intéresse actuellement beaucoup en Europe au meulage de précision avec des meules à agglomérant vitrifié tournant à des vitesses périphériques de 12 000 pieds par minute ou davantage. Aux Etats-Unis, l'on n'a encore fait que très peu de meulage à de telles vitesses — un peu d'aiguillage des filets et de meulage interne à la vitesse de 12 000 pieds par minute, ainsi que de meulage de roulements à gorge profonde à des vitesses pouvant atteindre 16 000 pieds par minute. Il s'agit, dans tous les cas, d'opérations spéciales effectuées sur des machines convenablement équipées pour de grandes vitesses.

Résistance des meules

Il importe d'essayer les meules à une vitesse dépassant de 50 % la vitesse maximale autorisée en opération, par exemple à 18 000 pieds pour une opération à 12 000 pieds par minute.

Les meules à agglomérat vitrifié de type classique dans les qualités les moins résistantes ou dans les grains les plus épais ne sont pas assez fortes pour être utilisées aux grandes vitesses. Du fait que les fractures dues à une vitesse excessive commencent toujours au centre, où l'effort est le plus élevé, le renforcement de la meule à proximité du centre est une solution au problème. Ce renforcement peut se faire en imprégnant la partie centrale de la meule avec un matériau de renfort convenable. La pratique japonaise montre que l'on peut, en toute sécurité, utiliser à de grandes vitesses des meules de qualités moins résistantes et de grains épais, renforcées avec une résine à haute résistance. Le meulage à grande vitesse devient alors une technique beaucoup plus prometteuse que la seule utilisation de meules dures à grain fin.

Vitesses de meulage élevées

Les principaux avantages des meules à grandes vitesses proviennent de ce que la force de meulage est inversement proportionnelle à la vitesse de la meule, toutes choses égales d'ailleurs. En accroissant la vitesse de la meule on réduit l'usure de celle-ci et on diminue la déviation de la pièce à usiner, ce qui permet d'obtenir un meilleur fini superficiel. Cependant, une vitesse plus élevée à la meule élève aussi la température sur la surface travaillée, à moins que la vitesse de travail ne soit augmentée dans la même proportion. Le meulage à grande vitesse demande aussi que l'on utilise un système de refroidissement grandement amélioré, puisque les buses de type classique ne déposent pas le liquide de refroidissement sur la surface de contact aux grandes vitesses de meulage.

Une vitesse plus élevée à la meule permet soit d'améliorer la qualité de la pièce usinée sans réduire la quantité de métal enlevé, soit d'obtenir une qualité améliorée en enlevant davantage de métal. Dans ce dernier cas, on procède en augmentant la vitesse d'avance jusqu'à ce que les forces de meulage soient aussi élevées qu'elles l'étaient avec une vitesse moindre de la meule. Ceci est exact du moment que la pièce usinée peut résister à l'élévation de température qui accompagne l'accroissement de la quantité de métal enlevée.

Parce que le matériel coûte sensiblement plus cher le meulage à grande vitesse ne peut se justifier que s'il augmente suffisamment les quantités de métal enlevées. Si le matériel peut se justifier sur cette base, son utilisation peut aussi se justifier pour améliorer la qualité si le besoin s'en fait sentir.

L'industrie de l'automobile considère que le meulage à grande vitesse offre de très prometteuses possibilités à la lumière des résultats déjà obtenus. Son acceptation en tant que technique d'usinage dépendra d'un minutieux calcul du coût de l'obtention de la qualité nécessaire en vue de chaque utilisation potentielle.

Un nouveau matériel sera nécessaire pour atteindre des vitesses de 12 000 pieds par minute car il ne semble pas possible d'adapter le matériel existant à cette vitesse. S'il est reconnu qu'il vaut la peine de passer à des vitesses plus élevées, ce changement sera progressif.

Vitesses de meulage peu élevées

On a constaté par expérience qu'il existe des situations spéciales où les vitesses élevées sont nuisibles les meilleurs résultats étant obtenus à des vitesses inférieures à 6 000 pieds par minute.

Dans le meulage à broche verticale sur table rotative, la vitesse ne dépasse généralement pas 4 500 pieds par minute. Des vitesses plus élevées risquent de vitrifier la meule, à moins que l'on n'utilise un matériau d'une résistance très inférieure à la normale. Dans cette opération, la plus grande partie de l'action abrasive est faite par des grains isolés qui arrachent la plus grande partie des copeaux et qui, en même temps, sont responsables, dans l'ensemble, de l'usure de la meule, car ils arrachent d'autres grains, en

complétant ainsi la réserve de matériel abrasif en rupture de meule. Une meule convenablement choisie fonctionne alors au premier chef comme une source contrôlée de grains abrasifs. Dans ce type d'opération, la meule fonctionne de façon différente de la façon classique et un accroissement de la vitesse peut empêcher la meule de remplir son office.

Une réduction de la vitesse de la meule augmente normalement l'usure et diminue le rapport de meulage — c'est-à-dire la quantité de métal enlevée par rapport à l'usure de la meule — en faisant travailler chaque grain davantage. Toutefois, dans une opération de surfacage sur un acier à coupe rapide à haute teneur en vanadium (5 %) tel que le T 15, le rapport de meulage augmente en même temps que la vitesse de la meule passe de 6 000 à 3 000 pieds par minute, puis baisse rapidement si l'on réduit encore la vitesse de la meule. Les particules très dures de carbure de vanadium que contient l'acier perdent, semble-t-il, de leur résistance à l'arrachement par les grains abrasifs au fur et à mesure que diminue la vitesse de la meule. Ce phénomène compense au-delà l'accroissement de l'usure qui accompagne normalement une diminution de la vitesse. Au-dessous de 3 000 pieds par minute, le rapport d'usure commence à être normal.

Il en est de même, mais à un degré beaucoup moins marqué, avec les aciers ordinaires à coupe rapide, dont le rapport de meulage peut rester plus ou moins constant entre des vitesses de 6 000 à 4 000 pieds par minute, pour diminuer ensuite.

En passant du titane et des alliages de titane à la meule, on a constaté qu'une réaction chimique peut se produire entre la surface du métal et les grains abrasifs, à cause de l'élévation momentanée de la température au point de contact ; il en résulte une très forte usure de la meule. Au nombre des métaux qui réagissent de la même façon figurent le zirconium et l'uranium. Il est possible de faire obstacle à cette réaction en combinant une forte réduction de la vitesse de rotation de la meule (en général 1 500 à 2 000 pieds par minute lorsque l'abrasif est un oxyde d'aluminium) avec l'utilisation de certains liquides de refroidissement à action chimique, ce qui permet de multiplier par 20 ou plus le rapport de meulage. Le liquide produit des couches d'isolement ionique à la surface du métal et de l'abrasif, ce qui diminue les possibilités de contact et, par conséquent, de réaction chimique entre ces deux éléments. Une vitesse de rotation peu élevée de la meule donne le temps nécessaire au liquide pour former de nouvelles couches qui remplacent celles qui se dispersent pendant le meulage, et réduit aussi la température au point de contact, ce qui aide à diminuer l'ampleur de la réaction chimique. L'effet d'une baisse de température est relativement faible en l'absence d'un liquide de refroidissement convenable, à action chimique.

L'utilisation de faibles vitesses pour les meules diminue aussi les tensions résiduelles provoquées par la chaleur dégagée par le meulage, au détriment de la résistance du métal à la fatigue. Une technique bien connue, souvent employée dans l'industrie aéronautique, consiste à meuler à une vitesse de 2 000 pieds seulement par minute avec une meule douce et à procéder par

touches progressivement plus légères quand on approche de la dimension définitive. On ne comprend pas très bien pourquoi cette vitesse peu élevée de rotation serait nécessaire pour empêcher la formation de tensions résiduelles, lorsqu'on se souvient que l'on peut creuser des gorges de roulement dans de l'acier durci à la vitesse de 16 000 pieds par minute sans que la chaleur de meulage entraîne des effets nuisibles.

Une autre opération de meulage pour laquelle une vitesse réduite a été jugée nécessaire est le polissage d'une brame d'acier par une courroie abrasive. Il importe d'imprimer à la courroie une vitesse de 2 800 pieds par minute, qui permet d'enlever une très grande quantité de métal. Les courroies abrasives fonctionnent normalement au double de cette vitesse, c'est-à-dire à la même vitesse que les meules vitrifiées de type classique.

Si le polissage à grande vitesse a certainement des aspects assez prometteurs, ces exemples montrent les conditions dans lesquelles les vitesses peu élevées ont des avantages patents.

LE RÔLE DES LIQUIDES DE REFOUDDISSEMENT

La fonction primordiale d'un liquide de refroidissement est d'abaisser la température de l'outil, du copeau et de la pièce à usiner. En abaissant la température aux surfaces de contact entre l'outil et le copeau, il permet à l'outil de travailler plus longtemps avant d'être réaffûté. En outre, le liquide de refroidissement améliore généralement le fini superficiel de la pièce et entraîne les copeaux. Nombreux sont les liquides de refroidissement qui ont été mis au point au cours des diverses opérations d'usinage, car il n'y a pas de liquide qui réponde à tous les besoins avec les meilleurs résultats.

Les liquides de refroidissement les plus courants sont des solutions aqueuses et des émulsions, qui donnent les meilleurs résultats dans des opérations telles que le tournage de l'acier avec des outils d'ACR à pointe unique. Le tournage avec des outils au carbure se fait en général sans liquide de refroidissement, bien que l'on utilise alors un courant d'air comprimé pour souffler les copeaux dans une direction déterminée.

Le soufre, ou des dérivés du chlore ou du phosphore en émulsion dans l'eau accentuent les propriétés lubrifiantes de l'eau. Il peut être intéressant d'utiliser ce genre de liquides de refroidissement pour percer, fileter et brocher, parce que ces opérations provoquent des frictions sur les surfaces autres que les surfaces de coupe, particulièrement sur le bord des mèches hélicoïdales. L'action lubrifiante du liquide de refroidissement peut alors réduire aussi les frictions engendrées par le processus de coupe, ce qui permet de diminuer la puissance nécessaire à l'outil. Ce phénomène n'apparaît pas au tournage, parce que dans ce cas un seul copeau se forme sous une forte pression superficielle à vitesse relativement élevée. Les émulsions d'huile et d'eau avec des additifs de soufre ou d'eau chlorée n'agissent dans le tournage qu'à des vitesses réduites (de l'ordre de 10 à 20 pieds par minute) auxquelles on a rarement recours dans la pratique. Il en résulte que les liquides de refroidissement généralement choisis pour le tournage agissent surtout en tant

qu'agents réfrigérants. On peut réaliser un bon agent réfrigérant en ajoutant de l'eau à un produit antirouille, par exemple du nitrate de sodium à 0,1 %, ainsi que des substances destinées à abaisser la tension superficielle du liquide et à empêcher la croissance des bactéries.

On utilise des huiles minérales, animales et végétales pour la coupe. Parfois l'on mélange des huiles en proportions variées afin de produire un liquide d'une certaine viscosité en vue d'une application déterminée, ou pour améliorer l'action lubrifiante du liquide. On ajoute aussi des dérivés du soufre, du chlore et du phosphore aux huiles de coupe parce que ces produits augmentent la puissance de lubrification aux pressions et aux températures élevées. Le soufre est d'ordinaire incorporé sous forme d'adjonction d'une huile minérale sulfurisée ou de graisse sulfurisée à de l'huile minérale ordinaire. Le soufre a tendance à tacher les métaux non ferreux et même les aciers. Il convient donc d'utiliser les huiles contenant du soufre avec précaution si l'on doit éviter de décolorer les pièces.

Les huiles de coupe à forte concentration de composés du chlore et du soufre sont utilisées sur les machines à fileter, sur les machines de shaviny et sur les tours à décolleter, ainsi que dans les opérations de brochage grossier. Pour le filetage, on utilise une huile minérale légère en vue d'obtenir un bon fini superficiel. Le kérosène est un liquide de coupe efficace pour l'usinage de l'aluminium et du cuivre. Il ne faut pas utiliser d'huiles, de solutions aqueuses ou d'émulsions pour l'usinage du magnésium, parce qu'il y a un risque d'incendie provoqué par le frottement des outils tournant au ralenti contre la pièce ou faisant de très petits copeaux. (Pour l'usinage de l'aluminium, il importe que les outils enlèvent toujours un gros copeau, et ne tournent jamais au ralenti au-dessus de la pièce à usiner ; il est en outre fortement recommandé, pour des raisons de sécurité, d'enlever sans arrêt les copeaux et la poussière qui se trouvent sur la machine-outil.)

On vaporise les agents réfrigérants, surtout lorsqu'il s'agit de fraisages à grande vitesse, afin d'obtenir un meilleur fini superficiel ou lorsqu'on ne peut utiliser un jet projeté par une buse, parce que le liquide serait dispersé dans tout l'atelier pendant l'usinage. Que ce soit sous forme de brouillard ou à l'état liquide, il importe de ne pas lésiner sur l'agent réfrigérant, afin qu'il puisse faire baisser sensiblement la chaleur engendrée par la coupe.

La plupart des machines-outils sont équipées de réservoirs et de tuyaux pour la circulation des liquides de refroidissement. Il importe de nettoyer ces appareils périodiquement afin d'enlever les résidus et de réduire au minimum le risque de rancidité, de moisissure et de mauvaises odeurs. On peut installer un système de filtrage rapide, destiné à débarrasser efficacement les liquides de refroidissement de toutes les fines particules, magnétiques ou non. L'utilisation, la récupération, et, finalement, l'évacuation des liquides de refroidissement peuvent être des opérations complexes et constituer un facteur important de l'économie du travail des métaux. Nombre d'usines ont trouvé avantageux de former au moins un ouvrier dans tous les aspects de

L'utilisation des liquides de refroidissement, parce que l'intervention de cet ouvrier peut alors abaisser fortement les coûts de fabrication et accroître l'efficacité de l'exploitation.

Evacuation des liquides de refroidissement usés

Dans la plupart des pays en voie de développement, le problème de la pollution de l'environnement est généralement négligé. Les usines où l'on travaille les métaux contribuent à cette pollution en évacuant sans discernement des huiles et des liquides de refroidissement usés, tout autant qu'elles émettent de la fumée et des poussières. Peut-être, au stade initial, les conséquences se limitent-elles à une gêne chez les ouvriers et les voisins de l'usine. Mais, avec le temps, les effets de la pollution peuvent atteindre des proportions écrasantes, comme beaucoup de pays industrialisés l'ont maintenant constaté, en mettant en péril la santé de chacun et en détruisant des ressources naturelles telles que l'eau pure, les forêts, les pêcheries et les terres arables.

Il a été découvert qu'il est moins onéreux d'empêcher la pollution que de la supprimer quand elle existe. Dans chaque pays, chacune des industries doit sentir qu'elle a une part de responsabilité dans la conservation du patrimoine naturel, et elle doit agir en conséquence ; autrement, elle ira à sa propre perte dans un délai facilement déterminable. Si un pays en voie de développement s'attaque dès le début de son industrialisation au problème de la pollution, il peut trouver des solutions valables avant que ce problème ne prenne des proportions quasi insurmontables. Les atteintes à la santé publique qui, dans maint pays industrialisé, résultent d'un contrôle insuffisant de la pollution, constituent un clair avertissement pour les pays en voie de développement. Le coût éventuel, pour les pays industrialisés, de la lutte contre la marée polluante représenterait une charge désastreuse pour tout pays en voie de développement qui se laisserait aller à une situation analogue.

ENTRETIEN ET RÉPARATIONS

Les machines-outils représentent une grande part de l'investissement lorsqu'il s'agit d'équiper un atelier pour le travail des métaux. Il est indispensable de les conserver en bon état. Une machine convenablement construite peut supporter bien des années d'utilisation et de négligence excessive, mais nul ne peut y compter. La plupart des petites entreprises ont des périodes de ralentissement pendant lesquelles elles réparent et repeignent leurs machines-outils. Même alors, le travail doit se faire selon un programme précis. Outre les remplacements pour cause de casse, il importe de procéder à des vérifications précises, et d'examiner l'usure des paliers, glissières, engrenages, courroies et moteurs. Le jeu dans le montage des moteurs, et l'usure des courroies peuvent provoquer des vibrations. Les machines-outils ne peuvent fonctionner à pleine capacité avec une tension insuffisante ou irrégulière des courroies.

Une vieille machine-outil peut être fondamentalement solide, auquel cas une révision complète, avec remplacement des éléments usés, pourra lui rendre sa pleine capacité. Avant d'entreprendre un long travail de réparation sur une machine-outil, on consultera le manuel d'entretien préparé par le fabricant. (En cas de perte, on pourra s'en procurer un autre exemplaire chez le fabricant.) La reconstruction d'une machine-outil usée est une tâche ardue ; les pays industrialisés disposent d'ateliers spécialisés dans ce travail de précision complexe, ateliers qui, souvent, modernisent les machines anciennes, puis les vendent sous garantie, comme des machines neuves. Ce genre d'activité pourrait devenir une étape importante sur la voie de la fabrication de machines-outils, pour des ateliers convenablement équipés.

Lorsque le fonctionnement d'une machine-outil commence à devenir défectueux, il peut y avoir plusieurs raisons. Les conseils ci-dessous concernant l'exploitation et l'entretien éviteront, s'ils sont suivis, la plupart des problèmes et permettront d'en régler beaucoup d'autres :

1. Vérifier en premier lieu que la machine est horizontale et qu'elle ne bascule pas sur le sol, ce qui peut être dû au tassement des fondations. Le test exige une vérification précise du niveau des glissières transversales et du banc.
2. S'assurer que le fonctionnement de la machine-outil n'est pas dérangé par des chocs extérieurs provenant de la circulation routière, de marteaux-pilons, de grues et autres appareils, ce qui se traduit par un fini superficiel plus grossier et une baisse dans la précision. Utiliser au besoin des caoutchoucs, des ressorts, du feutre, des montures pneumatiques ou en fibre de verre pour absorber les vibrations provenant du voisinage.
3. Un programme régulier de lubrification de la machine-outil et de ses moteurs évitera certains types de pannes. S'assurer que l'on utilise bien l'huile de lubrification prescrite.
4. S'assurer de la propreté de la machine-outil avant d'entreprendre un nouveau travail. Evacuer tous les copeaux et toute la poussière en fin de travail, mais ne jamais nettoyer la machine lorsqu'elle est en marche, parce qu'il peut en résulter des dégâts matériels ainsi que des blessures pour le personnel de service.
5. Eviter les coupures et les plaies infectieuses, ne jamais enlever les copeaux à mains nues : prendre une brosse ou un chiffon.
6. S'abstenir d'allonger le bras au-dessus des outils de coupe ou des pièces à usiner, en cours de travail.
7. Procéder aux vérifications du réglage des outils de coupe et des pièces avec une pige ou un morceau de papier.
8. Conserver les outils et les pièces à usiner en un lieu où ils ne peuvent être abîmés ou recouverts par des copeaux et où ils resteront propres. On enlèvera périodiquement les copeaux, afin qu'ils ne s'accumulent pas en grandes quantités près de la machine.

9. Vérifier qu'il n'entre pas de poussières et de copeaux dans le réservoir du liquide de refroidissement ou dans les tuyaux, ou dans les glissières et surfaces de précision de la machine-outil. Il est recommandé de couvrir toutes les glissières ouvertes.
10. La broche et le nez de broche d'une machine-outil figurent parmi ses éléments les plus précis. Il convient de veiller particulièrement à leur épargner les coups de marteau ou les contacts avec les outils de coupe ou les copeaux.
11. Avant de monter des outils sur la machine-outil, vérifier qu'ils sont exempts de copeaux, de poussières et d'entailles. La présence de petits copeaux entre les outils et leurs montures entraîne l'imprécision et même parfois des dégâts permanents.
12. Lorsque l'on utilise un tour, réduire le plus possible le surplomb de l'outil et la rallonge de la contre-poupée afin de ne pas diminuer la raideur de l'assemblage, au détriment du fonctionnement du tour. Les outils de tour doivent être montés sur l'axe ; un montage dans lequel l'arête de coupe se trouve au-dessus ou au-dessous de l'axe affecte l'angle de l'outil.
13. Lorsque l'on monte une fraise sur un arbre, placer l'outil de coupe le plus près possible du nez de broche et régler la position du plateau près de la colonne. Veiller à ce que la force de coupe horizontale s'exerce de manière à pousser la fraise dans la broche. Une fraise à dents décalées travaille mieux dans des entailles profondes. Il est d'ordinaire préférable d'utiliser une fraise aux dents largement espacées, plutôt qu'une fraise comportant un grand nombre de dents, parce qu'elle absorbe moins de puissance et que l'évacuation des copeaux se fait plus facilement. Il convient que toutes les fraises soient montées de façon concentrique, faute de quoi certaines dents seront surchargées tandis que d'autres resteront inactives.
14. Manipuler les grosses fraises avec un morceau d'étoffe, et non à mains nues, afin d'éviter les coupures.
15. S'assurer que la pièce est bien montée dans la position correcte, et fortement serrée sans être déviée, et qu'il n'y a pas d'obstacles entre les outils et les porte-outil. Insérer des cales de métal ou de carton afin de protéger les surfaces finement polies lorsqu'on les serre dans des outils ou des porte-outil.
16. Ne jamais placer de pièces de fonte ou de forge grossières sur les glissières de précision ou autres surfaces analogues de la machine-outil sans interposer une protection.
17. Pour procéder aux petits réglages de mise en place des pièces de fonte et d'acier, utiliser un marteau à tête de plomb, et pour les pièces en aluminium et magnésium, se servir d'un marteau à tête de cuir ou de plastique.

18. Avant d'entreprendre la coupe, s'assurer qu'on a choisi la bonne vitesse et la bonne cadence d'avancement. Un oubli de cette prescription peut entraîner une fabrication défectueuse, la casse de l'outil de coupe, ou un mauvais fini superficiel.
19. Vérifier le fonctionnement de tous les arrêts de l'avance et s'assurer que la translation à grande vitesse n'est pas engagée au moment où l'outil commence à couper.
20. Si l'on utilise un agent de refroidissement, il convient de l'appliquer largement. Toutefois, on coupe généralement la fonte à sec.
21. Régler et nettoyer les glissières et les paliers à intervalles réguliers, afin de maintenir la vitesse et la précision du fonctionnement.
22. Lorsqu'on met au point la machine en vue de sa prochaine opération, ne pas poser les outils par terre, mais sur un râtelier où ils ne peuvent ni être endommagés ni tomber sur le béton.
23. La propreté et un bon éclairage de l'atelier assurent un travail satisfaisant. Il convient de protéger le fini de la machine et des outils. Il importe de fermer les portes et les ouvertures des machines-outils et des boîtiers de commande en cours de travail, afin de faire obstacle aux projections de copeaux.
24. Les opérateurs de machines-outils devraient toujours porter des lunettes protectrices. Ils devraient être capables d'entreprendre des réglages et de petites réparations pour garder la machine en bon ordre de marche. Les grosses réparations et les révisions devraient être confiées à un ouvrier du service d'entretien de l'usine.
25. Il ne faut pas laisser se diffuser les poussières des machines à affûter : non seulement elles abîment les autres machines-outils, mais aussi elles s'attaquent aux voies respiratoires des opérateurs.

Chapitre III

GESTION DE LA PRODUCTION

L'ÉCONOMIE DES INVESTISSEMENTS DANS L'ÉQUIPEMENT PRODUCTIF

Les décisions en matière d'investissement dans l'équipement productif sont au nombre des plus difficiles à prendre quel que soit le pays ou le système économique, mais en particulier dans les pays en voie de développement. Les risques varient selon le lieu et le pays. Il est difficile de faire la part des effets d'une inflation ou d'une déflation monétaire possible dans les calculs relatifs à la durée totale estimée du matériel de production. L'acquisition de matériels fabriqués entièrement à l'étranger peut donner lieu à une dépense supplémentaire pour l'obtention d'une licence d'importation. Les droits d'importation sur les machines et les matériaux, et même toute la structure fiscale, peuvent varier de façon tout à fait imprévisible pendant la durée active d'une machine. La valeur de change d'une monnaie dite forte peut également se modifier et les répercussions peuvent en être beaucoup plus néfastes dans un pays lointain que dans le pays d'émission de la monnaie.

Lorsqu'une machine-outil a été utilisée pendant plusieurs années, il arrive qu'elle ne corresponde plus aux technologies nouvelles. En d'autres termes, les entreprises concurrentielles commencent à utiliser des machines dotées de nouvelles caractéristiques permettant de produire une plus grande quantité des mêmes pièces. Il n'est pas toujours facile de mettre en évidence le vieillissement d'une machine car, en général, les technologies mécaniques évoluent lentement, sans augmentations brusques de la productivité. Sur une longue période, l'exploitation des machines doit produire un profit suffisant pour permettre l'acquisition d'une machine qui réponde aux progrès de la technologie sans lesquels il serait peut-être impossible de maintenir de nombreuses opérations de production à un niveau concurrentiel.

Dans ces conditions, quelques sociétés louent des machines-outils à l'année au lieu de les acheter, ce qui permet également de dégager des ressources supplémentaires qu'elles utilisent comme fonds de roulement. La location de machines (ou *leasing*) présente un autre avantage car elle permet à une société de juger dans la pratique de la valeur d'un nouveau type de machine avant d'avoir à décider si elle l'achètera ou non. Si la société achète ensuite le matériel, elle bénéficie d'ordinaire d'un rabais correspondant à une partie du montant de la location déjà versée.

Étant donné le vieillissement inévitable, quoique lent dans certains cas, du matériel de production, il faut envisager l'amortissement dès le jour d'installation de la machine dans l'atelier. Dans les pays industrialisés, de

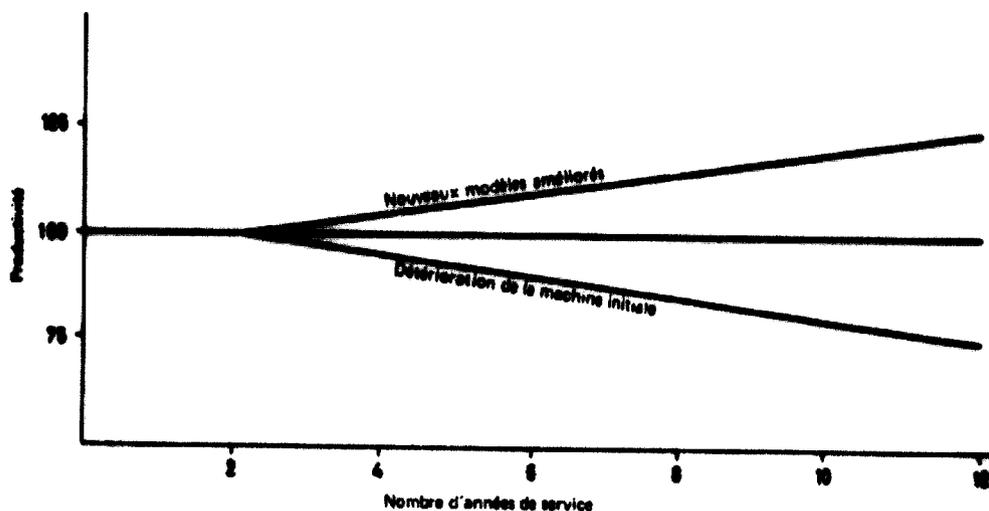
nombreux types de machines-outils sont considérés comme périmés au bout de 10 ans de service. Il arrive que certaines machines-outils spéciales soient amorties en 1 ou 2 ans lorsqu'elles augmentent suffisamment la productivité par rapport à la machine standard. Il ne peut être demandé au service technique de prévoir avec précision le taux de vieillissement. Le service de comptabilité cherche toujours à compter large de façon qu'aucun matériel ne soit effectivement périmé avant d'être totalement amorti. Ces appréciations ont une grande importance lorsque le matériel risque de tomber en désuétude bien avant qu'il ne soit matériellement usé.

L'usure d'une machine après de nombreuses années d'utilisation plus ou moins rationnelle est un phénomène beaucoup plus facile à mettre en évidence. Un certain nombre de détails contribuent chacun dans une faible mesure à la diminution des qualités d'emploi de la machine qui peut très bien être constatée et évaluée par le conducteur ou le contremaître. Il arrive, par exemple, qu'une machine-outil ne puisse plus être utilisée pour la finition d'une pièce mais seulement pour le dégrossissage ; ou bien qu'il faille effectuer des rectifications à la meule parce qu'un tour n'arrive plus à réaliser des cotes exactes ; ou encore, seuls des conducteurs de machines hautement qualifiés sont capables d'obtenir des pièces passant l'inspection sans être retravaillées ; ou enfin, les tâches à effectuer, même relativement peu précises, sont longues à préparer et demandent des réglages spéciaux de la machine-outil.

Une machine est également détériorée lorsqu'elle tombe en panne, par exemple trois semaines après avoir été réparée et que sa remise en état demande encore 3 semaines. (Cela peut également se produire avec des machines relativement nouvelles qui subissent une forte surcharge ou dont le modèle comporte quelques points faibles.) Il existe d'autres signes d'alarme, par exemple les outils qui s'usent trop vite en raison des vibrations anormales ou des compteurs qui ne donnent plus les indications exactes parce que les engrenages sont usés ou que les roulements ont trop de jeu.

Il est quelquefois possible, dans la métallurgie, d'utiliser avec profit de vieilles machines amorties depuis longtemps, mais ce sont là des situations exceptionnelles et le matériel ne reste pas concurrentiel pendant très longtemps.

Une machine-outil bien construite doit être à 100 % efficace pendant les premières années. Puis elle commencera à se détériorer et sa productivité diminuera, ou bien le conducteur devra réaliser un plus gros effort pour obtenir des dimensions précises. La fatigue peut également diminuer l'efficacité du conducteur. La figure 2 indique le schéma de l'usure et du vieillissement d'une machine-outil. Bien entretenues, la plupart des machines fonctionneront bien pendant 10 ans. Puis elles commenceront peut-être à montrer quelques signes de vieillissement qui nécessiteront une comparaison de leur coût avec celui des machines-outils plus nouvelles. Le vieillissement et l'usure d'une machine-outil sont inévitables et la législation des pays industrialisés en tient compte moyennant des lois de rééquipement industriel. Des avan-



Noté. Une machine-outil neuve a une productivité 100. Avec l'usure et le temps, la machine se détériore. Les améliorations de conception peuvent permettre une exploitation plus efficace et la machine peut se périmer au bout d'un certain temps.

Figure 2. Détérioration et vieillissement des machines-outils

tages fiscaux particuliers encouragent la modernisation des machines-outils, améliorent le rendement et favorisent l'expansion générale de la capacité industrielle d'un pays.

Pour qu'un programme d'investissement soit rationnel, il faut évaluer les différences probables de coût selon les divers devis et établir un plan détaillé des priorités d'investissement dans le matériel et les machines-outils. Il est rare que l'on puisse réduire les dépenses d'investissement dans le cas de tous les projets.

Dans cette évaluation, doivent figurer toutes les catégories de coûts de production fixes et variables, et non pas seulement les coûts de vieillissement et d'usure. Il est difficile d'obtenir des estimations des coûts correspondant à la réalité, même dans un pays industrialisé. Les formules et les diagrammes de calcul des coûts d'exploitation des matériels de production nouveaux ne s'appliquent qu'aux marchés industriels particuliers pour lesquels ces formules et ces diagrammes ont été établis. Néanmoins, malgré toutes les difficultés, il faut évaluer les coûts aussi exactement que possible.

Il ne faut pas oublier d'ajouter les coûts de mise en place, de réaménagement et de transformation des bâtiments et des matériels existants au prix d'achat des matériels nouveaux — et le produit éventuel de la vente des matériels remplacés doit être déduit de cette somme — avant de calculer les charges financières.

Les raisons justifiant la mise en service d'un équipement de production nouveau sont nombreuses :

- Réduire les coûts actuels d'usinage ;
- Améliorer la qualité des produits ;

Permettre à la production de soutenir la concurrence des produits importés ;

Augmenter la capacité existante ;

Rendre les produits compétitifs par rapport à ceux d'autres usines établies dans le pays ;

Apporter une solution à la pénurie de main-d'œuvre qualifiée ;

Éliminer les opérations manuelles à la fois coûteuses et indésirables ;

Simplifier les opérations d'usinage difficiles ;

Entreprendre une nouvelle production, par exemple avec de nouvelles matières.

Les investissements dans l'équipement nouveau pour remplacer un équipement vieilli ou usé doivent être évalués en fonction de plusieurs critères.

D'abord et surtout, le nouvel équipement doit permettre des économies importantes dans la production des articles fabriqués avec les matériels existants, étant donné la marge d'erreur inhérente à des estimations sur longues périodes.

En second lieu, la direction doit définir les options de l'entreprise et déterminer si elles concordent avec les formules d'amortissement de matériels nouveaux pour les années à venir.

Quelles que soient les raisons de l'investissement, la méthode la plus courante consiste à diviser les recettes avant ou après impôt par le montant de l'investissement afin de déterminer le rendement du capital investi. (Lorsque le volume des ventes est limité en raison du matériel de production et que le matériel nouveau permet d'augmenter la production, il convient de tenir compte, dans le calcul des recettes, de l'augmentation des ventes tout autant que des modifications éventuelles des prix de revient.) Le profit exprimé en pourcentage des ventes est assez utile pour mesurer la rentabilité du matériel utilisé. Dans l'un ou l'autre cas, le profit doit être diminué du coût de l'usure et du vieillissement des machines et de l'outillage. C'est alors que l'on constate souvent pour la première fois que le profit est nul.

Le rendement de l'investissement ainsi calculé de façon approximative peut être comparé à celui qui pourrait être réalisé avec d'autres projets de remplacement de machines ou d'investissements effectués pour augmenter la capacité de production. Ces formules de calcul approximatives ont cependant des inconvénients ; elles ne tiennent aucun compte des variations futures de la valeur de la monnaie non plus que du facteur temps lorsqu'il est réalisé des économies. Les économies des années précédentes peuvent être réinvesties de façon à obtenir un revenu additionnel. On peut appliquer une méthode plus élaborée, connue sous le nom de flux actualisés, pour tenir compte de ces facteurs et par conséquent pour évaluer plus exactement le rendement de l'investissement dans des matériels nouveaux ou dans d'autres projets.

Il faut considérer la transformation d'un produit comme une opération d'élaboration de matières premières (acier, fonte moulée ou matières

plastiques) qui leur confère une valeur ajoutée. Le succès de l'opération se mesure par la différence entre la valeur de la production finale et le coût des matières, etc., employées. Le revenu net devrait permettre directement une expansion progressive de la société ou être suffisamment important pour attirer les investisseurs et les institutions publiques en démontrant que l'entreprise peut survivre seule et même prospérer.

EMPLACEMENT DE L'ATELIER

La construction ou l'acquisition d'un nouvel atelier ou d'une nouvelle installation de transformation peut représenter un investissement considérable et il convient de choisir soigneusement le terrain et l'emplacement. Si l'importance de l'opération envisagée justifie une enquête détaillée et si l'on a toute latitude pour choisir l'emplacement initial ou bien celui où l'on va transporter une installation déjà en place, la liste ci-après peut s'avérer un guide utile pour déterminer l'adéquation d'emplacements déterminés².

a) *Caractéristiques de la main-d'œuvre*

Main-d'œuvre locale ou de passage ; proportions de l'absentéisme ; comportement à l'égard du matériel et de l'outillage ; acceptation des innovations technologiques.

Statistiques de la population générale et de la population active par âge et par sexe ; effectifs employés dans l'industrie de transformation, l'agriculture, etc. ; disponibilités en main-d'œuvre qualifiée, semi-qualifiée et non qualifiée ; emplois saisonniers ; chômage ; acceptation du travail par équipe. Ces statistiques devraient porter sur une zone géographique à distance raisonnable de l'atelier.

Évaluer l'influence des industries établies depuis longtemps dans la région sur les barèmes de salaire ; les heures de travail et le roulement par équipes ; la concurrence pour l'embauche d'ouvriers qualifiés, la syndicalisation, la productivité, la sécurité, les dispositions en cas de débauchage et même les proportions tolérables d'accidents de travail. Il vaut la peine de vérifier s'il existe localement une entreprise industrielle de pointe que le nouvel établissement sera obligé de concurrencer.

b) *Le potentiel d'encadrement*

Les travailleurs en puissance se trouvant dans la région acceptent-ils progressivement de nouvelles responsabilités ? Perspectives de recrutement sur place de cadres de direction, de personnels technique et scientifique. Dans quelle mesure la population locale peut-elle être formée ?

c) *Infrastructure sociale*

Nombre et types de logements. Équipement scolaire, sanitaire, social, culturel et récréatif. Attitude de la communauté locale vis-à-vis des nouveaux venus.

² D'après "Plan site selection guide", *Factory*, mai 1957, copyright Morgan-Grampian, avec autorisation spéciale.

d) Impôts, règlements d'urbanisme et de zonage

Abattement et exonération d'impôts pour favoriser l'industrie. Impôts sur les biens fonds et autres taxes locales.

Réglementation locale sur les émissions de fumées, l'évacuation de déchets liquides et solides, la conservation des sites et la création de nuisances pour le voisinage. Codes du bâtiment et inspection des constructions. Codes actuels et probables pour l'avenir pour la protection de l'environnement contre la pollution et modalités d'application.

e) Services

Équipement en énergie, en combustible et en eau.

Transports : proximité des lignes de chemins de fer, lignes de dessertes et tarifs de transport par fer ; plans d'itinéraires, tarifs de transport et route d'accès pour les camions, limites de poids et de dimensions, et techniques utilisées aux points de transbordement ; aéroport, voies d'accès et installations pour les expéditions par air.

Existence, sur le plan local, de nombreux services commerciaux : grand atelier de réparations ; réseau de dessertes des industries ; service local de camionnage ; atelier d'entretien des moteurs électriques ; fournisseurs de lubrifiants, d'acier, de bois, de pièces mécaniques et de fournitures de bureau ; architectes et techniciens ; entrepreneurs.

Qualité des services postaux, de police et d'incendie.

f) Approvisionnement en matières premières

Proximité des fournisseurs, confiance que l'on peut leur accorder et mesure dans laquelle ils se sont déjà engagés avec d'autres consommateurs industriels. Prix, délais de livraison, conditions de vente, coût du transport. Vitesse d'épuisement des stocks des fournisseurs. Pour les pièces essentielles, existence de fournisseurs (de préférence plus d'un) et possibilités de transport rapide. Sous-traitants existants ou potentiels.

g) Analyse critique d'un emplacement déterminé

Nature de l'emplacement ; topographie et climat ; superficie disponible, disposition et orientation ; drainage et risques d'inondations ; services installés ; sous-sol et assises ; ravines, ruisseaux, etc. ; risque d'ensablement et nécessité de terrassement et d'aménagement du paysage ; nécessité éventuelle de déplacement des conduites et des autres infrastructures ; coût du terrain ; existence de servitudes ; et, naturellement, coût du terrain.

Il est de la plus haute importance de réserver des superficies suffisantes pour l'équipement technique, les bureaux, les bâtiments auxiliaires, le parc de matériel, le trafic par camions et/ou chemins de fer, non seulement pour les besoins immédiats, mais également pour tenir compte de l'agrandissement anticipé de l'usine, conformément aux prévisions, sans déplacement sur un nouveau terrain. Le calcul de la superficie nécessaire se fait de la manière suivante :

Zone bâtie

1. Établir la liste actuelle des superficies nécessaires pour l'équipement de production et le stockage.
2. Estimer tous les besoins pour lesquels il n'y a pas de précédent ou qui apparaîtront vraisemblablement à l'avenir.
3. Considérant la formule d'équipe de travail effectivement appliquée ou anticipée, calculer les superficies supplémentaires nécessaires pour un développement des opérations.
4. Prévoir une marge raisonnable pour les couloirs intérieurs ; selon les procédés de fabrication et la configuration du terrain, ces couloirs peuvent occuper une superficie atteignant jusqu'à 25 % des surfaces de fabrication et de stockage.
5. Ajouter les superficies nécessaires pour les services auxiliaires : énergie, air comprimé, eau, vapeur, réserve de combustibles, magasins d'outillage, stock d'équipement, atelier de réparations, traitement de l'air, de l'eau, des liquides, etc., usés.
6. Ajouter une certaine superficie pour les bureaux, y compris le service technique et le laboratoire.
7. Ajouter une certaine superficie pour les aménagements de service : toilette, vestiaire, cantine, infirmerie.

Superficie non couverte

1. Établir un plan de routage reliant l'usine au réseau de transport existant déjà dans la région. En général, les véhicules circulent dans le sens des aiguilles d'une montre.
2. Elaborer des itinéraires détaillés pour la livraison des matériaux et l'expédition des produits. Prévoir des surfaces suffisantes pour les plates-formes de chargement. Dans le cas d'industries lourdes, prévoir la possibilité d'abaisser le tablier de la plate-forme de chargement ou de lever le plancher de l'atelier au niveau de la plate-forme des camions.
3. Le cas échéant, réserver des parcs à voitures à l'intention des employés. Aux États-Unis, on prévoit habituellement 1,2 à 2,5 employés par voiture. Dans certains pays, on prévoit des surfaces pour l'installation de tentes et de douches de plein air ou pour la construction de logements pour les travailleurs.
4. Prévoir une zone pour le stockage des chutes et pour celui des gros stocks de matériaux indispensables.
5. Prévoir des chemins pour le passage des pompiers, des chemins de sécurité le long des grilles, etc.

Les zones bâties et non couvertes doivent être estimées à au moins trois moments : le jour de l'estimation, à l'expiration de la durée de l'installation et, dans l'intervalle, tous les 3 ou 5 ans. Ces estimations donnent de bonnes indications sur la surface nécessaire à une activité bien organisée et bien planifiée pour le présent et pour l'avenir.

CONSTRUCTION DES BÂTIMENTS D'ATELIER

Les considérations essentielles en matière de construction des bâtiments d'atelier sont la résistance, la hauteur et l'éclairage.

Les planchers mal conçus empêchent tout travail de précision. Il est courant et recommandé de construire un sol en béton pouvant supporter une charge de 1 000 à 2 500 kg par mètre carré. Il faut veiller à ce que l'ossature du bâtiment soit calculée pour résister aux charges de pointe verticales, aux poussées latérales et aux choc longitudinaux dus au maniement des grues. La charpente du toit doit être suffisamment résistante pour supporter des charges suspendues (au moins 900 kg à chaque point de suspension). Le reste de l'atelier doit être construit pour assurer une protection suffisante en fonction du climat local. Les halls doivent avoir une hauteur suffisante pour permettre la manutention aérienne du matériel.

L'éclairage par la lumière du jour est un avantage précieux. C'est pourquoi les murs sont généralement construits en briques jusqu'à la base des fenêtres, et en verre jusqu'aux pannes du toit. Les vitres sales provoquent toujours une perte de lumière. Lorsque le bâtiment est exposé à l'est ou à l'ouest, la lumière est souvent éblouissante au début ou en fin de journée. L'exposition au nord est la meilleure.

AMÉNAGEMENT DE L'ATELIER

L'aménagement de l'atelier peut être simple et ne comprendre qu'une seule rangée de machines — par lesquelles passe successivement la pièce à usiner depuis le poste de réception des matériaux jusqu'au poste d'expédition de la pièce — située dans un bâtiment composé d'un seul hall et d'une travée. A l'autre extrême, il est possible de concevoir un aménagement d'atelier complexe en disposant selon un plan rationnel du matériel polyvalent dans un atelier travaillant à la commande en petites séries avec des priorités, des temps de fabrication et des outillages différents.

Les aménagements à postes fixes conviennent pour les petits ateliers où une pièce est essentiellement achevée à un même poste de travail, établi ou machine par exemple, mais nous nous intéressons surtout ici aux aménagements d'ateliers où une pièce passe par plusieurs postes successifs. L'avantage essentiel du bon aménagement d'un atelier de fabrication est d'assurer, sur une base réaliste, l'efficacité d'une production et par conséquent des coûts de production peu élevés. Tous les objectifs ci-après sont valables pour les petits ateliers et les ateliers de moyenne importance, mais tous ne s'appliquent pas dans chaque cas. Il est évident que l'on dispose d'une plus grande latitude pour établir les plans d'un nouvel atelier que pour modifier un atelier existant.

Considérations préliminaires

Toute la surface couverte doit être organisée, opération par opération, en un système cohérent conformément aux principes suivants :

1. L'acheminement des matériaux aux postes de travail doit être ordonné conformément aux impératifs de la fabrication.
2. La chaîne de fabrication doit être continue, de préférence rectiligne et sans mouvements à contre-courant.
3. L'emplacement des opérations dont le développement nécessitera de plus en plus de place doit être choisi à proximité d'espaces réservés pour utilisation future.
4. Les gros matériels de fabrication doivent être disposés de telle sorte qu'il ne soit pas nécessaire de les déplacer tant que l'atelier existera, sans pour autant nuire à l'efficacité de la production.

D'autres méthodes de production possible, des chemins critiques raccourcis, les conséquences de l'évolution technologique doivent entrer en ligne de compte dans la planification de l'atelier. Il faut donner la priorité aux procédés de fabrication indispensables à la production des articles les plus rentables, actuellement ou en prospective, dans la répartition de l'espace et la disposition des chaînes de fabrication.

Dans la métallurgie, il est économique de grouper les équipements de production en section de presses, section de découpage, etc. Il faut essentiellement chercher à réduire au minimum la manutention des matériaux. C'est le principal argument en faveur de la constitution de chaînes de fabrication rectilignes. Le point d'achèvement d'une opération devrait être logiquement relié au point de départ de l'opération suivante en combinant manutention et travail. Dans les opérations par lots, l'acheminement des matériaux ne devrait pas être bloqué par les stockages en cours de travail.

Il convient de veiller au confort et à la sécurité des travailleurs. Les ateliers bien éclairés et bien aérés, où chaque ouvrier dispose de suffisamment de place pour travailler et peut accéder facilement aux zones de travail, favorisent une productivité élevée. Il faut rechercher attentivement tous les risques d'accident ou de maladie et prendre les mesures correctives nécessaires.

Méthode classique d'aménagement des petits ateliers de métallurgie

Pour l'élaboration du plan d'aménagement détaillé, il faut tout d'abord avoir une vue d'ensemble. Il faut analyser et planifier la fabrication pour que le taux de roulement du travail en cours soit élevé sans que les coûts augmentent. Dans les opérations à la commande, la somme de tous les temps-machine sur une pièce atteint rarement 10 % du temps total passé par la pièce dans l'atelier et se situe souvent au niveau de 1 % ou même moins de ce temps total.

Il est rare que l'on puisse pratiquer intégralement le système de la chaîne de fabrication rectiligne, et la chaîne en épingle à cheveu en est une approximation très commode, car la réception des matériaux et la sortie des pièces peuvent alors être adjacentes ou même combinées. La figure 3 montre l'aménagement d'un atelier pour une vingtaine d'ouvriers comme on en rencontre souvent. La figure 4 montre comment l'atelier pourrait être

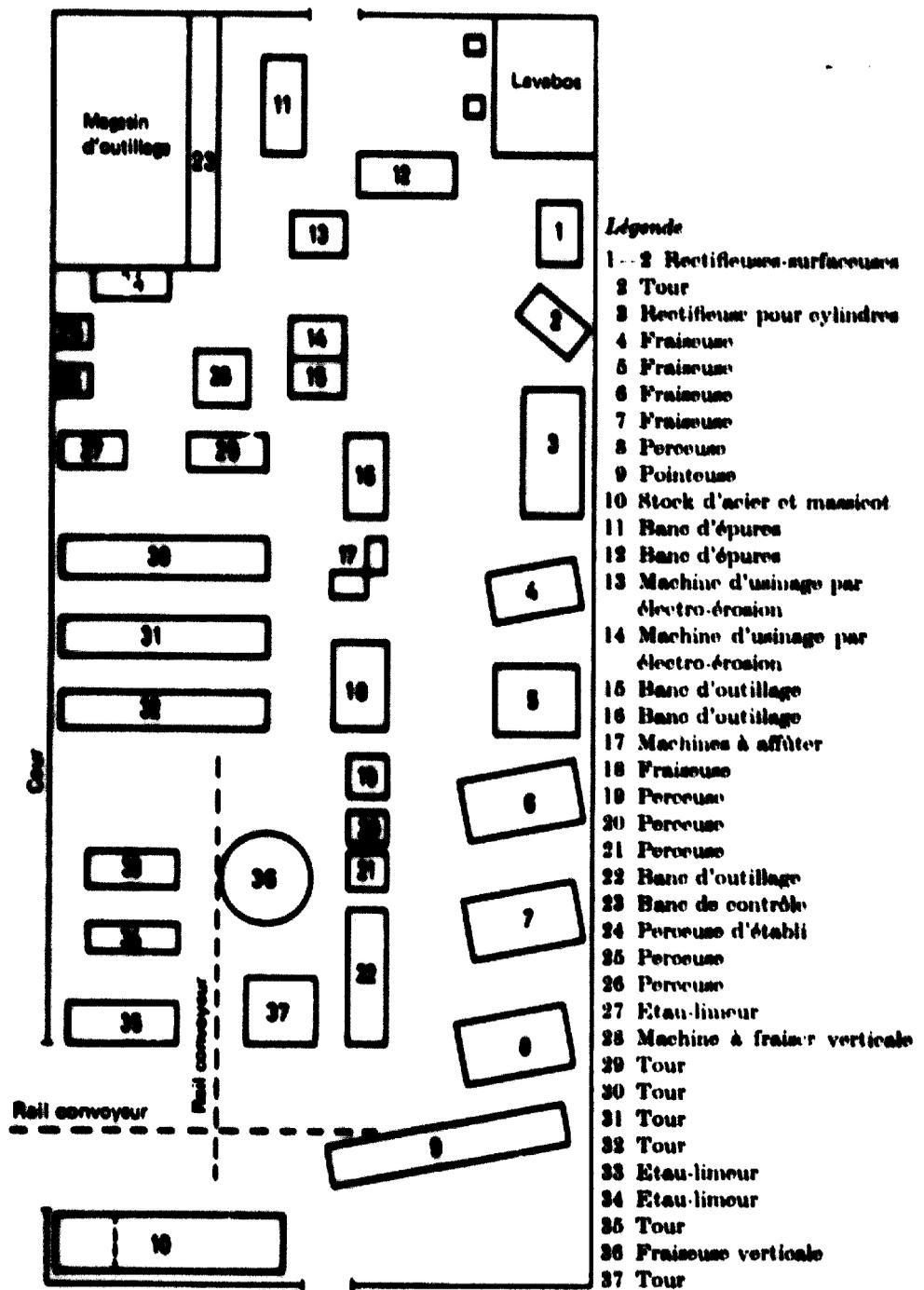
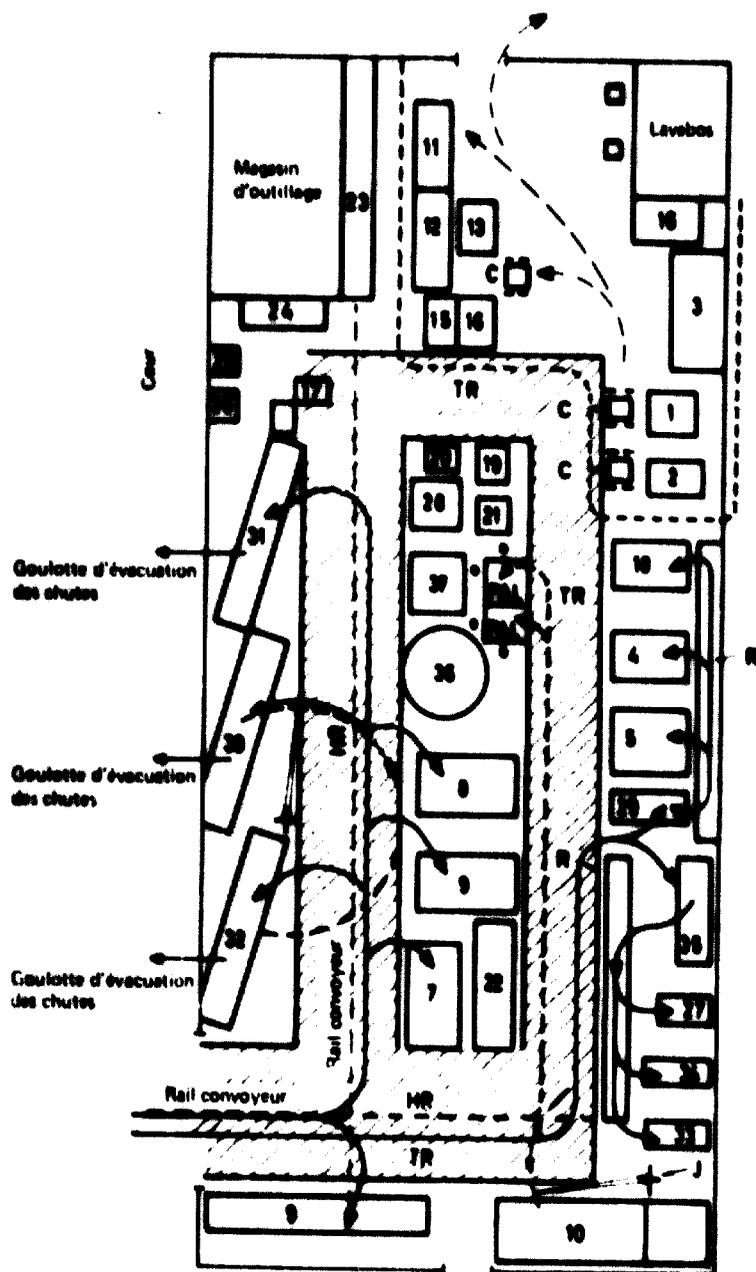


Figure 3. Aménagement de petit atelier de type courant

réaménagé de façon à améliorer l'acheminement des matériaux et la manutention.

Dans les épures d'aménagement, les installations fixes et les machines doivent être représentées à la même échelle. S'il n'est pas possible d'obtenir



Légende. C : Chariots à roues ; R : Transporteurs à rouleaux inclinés avec praticables ; J : Grue à flèche sur socle avec treuil élévateur manuel ; HR : Treuil aérien suspendu à commande manuelle ; PAL : Matériau en palettes sur étagères ; TR : Couloir de passage pour chariots-plates-formes non motorisés et chariots-élévateurs à fourche.

Note. Les numéros de référence des machines sont les mêmes qu'à la figure 3.

Figure 4. Aménagement amélioré de l'atelier de la figure 3

des maquettes tridimensionnelles de machines, il faut utiliser des découpages bidimensionnels.

Il convient de planifier simultanément les emplacements des couloirs et celui des services. Dans les ateliers travaillant à la commande, chaque

groupe de matériels doit être facilement accessible, car les pièces ne passent pas toujours par toutes les sections. Certaines sections doivent être inamovibles parce qu'il est malaisé de les déplacer (fondations renforcées, canalisations, etc.). Il convient de prévoir que chaque section pourra devoir être agrandie d'au moins 25 %. La tendance est de prévoir une expansion de 40 à 60 %, mais cela n'est pas à recommander à moins que de bonnes prévisions de détail ne puissent être calculées et que l'on ne dispose de planificateurs hautement compétents.

Les principaux couloirs doivent permettre la circulation dans les deux sens, mais les couloirs d'accès aux machines doivent être à sens unique. Le matériel de manutention doit être conçu spécialement pour le transport des pièces d'une machine ou d'une section à l'autre et, en cas de besoin, il convient de concevoir des dispositifs spéciaux.

Les chutes de métal doivent être enlevées des machines et ramassées par un collecteur desservant l'ensemble de l'atelier.

Il convient de déterminer les goulots d'étranglement possibles, par exemple en cas de panne d'un outil ou d'une machine, et de prévoir un itinéraire de rechange ou de dérivation.

L'efficacité du cycle de fabrication doit être calculée soigneusement pendant la planification. L'utilisation de l'espace doit être calculée d'avance et contrôlée. Il faut déterminer le coût de construction par mètre carré d'atelier, et considérer les possibilités de mouvement des matériaux offertes par l'espace réservé aux couloirs. L'efficacité de la manutention des matériaux est mesurée en comparant l'effectif ouvrier total à celui qui est affecté à la manutention, ou les heures ouvrées totales par ouvrier aux heures ouvrées de manutention par ouvrier. Enfin, il faut calculer le coefficient d'utilisation des machines résultant du plan, car ce coefficient est capital. Dans certains ateliers travaillant à la commande, ce coefficient n'atteint pas 40 % en l'absence de planification.

MANUTENTION DES MATÉRIAUX

L'exemple le plus simple de manutention de matériaux est le transport d'un seul objet par une personne dans le hall d'un atelier. Par contre, cette manutention peut être très complexe et se décomposer en 50 gestes pour la fabrication d'une seule pièce. Elle représente parfois jusqu'à 80 % du coût de production dans un grand atelier de mécanique. Il faut distinguer dans les ateliers mécaniques trois types de manutention :

- La réception et le stockage au point de réception ;
- La manutention en cours de fabrication, y compris la manutention au poste de travail ;
- L'expédition des pièces finies, y compris l'emballage et le stockage dans le hall d'expédition.

La manutention des matériaux représente des frais indispensables et tout à fait indirects. Les objectifs d'un bon système de manutention des

matériaux peuvent être classés de la manière suivante, par ordre de complexité croissante :

Augmentation de la capacité productive des quelques travailleurs qualifiés moyennant la suppression de la fatigue provoquée par le déplacement et le port d'objets. La production augmente parce que l'effort se trouve diminué et qu'une plus grande partie du temps de travail effectif peut être consacrée à l'usinage de la pièce.

Diminution des chutes et des déchets. Une bonne manutention permet de réduire au minimum l'endommagement des produits et d'économiser des matériaux rares. Au stade de la finition, en particulier, la manutention mécanique permet l'uniformisation et la répétition exacte des opérations ainsi que la réduction des chutes.

Amélioration générale des conditions de travail par l'élimination des travaux excessivement pénibles pour la main-d'œuvre et la diminution des risques d'accidents.

Abaissement des coûts. Comme le coût des matériaux, de la main-d'œuvre et les frais généraux fixes peuvent être considérés comme à peu près égaux, la diminution du coût de manutention des matériaux représente un grand avantage économique. Dans les usines métallurgiques très modernes, une proportion de manutention des matériaux représentant 10 % de la main-d'œuvre totale est exceptionnellement bonne, mais une proportion de 40 % est extrêmement anormale. En général, dans les usines l'espace coûte cher, et la manutention moderne des matériaux améliore l'utilisation de l'espace disponible. De plus, en régularisant et en réduisant les quantités de travaux en cours, cette forme de manutention permet de libérer des ressources financières additionnelles à des fins plus productives.

Pour appliquer les principes généraux énoncés ci-dessus à un atelier particulier, il convient tout d'abord de définir la nature des matériaux à utiliser. On a tout d'abord les inputs matériels auxquels viennent s'ajouter au moins trois catégories de produits qui résultent de l'activité de tout atelier de métallurgie : le produit lui-même, les chutes et les rebuts. Selon l'importance de l'exploitation, les matériaux réceptionnés peuvent être des barres, des lingots, des pièces moulées, etc., et dans le hall d'expédition, ce sera des caisses, des praticables, des traîneaux, etc., contenant des produits finis.

En second lieu, l'optimisation de l'implantation de l'équipement devrait avoir mis en évidence le meilleur emplacement (initial ou nouveau) du matériel de production et de manutention. La planification technique et dans le temps de la production doit permettre de déterminer la charge optimale des machines et l'acheminement optimal des matériaux. Sinon, l'installation d'un système de transport pourrait simplement provoquer des goulots d'étranglement, des temps-machine morts et des délais prolongés de redéploiement des matériaux.

En troisième lieu, les indications suivantes peuvent être utiles :
 Grouper si possible les pièces et, si leurs dimensions le permet, les transporter ensemble en praticables ou en caisses.

Les ouvriers devraient déplacer un article à la fois.

Il doit être facile de retirer des pièces du flux de matériaux, de préférence sans les soulever, au chargement ou au déchargement.

Exploiter l'espace disponible pour le stockage en utilisant des casiers, des étagères, des praticables automatiques, etc.

Employer la méthode FIFO (premier entré, premier sorti) à moins qu'elle ne soit à rejeter pour des raisons particulières.

Chercher à diminuer les stocks, en particulier ceux des pièces finies (étant donné les fonds bloqués sous la forme de main-d'œuvre). Ne stocker aucun lot non marqué.

Comme la manutention et le transport des matériaux représentent toujours une charge financière, essayer de travailler sur le matériau en mouvement. (Cette méthode ne présente pas de difficultés dans les chaînes de fabrication en continu mais elle est plus difficile dans un atelier de métallurgie.) Les opérations ainsi réalisables sont le préchauffage, le refroidissement et la finition (lavage, agglomération, peinture, vitrification et cuisson par exemple).

Il est important de planifier l'évacuation des déchets. Des récipients en acier suffiront pour les petits ateliers ; des bandes d'entraînement ou des transporteurs à oscillations pour les ateliers plus grands et des casseurs, des transporteurs à plaques ou à crochets dans les ateliers de grosse production.

À chaque poste de contrôle, il conviendrait de pourvoir au stockage et à l'enlèvement des pièces de rebut.

Choix de l'équipement

Le choix de l'équipement, qui constitue la quatrième étape, peut alors commencer. La liste de l'équipement, par ordre de complexité croissante, s'établit comme suit :

Matériels à déclivité ou à levier

Transporteurs à rouleaux, transporteurs à roues

Transporteurs à roulements à billes

Monorails à commande manuelle

Dévaloirs, casiers, étagères

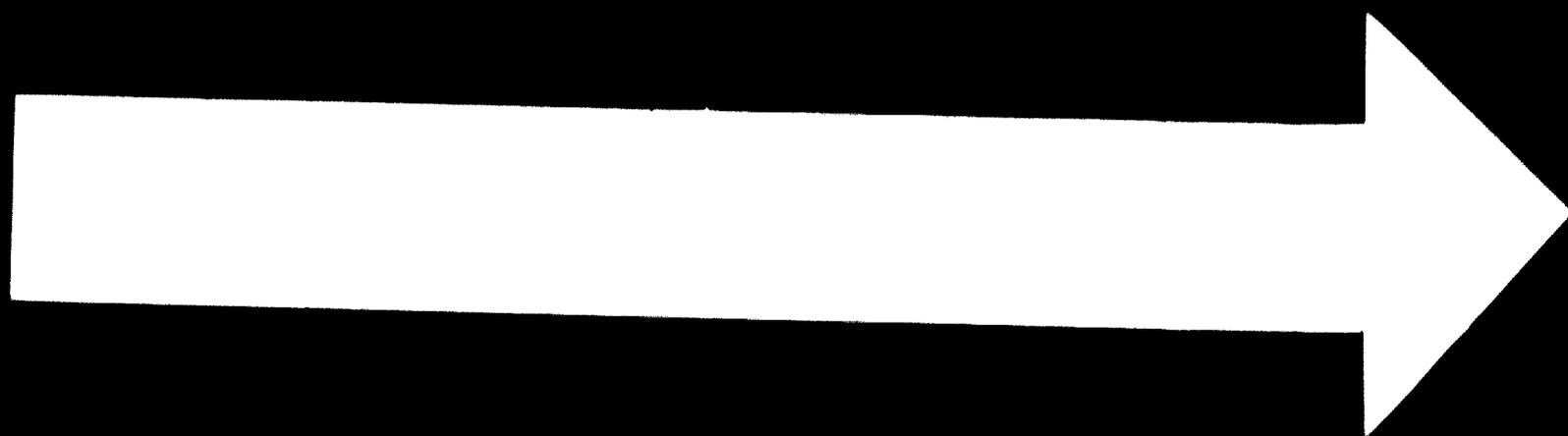
Treuil à chaîne montés sur divers types de grues à commande manuelle (à flèche, à portique et à pont)

Types très divers de chariots actionnés à la main

Matériels à commande mécanique ou électrique simples sans connection ni commande automatique

Transporteurs à rouleaux à commande électrique

Transporteurs à plaques en métal ou en bois

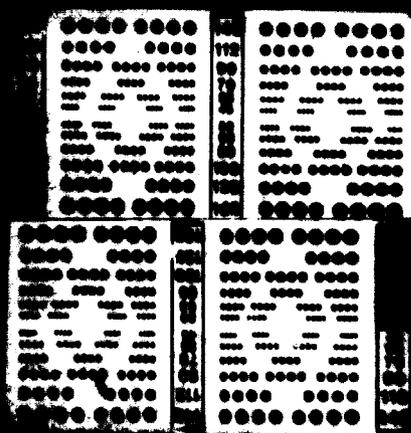


2 - 12 - 74



2 / 2

74ST0057



Transporteurs à bandes (de métal, de toile, etc.)

Voies suspendues à monorail

Treuil à commande électrique, montés sur divers types de grues à commande manuelle

Chariots-élévateurs à fourches

Autres matériels mécanisés mus à l'électricité ou à l'air comprimé, avec commandes électriques ou connections

Tous les modèles de transporteurs déjà mentionnés

Transporteurs à oscillations

Transporteurs à commande électrique

Élévateurs à commande électrique

Treuil à commande électrique, montés sur des grues à commande électrique

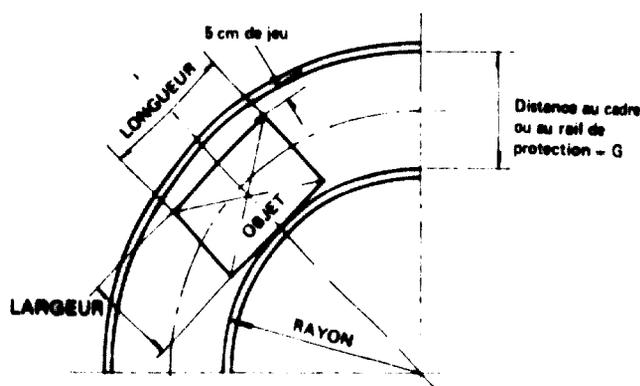
Chariots-élévateurs à fourche

On constate immédiatement que différents modèles de matériel peuvent exécuter la même tâche fondamentale. A l'annexe 1 figure une méthode de pondération de leurs diverses caractéristiques, qui doit permettre un choix rationnel entre les diverses possibilités.

Quelques illustrations et informations de base, exposées ci-après, faciliteront le choix de l'équipement. Il convient de tenir compte des capacités physiques des ouvriers et des caractéristiques de l'équipement. Nous commençons avec le premier groupe, c'est-à-dire les matériels à déclivité ou à levier.

Transporteurs à rouleaux

La largeur d'un transporteur à rouleaux s'obtient en ajoutant 5 cm à la largeur de l'objet le plus volumineux à transporter. Ce calcul vaut pour les parcours droits ; dans les courbes, la largeur doit être calculée selon les indications portées à la figure 5 ci-dessous.



$$G = \sqrt{(\text{rayon} + \text{largeur de l'objet})^2 + \left(\frac{\text{longueur de l'objet}}{2}\right)^2} - \text{rayon} + 5 \text{ cm}$$

Source : Conveyor Equipment Manufacturers Association, Standard 401-1962.

Figure 5. Largeur des transporteurs à rouleaux dans les courbes

Les postes d'arrivée des transporteurs à déclivité seront beaucoup plus bas que les postes de départ si le parcours est long. La pente nécessaire pour que le démarrage soit automatique dépend de l'objet à transporter (voir tableau 2). Les capacités moyennes des transporteurs à rouleaux sont indiquées au tableau 3.

TABLEAU 2. PENTES MINIMALES POUR LES TRANSPORTEURS À ROULEAUX

Objets transportés	Déclivité par 10 pieds (en pouces)	Déclivité par mètre (en cm)
Praticables métalliques	1½	1,25
Praticables	2-5	1,7 - 4,2
Fûts vides	5	4,2
Fûts pesant plus de 150 lb (70 kg)	3½	3,0
Fûts pleins, jusqu'à 250 lb (115 kg)	1½	1,3
Cartons, jusqu'à 15 lb (7 kg)	5	4,2
Cartons de 15 à 50 lb (7 à 25 kg)	4	3,3
Caisses en bois, jusqu'à 50 lb (25 kg)	4½	3,8
Caisses en bois, de plus de 50 lb (25 kg)	3½	3,0
Caisses armées et caisses cerclées	6	5,0
Caisses à claires-voies, jusqu'à 125 lb (55 kg) ...	4	3,2

Source : Rapistan, Inc.

Monorails

Les contenants actionnés à la main et suspendus à des monorails sont très pratiques, car ils peuvent circuler dans les couloirs et n'occupent aucune superficie au sol.

Le choix du parcours approprié d'un monorail dépend, par exemple : a) du poids maximal qui peut se trouver concentré entre deux points d'accrochage ; b) de la distance maximale entre deux points d'accrochage successifs ; c) de la fréquence du trafic ; d) de la vitesse de déplacement des contenants. Ces facteurs, ainsi que la résistance des éléments structurels de la construction, déterminent les types d'accrochage de monorail. Normalement, les dispositifs d'accrochage peuvent être fixés sur les charpentes. Néanmoins, si la charpente est trop faible, il faudra d'abord installer une superstructure spéciale. On peut prévoir, à titre d'indication générale, que les charges actionnées à la main se déplacent de 150 pieds (45 m) par minute et ne dépassent pas 3 tonnes.

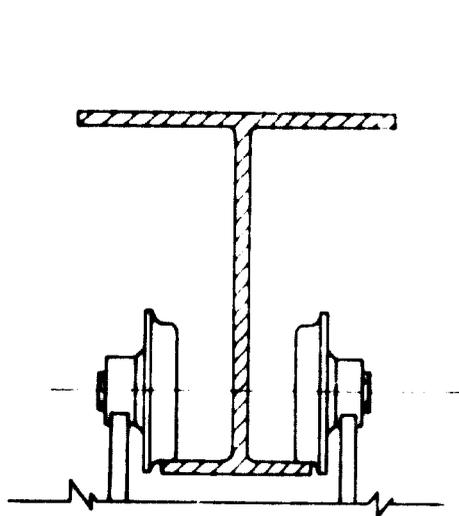
S'il s'agit d'installations comprenant de longues portées et de lourdes charges, on utilise souvent des rails sur poutre ou traverse, c'est-à-dire des rails renforcés en forme de T renversé, soudés à des poutres de soutènement spécialement conçues qui sont raccordées, par le haut, à la charpente par des flasques et des résilles larges en acier doux.

Le rail et la suspension sont schématisés aux figures 6 et 7.

TABEAU 3. POIDS DU ROULEAU ET CAPACITÉ DE TRANSPORT
(en tonnes)

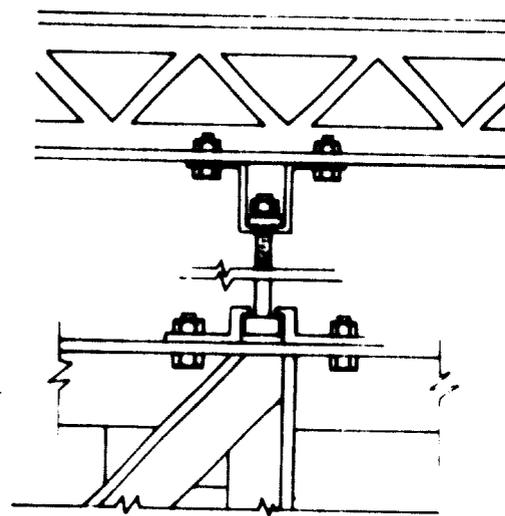
Longueur nominale des rouleaux, en pouces	1,9 pouce, n° 16		1,9 pouce, n° 13		2,25 pouce, n° 12		2,5 pouce, n° 14	
	Capacité	Poids	Capacité	Poids	Capacité	Poids	Capacité	Poids
6	—	—	—	—	350	1,9	250	1,7
9	150	1,8	250	2,3	350	2,6	250	2,3
12	150	2,2	250	2,9	350	3,4	250	3,0
15	150	2,6	250	3,5	350	4,4	250	3,7
18	150	3,0	250	4,1	350	4,9	250	4,4
21	150	3,5	250	4,7	350	5,7	250	5,0
24	150	3,9	250	5,3	350	6,4	250	5,7
27	150	4,3	250	5,8	350	7,2	250	6,4
30	150	4,7	250	6,4	350	8,0	250	7,1
33	150	5,2	250	7,0	350	8,7	250	7,7
36	150	5,6	250	7,6	330	9,5	250	8,4
39	150	6,0	250	8,2	300	10,3	250	9,1
42	150	6,4	250	8,8	280	11,0	250	9,8
45	150	6,8	250	9,4	260	11,8	250	10,4
48	150	7,3	250	10,0	250	12,5	250	11,1
51	150	7,7	230	10,6	230	13,3	230	11,8

Source : Rapiotan, *Data Book 51.5*, tableaux 2, septembre 1966.



Source : Tirée de Monorail Manufacturers Association, *Material Handling with Monorail*.

Figure 6. Roulements sur monorail typique



Source : Tirée de Monorail Manufacturers Association, *Material Handling with Monorail*.

Figure 7. Suspension d'un monorail

Grues et treuils à chaîne

Les modèles de grues à manœuvre manuelle qui coulissent sur rail supérieur sont particulièrement pratiques et utilisent de nombreux éléments du système monorail. (On emploie également les poutres de soutènement pour les éléments porteurs de grues.) Le modèle le plus simple de grue aérienne est le pont léger à manœuvre manuelle pour charges allant jusqu'à 3 tonnes. Il est équipé d'un treuil et permet d'exécuter des opérations de levage peu coûteuses sur toute la surface de travail de la grue. Il peut également être utilisé avec des raccords pour déplacer une charge d'un rail à l'autre.

Le pont-grue est le modèle de treuil le plus courant et consiste surtout en une traverse se déplaçant sur un rail aérien. Une grue à portique à double pied se compose d'un pont soutenu par 2 pieds qui se déplacent sur les rails placés sur un socle au niveau du sol. Une grue à portique à un seul pied se compose d'un pont soutenu d'un côté par un pied se déplaçant sur un rail au niveau du sol et de l'autre côté par un rail fixé à un mur du bâtiment.

Une grue à flèche se compose d'un pont soutenu à partir d'un mât vertical ou d'un mur. Le pont d'une grue à flèche soutenu par un mât vertical peut pivoter sur 360 degrés. Les grues à flèche à support mural sont souvent montées sur pivot, ce qui permet de dégager les couloirs de roulement lorsqu'elles ne sont pas utilisées.

Chariots à main

Des chariots à main très variés constituent l'un des moyens de manutention le plus courants. On peut les classer selon leur capacité de charge et l'effort nécessaire pour les déplacer.

La force nécessaire pour pousser un chariot est fonction de son poids, du poids de la charge et du coefficient de friction des roues sur le sol, ce coefficient dépendant du diamètre des roues.

Pour calculer les tonnes par heure/ouvrier qui peuvent être effectuées avec des chariots à main, il faut considérer que la vitesse de marche de l'ouvrier est de 2 à 2 1/2 miles par heure, c'est-à-dire entre 176 et 220 pieds, soit environ 53-66 m par minute. Il est recommandé de tenir compte de la vitesse la moins élevée si l'on veut limiter la fatigue de l'ouvrier. La résistance horizontale qui s'exerce lorsque l'on pousse un chariot sur un plan horizontal est de 40 lb (18 kg) ou moins. Une augmentation sensible de ce chiffre diminue nettement le rendement de l'ouvrier. Une résistance atteignant 50 lb (23 kg) est rarement recommandée, sauf pour des mouvements intermittents et peu fréquents, par exemple pour la montée d'un plan incliné. La résistance optimale est fixée à 32 lb (14,5 kg) pour un ouvrier moyen.

Le tableau 4 ci-dessous indique la résistance moyenne de roulement de chariots équipés de pneus moulés sur différents revêtements.

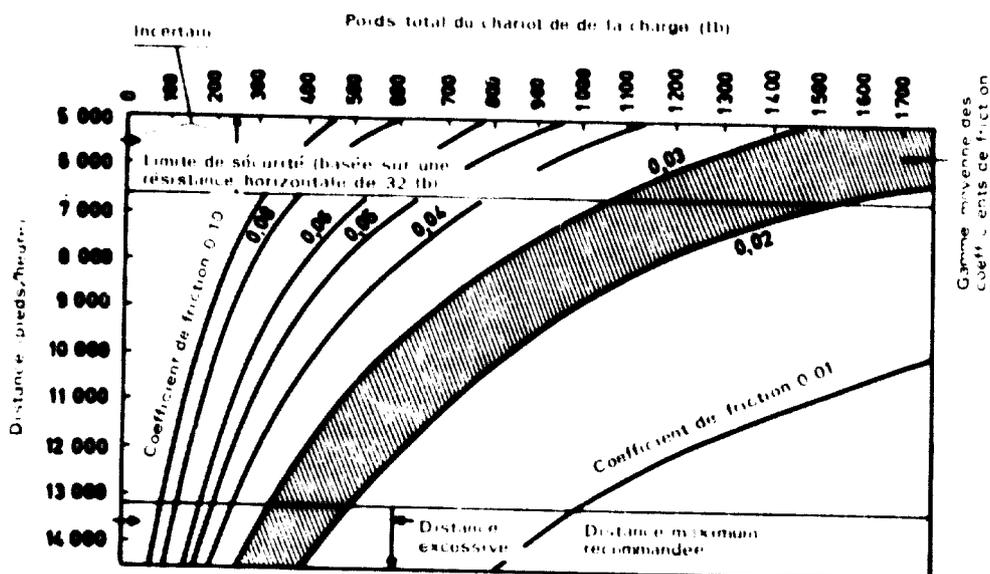
TABLEAU 4. RÉSISTANCE DES CHARIOTS ROULANT SUR DES REVÊTEMENTS HORIZONTAUX

Revêtement	Coefficient de friction	Résistance (lb/tonne)
Béton	0,010-0,020	20 à 40
Asphalte	0,010-0,025	20 à 50
Pierre	0,015-0,035	30 à 70
Pavés de bois	0,015-0,025	30 à 50
Sable	0,015-0,030	30 à 60
Pneus sur revêtement lisse	0,020-0,030	40 à 60

Source: Liberty Mutual Research Center.

Le rendement des matériels utilisant la force de l'homme et de manutention manuelle des matériaux est limité par l'anatomie et la physiologie humaines. Il importe de ne pas imposer aux travailleurs des efforts supérieurs au niveau normal de leur endurance. Il est donc utile de connaître les limites de l'endurance humaine pour pouvoir décider s'il convient d'avoir recours à des dispositifs électriques, quelles que soient les disponibilités et les coûts de main-d'œuvre.

La figure 8 indique le rapport poids-distance recommandé dans le cas de chariots propulsés à la main. Comme on le voit, un chariot de 1 000 livres (poids total, chariot plus charge) peut être poussé de 7 000 pieds à l'heure lorsque le coefficient de friction est voisin de 0,03. Avec un coefficient de 0,04, la distance se trouve réduite à 5 700 pieds. On se trouve alors dans la zone d'insécurité du graphique où la résistance à la poussée horizontale dépasse les 32 lb recommandées (limite de sécurité). La seconde ligne horizontale indique la distance horaire maximale recommandée.



Source : Liberty Mutual Research Center.

Figure 8. Relation entre le trafic horaire des chariots à propulsion manuelle, le poids et le coefficient de friction du roulement

TABLEAU 5. POIDS MAXIMAUX (LB) QUE PEUVENT SOULEVER ET ABAISSER DIVERS POURCENTAGES D'OUVRIERS DE L'INDUSTRIE

		90%	75%	50%	25%	10%
Du sol à hauteur des mains	Soulever	37,3	45,1	53,8	62,5	70,3
	Abaissier	36,2	48,4	61,9	75,4	87,6
De hauteur des mains à hauteur d'épaules	Soulever	34,4	43,0	52,7	62,3	70,9
	Abaissier	39,0	46,4	54,6	62,8	70,2
De hauteur d'épaules à bout de bras	Soulever	29,4	38,6	48,8	59,1	68,3
	Abaissier	28,7	36,1	44,3	52,5	59,9

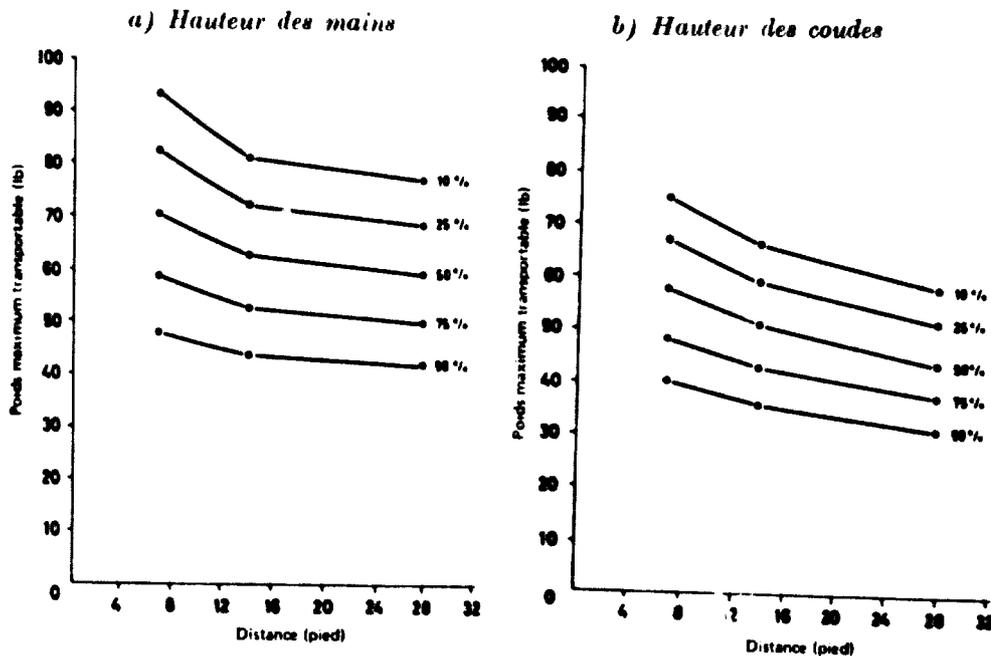
Source : Snook, Irvine et Bass (Liberty Mutual) (1970) "Maximum weight and work loads acceptable to male industrial workers", *American Industrial Hygiene Association Journal*, Vol. 31, sept.-oct., tableaux II et III, p. 582.

TABLEAU 6. CHARGES MAXIMALES (LIVRES-PIED/MN) QUE PEUVENT SOULEVER ET ABAISSER DIVERS POURCENTAGES D'OUVRIERS DE L'INDUSTRIE

		90%	75%	50%	25%	10%
Du sol à hauteur des mains	Soulever	209	262	322	381	434
	Abaissier	311	419	539	658	766
De hauteur des mains à hauteur d'épaules	Soulever	333	397	468	540	604
	Abaissier	431	542	667	791	903
De hauteur d'épaules à bout de bras	Soulever	204	283	370	458	537
	Abaissier	255	357	471	584	686

Source : Voir tableau 5.

Aux tableaux 5 et 6 figurent les limites de poids acceptables pour le déplacement manuel dans le sens vertical, et la figure 9 indique les charges maximales qui peuvent être portées à hauteur des mains et à hauteur des coudes.



Source : Snook, Irvine et Bass (Liberty Mutual) (1970) "Maximum weight and work loads acceptable to male industrial workers", *American Industrial Hygiene Association Journal*, Vol. 31, numéro de sept.-oct., fig. 4, p. 585.

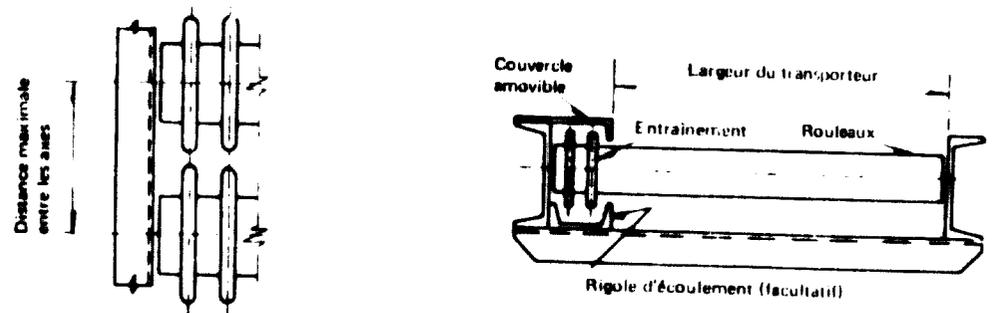
Figure 9. Poids maximum transportable pour divers pourcentages de travailleurs de l'industrie (sexe masculin)

Transporteurs à rouleaux à commande électrique

Le calcul de la largeur est le même pour les transporteurs à rouleaux à commande électrique que pour ceux à déclivité, à cette exception près qu'il faut prévoir un espace supplémentaire pour une chaîne de transmission électrique. Les bandes transporteuses à rouleaux à commande électrique ne sont pas pratiques dans les ateliers mécaniques où l'huile, le liquide de refroidissement, etc., peuvent diminuer l'efficacité des dispositifs à friction. Les capacités indiquées au tableau 2 sont également valables pour les rouleaux à commande électrique. La figure 10 indique la distance minimale entre les axes des rouleaux, qui limite les dimensions du plus petit objet manutentionné.

Transporteurs à plaques et transporteurs à bandes

Les transporteurs à plaques sont généralement utilisés lorsque les bandes ne pourraient fonctionner en raison de la température élevée et de la présence de copeaux et de lubrifiants.



Dimension ASA de la chaîne	Distance minimale entre les axes (C) (pouces)							
	Nombre de dents							
	13	15	16	17	19	21	23	28
40			3 1/4	3 1/2	3 3/4	4		5 1/4
50		4 1/16		4 11/16			5 5/16	
60	4 1/8	4 1/2			5 5/8	6 3/8		
80	5 1/2		6 1/2					
100	6 7/8							

Source : Conveyor Equipment Manufacturers Association, Standard 404 - 1965.

Figure 10. Quelques caractéristiques techniques des trains de rouleaux à propulsion électrique

Les bandes en fils métalliques et les bandes en acier peuvent être utilisées dans certains cas spéciaux. Le choix limité de modèles et le coût élevé des bandes en acier et en fils métalliques tissés en restreint l'usage.

Transporteurs aériens à monorail

Les monorails à commande électrique et autres voies suspendues sont des dispositifs de manutention des matériaux très efficaces et économiques, fortement recommandés lorsqu'ils sont adaptés à la technologie et à la disposition de l'atelier. Ils occupent un espace en hauteur qui demeurerait autrement inutilisé, ont des coûts d'entretien peu élevés, sont très sûrs et consomment peu d'énergie. Des baladeurs aériens sans entraînement électrique sont souvent utilisés à la place des monorails.

La poulie du baladeur aérien est un roulement à bille de grandes dimensions pouvant supporter une charge très lourde. Le rail sur lequel elle se déplace est une poutre en forme de I dont la capacité de charge est moins élevée et par conséquent dont les dimensions déterminent les limites de charge du baladeur aérien. Les charges généralement recommandées sont les suivantes :

Dimensions de la poutre		Charge maximale du baladeur aérien	
Pouces	Centimètres (env.)	Livres	Kilogrammes (env.)
2 1/8	6,7	75	35
3	7,6	250	115
4	10,2	400	180
6	15,2	1 000	455

Treuil et grues à commande électrique

Des classifications sont généralement établies par les fabricants pour aider les acheteurs à indiquer la grue la mieux adaptée à chaque usage déterminé. La Crane Manufacturers Association of America a élaboré 6 catégories — de A à F — correspondant à l'équipement de réserve, aux équipements de faible, moyenne et grande puissance, aux équipements pour le travail prolongé et en grande charge et aux équipements pour les aciéries (déplacement aérien). Nous nous intéresserons ici aux grues de moyenne et de grande puissance. Celles de la première catégorie s'utilisent dans les ateliers de machines, les ateliers de montage, les fonderies et les ateliers de transformation nécessitant un équipement de moyenne puissance. Celles de la seconde catégorie s'utilisent dans les ateliers de fabrication en matériel lourd, dans certaines fonderies, dans des ateliers de fabrication, dans des ateliers d'emboutissage et les entrepôts des aciéries.

Le tableau 7 indique les vitesses d'exploitation de l'équipement disponible sur le marché.

TABEAU 7. VITESSES D'EXPLOITATION DE GRUES À COMMANDE ÉLECTRIQUE EN PIEDS/MN

Capacité en tonnes	Treuil			Baladeur aérien			Pont		
	Lente	Moyenne	Rapide	Lente	Moyenne	Rapide	Lente	Moyenne	Rapide
3	20	35	70	125	150	200	200	300	400
5	20	35	70	125	150	200	200	300	400
7 1/2	20	35	70	125	150	200	200	300	400
10	20	30	60	125	150	200	200	300	400
15	15	30	50	125	150	200	200	300	400
20	15	25	40	125	150	200	200	300	400

Source : Crane Manufacturers Association of America, *Specification No. 70*.

Le bâtiment doit être construit en vue de l'installation d'un type déterminé de grue. Il n'est pas toujours économiquement possible de modifier sa structure par la suite. La construction ne devra pas seulement supporter des charges statiques, mais également des charges dynamiques. Il faudrait laisser entre le point le plus élevé de la grue et le point le plus bas du toit, en tenant compte de l'affaissement, un espace d'au moins 6 pouces. La marge entre les extrémités de la grue et l'obstacle le plus proche ne doit pas être inférieur à 2 pouces.

Lorsque des étrépillons sont fixés à la jonction des fermes du toit et des colonnes qui soutiennent les rails des ponts-grues, il faut placer les étrépillons et la semelle inférieure des fermes du toit de manière que le baladeur aérien soutenant la grue puisse se déplacer jusqu'à l'extrémité du pont, ce qui permet également d'amener le grappin près des colonnes qui soutiennent le rail de grue.

Chariots-élévateurs à fourche

Etant donné leur grande adaptabilité, les chariots-élévateurs à fourche sont largement utilisés comme dispositifs de levage, de transport et de mise en place. Sur les modèles les plus simples, les commandes sont placées sur le guidon et le conducteur marche à côté de la machine. Ils sont propulsés à l'électricité ou au gaz, et les modèles offerts ont généralement une capacité allant jusqu'à 4 000—6 000 livres.

Les chariots-élévateurs à fourche équipés d'un siège de pilotage ont une capacité de 2 000 à 60 000 livres, sont de formes très variées et peuvent être mus à l'essence, au gaz ou à l'électricité. Leur vitesse peut atteindre 15 mph, mais la vitesse normale d'exploitation à l'intérieur des bâtiments ne dépasse pas 5 mph. Les chariots-élévateurs à essence ne peuvent être utilisés à l'intérieur des bâtiments que si la ventilation est suffisante. Les chariots-élévateurs électriques sont divisés en trois groupes : les modèles utilisés dans les emplacements poussiéreux et dangereux, les modèles équipés de moteurs blindés et les modèles polyvalents.

Pour utiliser efficacement les chariots-élévateurs à fourche, les couloirs de l'atelier doivent être suffisamment larges pour permettre un gavage à angle droit. La figure 11 indique la méthode de calcul de la largeur minimale du couloir. On distingue deux cas, dépendant du rapport de la largeur des charges à la largeur du chariot-élévateur et du rayon de braquage intérieur.

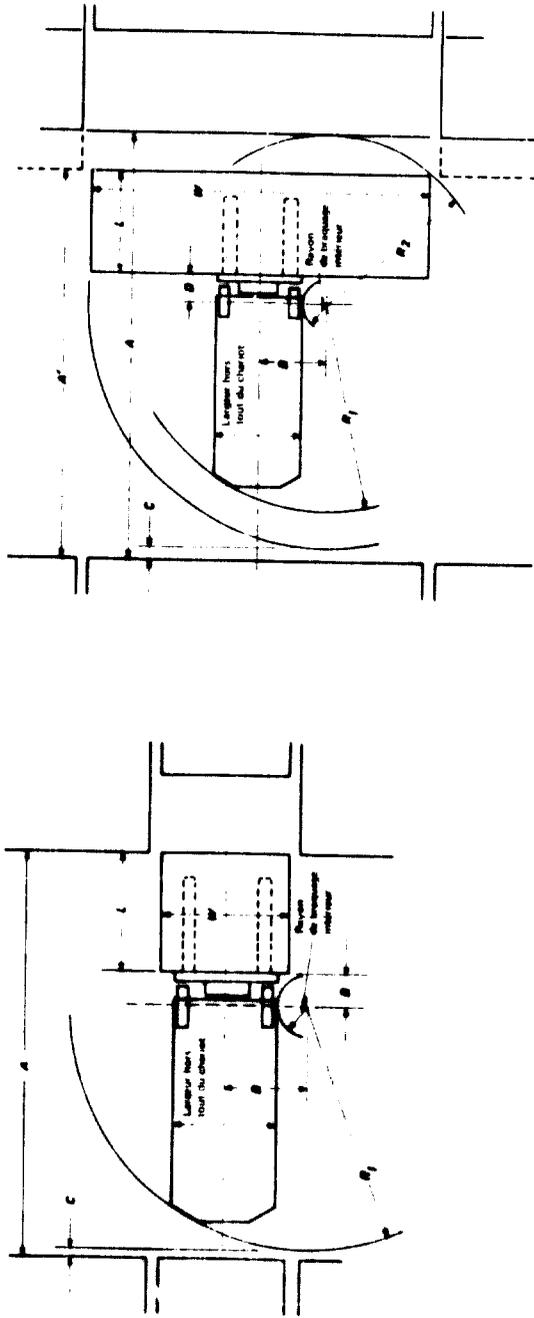
Manutention des matériaux au poste de travail

La manutention des matériaux au poste machine est souvent inefficace dans la plupart des ateliers de machines. Des améliorations et une mécanisation au poste de travail permettent de réaliser des économies qui sont de plus en plus importantes au fur et à mesure que les coûts de main-d'œuvre augmentent.

Il est difficile de chiffrer le rendement général de l'usinage des pièces, mais le plus souvent le temps effectif de travail d'une pièce sur machine ne dépasse pas 25 % du temps où la pièce est restée à ce poste machine. (Il y a des exceptions évidentes : des coupes longues et difficiles, des travaux sur tours-revolvers.)

Il faut augmenter le rendement d'un ouvrier qualifié en lui évitant dans son travail manuel de routine le plus possible de gestes d'élévation, de port, de déplacement et de mise en place des objets. Cela augmentera la production et la sécurité tout en diminuant la fatigue et les pertes. On peut généralement chiffrer les avantages dont la valeur unitaire sera généralement supérieure aux frais généraux et à l'amortissement de l'équipement supplémentaire nécessaire.

Les matériaux sont manutentionnés au poste de travail par des dispositifs permettant l'avance, l'enlèvement, le maintien et la mise en place des pièces. D'autre part, on utilise des transporteurs automatiques et semi-automatiques pour le montage, l'inspection des pièces, etc.



Légende. *A* : Largeur minimale des couloirs pour garbage à angle droit ; *B* : $\frac{1}{2}$ largeur hors tout plus rayon de braquage interne ; *C* : Largeur optimale pour l'exploitation, compte tenu du glissement de la direction (consulter le fabricant) ; *D* : Distance du chemin de la charge à l'axe de conduite ou à l'axe porteur ; *R*₁ : Rayon de braquage externe (chariot à vide, circulant à faible vitesse) ; *R*₂ : Distance de l'axe de braquage à l'angle indiqué de la charge = $\sqrt{(D + L)^2 + \left(\frac{W}{2} - B\right)^2}$; *L* : Longueur de la charge ; *W* : Largeur de la charge.

Not. Quand $W > 2B$, mais $\leq 2(R_1 - B)$, utiliser la formule : $A = R_1 + R_2 + C$. Si l'arc de cercle *R*₂ n'a pas besoin de passer à côté de la ligne d'empilage (indiqué en pointillé), utiliser : $A' = R_1 + D + L + C$.

Sources : Mill and Factory, mai 1968.

Figure 11. Largeur minimale des couloirs pour les chariots glisseurs à fourche

Les dispositifs d'avance des pièces comprennent des alimentateurs à vibrations, des combinés alimentateur-orientateur, des combinés alimentateur-orientateur-compteur, des élévateurs et des gerbeurs de feuillards.

L'avance des pièces pour des opérations consécutives (par exemple sur presses) et l'enlèvement des pièces exécutées nécessitent souvent des dispositifs spéciaux, mais on peut quelquefois employer du matériel standard tel que des orientateurs, des transporteurs magnétiques à courroie, des gerbeurs et des palettiseurs.

Il y a plusieurs façons de maintenir et de mettre en place les pièces usinées, selon leur forme. Des dispositifs à mouvement alternatif font avancer et placent une pièce à la fois au moment voulu. Il existe dans le commerce un grand nombre de positionneurs, de trains de rouleaux, de redresseurs et matériels analogues pour mettre la pièce en place et la maintenir dans la position voulue pendant l'usinage. Les manipulateurs maintiennent les pièces dans n'importe quelle position et font effet de troisième main pendant l'usinage. Lorsque l'on utilise des matrices lourdes, il faut avoir recours à des dispositifs mécaniques pour les maintenir et les soulever.

Le maintien des dispositifs d'avance à la même hauteur diminue fortement l'effort manuel car il élimine la nécessité de lever ou d'abaisser chaque pièce entre les opérations.

Le matériel de transport automatique et semi-automatique peut être plus ou moins élaboré. Les plaques tournantes équipées de poste de montage constituent un cas simple. La chaîne de production peut être mécanisée au point que chaque ouvrier a son propre volant de temps pour tourner, soulever, porter et abaisser la pièce mécaniquement, indépendamment de la vitesse de la chaîne mais selon un plan horaire ou journalier. L'emploi de transporteurs qui éliminent entièrement la manutention manuelle n'est qu'une question de justification économique, car on peut aujourd'hui concevoir et fabriquer un matériel qui corresponde à n'importe quel besoin des ateliers.

Le tableau 8 indique combien de minutes un ouvrier gagne par jour pour que les économies de coût de main-d'œuvre justifient, à elles seules, l'installation d'un équipement automatisé.

Les calculs sont basés sur les salaires aux États-Unis à raison de 2 000 heures de travail par an ; on considère que les charges annuelles au titre de l'équipement représentent 10 % de son coût initial ; bien que très simplifiée, cette méthode a l'avantage de permettre l'estimation rapide des ordres de grandeur. Il est facile de procéder à d'autres calculs sur la base d'hypothèses correspondant mieux aux conditions qui règnent dans tel ou tel pays en voie de développement.

La manutention des déchets

La manutention et l'enlèvement des déchets constituent l'une des tâches d'intendance les plus difficiles à accomplir dans un atelier mécanique et comptent parmi les moins efficaces. Il s'agit, on le voit, d'une double tâche : tout d'abord, évacuer les déchets des machines et de l'atelier, et en second lieu les traiter, les stocker et les enlever.

TABLEAU 8. RELATION ENTRE LES GAINS DE TEMPS JOURNALIERS ET LE COÛT DE L'ÉQUIPEMENT DE MANUTENTION DES MATÉRIEAUX AU POSTE DE TRAVAIL.

Salaires hebdomadaires (en dollars) :	38,5	48	58	68	77	87	96	106
Salaires annuels (en dollars) :	2 000	2 500	3 000	3 500	4 000	4 500	5 000	5 500
Coût de l'équipement (en dollars)	Gain de temps, en minutes, nécessaire pour justifier la dépense							
100	2	2	2	1	1	1	1	1
200	5	4	3	3	2	2	2	2
300	7	6	5	4	4	3	3	3
400	10	8	6	6	5	4	4	4
500	12	10	8	7	6	5	5	4
600	14	12	10	8	7	6	6	5
700	17	13	11	10	8	8	7	6
800	19	15	13	11	10	9	8	7
900	22	17	14	12	11	10	9	8
1 000	24	19	16	14	12	11	10	9
1 100	26	21	18	15	13	12	11	10
1 200	29	23	19	16	14	13	12	11
1 300	31	25	21	18	16	14	13	11
1 400	34	27	22	19	17	15	14	12
1 500	36	29	24	21	18	16	14	13
1 600	38	31	26	22	19	17	15	14
1 700	41	33	27	23	20	18	16	15
1 800	43	34	29	25	22	19	17	16
1 900	46	36	30	26	23	20	18	17
2 000	48	38	32	27	24	21	19	18

Source : Développement d'un graphique établi par O. B. Lovell, Controller, First National Bank, Madison, Wisc., et publié dans *Auditorium* (1958), de la National Assn. of Bank Auditors and Controllers, p. 32.

Dans les petits ateliers, on enlève généralement au rateau les copeaux tombés autour et en dessous des machines-outils et on les place dans des poubelles, des fûts ou des praticables, qui sont ensuite rassemblés sur des véhicules à moteur ou non et transportés ainsi jusqu'à une décharge. Un système de cette nature exige un bon aménagement de l'atelier qui facilite le ratissage et l'enlèvement des déchets. Les ateliers plus importants peuvent être organisés de façon que l'évacuation des déchets soit mécanisée. Cette solution est toujours à conseiller lorsque l'on établit les plans de nouvelles installations.

Les transporteurs de déchets à l'intérieur des ateliers appartiennent aux types suivants :

- Transporteurs à tablier ;
- Transporteurs à bandes ;
- Transporteurs à paliers, à raclettes ou à chaînes ;
- Transporteurs à grappins ;
- Dévaloirs et trémis à bascule ;
- Transporteurs pneumatiques.

Malgré la simplicité des systèmes pneumatiques, leur utilisation en lieu et place de transporteurs mécaniques pour le ramassage des déchets ne doit être envisagée qu'avec la plus extrême circonspection.

La première règle à appliquer pour cette opération est de les séparer en au moins 4 groupes, c'est-à-dire :

Les chutes de tours exclusivement composées d'acier et exemptes de fonte ou de métaux non ferreux, d'incrustations ou d'huile en trop grandes quantités. Aucun matériau très rouillé ne doit être compris dans ce groupe.

Les mélanges de chutes de perceuse et de chutes de tours. L'acier et la fonte doivent être exempts d'incrustations, d'huile en quantités excessives et de métaux non ferreux. Ce groupe de déchets ne doit pas comporter de matériaux très rouillés.

Les déchets propres de fonte.

Les métaux non ferreux et l'acier inoxydable.

Une fois qu'ils ont été rassemblés, généralement dans une cour, les déchets doivent être traités et stockés. Dans les petits ateliers mécaniques, le traitement peut consister simplement à enlever le liquide de refroidissement par lavage. Dans les ateliers plus importants, il peut comprendre le broyage des déchets, l'enlèvement du liquide de refroidissement et le séchage.

Le stockage des déchets sur des places surélevées constitue la meilleure solution, mais il convient de ne pas stocker plus de 60 à 70 tonnes par compartiment en raison du risque de compactage. La pente et les dimensions des guichets doivent être calculés de façon à éviter les engorgements.

PLANIFICATION DE LA PRODUCTION

Lorsqu'il s'agit de planifier la production d'une future installation, les paramètres commerciaux et le niveau de la technologie envisagés sont les éléments décisifs, mais ce cas n'est pas analysé ici.

La planification de la production d'un atelier existant est déterminée dans une large mesure par les équipements de production déjà en place. C'est le cas le plus fréquent pour les industries des pays en voie de développement. Les objectifs de la planification de la production sont alors les suivants :

Utiliser avec profit et efficacité les ressources en hommes, en machines et en matériaux ;

Procurer en temps utile à la direction une rétro-information qui lui permette de maintenir un flot de production régulier et constant à travers toute l'usine ;

Réduire au minimum le temps qui s'écoulera entre la réception de la commande et l'expédition du produit fini ;

Tenir compte de l'évolution du marché, de la technologie et des modifications des ressources en matériel, en main-d'œuvre, etc.

La planification de la production peut être assurée par une seule personne ou par une équipe de cadres mais, dans les deux cas, l'information sur la production réelle est la base indispensable qui, comparée à la rétro-information venue de l'atelier, constitue le mécanisme autorégulateur qui permet la prise de judicieuses décisions additionnelles.

Dans l'analyse de la rentabilité, les principaux facteurs à considérer sont la capacité de l'atelier, la possibilité d'exécuter un travail donné sans effectuer d'heures supplémentaires et sans retarder l'exécution des commandes d'autres clients importants, la nécessité et la possibilité d'employer des sous-traitants.

Dans les ateliers qui exécutent de petites séries à la commande, il convient de grouper les commandes de façon à améliorer les opérations de transformation, de les sortir par lots le plus économiques possibles afin d'occuper pleinement les machines de la façon la plus permanente possible. Les sous-traitants doivent être comptés dans la capacité totale de production du système. Les délais de livraison promis au client doivent être calculés en fonction de l'attente sur les diverses machines. Les travaux en urgence sont à éviter en raison de leur coût.

Les rapports manuscrits sur l'activité à chaque poste de travail peuvent apporter à la direction un courant constant d'information sur le volume et l'avancement du travail dans tout l'atelier. La direction doit toujours rester à l'affût des signes annonciateurs de retards dans les livraisons, afin d'y porter remède lorsqu'elle peut encore choisir des méthodes moins coûteuses que les heures supplémentaires de dernière minute.

C'est également une erreur que de livrer trop tôt des lots de matériaux pour la fabrication ou de planifier les opérations de telle sorte que l'une s'achève bien avant le début de la suivante, car les matériaux en stock représentent une immobilisation de capital et augmentent les risques de détérioration, de corrosion, de vols et de pertes.

La réduction des coûts et l'acquisition d'une position plus concurrentielle sur le marché devraient être les objectifs constants des plans de production. Les petits ateliers disposant de peu de capital auraient tout intérêt à adopter la méthode suivante :

Favoriser les économies en général, moyennant le réaménagement de l'équipement, la réduction de l'effort de manutention des matériaux et le raccourcissement du cycle de fabrication.

Investir les économies réalisées dans des dispositifs simples de manutention manuelle (transporteurs, etc.), soit fabriqués dans l'atelier même surtout s'il s'agit d'un atelier de métallurgie -- soit achetés. Il devrait en résulter une diminution appréciable des coûts. Si tel n'est pas le cas, il convient de revoir la planification.

Le profit résultant des réductions des coûts devrait être accumulé en vue de l'achat de matériels plus élaborés de manutention des matériaux et de fabrication, ou même de nouvelles installations de production, s'il n'est plus possible d'améliorer encore les installations existantes.

ORDONNANCEMENT DE LA PRODUCTION

L'ordonnancement bien conçu de la production permet la canalisation régulière des matériaux à travers l'atelier. Il peut être réalisé aussi bien pour un atelier n'employant qu'un ouvrier et pour une grande entreprise de plusieurs usines car le processus logique demeure le même. Toutes les phases de la production doivent être prises en considération sur le papier, puisque, par définition, l'ordonnancement est la simulation sur papier de l'activité de l'usine.

Dans un petit atelier, quelques-unes des étapes décrites ci-après peuvent être comprimées ou combinées à d'autres.

L'ordonnancement de la production commence avec la réception de la commande d'un client, ou des commandes groupées par un groupe de planification, et se termine avec l'expédition des marchandises. L'ordonnancement typique dans un atelier de dimensions moyennes doté d'un service technique est le suivant :

1. Réception de la commande individuelle (ou groupée).
2. a) Transmission de la commande au service technique pour examen.
b) Transmission au service d'achat de l'état des pièces, matériaux et sous-assemblages principaux qui sont nécessaires.
3. a) Etablissement des copies et descriptions techniques qui sont transmises au service de fabrication.
b) Elaboration des demandes finales de matériaux.
4. a) Remise des demandes de matériaux au service d'achat.
b) Le service de contrôle de stocks de matériaux vérifie les stocks et commande les matériaux nécessaires pour les reconstituer.
5. Remise de la description du produit ou des éléments le composant au service de contrôle de la production pour ordonnancement.
6. Calcul des temps, élaboration du plan d'utilisation des machines et détermination de l'outillage nécessaire, effectués par le service de contrôle de la production.
7. Inscription de la commande au programme de fabrication de l'usine, pour une date postérieure à l'arrivée des matériaux et de tout outillage spécial. S'il s'agit d'un travail prolongé, le début d'exécution de la commande sera différé jusqu'au moment où il aura été accumulé assez de matériaux pour permettre une fabrication en continu.
8. Toutes les phases successives de la fabrication, antérieures au montage final des éléments, sont ordonnancées selon la formule du point 7.
9. a) Les éléments fabriqués sont envoyés au montage.
b) Les éléments achetés sont livrés en temps utile pour le montage.
10. Montage, essais, contrôle.
11. a) Envoi au service d'expédition, emballage.
b) Notification au service de la comptabilité.
c) Notification au client.
12. Expédition.

CALCUL DU COÛT DES MATÉRIAUX ET DE LA MAIN-D'ŒUVRE

Les usines de la plupart des pays en voie de développement occupent en général moins de 50 personnes. Elles sont d'habitude issues de petits ateliers qui se sont développés grâce à la capacité de travail et aux connaissances techniques exceptionnelles du propriétaire ou du gérant, qui est aussi dessinateur-concepteur, artisan, homme d'affaires, vendeur et souvent comptable. La comptabilité ne constitue pas nécessairement une tâche trop lourde tant que l'entreprise emploie moins de 12 personnes, mais au-delà l'enregistrement des opérations financières doit être confié à un comptable qualifié.

Le service de comptabilité est chargé de présenter la situation financière de la société, y compris les montants à percevoir et à payer à une date déterminée, ainsi qu'une ventilation détaillée des dépenses. L'administrateur a besoin d'états complets et détaillés pour établir un budget ou le plan directeur des ventes, de la publicité, des achats, de l'emploi de main-d'œuvre, des quantités produites, des réalisations techniques et des travaux de recherche, et du remplacement des machines et du matériel. Lorsque les cadres de maîtrise et contremaîtres commenceront à comprendre l'incidence d'un budget détaillé sur leur propre travail, ils s'efforceront de donner le meilleur d'eux-mêmes.

Les différents services de l'atelier préparent généralement leur propre budget, qui indique les dépenses générales de production, l'achat des matériaux, les machines et l'équipement, les dépenses d'entretien et les salaires du personnel de production. Une bonne planification augmente la précision du budget et peut contribuer à stabiliser les coûts de production pendant les temps d'inactivité relative.

Les salaires payés dans une usine sont souvent classés en deux catégories : les salaires versés au titre de la main-d'œuvre directe et de la main-d'œuvre indirecte. La conduite de machines représente toujours une main-d'œuvre directe alors que la gestion du magasin d'outillage, l'entretien des ateliers et les services de conciergerie sont le plus souvent considérés comme de la main-d'œuvre indirecte. Toutes les dépenses qui ne peuvent être imputées directement sur une production, la main-d'œuvre indirecte y compris, sont généralement incluses dans les frais généraux (ou charges) de l'usine. Les matériaux font l'objet d'une classification analogue. Ceux qui sont directement utilisés dans la fabrication de pièces, y compris l'outillage spécial, sont considérés comme des matériaux directs alors que les matériaux tels que les lubrifiants, les outils polyvalents, les étaux et les pinces sont classés comme matériaux indirects et inclus dans les frais généraux.

L'assurance, la détérioration, le vieillissement et l'entretien des machines-outils, comme ceux des autres biens d'équipement, doivent être comptés dans les coûts de production. Sont ainsi accumulés les fonds nécessaires pour remplacer une machine usée au bout d'un temps déterminé ou investir dans un nouveau procédé et dans l'équipement nécessaire pour sa mise en œuvre.

Le budget de production est fonction du volume anticipé de la production, qui est lui-même basé sur les ventes estimées. Bien préparé une année à l'avance, le budget empêche des fluctuations coûteuses d'effectif. Il sera plus facile d'estimer le coût des matériels et des matériaux à acheter si la direction conserve et utilise de bons états de stocks. De plus, elle peut alors passer ses commandes en temps voulu pour que les livraisons des matériaux, machines et matériel correspondent aux besoins de production.

En cas d'expansion ou de remplacement envisagés des installations de production, il faut déterminer de nombreuses autres composantes des coûts de production à échéance plus lointaine que celle des dépenses annuelles d'exploitation et qui apparaîtront donc dans les budgets portant sur plusieurs exercices financiers.

L'inclusion dans le budget d'un plan d'entretien bien conçu permet d'assurer la remise en état et l'entretien réguliers des machines et des bâtiments dont l'utilisation et la valeur d'équipement sont ainsi maintenues.

La comptabilité établit la base de calcul des coûts de fabrication et également celle des dépenses d'administration et de commercialisation. Ces frais doivent être enregistrés avec précision car chaque pièce ou produit sorti de l'usine doit en supporter une partie appropriée.

CALCULS DU RENDEMENT DE LA PRODUCTION

Productivité du travail

L'efficacité de la production dépend de l'aptitude à utiliser les ressources humaines et les machines. Ces deux facteurs de la productivité sont dans une certaine mesure interdépendants et l'une des fonctions indispensables de la gestion d'entreprise consiste à peser judicieusement leurs interactions. Nous commencerons par analyser certains aspects de la productivité qui sont directement liés à l'utilisation de la main-d'œuvre.

Le chef de l'atelier travaillant à la commande doit souvent évaluer les normes de temps avant que la fabrication du premier lot ne soit achevée ou même commencée. Il est donc plus difficile d'évaluer les coûts et les taux horaires dans un atelier à la commande que dans un atelier de production en série qui dispose généralement de registres de production et emploie quelquefois des réalisateurs d'étude des temps pour déterminer périodiquement le rendement des opérateurs de machines et des monteurs.

Lorsqu'il s'agit d'un nouveau travail d'usinage, la méthode la plus courante consiste à confier ce travail à un ouvrier qualifié qui a déjà travaillé sur des pièces similaires. Il faut souvent prévoir une période d'expérimentation sous le contrôle rigoureux d'un contremaître avant d'élaborer les cadences de travail. Le contremaître et l'ouvrier devraient être encouragés à mettre spécialement au point des outils, des dispositifs et des méthodes de manutention des matériaux de façon à augmenter la production. Lorsqu'un travail nouveau doit être confié à des ouvriers moins confirmés, on peut obtenir dans le temps une amélioration de la qualité du travail à condition de choisir

les ouvriers avec soin. Il faut pour cela qu'ils soient capables de coordination entre leur vision et leur réflexion d'une part, et leurs gestes des mains ou des pieds d'autre part.

Certaines conditions sont nécessaires pour que l'ouvrier puisse améliorer au maximum ses capacités pour un travail déterminé, et particulier :

Les dimensions et les tolérances ne doivent pas être modifiées sensiblement pendant l'exécution de la série à produire ;

L'acheminement des matériaux aux postes de travail et leur manutention doivent être planifiés efficacement de façon à assurer un travail en continu, supprimant ainsi l'attente pour les opérateurs de machines et les monteurs ;

Les outils doivent être aiguisés et remis en état régulièrement, selon un plan déterminé à l'avance ;

Les machines doivent être vérifiées et entretenues conformément au plan d'entretien ;

Les déchets et copeaux de matériel doivent être enlevés régulièrement et ne jamais s'accumuler autour des machines-outils car ils nuisent à l'efficacité du travail ;

La composition et les propriétés physiques des matériaux utilisés pour la fabrication des pièces ne doivent pas changer, sauf cas exceptionnel.

Les modifications de cette nature peuvent nécessiter des modifications de vitesse, des cadences d'alimentation des postes de travail aussi bien que des outils, voire du modèle de machine-outil utilisé. Le chef d'entreprise n'en doit pas moins demeurer constamment à la recherche de matériaux dont les propriétés mécaniques sont meilleures ou qui durent plus longtemps.

Pour obtenir un haut degré de qualité et d'efficacité dans les opérations effectuées en série en atelier, il faut toujours assurer la formation de l'opérateur de machines, en particulier s'il s'agit de nouveaux travailleurs non qualifiés. Le temps d'apprentissage dépend de la qualité des méthodes pédagogiques. Selon le type des tâches, il peut durer de quelques jours à plusieurs années. Les programmes de formation aux tâches les plus difficiles qui exigent de plus hautes qualifications devront assurer un développement intellectuel et comporter des moyens d'augmenter la dextérité manuelle.

La durée de l'apprentissage aux tâches effectuées dans un atelier mécanique dépend des facteurs suivants :

Une certaine précision est toujours de rigueur. La formation pour la plupart des opérations sur machine-outil nécessite de 3 à 4 ans en raison du degré élevé de précision à acquérir.

Le degré d'éducation nécessaire pour l'exécution de toute tâche doit être inculqué à l'opérateur s'il ne le possède pas déjà. Même les opérateurs de tours simples et de perceuses sur colonne, et non pas seulement les ajusteurs, doivent pouvoir lire facilement les règles graduées, les micromètres et les comparateurs. Il ne suffit généralement pas de former un ouvrier à reproduire une pièce à l'aide d'un pied à coulisse.

L'instruction ne doit pas être impartie exclusivement de façon orale ; il faut également utiliser des manuels et les opérateurs de machine doivent savoir bien déchiffrer les dessins techniques.

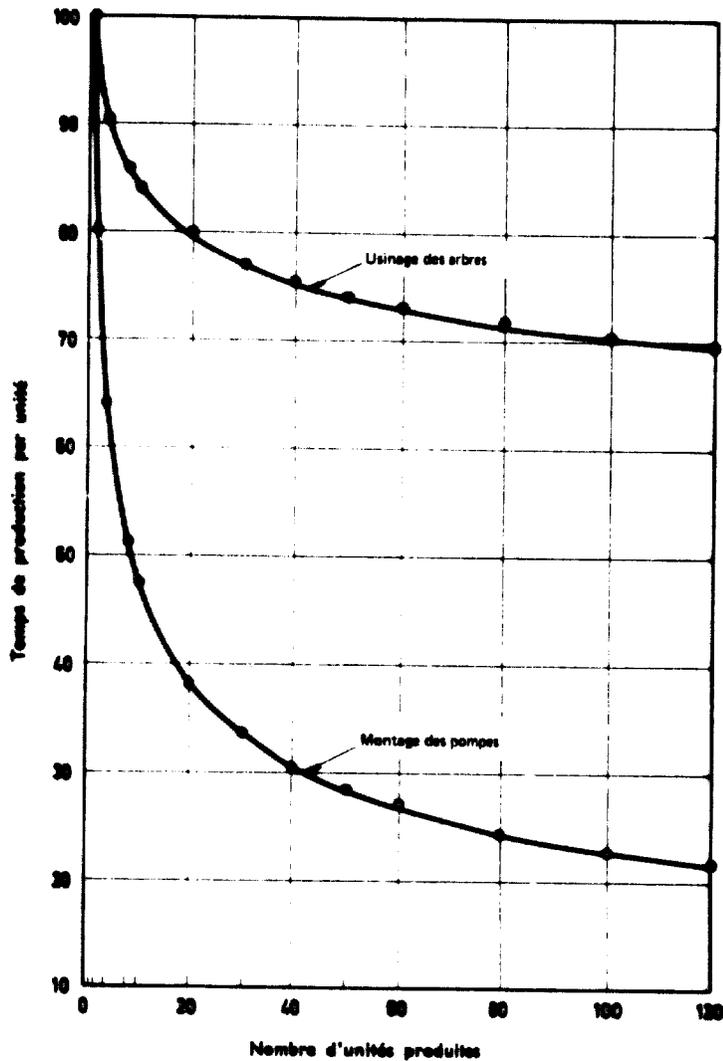
La dextérité manuelle nécessaire pour la manipulation des machines-outils, la mise en place et l'enlèvement des pièces, varie du simple geste du bras et de la main jusqu'au mouvement calculé qui appelle une coordination entre la lecture de l'instrument et le déplacement manuel de la pièce.

Quelques machines-outils automatiques demandent moins de compétences manuelles que d'autres, mais exigent souvent une plus grande adaptabilité mentale, une ouïe fine, un odorat très sensible et une très bonne vue. Un son particulier en provenance d'un outil peut signaler une usure anormale ou une rupture ; l'odeur de graisse chaude peut révéler le grippage d'un roulement, et la vibration d'un outil ou d'une pièce peut provoquer une panne grave si elle n'est pas remarquée à temps.

L'énergie physique est l'une des qualités les plus demandées aux travailleurs dans la plupart des pays en voie de développement. Elle doit être le premier facteur à considérer lorsqu'il s'agit de soulever et de mettre en place des pièces lourdes. L'emploi de techniques et de matériels appropriés de manutention des matériaux non seulement permet de raccourcir le temps d'apprentissage, mais encore améliore également le rendement global des hommes et des machines.

Les nouvelles recrues, même qualifiées, atteignent rarement leur production maximale dès le premier jour. Néanmoins, leur rendement s'améliorera régulièrement jusqu'à ce qu'ils acquièrent le niveau exigé à condition que l'organisation de l'atelier soit efficace. Le contraire se produira si l'atelier est désorganisé par de fréquents changements de contremaîtres et d'opérateurs. La rentabilité de l'exploitation d'un atelier est surtout une question de gestion et n'est aucunement simple.

La répétition fréquente d'une tâche donnée doit aboutir à en augmenter le rendement, mais cela n'arrive que dans les ateliers bien organisés. Ce phénomène a été analysé dans de nombreuses publications et le théorème des courbes d'apprentissage a généralisé les résultats de ces analyses. Chaque fois que la quantité à produire double, le temps moyen de production unitaire décroît dans une proportion constante pour la tâche ou l'ensemble de tâches données. Cette proportion, exprimée en pourcentage, est connue sous le nom de courbe d'apprentissage, et des ingénieurs en ont établi peu à peu des valeurs caractéristiques. Il a été constaté que le rendement d'apprentissage est le plus élevé dans le montage, où la courbe d'apprentissage peut atteindre 75 à 80 %. Ces chiffres indiquent, par exemple, que si 10 pièces de charpente ont été assemblées en 10 jours (à raison d'une journée en moyenne par unité), 20 unités le seraient en 15 ou 16 jours (soit 0,75 ou 0,80 journée en moyenne par unité). On a calculé que, pour la soudure, les courbes d'apprentissage sont de 80 à 90 % et pour l'usinage de 90 à 95 %.



Note. La graduation des temps peut représenter des minutes pour l'usinage et des heures pour le montage des pompes.

Figure 12. Augmentation de la productivité concomitante à celle du nombre d'unités produites

La figure 12 montre une courbe d'apprentissage de 95 % pour le tournage des arbres de pompe, et de 80 % pour le montage des pompes. On peut constater que ces courbes s'aplatissent au fur et à mesure que le nombre d'unités produites augmente. Cela signifie qu'au-delà d'un certain point, la diminution du temps de production unitaire devient négligeable.

Plusieurs courbes d'apprentissage ont été reproduites à la figure 13 à échelle bi-logarithmique. L'utilisation de cette échelle transforme les courbes en droites et en facilite l'application. Ces courbes servent communément à l'évaluation des coûts correspondants des commandes renouvelées après une

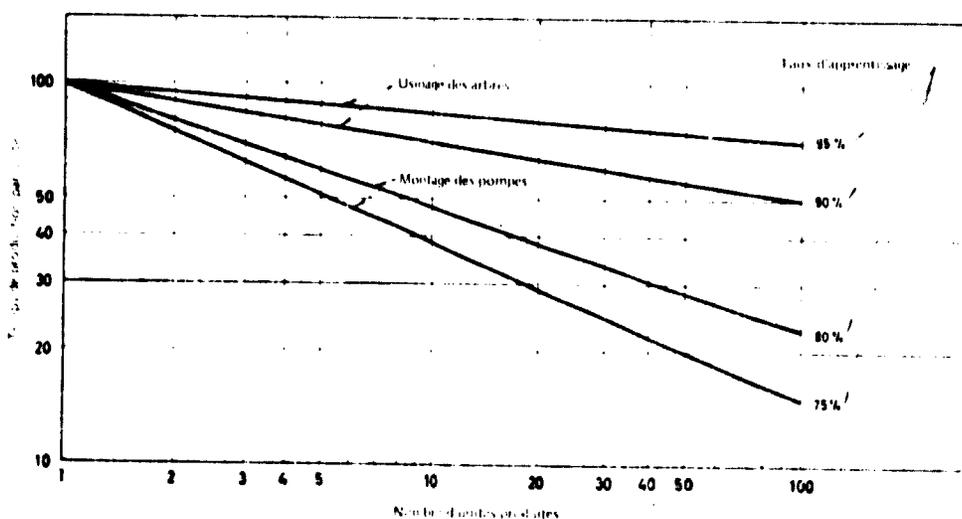


Figure 13. Présentations ortho-linéaires des courbes d'apprentissage

commande initiale d'essai. Si l'amélioration prévue du rendement ne se réalise pas, il convient d'en déterminer les causes et d'y porter remède. (Dans certains cas, les temps initiaux ne sont pas caractéristiques.) Le choix, pour une tâche, de temps arbitraires basés sur de vagues hypothèses est généralement plus nuisible qu'utile et détruit la confiance des ouvriers vis-à-vis des cadres de gestion.

Une interprétation algébrique générale du théorème des courbes d'apprentissage figure à l'annexe 2.

Productivité des machines

Une analyse du coût des opérations de transformation permet à la direction de décider quel est le nombre qui constitue le lot le plus rentable dans les conditions d'exploitation de l'atelier. Plus l'importance du lot augmente, et plus le coût unitaire diminue tout d'abord (comme nous l'avons vu), en raison de la diminution éventuelle des coûts en main-d'œuvre pour une part et de la division du temps de réglage entre un plus grand nombre de pièces d'autre part. Mais lorsque la production de lots très importants nécessite une augmentation des stocks, les charges financières et les frais de stockage augmentent. Lorsque les dimensions des lots dépassent ce niveau, la surface de stockage ou le capital de roulement en viennent à constituer des facteurs limitatifs. Les modifications éventuelles de la demande du marché, imputables à des causes saisonnières ou autres, constituent un risque supplémentaire qui s'attache au maintien de stocks importants.

En règle générale les responsables de la gestion décomposent toutes les tâches à exécuter sur machine-outil. En ce qui concerne le total des temps machines ou atelier, on suppose que les temps de coupe ont déjà été calculés

dans des études de temps pour chaque pièce déterminée, pour chaque outillage et pour chaque géométrie d'outil. Ces études permettent de déterminer des valeurs précises de vitesses de coupe, de profondeur d'entaille et de vitesse d'avance qui ne devraient pas beaucoup se modifier pendant la production. On ne peut donc raccourcir le temps de coupe qu'en adoptant des outils fabriqués avec un matériau permettant d'augmenter la vitesse de coupe, la profondeur d'entaille et l'avance tout en donnant le fini et la précision désirés. L'adoption de ces matériels suppose également une plus grande dépense de puissance et peut donc exiger l'emploi d'une machine-outil également plus puissante. Si l'augmentation de l'efficacité entraîne un renouvellement des commandes, les temps de manutention et de réglage devraient diminuer de 10 à 20 % conformément à la courbe d'apprentissage à condition que le nombre de pièces par lot soit suffisamment élevé. Le coefficient d'apprentissage peut être toutefois moins élevé s'il s'écoule beaucoup de temps entre deux commandes successives ou si l'on affecte un nouvel opérateur à la machine.

Participation des travailleurs

Les ordres ne suffisent pas pour assurer la formation et la participation des travailleurs à l'augmentation du rendement. Comme dans toutes les entreprises, les meilleurs résultats sont obtenus par les directions qui créent des attitudes favorables à tous les niveaux du personnel. Lorsque la confiance mutuelle règne dans toute l'organisation, il y a de bonnes chances que les travailleurs apprennent et tirent des leçons de leurs erreurs sans pour autant que leur soit nécessairement infligée une sanction. Le chef d'atelier doit, par son attitude, manifester clairement son soutien aux ouvriers et il doit s'intéresser à enseigner et à montrer à chaque travailleur comment améliorer son travail. Lorsque les membres d'une organisation s'identifient vraiment avec elle et avec ses objectifs, ils ressentent le besoin d'éliminer les pertes en temps et en matériaux et d'améliorer les procédés de fabrication et les produits. Le climat de l'atelier doit faire sentir à chacun qu'il peut démontrer sa valeur personnelle et professionnelle par son travail journalier. Ce sentiment conjugué avec la stabilité de l'emploi et du revenu, encouragera le travailleur à augmenter sa production et, si les communications entre la direction et les membres du personnel transmettent toutes les informations dont l'ouvrier a besoin pour cela, le rendement augmentera. La rotation de la main-d'œuvre et l'absentéisme tomberont à des niveaux peu élevés, le gaspillage de matériel diminuera. Les coûts seront réduits et il se développera un sens de loyauté envers l'entreprise. Même un petit atelier a intérêt à organiser des cours spéciaux de formation pour que les travailleurs qu'il emploie améliorent leurs aptitudes. De nombreuses sociétés gérées selon les méthodes de pointe donnent à chaque membre de leur personnel une possibilité de prendre part aux décisions sur l'organisation de leur travail. Elles ont constaté que cette méthode améliore davantage les rendements que l'ancien système de surveillance quasi-policière et de sanction.

Les technologies de production groupée

La technologie de production groupée est un autre moyen puissant pour améliorer le rendement de la production. Elle consiste en l'analyse systématique de chaque catégorie de pièces usinées dans une entreprise afin de déterminer celles dont la forme et les impératifs de fabrication sont suffisamment similaires pour que l'on puisse les grouper en lots de fabrication plus importants sans difficultés. Il faut tout d'abord classer les pièces selon les principaux procédés d'usinage à utiliser. Il faut ensuite grouper les opérations. Lorsque cela est possible, par exemple pour le tournage, le perçage, le rectifiage pour cylindres, le tournage et toutes les opérations d'usinage associées. On peut ainsi grouper plusieurs pièces différentes en un seul lot et les réaliser avec le même ordonnancement fondamental des machines.

Bien que cette idée ne soit pas nouvelle, les technologies de production groupées permettent d'en tirer pleinement parti grâce à une étude approfondie et attentive des pièces qui composent les lots, complétée par une simplification systématique et uniforme des modèles. Des pièces de configuration différente mais nécessitant des opérations semblables d'usinage sont également groupées pour la finition sur un même ensemble de machines. Cette sélection peut entraîner des économies importantes. Les dessinateurs-concepteurs et les ingénieurs de production coopèrent dès le début de la planification pour grouper les pièces et supprimer ou acheminer différemment l'exécution des tâches qui ne correspondent pas au cadre général. Il est possible de concevoir des appareils et des dispositifs de manutention adaptables aux dimensions diverses des pièces, ce qui permet de les grouper dans le même ordre d'exécution des tâches. C'est ainsi que les technologies de production groupée permettront un ordonnancement plus rapide des commandes et diminueront les délais de livraison.

MÉTHODES DE CONTRÔLE

Les instruments et les méthodes de contrôle dans les ateliers de production servent à vérifier la précision des pièces fabriquées en mesurant une ou plusieurs dimensions qui doivent s'inscrire à l'intérieur de tolérances bien définies. Plus les dimensions sont proches des spécifications, plus la précision de la pièce est grande. Il ne faut pas oublier que des différences entre les dimensions mesurées et les dimensions réelles peuvent être dues aux erreurs de mesure. Pour réduire ces erreurs au minimum, les méthodes et les instruments de contrôle doivent être constamment entretenus et faire l'objet de vérifications pendant leur emploi, avec l'approbation et la coopération active du service technique.

Il serait très coûteux de donner aux pièces usinées un degré de précision supérieure à celui qu'exige leur fonction. Les pièces ne peuvent être montées que si elles ne dépassent pas les limites et les tolérances déterminées. Les limites sont généralement déterminées pour les différentes catégories d'ajusto-

ment, (ajustement avec jeu, ajustement de transition et ajustement avec serrage)³.

Le type de pièce à fabriquer déterminera en grande partie le système de contrôle nécessaire. Aucune inspection supplémentaire n'est requise lorsque l'opérateur est très qualifié et comprend clairement les instructions données. A l'autre extrême, même un contrôle total à 100 % après chaque opération ne garantit pas nécessairement l'obtention de la qualité spécifiée. La plupart des ateliers de métallurgie fabriquent par lots de vingt pièces ou moins et il n'est pas facile d'utiliser des techniques de sondage statistique. (Dans les productions en série à plus grande échelle, les méthodes de sondage statistique peuvent assurer la régularité de la qualité du produit. Par exemple, on peut vérifier des écrous de machine en contrôlant la première pièce, puis en procédant à des sondages statistiques à intervalles successifs.) Une pièce qui doit subir plusieurs opérations peut quelquefois être envoyée à un contrôle central avant d'être montée ou stockée. Le contrôle assure à la direction que les pièces produites sont conformes aux spécifications et prouve ensuite au client que le produit acheté est conforme aux normes.

La plupart des ateliers disposent de trois jeux de calibres. L'opérateur en utilise un au poste de travail, un second sert au contrôle et un troisième est stocké, souvent dans une pièce à température contrôlée, et sert d'étalon.

Les quatre moyens principaux de mesure graduée sont la règle graduée, le vernier, le micromètre et le double décimètre, qui existent en modèles polyvalents et spéciaux. Les microscopes et les instruments utilisant un rayonnement lumineux de longueur d'onde déterminée sont utilisés pour les mesures de haute précision. Les instruments de mesure optique et les comparateurs ainsi que les calibres pneumatiques et électroniques de divers modèles permettent de faire des comparaisons avec certaines normes choisies de précision. Pour le contrôle et le réglage de divers types de calibres d'atelier, l'étalon le plus utile à employer dans les ateliers de machines-outils est la série de calibres étalonnés.

On utilise des instruments spéciaux pour mesurer la rugosité des surfaces. La plupart des modèles sont équipés d'un stylet à diamant qui suit les irrégularités de la surface, et l'instrument donne une valeur moyenne numérique de la hauteur des aspérités et de la profondeur des creux que le stylet rencontre dans son mouvement de va-et-vient sur la surface de la pièce. S'il faut maintenir dans des limites précises la rugosité, l'ondulation superficielle et la forme, l'opérateur de la machine doit pouvoir comparer à l'œil la pièce qu'il fabrique avec un modèle ou échantillon indiquant toutes les valeurs critiques.

³ Les tolérances et les ajustements sont examinés au chapitre 4.

L'ORGANISATION SUR LE PLAN COMMERCIAL ET TECHNIQUE

PROBLÈMES SPÉCIAUX DES PAYS EN VOIE DE DÉVELOPPEMENT

Les éléments qu'il convient nécessairement de prendre en considération et qui sont à la base du problème consistant à augmenter la rentabilité des industries métallurgiques des pays en voie de développement sont au nombre de cinq.

1) Par comparaison avec celles des États-Unis et de l'Europe, les méthodes de production de certains pays en voie de développement exigent en général une plus forte densité de main-d'œuvre et sont moins efficaces.

2) Les dimensions limitées du marché intérieur et l'absence de toute puissance d'organisation rendent souvent difficiles les économies dans la production que permettraient les groupements régionaux d'industries.

Le secteur industriel des pays en voie de développement est composé principalement de petits établissements dont beaucoup sont géographiquement dispersés. Il existe dans ces pays très peu de grandes entreprises capables de contribuer à l'organisation des capacités productives des établissements plus petits et de servir de principal débouché pour leurs productions. Certains gouvernements encouragent par principe l'industrie à s'implanter dans les régions non développées du pays, mais cette formule nuit au développement de grands ensembles régionaux d'industries apparentées.

3) On rencontre presque partout des témoignages manifestes de la difficulté que présente la mobilisation des ressources financières indispensables pour l'acquisition d'équipements et d'outillages nouveaux en vue de la fabrication de nouveaux modèles de produits.

La plupart des formules d'amortissement (par exemple l'amortissement linéaire en dix ans) n'encouragent pas la modernisation régulière des installations et du matériel. De plus, les taux d'intérêt élevés découragent les industriels de remplacer leur équipement fixe et d'engager leur production dans de nouvelles directions.

4) On trouve dans la plupart des pays en voie de développement peu de concepteurs capables de créer des modèles originaux. La pratique généralisée qui consiste à fabriquer des produits nouveaux en copiant ceux d'une entreprise étrangère, même sans contrat de fabrication sans licence ni accord de cession de technologie, n'a pas donné l'occasion à des dessinateurs-concepteurs de se former. Le marché intérieur offre souvent fort peu d'encouragements à l'amélioration des produits existants ou à la création de nouveaux

produits, et l'accès aux marchés étrangers paraît pratiquement impossible, de sorte que rien n'est fait pour créer de nouveaux produits destinés à l'exportation.

5) Il semble, en général, que les industriels des pays en voie de développement comprennent mal le rôle du marketing dans une économie de concurrence. Comme ils s'adressent à un marché intérieur protégé, ils ne prêtent généralement pas jusqu'ici beaucoup d'attention aux fonctions de marketing qui revêtent ailleurs une grande importance. C'est ainsi que les industriels des pays en voie de développement n'ont guère besoin de procéder à des études de marché pour déterminer les besoins et évaluer la demande de produits nouveaux, que les pressions exercées sur eux pour qu'ils déterminent les méthodes les plus appropriées d'écoulement de leurs produits et pour qu'ils développent les circuits de distribution sont faibles, et qu'ils sont peu encouragés à former des vendeurs et à procéder à des tests de marketing avant d'entreprendre la fabrication de produits nouveaux en quantités commerciales.

La politique des prix, qui constitue une variable de première importance dans le marketing, est d'ordinaire limitée par les politiques officielles.

Il n'est guère besoin, pour le marché intérieur, de rechercher le « marketing mix » optimal en choisissant comme il convient les circuits de distribution, les programmes de promotion, la conception de produits et les politiques de prix.

Toute solution durable au problème fondamental du développement de l'industrie métallurgique dans les pays en voie de développement doit tenir compte comme il convient de tous les éléments qui ont été exposés ci-dessus. Afin de concurrencer effectivement ses rivales dans son pays et sur les marchés étrangers l'industrie doit : 1) moderniser son matériel et ses méthodes de production ; 2) créer de nouveaux produits et les commercialiser de façon efficace ; 3) organiser des industries auxiliaires ; 4) se procurer des ressources financières suffisantes pour l'exécution de ces tâches.

LA CONTRIBUTION DE LA CONCEPTION-CRÉATION DES PRODUITS À LA STRATÉGIE COMMERCIALE

Il est généralement admis que les nouveaux produits et les innovations technologiques apportent à l'expansion industrielle des pays en voie de développement, aussi bien que des pays développés d'ailleurs, une contribution critique par son importance. La création de nouvelles usines, ainsi que la survie et l'agrandissement continu des entreprises établies, sont étroitement tributaires de la conception-crédation de nouveaux produits et du perfectionnement des technologies. Mais, pour que l'on puisse parvenir à quelque résultat que ce soit, il faut que la direction de chaque entreprise, qui seule peut décider du type de produits à fabriquer, comprenne la nécessité de l'innovation et les problèmes particuliers qu'elle pose. Il se peut que le produit qui sera fabriqué ait été jusque-là importé, ou bien qu'il s'agisse d'un produit spécialisé dont a besoin une industrie déjà établie dans le pays. Parmi les

autres possibilités, citons le petit produit relativement très demandé s'il est conditionné de façon plaisante et vendu par des distributeurs généraux, ou encore les machines relativement volumineuses et complexes qui obligeront l'entreprise à recruter un personnel technique pour ses services de vente et probablement à créer aussi un service d'entretien après-vente.

Quel que soit le type de produit choisi, la direction d'entreprise doit prendre un certain nombre de dispositions pour le créer :

Systematiser l'idée et déterminer quels sont les études et sondages de marché et les travaux d'ordre technique qui seront nécessaires pour lui donner une expression concrète ;

Procéder aux opérations techniques de conception-crétion, y compris la réalisation et l'essai des prototypes ;

Se procurer les moyens financiers nécessaires aux nouvelles productions dont le revenu pourra, le moment venu, fournir des fonds pour la conception-crétion d'autres produits ;

Elaborer les plans de production, qui exigeront parfois l'utilisation de nouvelles machines-outils, d'un outillage spécial, de nouveaux dispositifs de montage, de nouveaux appareillages et de nouvelles matrices ;

Prendre les dispositions en vue du marketing sur la base des résultats des tests de marché, en choisissant la meilleure méthode de distribution et en assurant aux distributeurs un soutien permanent par la publicité et la promotion des produits.

La haute direction devrait par conséquent avoir un plan de conception-crétion de produits nouveaux, d'objectifs de croissance et de contrôle des coûts, qui serait régulièrement remis à jour. Nous entendons par conception-crétion de produits nouveaux à la fois celle de nouveaux produits et de nouveaux procédés et les nouvelles utilisations des produits existants.

La première étape — qui consiste à organiser l'idée — comporte l'examen des divers moyens possibles de développer l'éventail de productions.

Sous la rubrique des produits nouveaux, l'innovation la plus simple peut consister simplement à changer le prix du produit existant (ce qui constitue la façon la plus simple de modifier les caractéristiques économiques d'un produit). Cette modification peut être conjuguée avec l'emploi de couleurs plus plaisantes ou d'autres moyens d'attirer davantage l'attention sur le produit. D'autres innovations, toujours basées sur le produit existant, peuvent consister en la modification du modèle ou le développement de la gamme de productions moyennant la fabrication en dimensions différentes. Enfin, on peut adopter un nouveau produit dans une gamme de production nouvelle pour l'entreprise, opération qui peut être désignée par le terme de stratégie de diversification.

En ce qui concerne la conception-crétion de procédés, les solutions possibles sont les suivantes :

Modification d'un procédé existant à l'effet d'abaisser les coûts de production ;

Intégration de la production « montante » ou « en amont » : par exemple, s'il fallait importer des pièces coulées en raison de la mauvaise qualité de leur production locale, création d'une fonderie afin de produire des pièces coulées de qualité acceptable ;

Intégration « descendante » ou « en aval », et par exemple création de services de vente et de services d'entretien lorsque les dispositifs de distribution existants ne donnent pas satisfaction.

En ce qui concerne les usages nouveaux (ou les marchés nouveaux), il est nécessaire d'envisager les nouvelles régions qui pourraient constituer des marchés, la vente à une nouvelle industrie, l'exportation vers les pays limitrophes, etc.

Cette revue des possibilités peut être effectuée avec succès par une société de n'importe quelles dimensions, mais l'exploitation des possibilités découvertes n'est jamais facile, en particulier pour une petite entreprise.

Le marketing comprend la publicité et d'autres activités de promotion à l'effet de stimuler les ventes et d'informer la clientèle en puissance au sujet des produits actuels ou nouveaux d'une société. L'étude des marchés, qui doit souvent être conjuguée avec la prévision technologique, peut amener à la modification des produits existants, et aussi bien à la conception de produits nouveaux.

Si l'on veut mesurer la nécessité de modifier les produits d'une société donnée, le premier impératif consiste à définir les objectifs de la société en matière de volume actuel et futur des ventes et des profits. Les points forts et les points faibles des produits actuels doivent être comparés avec ceux des produits concurrents. Il faut ensuite répartir les ventes par industrie, par région, selon leur volume, par utilisation finale, par circuits de distribution et selon leur potentiel d'expansion, ainsi que déterminer pour chaque produit son coût de production, le pourcentage de valeur ajoutée qu'il comporte et la marge bénéficiaire réalisable. A partir de cette information, il est possible de déterminer la stratégie de production qui répondra à la conjoncture de concurrence dans laquelle s'insère chaque produit et qui contribuera à la réalisation des objectifs de croissance de la société. De plus, il est possible de définir les caractéristiques particulières que doivent présenter les produits nouveaux pour s'insérer dans la gamme de fabrications de la société et répondre aux besoins du marché. Cela conduira à limiter la recherche de produits nouveaux ou améliorés que devra ensuite entreprendre le personnel spécialisé et pour laquelle il faut trouver des formules de recherche et d'évaluation.

Il est permis de se demander comment les petites entreprises des pays en voie de développement peuvent arriver à réaliser tous ces travaux d'étude de marché. Or, il est possible de procéder de diverses manières pour mettre en œuvre les recommandations qui précèdent.

1. Utiliser des sources d'information de seconde main, par exemple les publications techniques, pour identifier les facteurs fondamentaux

- de l'environnement et de la technique qui provoquent des modifications du marché desservi, et en suivre l'évolution.
2. Affecter régulièrement certaines ressources à l'évaluation des tendances de la technique et du marketing qui peuvent influencer le programme de conception-crétion technologique.
 3. Faire appel à un groupe techniquement qualifié de consultants à temps partiel pour augmenter les ressources propres de la société en techniciens et en personnel d'encadrement.
 4. Procéder à une évaluation approfondie des méthodes techniques utilisées ou proposées pour les productions existantes et les productions nouvelles.
 5. Constituer une série très diversifiée de filières d'information sur les menaces que l'évolution des technologies fait peser sur l'avenir des produits existants et sur les possibilités de croissance.
 6. Déterminer avec précision les impératifs techniques internes de l'entreprise et se mettre en quête des ressources humaines et des machines nécessaires pour combler les lacunes du personnel et du matériel existants.

Pour résumer, voici la liste de ce qu'il faut faire et ne pas faire, qui est valable à la fois pour les grandes et les petites entreprises.

A NE PAS FAIRE

1. Ne pas s'attendre à trouver une solution toute faite aux problèmes posés par les productions nouvelles.
2. Ne pas penser que l'entreprise est trop petite pour se maintenir au niveau du progrès technique dans son secteur d'activité.
3. Ne pas penser que l'entreprise ne peut pas obtenir un contrat de l'État.
4. Ne pas considérer la conception et la création comme une gageure ; y voir une possibilité de s'informer sur les progrès techniques nouveaux.
5. Ne pas négliger les moyens offerts par les universités ; le personnel technique et scientifique de ces institutions devrait normalement être tout disposé à vous aider à titre individuel.
6. Ne pas compter sur des miracles.
7. Ne pas attendre de ne plus disposer que de six mois pour trouver un nouveau produit ou déposer son bilan.

A FAIRE

1. S'efforcer de prévoir de trois à cinq années à l'avance en ce qui concerne :
 - a) La demande des produits actuels ;
 - b) Les nouveautés technologiques susceptibles d'avoir une incidence sur vos productions actuelles ;
 - c) Les demandes potentielles qui coïncident avec vos intérêts fondamentaux et vos capacités essentielles ;

- d) La planification continue que nécessite la conception — création de produits pour répondre aux objectifs de croissance fixés.
2. S'assurer les services d'un expert-technicien extrêmement compétent, tout au moins en qualité de consultant, mais si possible à titre permanent.
 3. Apprendre à connaître le personnel d'enseignement technique de toutes les universités ou instituts proches de l'entreprise et se renseigner auprès d'eux sur le type des recherches effectuées dans ces établissements.
 4. Rechercher quels sont les produits achetés par l'Etat dont la fabrication coïncide avec vos intérêts et objectifs fondamentaux de l'avenir. A cet effet, s'assurer le concours d'un consultant et, au besoin, de départements universitaires de recherche. En outre, lire la documentation commerciale et technique d'actualité, y compris les revues techniques étrangères bien illustrées.
 5. Commencer votre planification au moment où la bonne marche de vos affaires vous donne le temps de mettre au point des produits nouveaux.

LES MARCHÉS D'EXPORTATION

Il n'est pas réaliste de penser que plus d'un petit nombre d'entreprises relativement importantes des pays en voie de développement pourront à brève échéance concurrencer directement et efficacement leurs rivales sur les marchés mondiaux, même en modernisant leurs méthodes de production. Il est possible de constater que la plupart des entreprises métallurgiques des pays en voie de développement, si tant est qu'elles essaient de traiter des affaires à l'exportation, recherchent des débouchés pour leurs productions existantes qui ne répondront très probablement pas aux normes des pays industriellement avancés sans modification, voire transformation complète des modèles. En tout état de cause, la continuité d'un commerce d'exportation est subordonnée à l'étude répétée des marchés étrangers qui conduira à la conception et à la mise au point de produits répondant à leurs exigences particulières. Les petites entreprises ne disposent pas des moyens de procéder elles-mêmes à la conception-crédation et au marketing de nouveaux produits. La question capitale est alors de savoir comment les petites entreprises peuvent accéder à des moyens de cette nature de façon à pénétrer sur les marchés internationaux.

Pour l'avenir immédiat, le nombre des solutions qui s'offrent à la plupart des petites entreprises paraît très limité. La solution qui pourrait être la plus fructueuse consiste à trouver d'autres entreprises capables de se charger de la conception — création et du marketing de produits nouveaux à l'intention des marchés internationaux, mais dont la capacité de production commerciale est insuffisante et qui accepteraient de faire appel aux petites entreprises en sous-traitance.

Considérant les méthodes de production appliquées dans les pays en voie de développement, il est deux situations dans lesquelles certaines entreprises pourraient raisonnablement espérer remporter un succès en sollicitant des sous-traitances d'entreprises des Etats-Unis ou d'Europe occidentale :

Lorsque la production et le montage du produit font appel à des méthodes à forte composante de main-d'œuvre ;

Lorsque les séries de production demandées sont petites.

Par exemple, une petite entreprise d'un pays en voie de développement pourrait fabriquer ou monter un ou deux articles appartenant à la gamme des productions d'une entreprise étrangère et dont la demande est limitée, le marketing étant assuré par l'entreprise étrangère. Les arrangements de cette nature peuvent procurer aux petites entreprises des affaires à la fois stables et profitables.

Il n'existe probablement pas de moyen unique de découvrir ces débouchés possibles pour les petites entreprises. Celles qui souhaiteraient conclure ce genre d'affaires sur des marchés étrangers devraient déployer de plus grands efforts qu'elles ne le font selon toute apparence actuellement. Il semblerait bon que les gouvernements des pays en voie de développement stimulent l'intensification indispensable de ces études de marchés. Ils pourraient par exemple encourager financièrement les industriels à se rendre à cet effet à l'étranger.

En second lieu, comme plusieurs petites entreprises seront peut-être capables d'exécuter des commandes d'entreprises étrangères, il serait opportun que le gouvernement du pays en voie de développement assure un service amélioré d'information sur les marchés, en particulier en Europe et aux Etats-Unis, afin de mettre ses entreprises en relation avec les entreprises étrangères appropriées, et vice versa. Les moyens de créer un service de cette nature existent parfois déjà à l'état rudimentaire au Ministère des affaires étrangères et dans les ambassades et consulats établis dans les pays industriellement avancés, ou bien dans le bureau d'étude des marchés du Ministère du commerce et de l'industrie, ou encore dans les instituts d'exportation et de marketing dont les efforts pourraient utilement être complétés moyennant des contrats avec des bureaux d'étude de marché étrangers ou des bureaux d'ingénieurs-conseils.

Cela mis à part, les interventions additionnelles des autorités pourraient à juste titre s'orienter également dans deux directions principales :

La recherche active et permanente, moyennant des contacts personnels pris dans les principaux pays visés, des produits qui pourraient être fabriqués en sous-traitance par les firmes intéressées de leurs pays, en lieu et place d'une recherche de débouchés pour les produits existants des entreprises nationales dans ces pays étrangers ;

L'analyse de l'image nationale sur les principaux marchés potentiels d'exportation et l'élaboration de programmes appropriés de publicité de prestige destinés à aider les fabricants à traiter individuellement des affaires dans les pays voisins.

En résumé, les mesures additionnelles proposées consistent :

A mettre davantage l'accent sur la recherche active et personnelle de débouchés, et non pas simplement à accepter passivement des commandes ;

A accroître substantiellement l'effort déployé par les services diplomatiques et consulaires et la qualité technique de cet effort ;

A faire davantage appel aux consultants nationaux ou étrangers en matière d'études techniques ou d'études de marché afin de découvrir les débouchés qui s'offrent pour tels ou tels produits ;

A multiplier les contacts personnels entre les cadres d'industrie et les acheteurs étrangers en puissance.

Ces mesures doivent être considérées uniquement comme un programme intérimaire pour la solution du problème à court terme. Si elles sont couronnées de succès, les entreprises locales obtiendront une expérience précieuse de la fabrication à l'intention des marchés étrangers, ainsi que certaines ressources financières pour la modernisation de leurs installations et de leur matériel.

L'objectif national qui est souhaitable à longue échéance consiste d'ordinaire à doter les entreprises métallurgiques de la capacité pleine et entière de concevoir, mettre au point et fabriquer des produits nouveaux pour l'exportation, et d'écouler ces produits. Ainsi les entreprises et la nation retireraient le bénéfice de la valeur ajoutée à toutes les étapes du processus de création de la valeur — c'est-à-dire la conception, la fabrication et le marketing. Il importe particulièrement pour les petites entreprises de développer, si elles le peuvent, leurs ventes à des industries apparentées ou auxiliaires dans le pays même, ce qui devient possible si elles acquièrent l'aptitude à concevoir des modèles originaux.

Il convient cependant de se demander comment un pays en voie de développement, avec la multiplicité de ses petites entreprises, l'étendue limitée de son marché intérieur, la quasi-absence de toute organisation d'ensemble de l'industrie, et la pénurie des moyens de conception et de marketing de ses produits, peut se doter d'entreprises orientées vers l'exportation et présentant les caractéristiques exposées plus haut. L'une des stratégies consisterait à concentrer l'effort national de recherche et l'effort apparenté d'équipement industriel pour la fabrication vers un petit nombre de branches principales de la métallurgie, et d'encourager la concentration régionale des industries auxiliaires de ces branches, en même temps qu'on les moderniserait et qu'on améliorerait leur productivité. Moyennant un effort concentré de cette nature, un pays pourrait devenir en dix ans une grande force sur les marchés mondiaux dans une, voire plusieurs, grandes branches de la métallurgie, à peu près comme les Suisses l'ont fait pour les instruments de précision et les machines-outils. En d'autres termes, cette stratégie pourrait de façon très convenable conduire à l'organisation interne indispensable de l'industrie, donnant lieu aux avantages économiques qui résultent de la concentration, et pourrait engendrer les économies d'échelle nécessaires à l'extérieur pour soutenir les fonctions voulues de marketing à l'exportation.

Il faudrait réaliser sur le plan national un grand effort d'étude technico-économique des marchés de façon à identifier les produits les plus prometteurs

de l'industrie métallurgique auxquels pourrait être appliquée la stratégie en question. Ces produits sont caractérisés par une forte valeur ajoutée par les opérations de conception et de fabrication, et par la modicité des frais de transport relativement à la valeur brute de la production. Les marchés d'exportation subissent les fluctuations du cycle commercial, mais leur structure est assez stable. Fondamentalement, le volume de leur activité marque une tendance à une croissance rapide.

PRÉCISION DES DIMENSIONS ET TOLÉRANCES

La diversité des produits fabriqués dans les petits ateliers de l'industrie métallurgique est si grande qu'il est impossible d'analyser de façon complète la technologie des produits dans le présent rapport. Nous nous bornerons donc ici à poser un petit nombre de principes généraux qui sont toujours applicables dans la création de modèles de produits. Ils s'appliquent à la précision des dimensions et aux tolérances, ainsi qu'à leur rapport avec les propriétés d'emploi, l'interchangeabilité et les coûts de production des produits.

Qu'est-ce que la précision? En voici une définition : quantification exacte d'une dimension dans les unités de mesure employées. Lorsque la mesure d'une dimension est répétée sur une série de produits semblables et que les valeurs obtenues sont à peu près identiques, nous avons la précision. Comme il est impossible d'obtenir une précision absolue, on attribue aux dimensions industrielles des tolérances, qui sont les variations permises par rapport aux dimensions indiquées dans l'épure. Lorsque les variations de dimensions ne sont autorisées que dans une direction, en raison des impératifs du modèle, on les appelle tolérances unilatérales. Mais le plus souvent, cependant, les tolérances sont bilatérales et permettent des variations égales en plus et en moins par rapport à la dimension prescrite.

Il est maintenant coutumier, dans la transformation des métaux, de spécifier des tolérances de dimensions, et il a été établi des normes en ce qui les concerne dans tous les pays industrialisés. Lorsque des pièces accouplées doivent fonctionner sans difficulté et n'être remplacées qu'après un temps de service défini ou lorsqu'elles sont usées, il est particulièrement important de disposer de normes qui en prescrivent les tolérances.

Dans l'industrie mécanique et dans d'autres opérations de transformation, des tolérances peuvent être spécifiées pour ce qui concerne la géométrie, la position, l'état des surfaces, la dureté, la composition et la microstructure, et non pas seulement pour les dimensions.

Développement de la normalisation

Le contrôle de la précision des pièces usinées a posé un problème dans tous les pays dès le début de la métallurgie industrielle. Peu à peu, au fur et à mesure que les usines augmentaient de dimensions, elles instituaient leurs propres normes de dimensions et d'ajustements afin de faciliter l'inter-

changeabilité des pièces produites dans divers établissements. Les sous-traitances, indispensables pendant les périodes de haute conjoncture et en temps de guerre, ont intensifié la nécessité de prescrire des normes nationales de tolérance et d'ajustement. Puis il a été question d'unifier sur le plan international les divers systèmes nationaux, principalement entre les nations d'Europe occidentale qui utilisaient le système métrique et qui avaient entre elles des liens d'interdépendance économique. L'unification, si elle est réalisée, rend toute incertitude et tout malentendu impossibles concernant l'accouplement de deux pièces, quelle que soit la distance qui sépare les établissements où elles sont usinées et indépendamment de la langue qui y est parlée. Les négociations entreprises ont conduit en 1935 à la création, par la Fédération internationale des Associations nationales de normalisation (ISA), du « Système de tolérances ISA », dont les spécifications ont été approuvées par la suite comme normes nationales par de nombreux pays, y compris l'URSS, le Japon et la Chine.

Les Etats-Unis et le Royaume-Uni, bien qu'ils fussent membres de l'ISA, n'adoptèrent pas initialement le système ISA, et cela surtout parce qu'il utilisait le mètre et non pas le pouce comme étalon de longueur. Mais, au cours de la Seconde Guerre mondiale, il est apparu qu'une normalisation internationale des tolérances et des ajustements s'imposait d'urgence, malgré la coexistence du système métrique et du système duodécimal.

L'expérience du temps de guerre fut utilisée pour l'élaboration des normes américaines dites « Limits and Fits for Engineering and Manufacturing (Part I), ASA B 4. 1-1947 »⁴. Dans la préface de ce document, il était dit que les réunions de l'ABC — groupant l'Amérique, la Grande-Bretagne et le Canada — avaient conduit à un accord sur cinq principes de base. Comme les quatre premiers de ces principes, assortis de certaines variantes mineures et évidentes, ont été incorporés dans la norme américaine, il sera peut-être utile de les répéter ici. En premier lieu, il doit y avoir un langage commun (définitions) à utiliser pour la notation des résultats des analyses et leur diffusion. En deuxième lieu, il convient d'arrêter une table des dimensions fondamentales préférées qui permet de réduire le nombre des diamètres communément utilisés dans une gamme donnée de dimensions. En troisième lieu, le système des tolérances et marges préférées constitue un complément logique de celui des dimensions préférées et devrait encourager le concepteur à choisir des tolérances uniformes. En quatrième lieu, il est indispensable que la méthode d'application des tolérances soit unifiée.

L'absence de spécifications types pour les ajustements et la rigidité des systèmes de tolérances recommandés par le passé constituent sans aucun doute les principales raisons pour lesquelles l'institution de normes nationales dans ce domaine n'avait, jusqu'en 1950, remporté qu'un succès limité, même dans les pays industriellement développés. Les visites faites à des centaines

⁴ La dernière révision de ces normes, établie par l'American Society of Mechanical Engineers, a été publiée par l'Institut de normalisation des Etats-Unis sous la référence USAS B4.1 — 1967.

d'ateliers techniques dans les pays en voie de développement font apparaître qu'aucun système différencié n'est largement utilisé dans ces pays. Le plus souvent les tolérances et marges sont indiquées sur les bleus en chiffres arbitraires, en millièmes de millimètre ou en dix-millièmes de pouce. Par contre, la plupart des personnes qui sont au courant de la question reconnaissent l'intérêt de la normalisation dans ce domaine et préfèrent généralement les mesures métriques.

Le système ISO de tolérances et d'ajustements

La négociation de normes internationales a été poursuivie par l'Organisation internationale de normalisation (ISO) qui a succédé à l'ISA. Les recommandations de l'ISO sont reprises dans le système ISO de tolérances et d'ajustements⁵, qui s'applique particulièrement aux ajustements des parties cylindriques, désignées sous le nom d'« alésages » et d'« arbres », mais que l'on peut tout aussi bien utiliser pour des pièces couplées non cylindriques, par exemple les pièces coulissantes.

La température de référence du système ISO est de 20 °C ou 68 °F, c'est-à-dire la même que celle des normes des Etats-Unis et de nombreux autres pays industrialisés.

La classification qualitative du système ISO définit la précision imposée d'une dimension, c'est-à-dire la tolérance autorisée pour telle ou telle dimension particulière de la fabrication. Le système ISO comporte 18 qualités désignées par les codes IT 01, IT 0, IT 1 etc. jusqu'à IT 16, IT 01 correspondant à la qualité supérieure assortie des plus faibles tolérances⁶. Les qualités de IT 01 à IT 4 sont applicables presque exclusivement aux calibres et nous n'en discuterons pas davantage ici. A partir de la qualité IT 5, les tolérances de base de chaque qualité sont des multiples arrondis de l'unité de tolérance i , qui est définie comme une fraction de la dimension nominale D de la pièce usinée.

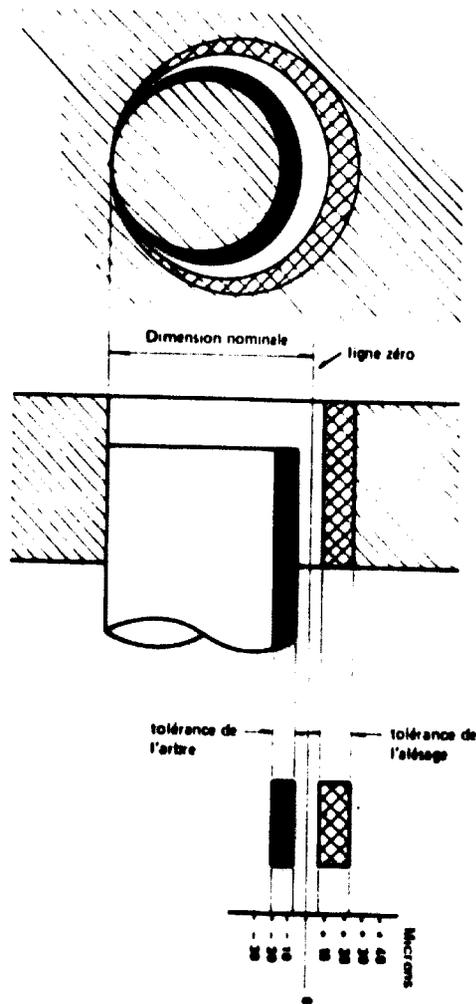
Ajustements⁷

Les conditions générales à prendre en considération pour choisir un ajustement sont indiquées à la figure 14.

⁵ Voir Organisation internationale de Normalisation (1962), *Recommandation ISO R 286 : Système ISO de tolérances et d'ajustements, première partie : Généralités, tolérances et écarts*, Genève.

⁶ Les qualités IT 1 à IT 16 ont été en substance reprises du système ISA, mais on leur a ajouté deux qualités supérieures.

⁷ Le texte de cette partie est démarqué de l'ouvrage de Tom H. Vogel (1950) "Accuracy in machining—its standardisation and cost", *The Tool Engineer*, numéros de novembre et décembre. Etant donné que cet article a été écrit avant la création du système ISO, il se réfère à l'ancien système ISA. Comme il n'existe pas de différence fondamentale de principe entre les deux systèmes, les arguments présentés dans l'article demeurent valables. Dans la pratique, toutefois, il faut se reporter aux recommandations détaillées du système ISO ou à la norme nationale applicable.

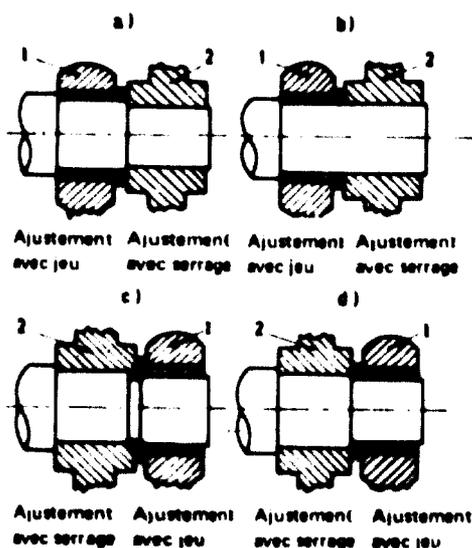


Source : Tom H. Vogel (1950), "Accuracy in Machining", *The Tool Engineer*, novembre, p. 17.

Figure 14. Alésage et arbre et leurs tolérances respectives

Bien que le système ISO permette une libre association des divers arbres avec les divers alésages et qu'il n'exige pas l'application rigoureuse de tel ou tel système particulier, cette organisation a adopté pour l'établir un système d'ajustement à alésage normal et un autre système à arbre normal. Les deux systèmes sont utilisés concurremment, et il n'y a pas lieu d'après l'ISO de donner la préférence à l'un ou l'autre d'entre eux. L'application du premier ou du second système doit dépendre d'impératifs particuliers de la fabrication.

Comme le montre la figure 15, la même dispositif peut en principe servir pour un système à arbre normal et pour un système à alésage normal, uniquement selon les détails de la construction. Les dessins a) et b) montrent le volant tournant en position extérieure. Avec le système à alésage normal a),



Source : Tom H. Vogel (1950), "Accuracy in Machining", *The Tool Engineer*, novembre, p. 18.

Note : L'arbre qui tourne dans la bague (1) est ajusté avec serrage dans le volant (2). Les diagrammes a) et c) illustrent le système à alésage normal et les diagrammes b) et d) le système à arbre normal.

Figure 15. Comparaison d'un système à arbre normal et d'un système à alésage normal

L'arbre doit être cranté pour pouvoir être inséré dans la bague. Avec le système à arbre normal b), il est possible d'utiliser un arbre simple puisqu'il peut être retiré du volant sans risque d'endommagement.

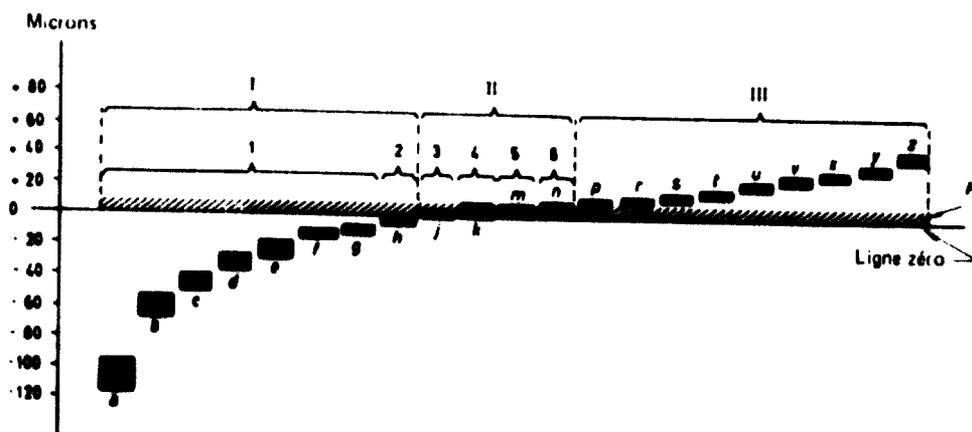
Les dessins c) et d) montrent le volant en position intérieure. Avec le système à alésage normal c), l'arbre peut être simple ; avec le système à arbre normal d), il doit être cranté pour passer à travers le volant sans dommage.

Le rapport qui résulte de la différence entre les dimensions de deux pièces avant le montage s'appelle un ajustement. Les positions des zones de tolérance de l'alésage et de l'arbre par rapport à la ligne zéro (qui correspond à la dimension de base) déterminent celui des trois types d'ajustement qui interviendra :

Un ajustement avec jeu, dans lequel les deux pièces conservent toujours un certain jeu au montage et restent libres l'une par rapport à l'autre ;
 Un ajustement de transition, intermédiaire entre l'ajustement avec jeu et l'ajustement avec serrage, c'est-à-dire que l'accouplement peut ou non avoir du jeu ;

Un ajustement avec serrage dans lequel les pièces, avant montage, dépassent dans une certaine mesure la dimension standard et, après montage, demeurent plus ou moins fixées l'une à l'autre.

La figure 16 montre les différents ajustements réalisables avec le système de l'ISA pour les systèmes les plus courants qui sont à alésage normal. Les



Source : Tom H. Vogel (1950), "Accuracy in Machining", *The Tool Engineer*, novembre, p. 18.

Note. La zone hachurée H est la tolérance de l'alésage normal, a à z désignant les tolérances des arbres correspondants.

Figure 16. Ajustements à alésage normal

lettres a à h désignent les zones de tolérances inférieures à la ligne zéro (c'est-à-dire les déviations négatives), a désignant l'écart le plus grand ; les lettres k à z désignent les zones de tolérance au-dessus de la ligne zéro (c'est-à-dire les déviations positives), z désignant l'écart le plus grand*. On a ainsi une série de gradations allant de la position maximale au-dessous de la ligne zéro à la position maximale au-dessus de cette ligne. Indépendamment du degré de qualité, ces lettres indiquent toujours le plus petit écart possible de la zone de tolérance à la ligne zéro et prescrivent ainsi le jeu minimal ou le serrage minimal entre deux pièces accouplées. Cette règle s'applique, avec un petit nombre d'exceptions, aux arbres comme aux alésages.

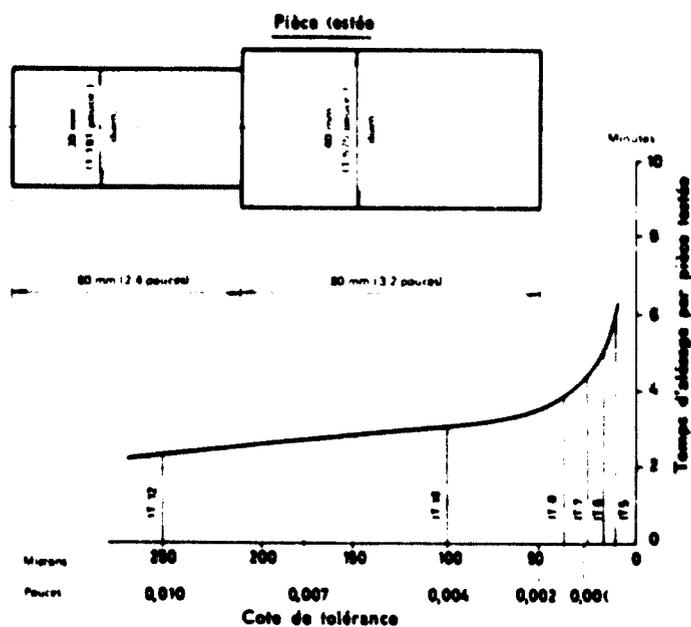
Le concepteur d'un produit peut être libre de prescrire la précision et le degré de qualité, contenus dans le système de tolérance, qu'il juge nécessaires. Désireux que l'objet conçu fonctionne véritablement, il peut porter son choix sur une trop bonne qualité, et augmenter ainsi dans des proportions considérables les coûts de fabrication, le plus souvent sans même s'en rendre compte.

Des recherches approfondies ont permis de démontrer que, dans certaines limites, on peut réaliser une précision voulue, avec relativement peu d'efforts supplémentaires, une fois que le matériel d'atelier et la formation des ouvriers ont été adaptés comme il convient. Néanmoins, la réalisation d'une certaine qualité sera moins coûteuse dans un atelier expressément équipé pour cette qualité, ni plus ni moins, et dont le personnel est accoutumé au degré de

* Le système ISO comprend de nouvelles déviations pour les alésages : *cd* (entre *c* et *d*), *ef* et *fg* (entre *e*, *f*, *g*) jusqu'à 10 mm seulement, pour les mécanismes délicats et les mécanismes d'horlogerie ; *js*, qui donne une gamme complète de déviations asymétriques pour toutes les gradations de diamètre et toutes les qualités ; *za*, *zb*, *zc*, pour les ajustements à fort serrage.

précision correspondant, ni plus ni moins. En soi, le travail de haute précision est toujours plus coûteux puisqu'il exige un matériel plus cher et des ouvriers plus qualifiés. Mais s'il faut fabriquer des pièces de faible précision dans un atelier équipé pour la haute précision, ces pièces reviendront relativement cher. Les salaires versés aux opérateurs de machines de précision sont plus élevés et ces opérateurs n'ont pas l'habitude du travail de moins bonne qualité. Il existe une relation étroite entre la précision, le coût de production, les machines disponibles et les qualifications des ouvriers. En demandant une précision superflue, non seulement nous augmentons le prix de revient de la pièce, mais nous risquons également d'accroître les coûts de production de pièces dont la précision prescrite est plus faible et qui doivent être exécutées sur les mêmes machines par les mêmes ouvriers. C'est pourquoi le bon concepteur ne prescrit jamais une précision supérieure à celle qui est absolument nécessaire. En termes de tolérance, il doit choisir une qualité d'ajustement telle qu'avec la tolérance immédiatement supérieure la pièce ne donnerait pas satisfaction.

On a constaté dans beaucoup de fabriques qu'il est souvent plus facile, psychologiquement, de réduire que d'augmenter les tolérances. Lorsque la direction décide d'abaisser le prix de revient d'un produit en augmentant les tolérances, les ingénieurs et les équipes de production protestent en général parce que la modification peut revenir à une « baisse de qualité du travail accompli », c'est-à-dire à une réduction des qualifications de leur travail.



Source : Tom H. Vogel (1950), "Accuracy in Machining", *The Tool Engineer*, décembre, p. 29.

Figure 17. Relation entre le temps d'alésage et la précision de la pièce

Les résultats des enquêtes de comparaison entre précision et prix de revient sont d'ordinaire considérés comme des secrets d'affaires, mais certains ont pourtant été publiés. Une série de tests effectués dans un atelier de machines-outils de précision a consisté à aléser 10 pièces à chacun de six degrés de qualité ISA. En limitant le nombre à 10, on comptait réduire l'influence de la répétition des gestes sur les résultats. L'identité de toutes les autres conditions a été assurée dans toute la mesure possible ; on s'est servi d'un matériau identique, et on a fait appel à un seul opérateur. L'épure des pièces testées et les résultats sont donnés dans la figure 17. Il a été établi une séquence d'opérations permettant d'aléser les pièces aux qualités IT 6, 10, 8, 5, 12 et 7 successivement. Pour ces travaux d'alésage, le facteur humain peut introduire de grandes variations dans les temps d'exécution. C'est pourquoi on a choisi pour le test un travailleur régulier et particulièrement sûr.

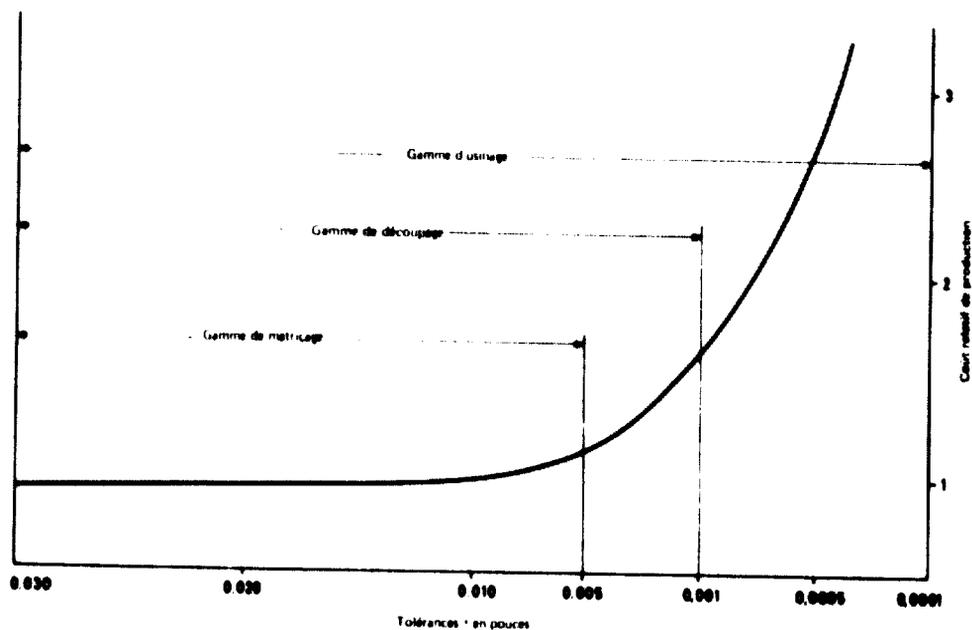


Figure 18. Relation coût/précision dans les opérations d'usinage, de découpage et de matriçage

La figure 18 donne des indications similaires, mais exprimées en coût relatif et non en temps, pour l'usinage, le découpage et le matriçage selon diverses tolérances. La gamme des tolérances d'usinage correspond à des pièces de dimensions moyennes. Avec une cisaille moderne et ses accessoires, on peut découper même de grandes feuilles avec une tolérance de plus ou moins 0,005 pouce à peu de frais supplémentaires. Les matrices au carbure et les presses en bon état permettent un matriçage avec des tolérances de plus ou moins 0,001 pouce.

Ce sont là des points dont les fabriques des pays en voie de développement devraient se préoccuper sans tarder. S'ils veulent s'insérer dans le

monde industriel, il faut que ces pays alignent dans leurs grandes lignes leurs normes industrielles et nationales sur les recommandations de l'ISO, dont les nations industrialisées reconnaissent en toute indépendance la valeur.

Il se dégage dans le Royaume-Uni et aux Etats-Unis une tendance générale à adopter le système métrique, malgré la multitude des problèmes difficiles que poserait le changement. Le Royaume-Uni a déjà pris la décision de principe de se convertir au système métrique et a commencé de le mettre en pratique. Le Congrès des Etats-Unis a voté une loi qui instituait un groupe d'étude pour

«... étudier et évaluer les avantages et inconvénients que présenterait pour les Etats-Unis, sur le plan du commerce international, ... un système international normalisé de poids et mesures.»

Ce groupe a présenté un rapport détaillé en août 1971. Un projet de loi a été déposé, depuis, devant le Sénat des Etats-Unis et, si ce projet est adopté, les Etats-Unis s'engageront dans un programme de conversion, en dix ans, de leur système de poids et mesures au système métrique ou Système international (SI).

Le gouvernement canadien, pour sa part, a publié un Livre blanc annonçant son intention de convertir son système.

De nombreux produits définis selon le système duodécimal sont largement acceptés dans les pays qui emploient le système métrique.

L'exemple le plus important est celui du système unifié de pas de vis. Les réunions de l'ABC dont il a été fait mention ont abouti en 1948 à une déclaration d'accord sur la création de ce système, qui constitue l'ensemble de normes applicables aux pas de vis le plus perfectionné et le plus complètement articulé qui ait jamais existé. L'ISO l'a adopté comme formule de rechange au même titre que la série métrique de pas ISO. La production de vis selon ces normes est très abondante, non seulement dans les pays de l'ABC, mais aussi dans le monde entier. Ces vis sont utilisées en prédominance dans une voiture de marque étrangère très cotée, que les Etats-Unis importent d'un pays employant le système métrique. Les systèmes de fixation réalisés selon le système unifié sont employés dans l'avion supersonique anglo-français « Concorde », en raison de leur supériorité technique. Ce pourrait bien être là un autre cas où les Etats-Unis continueront d'employer des cotes duodécimales quand bien même ils adopteraient de plus en plus le système métrique.

On trouve dans le domaine des machines-outils bien d'autres normes, à mesures métriques ou duodécimales, qui sont bien enracinées et acceptées sur le plan international, par exemple les normes relatives aux nez de broches et aux queues coniques. Refuser d'utiliser ces normes et en choisir d'originales et différentes constitue un moyen certain et coûteux de limiter l'acceptation d'un produit par le marché. Il convient de faire observer que l'adoption de tolérances plus larges que celles qui sont pratiquées sur le plan international

pourrait très bien rendre nécessaires de nombreux travaux sélectifs de montage et d'ajustage, qui gonfleraient sensiblement les coûts de production ; de plus, les pièces à tolérances plus larges peuvent avoir une durée de service plus courte.

Il en a été dit assez pour illustrer la complexité des problèmes qu'il faut résoudre pour arriver à l'adoption universelle d'une norme internationalement recommandée, lorsque plusieurs normes ont été largement utilisées par le passé.

Annexe 1

METHODE RATIONNELLE DE SELECTION ENTRE LES DIVERS TYPES DE MATERIELS DE MANUTENTION

Le matériel de manutention comprend des produits très différents les uns des autres, qui ne fonctionnent pas de la même manière, mais qui accomplissent pourtant essentiellement les mêmes tâches. Voici l'une des méthodes qu'il est possible d'utiliser pour effectuer un choix rationnel entre les dispositifs du marché.

Construire un tableau à deux colonnes pour chacun des appareils à comparer, en faisant précéder ces deux colonnes de deux autres où figureront obligatoirement :

1. Tous les attributs (propriétés d'emploi, sécurité, coût initial, etc.) à prendre en considération dans le choix d'un appareil ;
2. Les coefficients, de 1 à 10, affectés par vous à chaque attribut pour en indiquer l'importance ; propriété d'emploi, fiabilité, sécurité et coût initial sont d'ordinaire les attributs affectés des plus hauts coefficients.

Dans la première colonne est indiqué, pour chaque appareil, son classement en ce qui concerne tel ou tel attribut. Le numéro 1 s'applique à l'appareil qui convient le moins du point de vue de cet attribut, le numéro 2 au second, etc.

La deuxième colonne est remplie en multipliant le classement de la colonne 2 par le coefficient correspondant, puis en faisant la somme de ces produits.

Le matériel qui obtient en deuxième colonne le total le plus élevé constitue le choix rationnel pour l'usage recherché.

On peut illustrer la méthode par un exemple.

Il se construit une nouvelle fabrique de pompes. La construction est en acier léger avec armatures verticales espacées de 40 pieds et poutrelles horizontales espacées de 20 pieds avec entre-deux supportant une charge de 1 500 livres. Le sol de soutènement est médiocre et les dalles de plancher ont une capacité de 500 livres par pied carré. La fabrication consiste en un travail de métaux en lots d'importance variable et une flexibilité maximale est indispensable. Les charges peuvent atteindre 600 livres. Leur incidence est voisine de 30 par heure. Il n'est pas prévu d'agrandissement avant plusieurs années, mais s'il a lieu, il sera systématisé et le bâtiment sera allongé par addition d'ailes successives. La main-d'œuvre existant dans la

TABLEAU A-1. CALCULS POUR LE CHOIX D'ÉQUIPEMENT

Attributs	Coefficient		Pont		Chariot à fourche		Transporteur africain		Transporteur sur socle	
	Coef.	Rank	Point	Product	Rank	Product	Rank	Product	Rank	Product
Propriétés d'emploi	10	4	40		3	30	2	20	1	10
Polyvalence	7	4	28		3	21	2	14	1	7
Adaptabilité	3	2	6		1	3	4	12	3	9
Développement des opérations	5	3	15		4	20	2	10	1	5
Effet sur le charpente	5	3	15		1	5	2	10	4	20
Effet sur le bâtiment	7	2	14		1	7	3	21	4	28
Superficie occupée	3	4	12		2	6	3	9	1	3
Fiabilité	10	3	30		2	20	4	40	1	10
Facilité d'entretien	9	3	27		2	18	4	36	1	9
Pièces de rechange	8	2	16		3	27	4	32	1	8
Coût initial	10	4	40		2	20	3	30	1	10
Durée de service	5	3	15		2	10	4	20	1	5
Valeur de rebut	3	4	12		3	9	2	6	1	3
Economies réalisables	9	2	18		1	9	4	32	3	27
Coûts d'exploitation	3	2	6		1	3	4	12	3	9
Dépenses d'entretien	2	3	6		2	4	4	8	1	2
Main-d'œuvre nécessaire	10	2	20		3	30	4	40	1	10
Qualifications demandées	8	2	16		3	24	4	32	1	8
Sécurité	10	1	10		3	30	4	40	2	20
Pollution	8	4	32		1	8	2	16	3	24
Total			378			304		440		227

région est en grande partie non qualifiée, les spécialistes de l'entretien sont rares, et l'on ne trouve pas sur place de pièces de rechange pour les machines et les autres matériels mécaniques. La production pourrait normalement être modifiée au cours des années. Le matériel devrait se prêter à la maintenance des pièces usinées. Le bâtiment comprend de bons dégagements larges et droits, sa superficie n'est en général pas surutilisée.

On désire faire un choix rationnel entre les possibilités suivantes : pont roulant, transporteur aérien à manœuvre manuelle, chariot-élévateur à fourche ou transporteur sur socle. Le tableau A-1 indique les calculs effectués, d'où il ressort que le transporteur aérien est, en l'occurrence, le meilleur appareil, précédant le pont roulant.

Annexe 2

NOTE SUR LE CALCUL DES COURBES D'APPRENTISSAGE

Nous appellerons $t(n)$ le nombre moyen d'heures/ouvrier par unité pour une production de n unités, et L la courbe d'apprentissage.

Si nous postulons que $t(n) = kn^d$, où k et d sont constants pour une opération donnée de production ou de montage, nous constaterons que :

$$L = \frac{t(2n)}{t(n)} = 2^d \quad (1)$$

$$t(1) = k \quad (2)$$

Si l'on présente la courbe d'apprentissage sur un papier-graphe bilogarithmique, l'équation se pose comme suit :

$$\begin{aligned} \log t(n) &= \log k + d \log n \\ &= \log t(1) + d \log n \end{aligned} \quad (3)$$

L'équation (3) correspond à une ligne droite. Si les valeurs de $\log n$ sont reportées sur l'axe horizontal, la pente de la courbe est d et l'intersection avec l'axe vertical est $\log t(1)$.

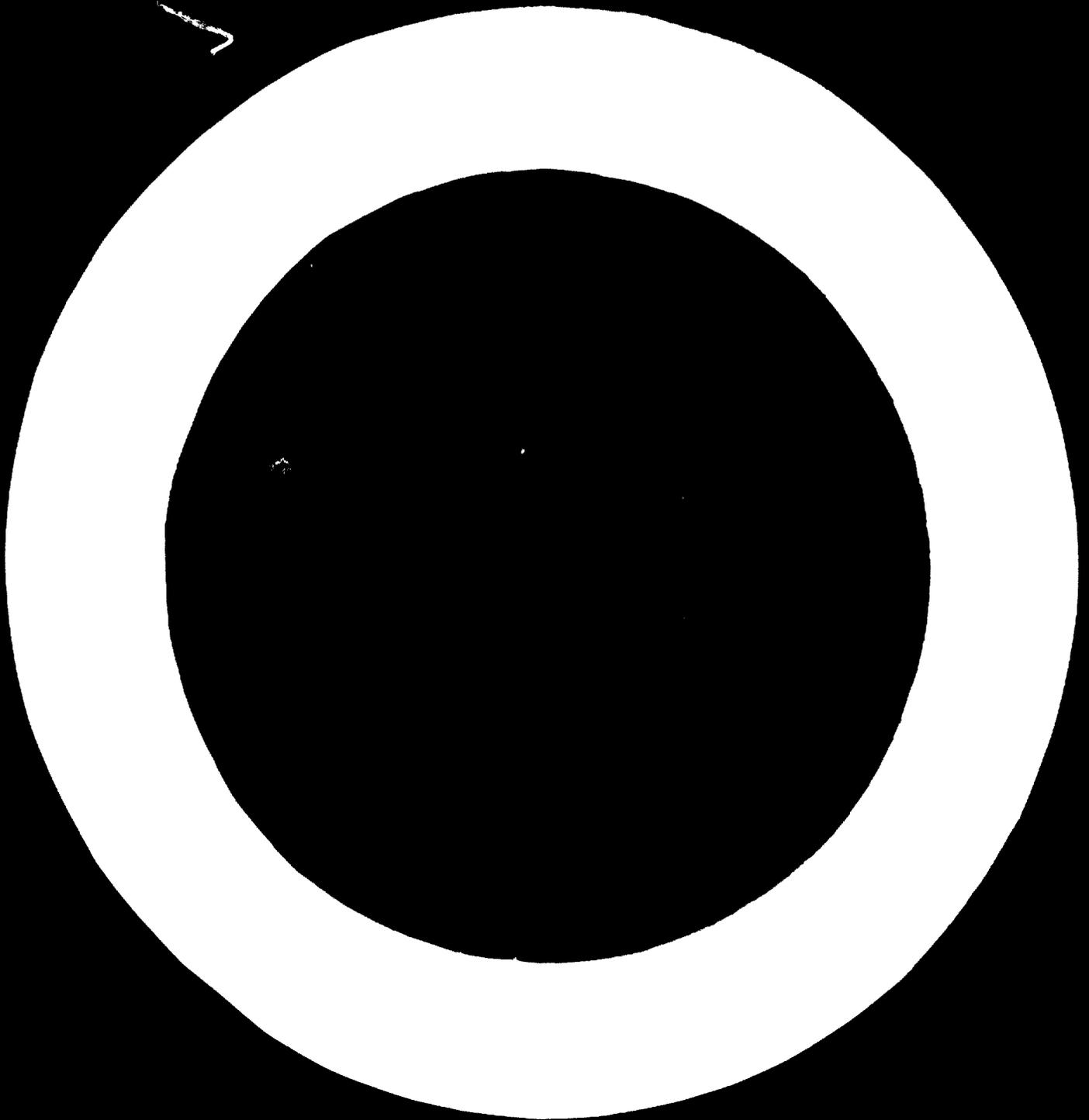
Si l'on détermine les valeurs moyennes en heures/ouvrier par unité pour deux (et de préférence pour plusieurs) valeurs de n , il est possible de tirer une ligne droite et de calculer d au moyen de cette ligne. Comme $d \log 2 = \log L$ [selon l'équation (1)], il est simple d'arriver à la courbe d'apprentissage.

De même, si l'on connaît la courbe d'apprentissage L et le nombre d'heures/ouvrier nécessaires pour produire la première unité, $t(1)$, nous calculons $d = \log L / \log 2$ et tirons la ligne droite de l'équation (3), qui nous permet de lire le nombre moyen d'heures/ouvrier par unité pour n'importe quelle quantité produite.

REFERENCES

- AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS (1967), *American Standard Preferred Limits and Fits for Cylindrical Parts*, USA Standard No. B 4.1, New York.
- AMERICAN SOCIETY OF TOOL AND MANUFACTURING ENGINEERS (ASTME) (1968), *Cutting Machining Processes, Manufacturing Data Series*, Dearborn, Michigan.
- AMERICAN SOCIETY OF TOOL AND MANUFACTURING ENGINEERS (ASTME) (1967), *Nontraditional Machining Processes, Manufacturing Data Series*, Dearborn, Michigan.

- BACON, FRANK R., JR. (1963), *Growth through New Product Development*, The University of Michigan, Industrial Development Research Program, Ann Arbor, Michigan.
- BACON, FRANK R., JR. et REMPP, KATHERINE A. (1967), *Electronics in Michigan*, The University of Michigan, Institute of Science and Technology, Ann Arbor, Michigan.
- BACON, FRANK R., JR. et SPARROW, FREDRICK T. (1962), *Research on product Development Capabilities of Michigan Firms*, The University of Michigan, Industrial Development Research Program, Ann Arbor, Michigan.
- BHATTACHARYYA, AMITABHA et HAM, INYONG (1969), *Design of Cutting Tools*, Manufacturing Data Series, American Society of Tool and Manufacturing Engineers (ASTME), Dearborn, Michigan.
- FULLERTON, BAXTER T. (1961), "Machine replacement for the shop manager", *Tooling and Production*, numéro de mars, p. 49 - 54.
- GOSLIN, LEWIS N. (1967), *The Product Planning System*, Richard D. Irwin, Inc., Homewood, Ill.
- GREVE, JOHN W. (Ed.) (1967), *Handbook of Industrial Metrology*, ASTME (American Society of Tool and Manufacturing Engineers) Manufacturing Engineering Series, Prentice-Hall, New York.
- KHOL, RONALD (1970), "Chemical fabrication processes", *Machine Design*, numéro du 12 février.
- MITROFANOW, S. P. (1960), *Wissenschaftliche Grundlagen der Gruppentechnologie*, VEB Verlag Technik, Berlin, R.D.A.
- NATIONS UNIES, CENTRE DE DEVELOPPEMENT INDUSTRIEL (1967), *Report of the Group of Experts on Maintenance and Repair of Industrial Equipment in Developing Countries*, New York, décembre 1966, United Nations Industrial Development Organization, Vienne (UNIDO Doc. No. ID/1) (mimeo.).
- NEWBROUGH, E. TRUETT (1967), *Effective Maintenance Management*, McGraw-Hill, New York.
- NIEBEL BENJAMIN W. (1967), *Motion and Time Study*, Richard D. Irwin, Inc., Homewood, Ill.
- NISSELY, HAROLD R. (1949), "The importance of learning curves in setting job shop standards", *Mill and Factory*, numéro de mai, p. 119 - 122.
- ODOM, J. V. (1969) "Problems of metric conversion", ASTME (American Society of Tool and Manufacturing Engineers), *Lectors*, No. 4, Dearborn, Michigan, p. 17 - 19.
- ORGANISATION DES NATIONS UNIES POUR LE DÉVELOPPEMENT INDUSTRIEL (1971), *Choix et essais de réception des machines-outils pour le travail des métaux: Manuel à l'intention des pays en voie de développement* (numéro de vente : F. 71.11.B.3).
- PENTLAND, WILLIAM (1968), "Economic machining optimizes profit", *The Tool and Manufacturing Engineer*, vol. 61, no. 4 (numéro d'octobre), p. 36 - 40.
- TARASOV, LEO (1969), "Role of wheel speed in grinding operations", *Machinery* (New York), numéro de mai, p. 153 - 155.
- VOGEL, TOM H. (1950), "Accuracy in machining - its standardization and cost", *The Tool Engineer*, numéros de novembre et décembre.



HOW TO OBTAIN UNITED NATIONS PUBLICATIONS

United Nations publications may be obtained from bookstores and distributors throughout the world. Consult your bookstore or write to: United Nations, Sales Section, New York or Geneva.

COMMENT SE PROCURER LES PUBLICATIONS DES NATIONS UNIES

Les publications des Nations Unies sont en vente dans les librairies et les agences dépositaires du monde entier. Informez-vous auprès de votre librairie ou adressez-vous à: Nations Unies, Section des ventes, New York ou Genève.

КАК ПОЛУЧИТЬ ИЗДАНИЯ ОРГАНИЗАЦИИ ОБЪЕДИНЕННЫХ НАЦИЙ

Издания Организации Объединенных Наций можно купить в книжных магазинах и агентствах во всех районах мира. Наведите справки об изданиях в вашем книжном магазине или пишите по адресу: Организация Объединенных Наций, Секция по продаже изданий, Нью-Йорк или Женева.

COMO CONSEGUIR PUBLICACIONES DE LAS NACIONES UNIDAS

Las publicaciones de las Naciones Unidas están en venta en librerías y casas distribuidoras en todas partes del mundo. Consulte a su librero o diríjase a: Naciones Unidas, Sección de Ventas, Nueva York o Ginebra.

Printed in Austria

Price: \$ U.S. 1.75

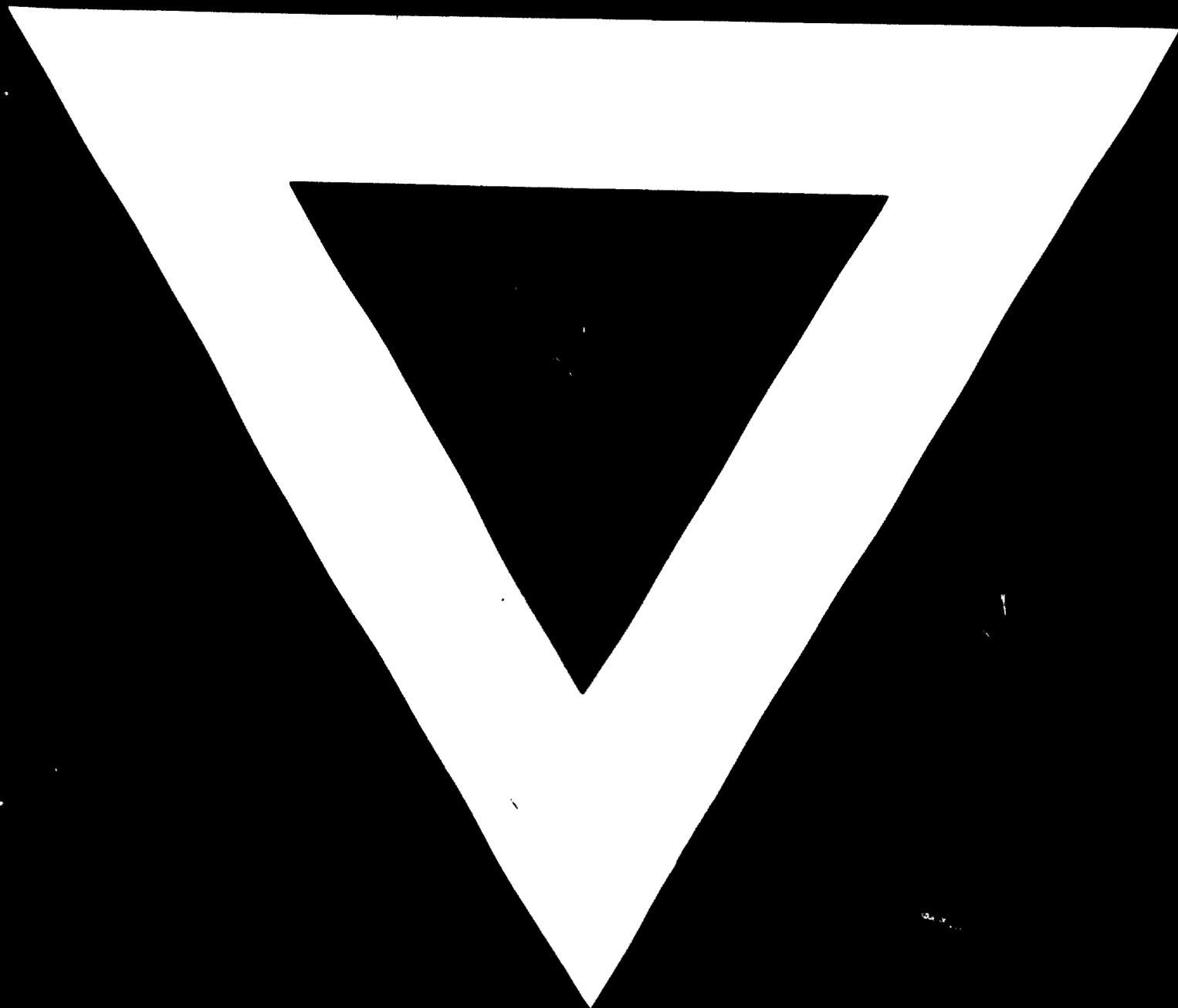
United Nations publication

(or equivalent in other currencies)

71-9078—August 1973—1,100

Sales No.: F.73.II.B.6

ID/77



2-12-74