

Publications RAVEL

Analyse dur rendement éneergétique de processus industriels de pro productique



M. Bongard
M. Jufer

Ressort 21:
Force

Office fédérale
RAVEL - Publications RAVEL,

des questions conjoncturelles

Adresses:

Editeur: Office fédéral des
questions conjoncturelles (OFOC)
Belpstrasse 53
Tél.: 031/322 21 39
Fax: 031/372 41 02

Direction: RAVEL
c/o Amstein+Walthert AG
Leutschenbachstrasse 45
8050 Zürich
Tél.: 0 1 /305 91 1 1
Fax: 01/305 92 14

Responsable
romand: Charles Weinmann
Weinmann-Energies SA
Route d'Yverdon 4
1040 Echallens
Tél.: 021/881 47 13
Fax: 021/881 10 82

Chef du domaine: Jurg Nipkow
ARENA
Schaffhauserstrasse 34
8006 Zürich
Tél.: 01/362 91 83
Fax: 01/363 38 50

Auteurs: M. Bongard
M. Jufer
Ecole polytechnique fédéral de Lausanne
Ecublens
1015 Lausanne
Tél.: 021/693 26 84
Fax: 021/693 26 87

Cette étude appartient à l'ensemble des projets d'étude effectués par des diers dans le cadre du programme d'impulsion RAVEL. L'Office fédéral des questions conjoncturelles et la Direction du programme autorisent la publication de ce rapport, sous la responsabilité des auteurs et des chefs des domaines concernés.

Copyright Office fédéral des questions
conjoncturelles
3003 Berne, septembre 1992

Reproduction autorisée, avec mention de la source. Commande auprès de l'Office fédéral central des imprimés et du matériel, Bern (NO de com. 724.397.21.55 f)

Form. **724.397.21.55 f 3.94 300**

RAVEL - Publications RAVEL

TABLE DES MATIERES

Résumé

Zusammenfassung

PRESENTATION

A.	Méthodologie appliquée	I
B	Glossaire	II
C	L'opération industrielle d'usinage	IV
D.	Bilan énergétique du processus et gains possibles	X
E.	Conclusions	XVI

RAPPORT PRINCIPAL

I	INTRODUCTION	1
1.	Enchaînement des opérations industrielles	1
1.1	Produits fonctionnels	1
1.2	Machines-outils	3
1.3	L'usinage	6
2.	La fabrication comme processus de traitement d'information	8
2.1	Valeurs économiques	8
2.1.1	Principe du minimum d'information morphologique	9
2.2	Valeurs énergétiques	9
2.2.1	Consommation énergétique de la fabrication mécanique en Suisse	12
2.2.2.	Considération générale	12
II	DELIMITATION DES FRONTIERES DU PROCESSUS GLOBAL DE L'OPERATION INDUSTRIELLE D'USINAGE PAR ENLEVEMENT DE COPEAUX	13
1.	Schéma de principe du processus	13
2.	Limites du processus	13
2.1	Matières premières	13
2.2.	Apport énergétique	13
2.2.1	Energie électrique opératoire	13
2.2.2	Equilibre des consommations	14
2.2.3	Part énergétique pour la réalisation des équipements permettant l'exécution de l'opération industrielle d'usinage	14
2.3	Part énergétique d'amortissement du capital des équipements immobilisés	14
2.3.1	Expression de la part d'amortissement	14
2.3.2	Choix de la puissance installée	15
2.3.3	Conception des machines	15
2.4	Part énergétique de l'opération d'usinage par enlèvement de copeaux	15
2.4.1	Définition de l'énergie utile	15
2.4.2	Définition de l'énergie spécifique de coupe	15
2.4.3	Définition des rendements	16
2.4.4	Définition du coût intégral unitaire énergétique (CIUE)	16
2.4.5	Détermination de l'énergie de coupe optimale	16
2.4.6	Flux des pièces à produire	16
3.	Situation de la branche "VSM" (industrie suisse des machines, des équipements électriques et des métaux) en 1990	17

III	ANALYSE DES OPERANTS DU PROCESSUS D'USINAGE	18
1.	Chaîne énergétique amont	18
2.	Matériau première	18
2.1	Contenu énergétique	18
2.2	Intensité énergétique	19
3.	Opération industrielle principale (définition des rendements et grandeurs particulières)	19
3.1	Energie utile - rendement de coupe	19
3.2	Rendement de production lors d'un cycle complet de fabrication d'une pièce	20
3.3	Rendement de production lors d'un cycle complet de fabrication pour une série de pièces	20
3.4	Rendement énergétique de production et coût intégral unitaire énergétique :	20
4.	Les préceptes d'optimisation	21
IV	ANALYSE DES ELEMENTS QUI INTERVIENNENT DANS LES PRECEPTES D'OPTIMALISATION	23
1.	Energie utile de production de copeaux (WC)	23
1.1	Théorie de la coupe	24
1.2	Variables de l'énergie de coupe	28
2.	Analyse des machines-outils	31
2.1	Répartition des puissances installées	31
2.2	Influence de la puissance installée sur le poids final de la machine	31
2.3	Diminution de l'énergie consommée par les auxiliaires	32
2.4	Analyse des activités des machines d'un parc	34
2.5	Modélisation des activités d'un parc de machines	36
2.6	Amortissement de l'énergie capitalisée	37
3.	La conversion électromécanique dans les machines-outils	38
3.1	Schématisation	38
3.2	Définitions	39
3.2.1	Rapport de transmission	39
3.2.2	Mesure de la puissance de coupe	41
3.2.3	Calcul du rendement énergétique de coupe	41
3.3	Mesures en site	41
3.3.1	Département des matériaux EPFL	41
3.3.2	Mesures énergétiques en site de production	45
3.3.3	Récapitulation de l'énergie opératoire par machine	48
3.4	Répartition de la consommation de l'énergie opératoire	48
3.5	Etablissement du bilan énergétique du processus de fabrication par enlèvement de copeaux	49
4.	Broche	50
5.	Choix du rapport de transmission moteur-broche	55
6.	Axe : transfert de position	58
6.1	Transfert de position	58
6.2	Equation de mouvement avec transmission	59
6.3.	Couple en fonction des dimensions	59
6.3.1	Moteur polarisé	59
6.3.2	Moteur réluctant	60
6.3.3	Forme générale	60
6.4	Inertie en fonction des dimensions	60
6.5	Corrélation couple-inertie	60
6.6	Relation couple-rapport de transmission	61
6.7	Exemple	62
6.7.1	Moteur à performances élevées	62
6.7.2	Moteur à performances moyennes	63
6.8	Conclusions	64
6.9	Liste des symboles	65
6.10	Compléments	65
6.10.1	Moteur polarisé - lois de similitude	65

6.10.2	Moteur réluctant - lois de similitude	66
6.10.3	Echauffement - lois de similitude	66
7.	Préparation des gammes d'operations	67
8.	Machines-outils multibroche	70
9.	Atelier flexible et organisation (JIT)	71
V.	ESTIMATION DU POTENTIEL D'ECONOMIE D'ENERGIE PRIMAIRE	72
VI.	CONCLUSIONS	78
VII.	LISTE DES REFERENCES	80
VIII.	LISTE DES SYMBOLES UTILISES	82
IX.	ANNEXES	83
1.	Complément relatif aux entraînements	83
2.	Récupération de la chaleur dégagée par les machines-outils	91
3.	Comportement énergétique des moteurs au démarrage et au freinage	93
4.	Comparaison des caractéristiques énergétiques des moteurs dans une large gamme de puissance	99
5.	Complément à la méthode de mesure de la puissance, du couple et de la force de coupe	101
6.	Exemples de mesures effectuées sur machine-outil	103
7.	Potentiel energy savings by increased motor efficiencies	106
8.	Conséquence énergétique des modifications et rebus	107

RESUME

Le processus de production industrielle par enlèvement de matière représente une part importante de l'activité industrielle des pays occidentaux.

Nous estimons que le nombre des machines-outils en fonction en Angleterre est d'environ 850'000 machines et qu'il est d'environ 50'000 machines en Suisse. La production de ces machines représente un chiffre d'affaire de l'ordre de £ 25 milliards pour l'Angleterre de Fr. 5,5 milliards pour la Suisse.

La consommation énergétique du processus est exclusivement l'énergie électrique finale.

Notre étude a pour but de définir les valeurs des gains énergétiques possibles en énergie électrique finale.

Dans ce sens nous avons défini la valeur de l'énergie spécifique théorique minimale et déterminé, pour chaque phase du processus, les différentes consommations énergétiques correspondantes.

L'établissement du bilan énergétique global en énergie primaire permet de se faire une idée réelle de la répartition énergétique entre les différentes phases du processus.

La conversion des valeurs énergétiques spécifiques aux valeurs absolues annuelles consommées est faite pour la Suisse sur la base des statistiques du VSM (Association Suisse des Constructeurs de machines).

Le potentiel maximal d'économie d'énergie électrique finale est calculé par rapport à l'énergie spécifique théorique consommée par l'opération. Le potentiel possible (réaliste) est déterminé en rapport aux énergies consommées à chaque phase de l'opération ainsi qu'aux considérations techniques particulières.

Les valeurs des "stimulants" économiques sont également évaluées.

Mars, 1992

M. Bongard

ZUSAMMENFASSUNG

Die Aufgabe der Fertigungstechnik besteht darin, Werkstücke aus vorgegebenem Werkstoff nach vorgegebenen geometrischen Bestimmungsgrössen zu formen und diese zu funktionsfähigen Erzeugnissen zusammenzusetzen.

Die Anwendung von Werkzeugmaschinen spielt eine wesentliche Rolle in den industriellen Aktivitäten der meisten westlichen Länder. Nach Schätzungen sind in England ca. 850.000 Werkzeugmaschinen in Betrieb; in der Schweiz beträgt diese Anzahl an die 50.000. Die Erträge dieser Maschinen belaufen sich in England auf £ 25 Milliarden und in der Schweiz auf Frs 5,5 Milliarden.

Dieser industrielle Prozess wird ausschliesslich mit Elektrizität betrieben.

Das Ziel unserer Studie ist es, mögliche Einsparungen an Elektrizität zu finden. In diesen Sinne haben wir die minimale Schnittenergie (für spanabhebende Bearbeitung) bestimmt. Für jede Phase der Arbeitsvorganges haben wir des Energieverbrauch errechnet und gemessen.

Die Aufstellung der System- Primärenergiebilanz erlaubt eine gute Aufteilung der Elektrizitätsverbrauchs auf jede Phase des Prozesses.

Die Umrechnung von spezifischer Energie in jährlichen Energieverbrauch beruht auf der Basis der vorhandenen Statistiken des VSM.

Das maximale Sparpotential im Elektrizitäts- Endverbrauch ist auf der Basis des spezifischen Energieverbrauchs pro Fertigungsstufe errechnet worden. Das mögliche (realistische) Sparpotential wird für jede einzelne Phase der Fertigungsstufe errechnet, gemäss der technischen Bedingungen.

Es wurden auch Berechnungen zur Wirtschaftlichkeit der Sparmassnahmen erstellt.

März 1992

M. Bongard

PRESENTATION

A. METHODOLOGIE APPLIQUEE

1. Nous avons commencé par visualiser globalement, sur un schéma, l'ensemble des éléments pouvant intervenir dans le processus de l'opération industrielle d'usinage par enlèvement de matière (copeaux). [Fig. 1]

Ainsi l'ensemble des intervenants sont désignés. Il faudra dès lors spécifier et quantifier la valeur énergétique de leur intervention dans le processus.

2. Afin de mieux définir le processus industriel considéré nous avons essayé de trouver une approche générale en liaison avec l'objectif même de l'opération. En effet l'opération d'usinage convertit un élément de matière brute en un produit caractérisé par des surfaces fonctionnelles.

Dans cette première approche nous nous sommes satisfaits de la notion d'énergie spécifique par unité de volume de matière enlevée et nous n'avons pas introduit la notion de surface créée qui permettrait une comparaison plus précise des efficacités des machines.

3. Nous avons systématiquement travaillé en valeur d'énergie spécifique.

Nous avons ainsi utilisé l'énergie spécifique par poids de copeaux enlevés et converti cette énergie en énergie spécifique par poids de la pièce fonctionnelle. Nous avons pour cela utilisé le fait que des statistiques indiquent que 20 % de la matière brute est convertie en copeaux.

4. Les opérants du processus sont les suivants

- chaîne énergétique amont - la matière première et son contenu énergétique - l'intensité énergétique de la branche "constructeurs de machines" - l'opération d'usinage dans ses différentes phases (coupe, production unitaire, production de série, production annuelle) l'amortissement du capital (machine) immobilisé - les rejets.

L'énoncé des préceptes d'optimisation va être un guide pour les études de détail.

5. Définition de l'énergie spécifique théorique minimale à partir de la théorie de coupe orthogonale. Cette énergie spécifique sera la référence du minimum de la consommation.

6. L'examen de la répartition des puissances installées sur les machines-outils et l'utilisation effective de celles-ci en exploitation nous donneront des informations sur la qualité des contenus énergétiques des machines-outils. En complément, l'analyse des activités des machines-outils d'un parc important, complétée par des statistiques, permettra de quantifier les durées d'usinage par rapport au temps de présence ou à l'horaire d'équipe. Aussi la quantification de l'utilisation des puissances installées sera un renseignement important.

Ces analyses, complétées par des mesures spécifiques sur quelques machines-outils, nous permettront de quantifier les consommations énergétiques pour chacune des phases du processus d'usinage.

7. Cette approche permet d'établir le bilan énergétique global spécifique pour l'ensemble du processus et de classer les consommations pour chacune des phases.

Ainsi nous avons défini, en rapport avec l'énergie consommée, deux groupes d'utilisation

- 1) l'outil et la broche de la machine-outil
- 2) la gestion de la production

Du bilan énergétique nous calculons l'énergie opératoire et considérons dans celle-ci la part faisant intervenir l'énergie électrique finale.

Nous calculons ainsi le rendement énergétique spécifique de production en ne considérant que la part consommée d'énergie électrique finale.

8 . Le passage des valeurs spécifiques aux valeurs absolues consommées est basé sur les données statistiques du VSM de 1991.

Nous pouvons dès lors quantifier les valeurs des économies potentielles et leurs caractéristiques.

B GLOSSAIRE

Energie primaire : C'est l'énergie contenue dans le combustible avant conversion. Pour les combustibles tels que le pétrole, le charbon, le gaz naturel, le bois, etc. la valeur spécifique de l'énergie primaire est le pouvoir calorifique. Pour l'énergie hydraulique, nous pouvons adapter la définition suisse, c'est-à-dire l'énergie potentielle de hauteur des barrages hydrauliques ou la définition européenne qui assimile cette énergie à l'énergie équivalente d'une centrale thermique "fictive" [36]. Dans notre calcul du rendement énergétique mixte de l'énergie finale, nous avons pris la définition suisse.

Energie finale : C'est l'énergie distribuée, disponible aux points de consommation.

Energie utile : C'est l'énergie sous la forme finalement désirée par le consommateur.

Contenu énergétique : (CE) C'est la quantité d'énergie primaire consommée pour la réalisation du produit fonctionnel désiré.

Energie spécifique de coupe : (Wsp) C'est l'énergie nécessaire à l'arrachement de la matière par un outil de coupe, burin, fraise, etc.

Energie opératoire : C'est l'ensemble des énergies intervenant dans le processus de l'opération d'usinage.

Intensité énergétique : (Joule/Fr) L'intensité énergétique est la quantité d'énergie associée à une unité monétaire de valeur ajoutée.

Conversion J/kg copeaux en J/kg, : Nous avons admis la conversion suivante

$$\frac{\text{J/kg copeaux} * 20}{80}$$

parce qu'en moyenne le poids de la matière enlevée correspond à 20 % de la matière brute.

Consommation minimale théorique : C'est la valeur de l'énergie spécifique de coupe multipliée par le volume de matière (copeaux) enlevée.

Consommation pendant le processus; de coupe : C'est la consommation énergétique pour l'exécution de l'opération de coupe proprement dite. Elle débute par la mise en route de la broche, se poursuit par la coupe et se termine par l'arrêt de la broche.

Consommation d'usi : C'est toute l'énergie consommée par les moyens de production pour la réalisation d'une pièce, d'un ensemble de pièces ou même la production annuelle.

Force spécifique de coupe : (kc) C'est la force nécessaire à l'arrachement de la matière dans le processus de coupe avec outils tranchants.

Temps d'équivalence en énergie utile (Teu) C'est le temps au bout duquel le convertisseur d'énergie a produit la quantité d'énergie égale à celle nécessaire pour sa réalisation.

CAPP: Logiciel servant à la conception assistée par ordinateur des gammes de fabrication. Ce logiciel est associé à une base de données relatives aux machines-outils, matières, outils, etc. CAPP = Computer aided production planning.

JIT / MRP : logiciels d'organisation de la production.

CIUE : Le "coût intégral unitaire énergétique est la somme du coût opératoire énergétique et de l'amortissement énergétique du capital investi initialement et non réutilisé en fin d'opération.

E a.c.i. : La valeur énergétique de l'amortissement du capital investi est donnée par la différence des contenus énergétiques initiaux et finaux, divisée par la valeur énergétique des produits fonctionnels.

CEN ou Δ CEN: On appelle "Contenu Energétique Net" (CEN) (Net energy requirement NER) le contenu énergétique opératoire (CEO) augmenté du capital énergétique des équipements principaux et annexes.

C. L'OPERATION INDUSTRIELLE D'USINAGE
- SCHEMA D'UNE OPERATION INDUSTRIELLE
IV

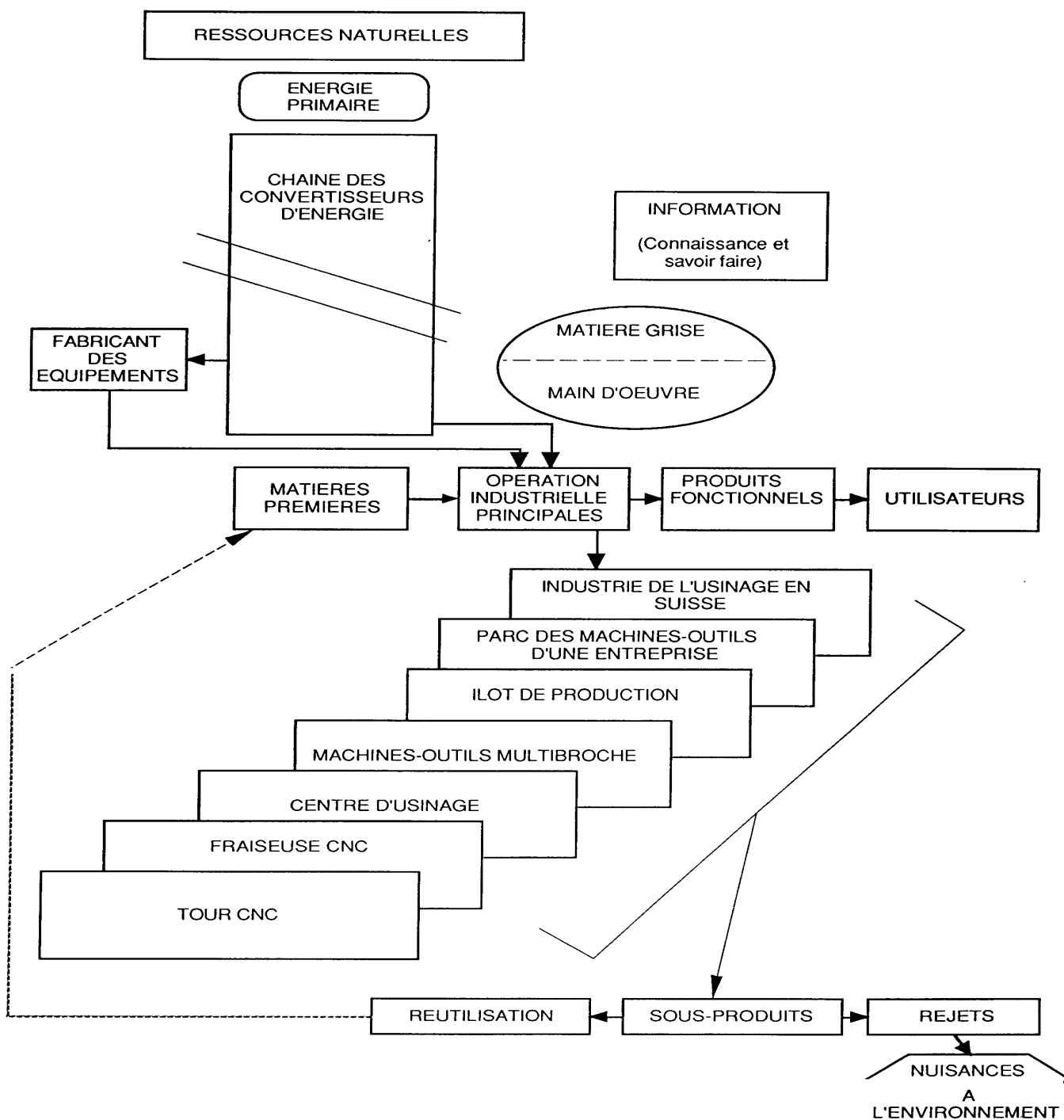


Figure 1

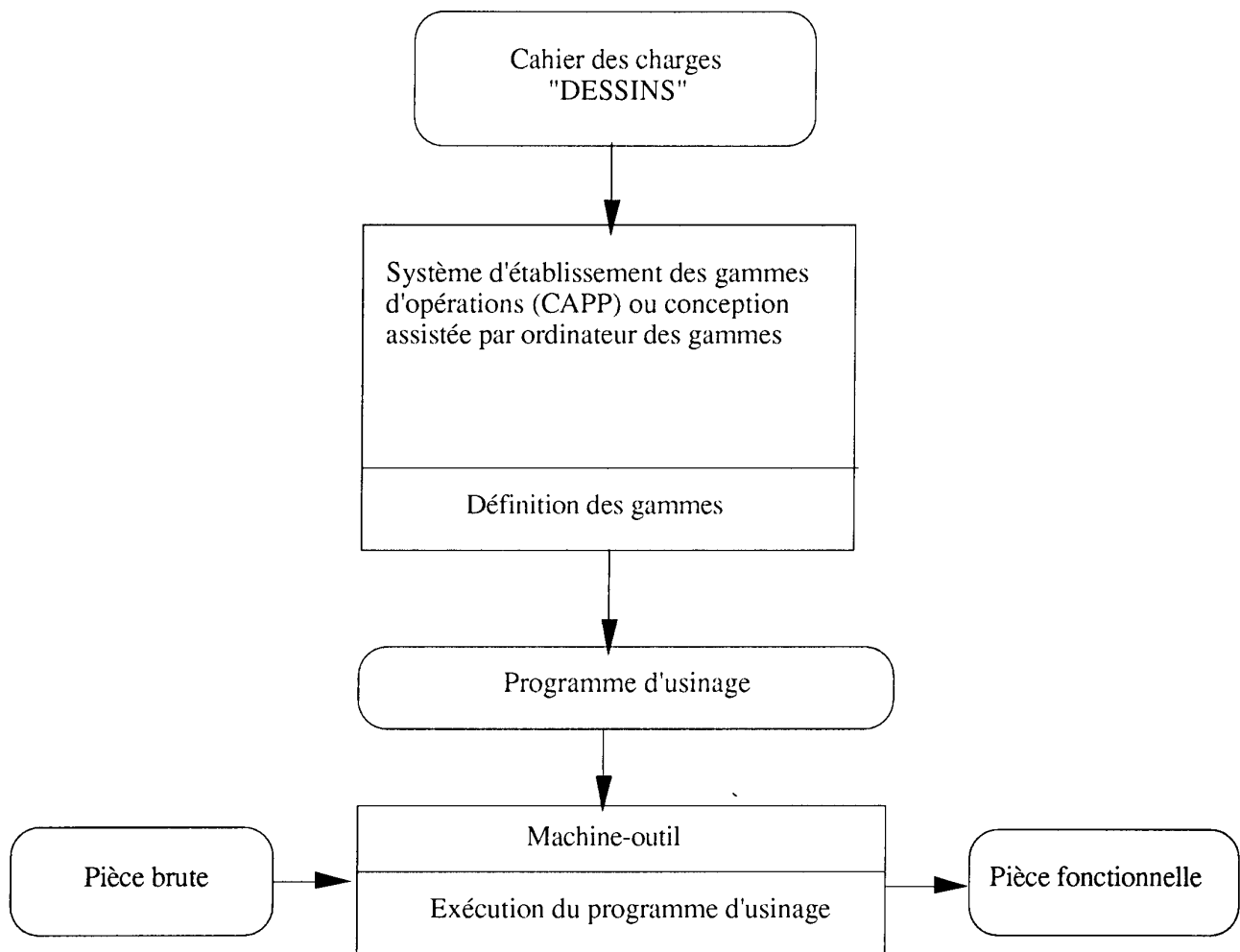
MACHINES OUTILS

Le façonnage des métaux par enlèvement de matière est un segment important de notre industrie.

Il y a environ 50'000 machines-outils affectées à ce travail en Suisse. Le chiffre d'affaire représente environ 5,5 milliards de francs.

De plus, certaines statistiques permettent de dire qu'environ 20% des métaux produits (matière brute) sont transformés en copeaux.

Schéma de l'opération d'usinage :



PROCESSUS DE TRAITEMENT D'INFORMATION

- Les INFORMATIONS en question sont de deux types. Le premier type est l'information contenue dans le matériau, c'est sa composition chimique et son état physique, c'est l'information "METABOLIQUE". Le second type est lui aussi contenu dans le matériau par ses formes et ses états de surface, c'est l'information "MORPHOLOGIQUE".

$$\text{- Valeurs économiques : } \underline{V_{\text{morph. éco.}} > V_{\text{méta. éco.}}}$$

$$\text{- Valeurs énergétiques : } \underline{V_{\text{morph. éner.}} < V_{\text{méta. éner.}}}$$

Pour la valeur énergétique d'une pièce d'acier usinée :

$$\text{Contenu énergétique matière : } 27720 \text{ kJ/kg}$$

$$\text{Energie morphologique consommée : } 210 \text{ kJ/kg c. } \hat{=} 52,5 \text{ kJ/kg}$$

Cette valeur est exprimée en énergie finale, sa valeur en énergie primaire est :

$$\frac{52.5 \text{ kJ/kg}}{0.52} = 101 \text{ kJ/kg (limite théorique)}$$

Le rapport des deux énergies spécifiques est le suivant :

$$\underline{\frac{\text{Energie morphologique}}{\text{Energie métabolique}}} = \frac{101}{27720} = 0,0036 \hat{=} 0,36 \%$$

Nous avons calculé que l'énergie opératoire globale primaire est de 1701 kJ/kg.

Nous avons alors les rapports suivants :

$$\underline{\frac{\text{Energie morphologique opératoire}}{\text{Energie métabolique}}} = \frac{1701}{27720} = 0,0614 \hat{=} 6,14 \%$$

$$\underline{\frac{\text{Energie morphologique opératoire}}{\text{Energie métabolique "récupération"}}} = \frac{1701}{14256} = 0,12 \hat{=} 12 \%$$

Dans cette première démarche nous nous sommes limités à la quantification de l'énergie morphologique en poids de la matière enlevée sans prendre en considération les surfaces nouvellement créées. Cette simplification nous empêchera de faire par la suite des comparaisons complètes d'une machine-outil à l'autre. Mais nous estimons que cette simplification n'altère en rien les valeurs du bilan énergétique du processus considéré.

CONSOMMATION ENERGETIQUE DE LA FABRICATION MECANIQUE EN SUISSE

Référence : VSM - 1991

Forces motrices, énergie électrique : 5410 TJ

Admis pour usinage : 4328 TJ

Convertie en énergie primaire : $\frac{4328 \text{ TS}}{0.52} = 8323 \text{ TJ}_{\text{pr.}}$

Lors d'une analyse globale énergétique du processus de fabrication mécanique, il est évident que le point de vue énergétique morphologique seul ne peut pas motiver un changement de stratégie puisqu'il représente entre 6 et 12 % de la consommation. Aussi la considération économique des coûts de fabrication va jouer un rôle catalyseur d'économie d'énergie.

DELIMITATION DES FRONTIERES DU PROCESSUS

1. Contenu énergétique des matières premières

2. Apport énergétique

- Energie électrique :

$$\eta_{\text{mixte}} = \frac{\text{Energie finale}}{\text{Energie primaire}} = 0,52 \hat{=} 52 \%$$

- Part énergétique des équipements en amont de l'opération : 2 à 5 % de l'énergie opératoire

- Part énergétique des équipements intervenant dans l'opération d'usinage

3. Part énergétique de l'opération d'usinage par enlèvement de copeaux.

Energie utile $\hat{=}$ Energie spécifique de coupe

$$W_{\text{sp}} = \frac{W_c}{\text{Vol. copeaux}} = k_c \text{ (MPa)}$$

k_c est la force spécifique de coupe ($\frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$)

Acier : 256 kJ/kg copeaux

VIII

4. Exécution de la gamme d'opérations

5. Le flux des pièces à produire

LES PRECEPTES D'OPTIMALISATION

- 1 . Minimiser le rejet spécifique d'énergie (maximiser le rendement des machines)
2. Maximiser la valeur de l'énergie rejetée (récupération)
- 3 . Minimiser la valeur de l'énergie d'alimentation
4. Maximiser la durée de vie des équipements (les rendre plus résistants à l'usure, etc.)
5. Minimiser le contenu énergétique des équipements (concevoir des machines qui continuent à assumer la même fonction, tout en étant plus légères, faites de matériaux moins nobles (énergétiquement), de conception plus évoluée, etc.)
6. Minimiser la valeur de l'énergie utilisée dans la fabrication (électricité en heures creuses...
- 7 . Maximiser la valeur résiduelle des équipements
- 8 . Maximiser, pendant la durée de disponibilité des équipements, leur taux de production
9. Minimiser toutes les formes de stock
10. Minimiser les modifications dès le début de la fabrication
- II. Minimiser les rebus en cours de fabrication

CARACTERISTIQUES DE COUPE

- La vitesse de coupe se situe entre 3 et 200 m/min et peut atteindre exceptionnellement 3000 m/min
- L'avance varie entre 0,0125 et 2,5 mm par révolution
- La profondeur de coupe peut varier de zéro à 25 mm
- Il est donc possible d'enlever un volume de matière de 80 à 160 cm³/min, exceptionnellement de 1600 cm³/min
- L'énergie théorique minimale consommée pendant 1 minute est donc de

$$\text{Energie finale : } k_c \cdot 80 \text{ à } 160 \text{ cm}^3 = 200 \text{ à } 400 \text{ kJ}$$

$$\text{Energie primaire : } \frac{k_c \cdot 80 \text{ à } 160 \text{ cm}^3}{0.52} = 385 \text{ à } 770 \text{ kJ}$$

$$\text{Acier } k_c = 2,5 \text{ J/mm}^3 \hat{=} 2,5 \cdot 10^3 \text{ J/cm}^3 \hat{=} 2'500 \text{ J/cm}^3$$

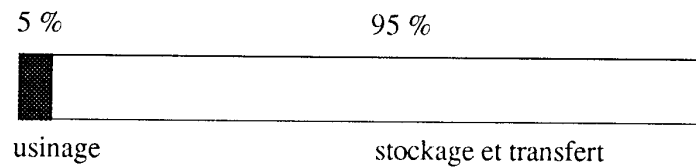
CONSUMMATION ENERGETIQUE D'AUTRES PROCEDES D'USINAGE

Tournage, fraisage, perçage :	1 à 3 j/mm ³
Rectifiage :	30 à 60 j/mm ³
Etincelage :	1 00 à 200 j/mm ³
Electro-érosion :	200 à 500 j/mm ³

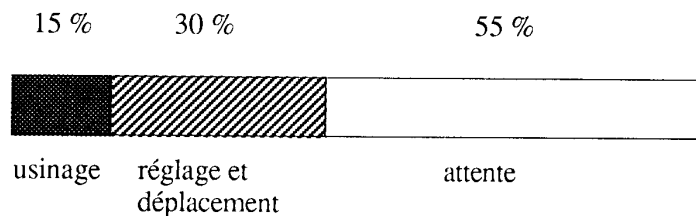
ANALYSE DES ACTIVITES DES MACHINES D'UN PARC

En résumé:

1. Fabrication petites et moyennes séries : (Suisse)

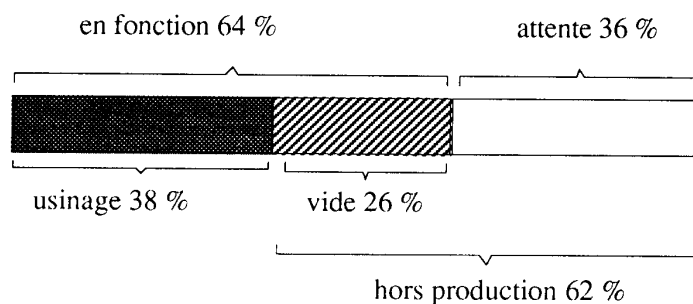


- Emploi des temps pour une pièce



- Emploi du temps pour une machine

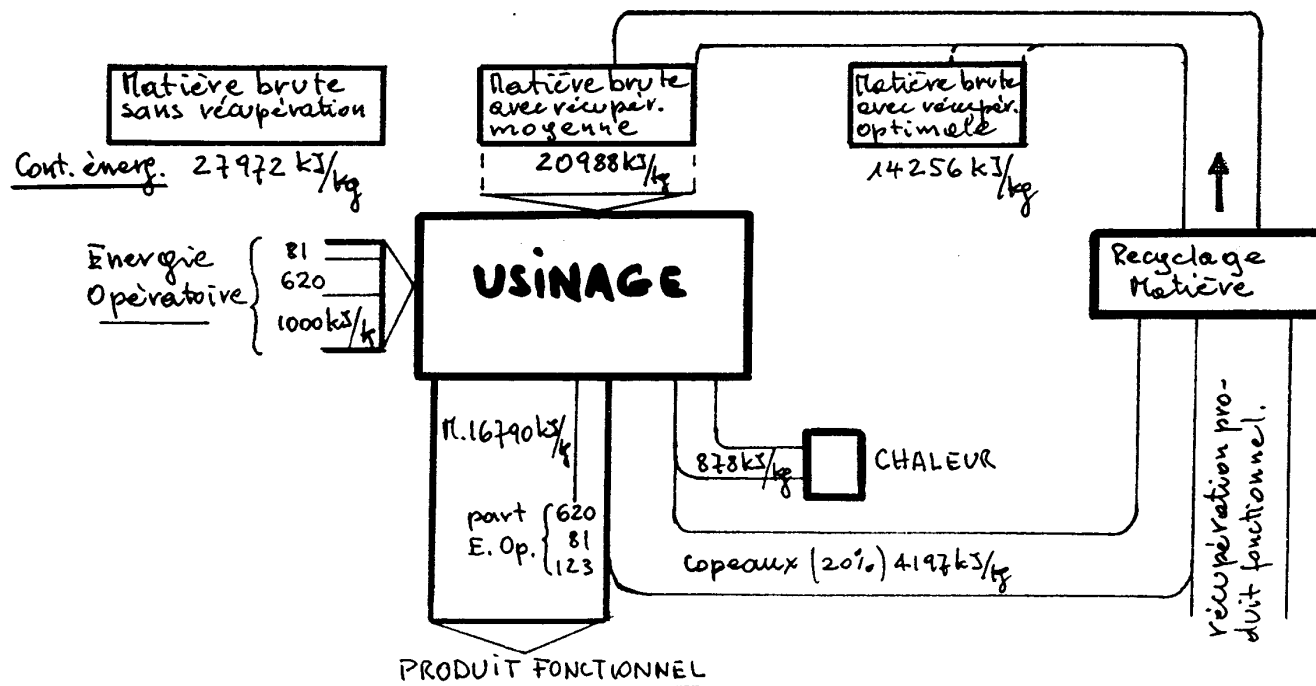
2. Fabrication grandes séries : (Italie)



X

D. BILAN ENERGETIQUE DU PROCESSUS ET GAINS POSSIBLES

1	. Contenu énergétique matière brute (récupération moyenne)	20'988 kJ/kg
2.	Résultats moyens des mesures :	
2.1	Consommation énergétique pour production	1'000 kJ/kg
2.2	Energie capitalisée (2 équipes)	620 kJ/kg
2.3	Energie capitalisée en amont 5% (2.1 + 2.2)	<u>81 kJ/kg</u>
	Sous-total	22'689 kJ/kg



2.4 L'énergie opératoire est la somme 2.1. + 2.2 + 2.3 1'701 kJ/kg

3. Contenu énergétique produit fonctionnel (80 % Matière brute + Energie cap. + Energie coupe) 17'614 kJ/kg
4. "Plus-value" énergétique 17'614 - 20'988 = (-) 3'374 kJ/kg

Il y a donc eu SUBSTITUTION ENERGIE — INFORMATION

RECAPITULATION DE L'ENERGIE OPERATOIRE

Sa décomposition est la suivante :

1. Energie spécifique (limite théorique)	210 + 46 = 256 kJ/kg copeaux
2. Production unitaire coupe	= 480 kJ/kg c.
cycle de production	= 1'280 kJ/kg c.
3. Production série :	= 1'900 kJ/kg c.
4. En complément part capitalisée	= 620 kJ/kg c.

POTENTIEL D'ECONOMIE ENERGETIQUE

Rendement global de l'ensemble de l'opération pour une production en série moyenne

$$\eta_{p \text{ industr.}} = 7,2 \%$$

Pour calculer nos estimations de potentiel d'économie énergétique en électricité finale, nous nous baserons sur la consommation électrique :

$$W_{sp. \text{ de coupe}} \hat{=} 256 \text{ kJ/kg c.}$$

$$\text{Efficacité de coupe} : 0,82$$

$$W_{sp. \text{ consommée pendant le cycle de production}} : 1'900 \text{ kJ/kg c.}$$

$$\text{Rendement en énergie f.} \frac{256 \cdot 0,82}{1'900} = 11 \%$$

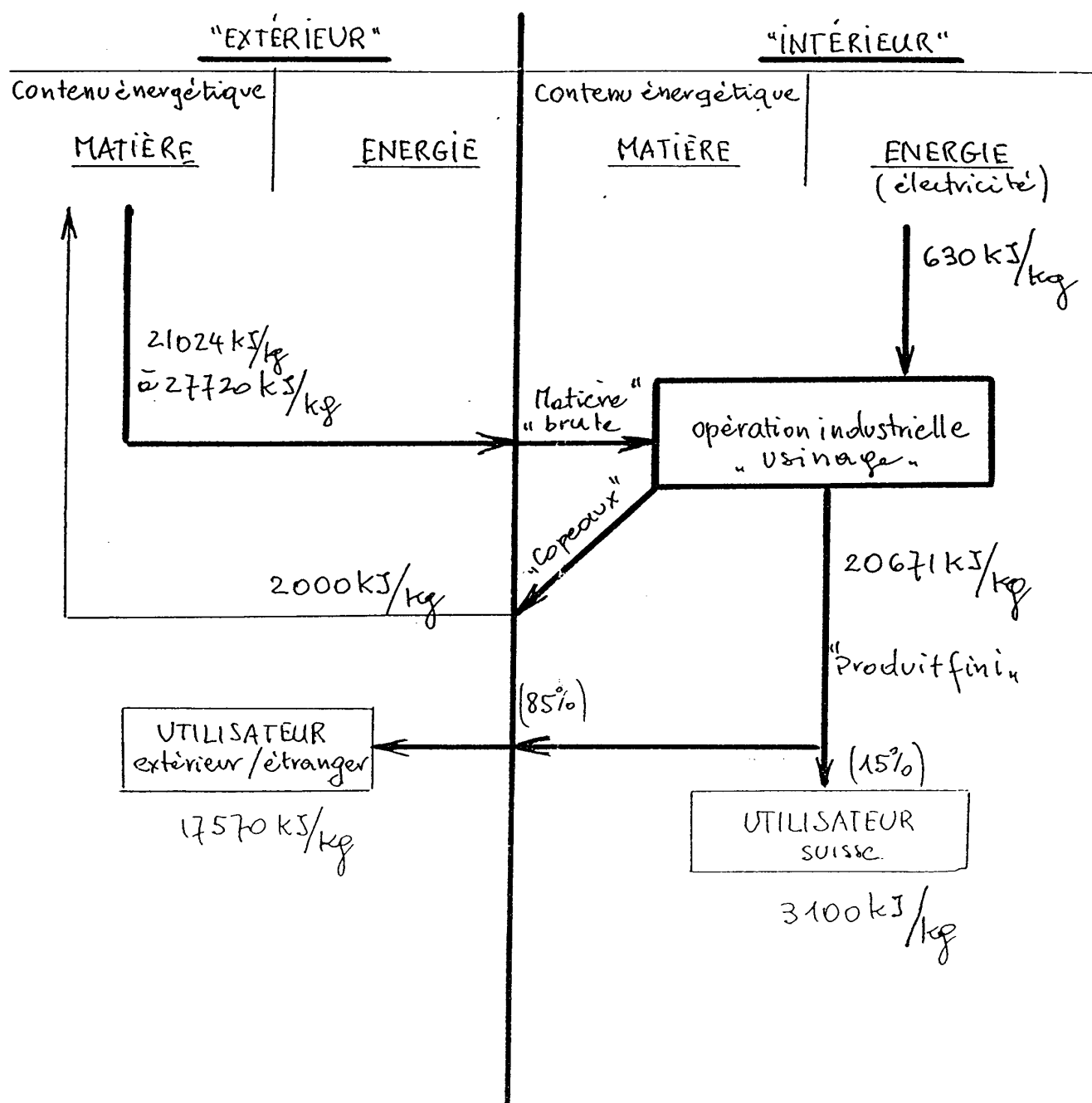
En valeur absolue cela représente 467 TJ d'énergie utile minimale.

$$\text{Economie potentielle MAXIMALE} : 4'328 - 476 = 3'852 \text{ TJ}$$

Se répartissant à raison de :

$$615 \text{ TJ} \hat{=} 170 \text{ GWh}_f \text{ OUTIL DE COUPE et BROCHE}$$

$$\text{et } 3'237 \text{ TJ} \hat{=} 899 \text{ GWh}_f \text{ GESTION de la production}$$



ESTIMATION DES GAINS POSSIBLES

1. Réduction du flux de pièces (JIT), effet sur consommation totale :	(-) 866 TJ
2. Gain "Outil et Broche"	20%
3. Gain "Gammes et cycle machine"	35%
4. Gain "production série, gestion"	40%

L'économie réelle devient $1'953 \text{ TJ} \hat{=} 542,5 \text{ GWh}_f$

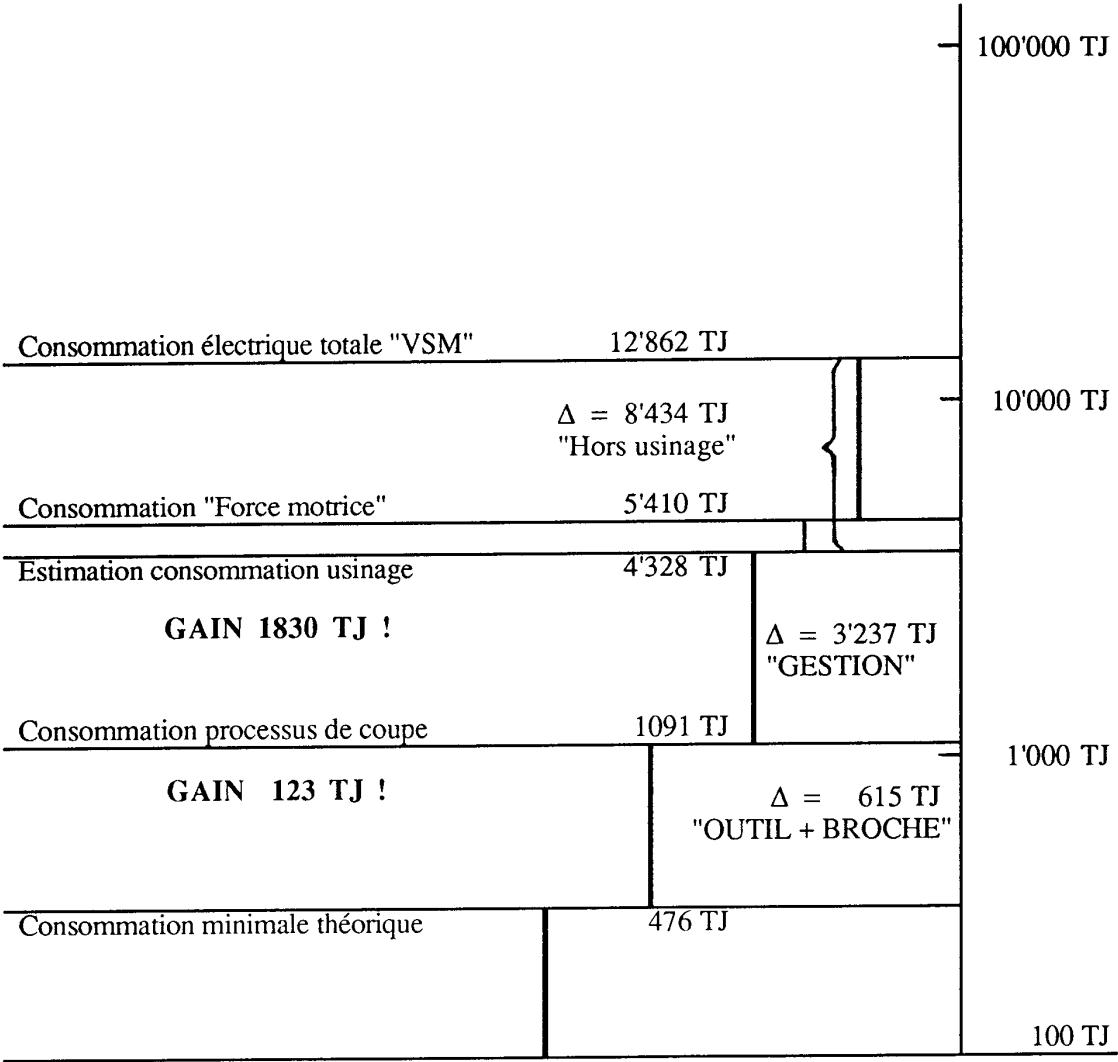
Le "stimulant" financier équivalent est de :

$$0,12 \text{ Frs/kWh} \cdot 542,5 \cdot 10^6 \text{ kWh} = \underline{65,1 \cdot 10^6 \text{ Frs/an}}$$

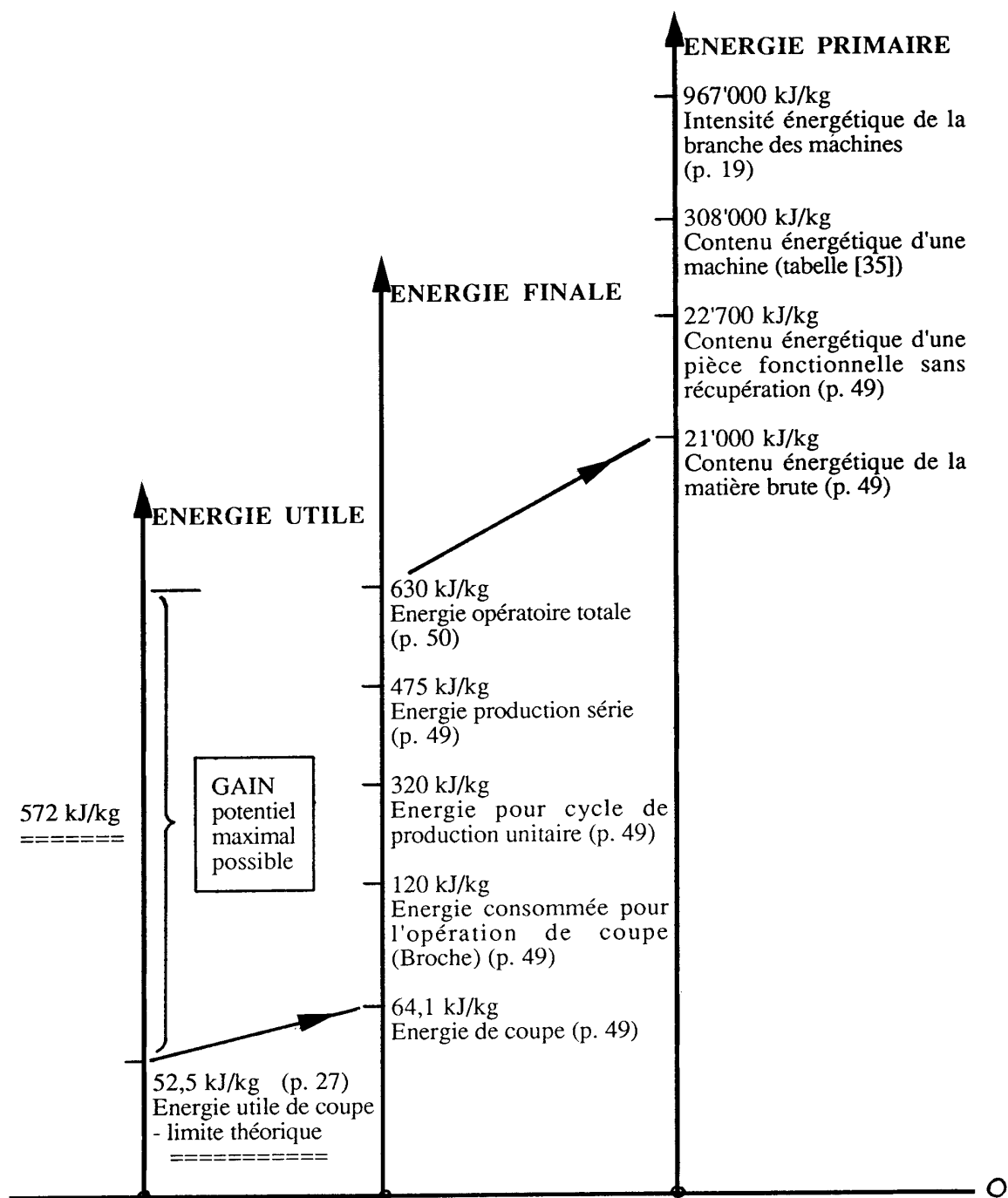
ou un budget d'investissement si l'on admet un amortissement sur 2,5 ans de :

$$\underline{152,5 \cdot 10^6 \text{ Frs.}}$$

ECHELLE DE REPARTITION DE LA CONSOMMATION D'ENERGIE
ELECTRIQUE FINALE



ECHELLE DES ENERGIES SPECIFIQUES POUR CHAQUE ETAPE DU PROCESSUS DE FABRICATION MECANIQUE



E. CONCLUSIONS

VALEURS ECONOMIQUES:

1) - Coût énergétique électrique USINAGE:

$$4328 \text{ TJ} \hat{=} 1,2 \cdot 10^9 \text{ kWh à } 0,12 \text{ Fr/kWh} = \underline{144 \cdot 10^6 \text{.- Frs}}$$

- Chiffre d'affaire ou coût USINAGE (estimé, page 3) : $5,5 \cdot 10^9 \text{.- Frs}$

$$\text{- Rapport } \frac{\text{coût électricité usinage}}{\text{coût usinage}} = \frac{144 \cdot 10^6}{5500 \cdot 10^6} = 0,0262 \hat{=} \underline{2,62 \%}$$

2) - Coût énergétique "électricité" de la branche (VSM) :

$$12862 \text{ TJ} \hat{=} 3,57 \text{ TJ} \hat{=} 3,57 \cdot 10^9 \text{ kWh à } 0,12 \text{ Fr/kwh} = \underline{428,4 \cdot 10^6 \text{.- Frs}}$$

- Chiffre d'affaire de la branche (VSM) : $43,6 \cdot 10^9 \text{.- Frs}$

$$\text{- Rapport } \frac{\text{coût électricité total}}{\text{ch. d'affaire "branche"}} = \frac{428,4 \cdot 10^6}{43600 \cdot 10^6} = 0,0098 \hat{=} \underline{0,98 \%}$$

QUANTIFICATION DES ECONOMIES:

1) Conception (Broche + technique de coupe) = 123 TJ

2) Gestion usinage = 1'830 TJ

REFLEXIONS:

Comme nous l'avons mentionné en page 12, dans le système économique actuel, les considérations énergétiques ne peuvent être une motivation suffisante d'utilisation rationnelle de l'électricité, même si en chiffre absolu cela représente des coûts d'environ 144 millions Frs pour l'usinage et 428 millions Frs pour l'ensemble de la branche, mais seulement 2,62 % et 0,98 % en valeur relative.

Cependant, les contraintes des coûts de production sont inéluctables et conduiront comme ils l'ont déjà fait jusqu'à présent, à une réduction des temps d'usinage et de stockage, etc. et par là même à une économie d'énergie électrique.

Les effets les plus importants d'utilisation rationnelle de l'électricité se feront dans la partie II "gestion" de la production. Cette partie comprend la mise en place d'ateliers flexibles, la

conception de machines avec des fonctions complémentaires (page 3), l'ordonnancement selon les méthodes (JIT, MPR-2, etc.), ainsi que le travail en 2 équipes ou robotisé (probablement que la 3ème équipe ne sera pas nécessaire).

Il est évident que ces transformations de structures vont se faire sur 10 ou 15 ans parce qu'il faut tenir compte des moyens en place et aussi de la nouvelle situation économique-sociale (transfert et suppression de places de travail) que cela entraînera et qu'il faut solutionner en parallèle.

Le secteur secondaire, générateur de richesse par excellence, sera conduit inexorablement dans cette restructuration et l'utilisation rationnelle de l'électricité en sera un sous-produit.

I. INTRODUCTION

1, ENCHAINEMENT DES OPERATIONS INDUSTRIELLES [6]

L'industrie est l'ensemble des activités humaines qui partent de l'exploitation des ressources naturelles, passent par leurs transformations en divers matériaux, matières consommables et objets manufacturés, et aboutissent à la satisfaction des besoins matériels de l'humanité.

Rappelons d'abord que l'exploitation des ressources naturelles est le fait des industries minières et de l'agriculture. Ces dernières produisent des matières premières de base, et des matières énergétiques, soit minérales (minerais de métaux et métalloïdes, uranium) soit organiques (pétrole, charbon, bois, glucides, protides, lipides, etc.).

Les industries chimiques et parachimiques (incluant les industries agricoles) ont pour objectif de fabriquer à partir de ces matières de base, toute une variété de matières plus élaborées qui seront ensuite utilisées par les industries mécaniques, électriques, électroniques, textiles, alimentaires, médiatiques, etc. pour fabriquer des objets manufacturés.

Ces objets seront alors repris par les industries de service, qui en assurent le transport, la distribution et l'entretien, jusqu'à leur utilisation même par les clients.

Dans le long enchaînement d'étapes de transformations de la matière, il est toujours possible d'isoler par la pensée une "opération industrielle", c'est-à-dire un système ouvert, avec des flux d'entrée, provenant des opérations placées en amont et des flux de sortie vers les opérations en aval.

La Figure 1 représente le schéma de l'opération industrielle de la fabrication mécanique par enlèvement de matière.

1.1 Produits fonctionnels

Dans cet enchaînement, chaque opération industrielle a pour objectif de fabriquer des produits que nous qualifions de "fonctionnels", car ils sont définis par la fonction même à laquelle ils sont destinés.

Il en sort aussi des "sous-produits" dont une partie est rejetée dans l'environnement (déchets matériels, énergie dégagée, etc.) et dont le complément est réutilisé, soit dans le système lui-même, soit dans un autre système.

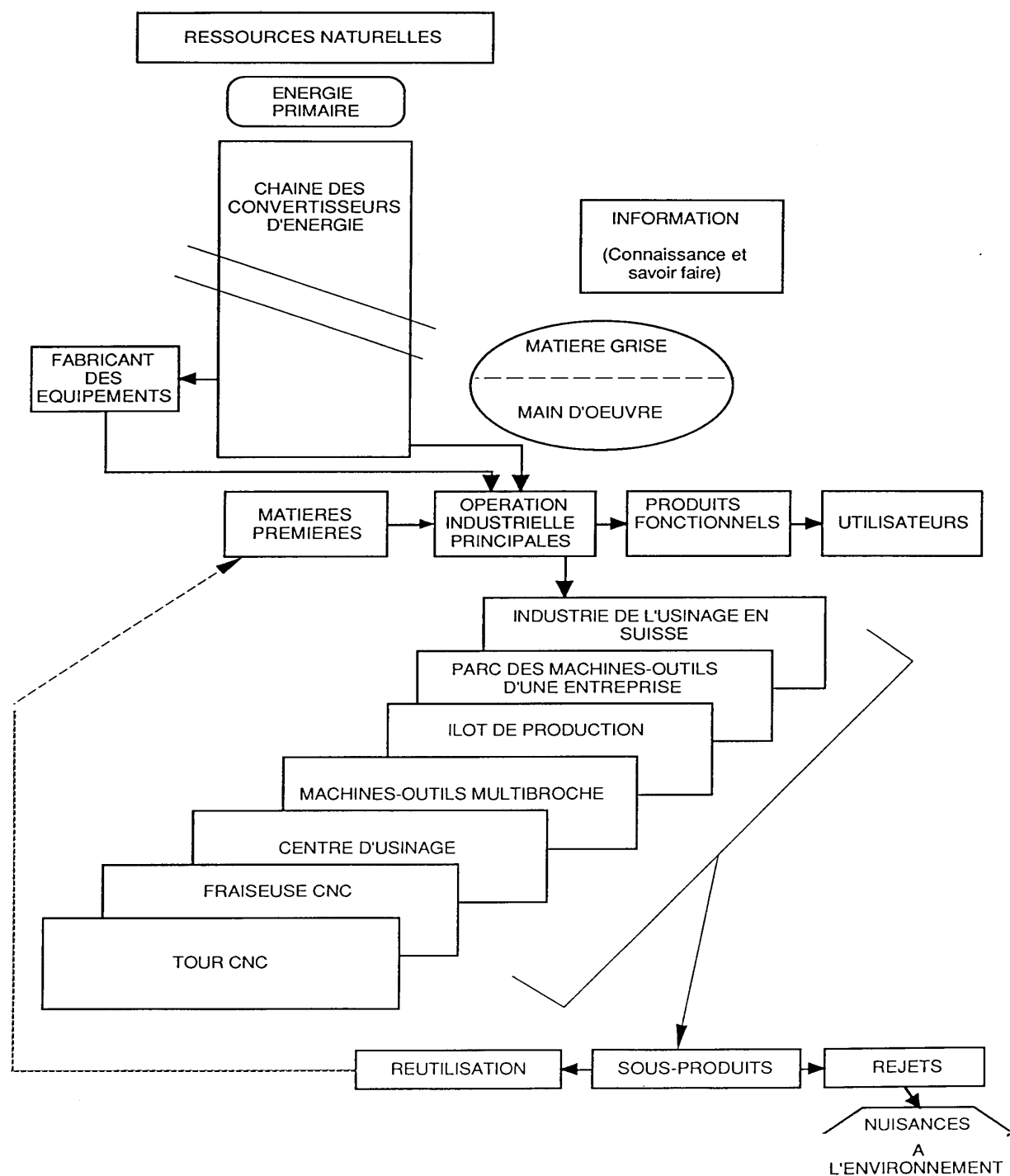


Figure 1

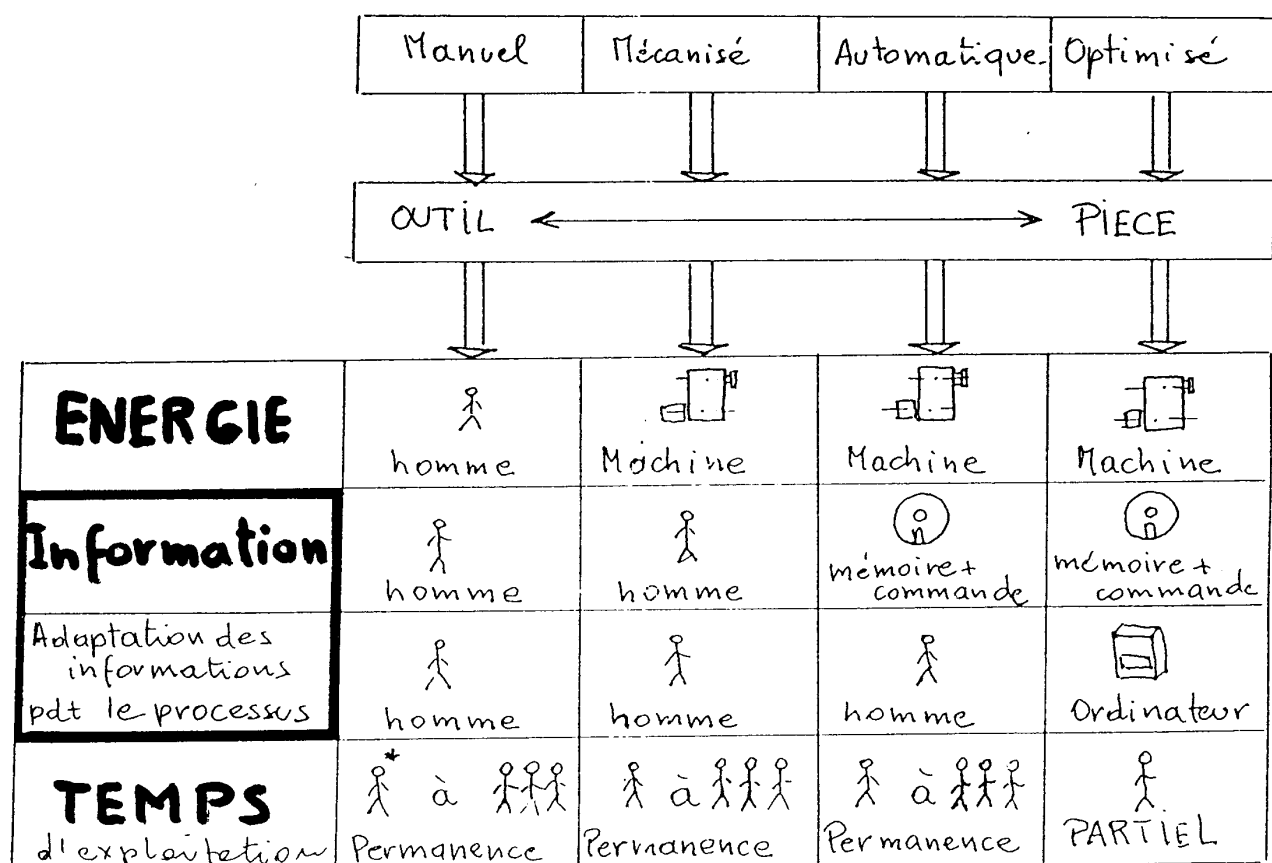
1.2 Machines-outils

Dans les opérations industrielles de façonnage des métaux, nous nous intéressons aux processus de production mécanique par enlèvement de matière et particulièrement à l'arrachement de "copeaux" sur les machines-outils conventionnelles.

Aujourd'hui le façonnage des métaux par enlèvement de matière est un segment important de notre industrie. Il y a environ 50'000 machines-outils affectées à ce travail en Suisse. Ces machines représentent un chiffre d'affaire de l'ordre de 5,5 milliards de Frs. En comparaison, l'Angleterre dispose d'environ 850'000 machines-outils effectuant un chiffre d'affaire de 25 milliards de £. D'autres statistiques permettent de dire qu'environ 20 % des métaux produits sont transformés en "copeaux", et que, de plus, ceux-ci sont produits en majorité sur des machines-outils conventionnelles. [26, 27]

- Futurdesmachines.Machinesdufutur.[15]

Les machines-outils du passé avaient pour fonction essentielle de remplacer une partie du travail manuel, tout en étant manoeuvrées par un opérateur. Celui-ci effectuait tous les travaux de pose, usinage, changement d'outil, etc. La machine était conçue pour effectuer un type d'usinage donné. Ainsi ont été développés les tours, les fraiseuses, perceuses et autres pointeuses et rectifieuses. [Fig. 2]



* équipe opérateur

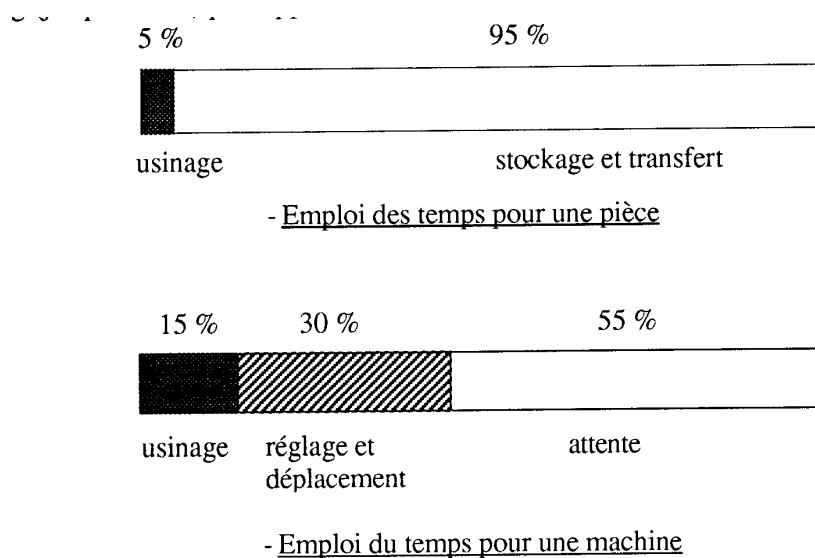
Figure 2

“La distinction entre les machines était d’abord dictée par l’usinage qu’elles devaient pouvoir réaliser; le type de pièces n’intervenait qu’au travers de leurs dimensions qui déterminaient les courses demandées à la machine. La pièce était transportée de machine en machine en fonction des opérations qu’elle devait subir. Depuis TAYLOR, les machines de même fonction sont regroupées en sections ou ateliers; ateliers de perçage, de pointage, de fraisage, de tournage, d’alésage, de rectification, etc. Les pièces à usiner passent alors successivement dans toutes les sections nécessaires selon un ordre établi par le Service des méthodes. Ainsi, lorsqu’une pièce quittait une section, elle entrait, pour un temps qui pouvait être assez long, dans un magasin dont elle ne sortait que pour être prise en charge par une autre section. Dans ces conditions, il n’est pas rare qu’une pièce devant subir 43 opérations reste en production pendant 43 semaines, l’ordonnancement prévoyant une opération par semaine.

On imagine aisément que le prix de la pièce finie n’a plus grand chose à voir avec les prix de la matière et de l’usinage et que même des marges confortables couvrent difficilement ces gigantesques coûts improductifs que sont les stockages et manutentions ainsi que les réfections et retouches que rendent obligatoires des temps de stockage aussi longs et des manipulations si fréquentes.”

Certaines statistiques sur la production des pièces mécaniques ont mis en lumière les deux résultats suivants [11]

d’une part, 75 % des pièces sont fabriquées à moins de 50 exemplaires et, d’autre part, le séjour d’une pièce dans un atelier est composé d’un temps d’attente et de manutention très long ‘us u’à 95 % ar ra ort à un faible temps passé sur les machines.



de plus, l’emploi du temps de la machine pour l’usinage n’est que de 15 %, le complément se répartit entre les réglages, les déplacements et les attentes.

“Il devrait en être évidemment tout autrement aujourd’hui. L’augmentation de productivité est rendue indispensable par la concurrence, qui exige de produire aux prix les plus bas, mais aussi par l’augmentation du coût des machines. Il est facilement démontrable que la rentabilité d’une machine moderne, chère, impose une division par un facteur d’au moins dix (10) des temps de production - productif,, et improductifs - par rapport au passé. Il est important de se rappeler ce chiffre afin de comparer aussi son effet sur la consommation énergétique.

On voit aisément que malgré le développement des outils et des techniques, ce temps ne peut pas être gagné sur l’usinage seul. Cela impose un changement radical à la fois dans la conception des machines, dans l’organisation des ateliers et jusqu’au dessin même des pièces à fabriquer. Signalons que ce changement a été fait depuis longtemps dans les entreprises faisant des produits de grande série, comme la fabrication en chaîne.

Si les machines d'aujourd'hui sont encore principalement conçues en fonction de l'opération à effectuer, il n'en ira certainement pas de même pour les machines de demain. Comme nous l'avons déjà mentionné, les impératifs de productivité exigent de réduire toujours plus les temps improductifs. Pour cela, les machines doivent être capables d'effectuer diverses opérations de tournage, fraisage, perçage, sans déplacer la pièce. Les ateliers de type moderne, destinés à la petite et moyenne série, sont de plus en plus organisés suivant le principe de la technologie de groupe. Dans une telle organisation, les machines sont regroupées non par type, en section, mais en groupement de machines nécessaires à l'usinage d'un type de pièces (atelier flexible!). Ainsi une pièce sera complètement usinée dans un atelier, évitant à la fois les temps morts et les stockages divers, mais aussi les nombreuses retouches et loupés qui viennent du fait que, dans les ateliers de type ancien, une section ignore ce que fait l'autre. Cela conduisait notamment à l'exigence, à chaque stade de la fabrication, du respect absolu des tolérances et donc à un énorme développement du contrôle, aucune compensation ne pouvant se faire d'une section à l'autre.

Dans un atelier moderne, le groupe de fabrication des carters, par exemple, sera composé de fraiseuses, de machines à percer, de machines à aléser; celui des arbres réunira des tours, des machines à tailler, à rectifier, des équipements de traitements thermiques, etc.

On voit donc que la tendance moderne d'organisation des ateliers de fabrication en petite série, et même de production unitaire, est de faire ressembler de plus en plus ces ateliers à ceux qu'on utilise depuis le début du siècle pour la production en grande série. Mais bien évidemment, le problème est fort différent : il ne s'agit plus de faire produire à un atelier une pièce unique mais une grande variété de pièces de même famille MORPHOLOGIQUE.

(Nous avons déjà observé ce type d'organisation lors d'un mandat industriel au JAPON en 1982.)

Le cahier des charges d'une machine multifonction flexible n'est évidemment pas dicté par l'opération à effectuer, mais par la gamme de pièces à réaliser. L'examen des pièces réalisées en mécanique montre qu'il est relativement aisé de les classer selon leur morphologie, en diverses familles, finalement peu nombreuses :

- * les pièces de révolution (3 familles)
- * la famille morphologique des "carters"
- * la famille morphologique des éléments structurels.

Il devient dès lors évident que l'on se dirige vers la définition de "5" types de machines, chacun conçu pour réaliser les pièces d'une famille. Ce sont les centres de tournage, avec possibilité de fraisage et reprise pour pièces courtes, avec possibilité de traitement thermique et finition pour pièces longues; ensuite nous trouverons les machines à tailler avec capacité de traitement thermique et finition; la famille des carters sera usinée sur des centres d'usinage permettant les opérations de tournage, fonctionnellement proches de ce que nous trouvons déjà aujourd'hui, puis enfin les machines à réaliser les bancs et bâtis, avec traitement thermique incorporé et usinage de finition.

- De l'ébauche à la finition - Le fait de pouvoir effectuer des usinages de types divers sur la même machine donne évidemment l'idée de réaliser l'ensemble des opérations, de l'ébauche à la finition, en un SEUL passage et sur la même machine." [15]

1.3 L'usinage

La transformation d'une pièce brute, de matériau défini, en une pièce fonctionnelle de formes géométriques, de dimensions et d'états de surface spécifiées est l'objectif de l'usinage. [Fig. 3]

Les opérants d'un système d'usinage constituent un flux d'information, d'énergie et de matériau. [Fig. 4]

La productivité (P) d'un système d'usinage est définie par le maximum de "Pièces fonctionnelles" (F#max) produites avec le minimum de moyens (Amin) dans le temps le plus petit.

$$P_{\max} = \frac{F_{\max}}{A_{\min} \cdot t_{\min}} \left(\frac{\text{Nbre}}{F_{rs} \cdot h} \right)$$

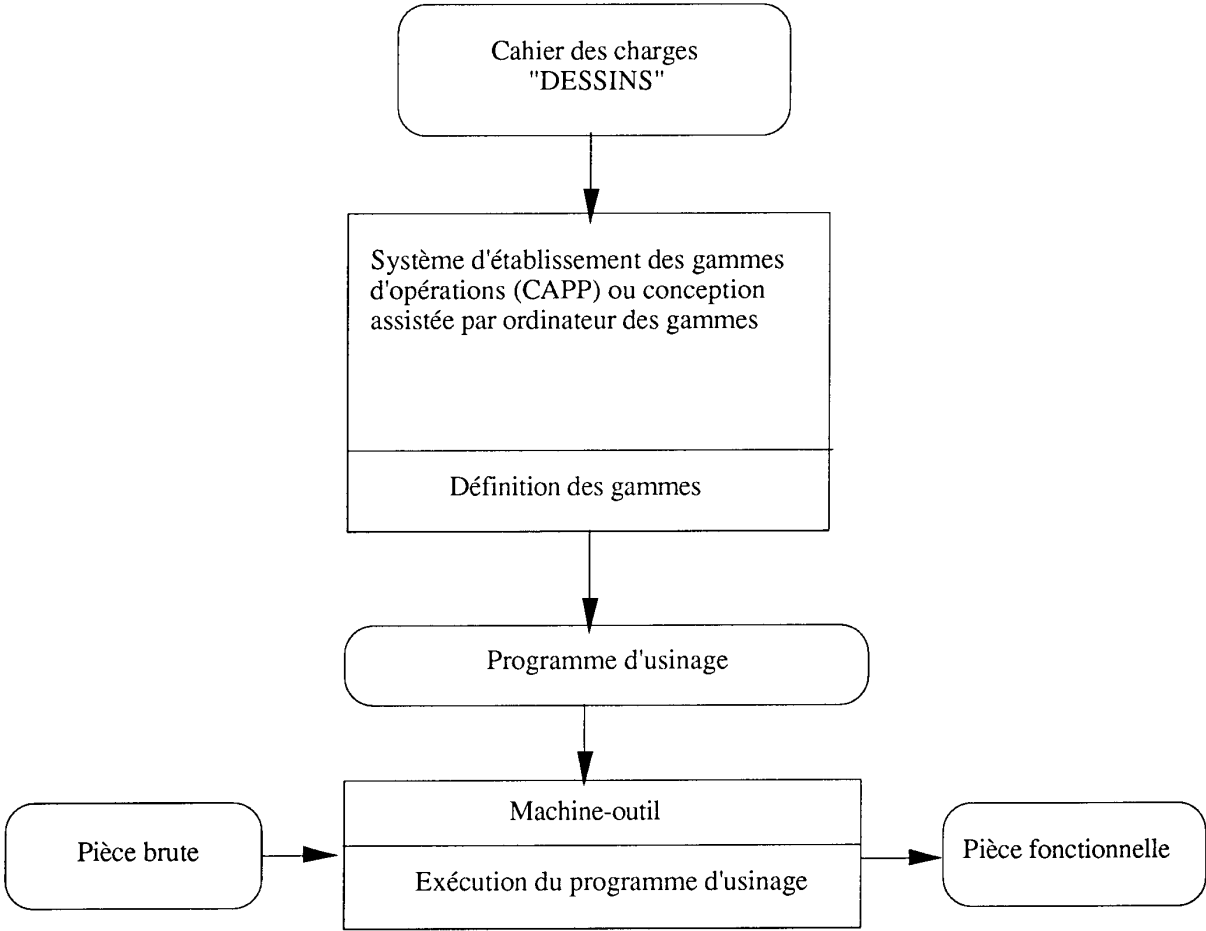


Figure 3

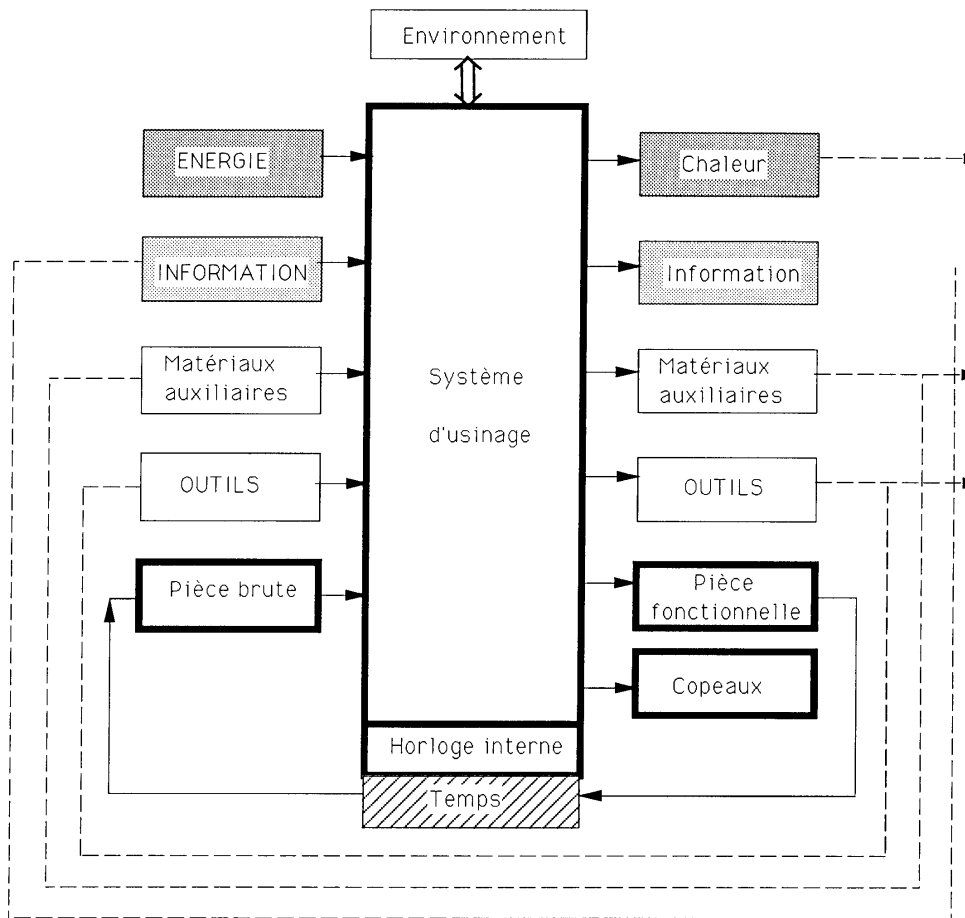


Figure 4

Les concepts présentés ci-après sont relativement peu familiers.

Le premier admet que toute fabrication peut être considérée comme une concentration d'informations, dans le produit fonctionnel exécuté. Le second concept considère que le système économique partage avec les systèmes vivants la caractéristique d'une structure dissipative.

Les "INFORMATIONS" en question sont de deux types. Le premier type est l'information contenue dans le matériau. C'est une fonction de sa composition chimique et de son état physique; c'est l'information "METABOLIQUE". Le second type est lui aussi contenu dans le matériau par ses formes et ses états de surface; c'est l'information "MORPHOLOGIQUE":

2.1 Valeurs économiques

La fabrication peut être ainsi considérée comme le processus de conversion de deux types distincts d'informations par les activités suivantes :

- 1) Les activités "METABOLIQUES" (processus métallurgique)
- 2) Les activités "MORPHOLOGIQUES" (configuration, formes et état de surface)

La "valeur ajoutée" (V) de fabrication se subdivise en deux composantes :

$$V_{\text{fabr.}} = V_{\text{métab.}} + V_{\text{morph.}} = P_{\text{métab.}} \cdot H_{\text{métab.}} + P_{\text{morph.}} \cdot H_{\text{morph.}}$$

avec P = valeur d'un "bit" d'information

H = quantité d'information contenue

Pour fixer les ordres de grandeur, considérons les 10 principaux secteurs d'activités économiques. Ils conduisent aux chiffres suivants :

- Activités METABOLIQUES :	(USA 1980)
Valeur ajoutée	\$ 141 · 10 ⁹
Energie consommée	12,1 · 10 ¹⁵ BTU $\hat{=}$ 12,76 · 10 ¹⁸ Joules
- Activités MORPHOLOGIQUES :	(USA 1980)
Valeur ajoutée	\$ 258 · 10 ⁹
Energie consommée	2,87 · 10 ¹⁵ BTU $\hat{=}$ 3,03 · 10 ¹⁸ Joules
d'où il ressort que :	$V_{\text{métab.}} < V_{\text{morph.}}$
et	$P_{\text{métab.}} \cdot H_{\text{métab.}} < P_{\text{morph.}} \cdot H_{\text{morph.}}$

De plus, il peut être démontré que dans le système économique actuel le rapport entre la quantité d'informations métaboliques et morphologiques est de l'ordre de 1020.

9
Ainsi sur le secteur de "fabrication" on peut généralement prétendre que :

$$H_{\text{morph.}} \ll H_{\text{métab.}}$$

et en fonction de l'expression précédente on peut déduire que :

$$\underline{P_{\text{morph.}} \gg P_{\text{métab.}}}$$

Les ordres de grandeur sont :

$$P_{\text{métab.}} \cong 3,3 \cdot 10^{-29} \text{ \$/bit}$$

$$P_{\text{morph.}} \cong 3 \cdot 10^{-9} \text{ \$/bit}$$

Cela veut dire qu'il coûte environ 10²⁰ fois plus pour faire contenir un "bit" d'information morphologique dans un processus de fabrication qu'il n'en coûte dans un procédé métabolique.

De cette inéquation découle une règle importante concernant la conception et la fabrication :

- La stratégie optimum de conception et de fabrication doit conduire à diminuer la quantité d'informations morphologiques (configuration, forme et état de surface) nécessaire pour accomplir une fonction spécifiée.

Ceci peut être fait, par exemple, par modification de la configuration qui permet de simplifier les exigences d'assemblage; ou exprimé inversement, l'augmentation des performances par une stricte manipulation de configuration, de forme, etc. va conduire vite à un coût excessif.

2.1.1 Principe du minimum d'information morphologique

De la connaissance de la stratégie précédente quatre règles peuvent être émises

- 1) Le matériau doit être choisi de manière à simplifier la conception, en particulier à minimiser les configurations, les façonnages et les opérations d'assemblage.
- 2) Réaliser des matériaux faciles à façonner et à former.
- 3) La recherche de fabrication doit être focalisée sur les solutions permettant d'augmenter globalement l'efficacité de configurer, de façonner - former et d'assembler.
- 4) La recherche de conception doit identifier les solutions contenant un minimum d'informations morphologiques, par exemple: nombre de pièces minimales.

2.2 Valeurs énergétiques

Nous pouvons déduire des indications précédentes que l'énergie consommée par unité monétaire est nettement plus importante dans les activités METABOLIQUES que dans les activités MORPHOLOGIQUES.

Prenons comme exemple la préparation de l'acier:

- Le contenu énergétique de la matière brute (page 19) (essentiellement métabolique) est d'environ 7,7 kWh/kg
- Nous verrons plus loin que l'énergie spécifique de coupe dans le processus de fabrication par enlèvement de copeaux (façonnage - formage et état de surface / exclusivement morphologique) est d'environ

$$2 \text{ Joules/mm}^3 \text{ copeaux} \hat{=} 256 \text{ kJ/kg copeaux} \hat{=} 71,2 \text{ Wh/kg copeaux} \quad (\text{page 15})$$

Essayons de déterminer, pour le processus de fabrication considéré, le rapport de ces deux consommations d'énergie [voir Méthodologie, Résumé et Présentation].

- Nous admettons que les surépaisseurs d'usinage optimales correspondent à 1 % des longueurs considérées et cela en mm et sur chaque face ! La variation minimale d'un volume cylindrique est:

$$\begin{aligned} \frac{\text{Vol} - (\text{Vol} - \Delta \text{Vol})}{\text{Vol}} &= \frac{\Delta \text{Vol}}{\text{Vol}} = \frac{\frac{\pi D^2}{4} L - \frac{\pi (D - 0.02 D)^2}{4} (L - 0.02 L)}{\frac{\pi D^2}{4} L} = \\ &= \frac{\frac{\pi D^2}{4} L - \frac{\pi D^2}{4} L (1 - 0.02)^2 (1 - 0.02)}{\frac{\pi D^2}{4} L} = 1 - (1 - 0.002)^3 \hat{=} 0.06 \hat{=} 6\% \end{aligned}$$

Cette valeur correspond à un minimum qui en pratique peut valoir probablement jusqu'à 50 %. En fonction des indications de statistique globale nous considérerons une valeur moyenne de 20 %

Rapportons maintenant la valeur de l'énergie spécifique de coupe au poids de la pièce fonctionnelle; cela donne:

$$\text{Minimum : } \frac{71.2 \cdot 6}{94} = 8,75 \text{ Wh/kg} \hat{=} 31,5 \text{ kJ/kg}$$

$$\text{Pratiquement : } \frac{71.2 \cdot 20}{80} = 17,8 \text{ Wh/kg} \hat{=} 64,1 \text{ kJ/kg}$$

qui doivent être ramenés à l'énergie primaire, soit:

$$\frac{64.1}{0.52} = 123,3 \text{ kJ/kg} \hat{=} 34,3 \text{ Wh/kg} \quad (\text{page 14})$$

Le rapport entre les deux types d'énergie devient :

$$\frac{\text{Energie morphologique minimale}}{\text{Energie métabolique}} = \frac{34.3}{7700} = 0,0045 \hat{=} 0,45\%$$

Si l'énergie métabolique provient de la récupération des copeaux, alors le rapport devient :

$$\frac{\text{Energie morphologique minimale}}{\text{Energie métabolique "récupération"}} = \frac{34.3}{3960} = 0,0087 \hat{=} 0,87 \%$$

- Faisons les mêmes rapports en tenant compte de l'énergie effectivement consommée pendant le processus d'usinage; c'est à dire l'énergie opératoire globale (page 50)

$$1701 \text{ kJ/kg} \hat{=} 472,5 \text{ Wh/kg}$$

Les rapports sont alors :

$$\frac{\text{Energie morphologique opératoire}}{\text{Energie métabolique}} = \frac{472.5}{7700} = 0,061 \hat{=} 6,1 \%$$

$$\frac{\text{Energie morphologique opératoire}}{\text{Energie métabolique "récup."}} = \frac{472.5}{3960} = 0,12 \hat{=} 12 \% \quad (\text{page 13})$$

- A titre indicatif estimons la consommation pour un traitement thermique :

Prenons l'acier dont la chaleur spécifique est de 0,46 kJ/kg K et une variation de température de 850° :

$$W_{th \text{ sp}} = 0,46 \cdot 850 = 391 \text{ kJ/kg} \hat{=} 108,6 \text{ Wh/kg}$$

Si le chauffage a lieu à l'électricité, alors l'expression de la consommation en énergie primaire est de

$$W_{th \text{ sp}} = \frac{391}{0.52} = 752 \text{ kJ/kg} \hat{=} 208,9 \text{ Wh/kg}$$

donc d'un ordre de grandeur (théorique) d'environ 6 fois la valeur de l'énergie spécifique de coupe rapportée au poids de la pièce fonctionnelle.

Par rapport au contenu énergétique (métabolique) de la matière brute, cette énergie représente :

$$\frac{W_{th \text{ sp}}}{\text{Energie metab.}} = \frac{208.9}{7700} = 0,0271 \hat{=} 2,71 \%$$

$$\frac{W_{th \text{ sp}}}{\text{Energie metab. "récup."}} = \frac{208.9}{3960} = 0,0528 \hat{=} 5,28 \%$$

2.2.1 Consommation énergétique de la fabrication mécanique en Suisse [27]

Le VSM (Société Suisse des Constructeurs de machines) indique que la consommation énergétique (énergie électrique finale) pour les "Forces motrices" uniquement est de 5410 TJ # 1,5 TWh. Nous admettons, faute de meilleures indications, que les 80 % de cette consommation sont utilisés directement dans le processus de conversion par usinage, soit

$$5410 \text{ TJ} \cdot 0,80 = 4328 \text{ TJ}$$

ou convertie en énergie primaire de,

$$\frac{4328}{0.52} = 8323 \text{ TJ}_{\text{pr.}} \hat{=} 2,3 \text{ TWh}_{\text{pr.}}$$

Nous pouvons calculer la valeur équivalente de la puissance installée (barrage + uranium) si l'on travaille en 1 ou 2 équipes.

$$\text{Soit 1 équipe : } \frac{2300 \text{ GWh}_{\text{pr.}}}{1728 \text{ h}} = 1,331 \text{ GW}_{\text{pr.}} \hat{=} 1331 \text{ MW}_{\text{pr.}}$$

$$2 \text{ équipes : } \frac{2300 \text{ GWh}_{\text{pr.}}}{3456} = 0,6656 \text{ W}_{\text{pr.}} \hat{=} 665 \text{ MW}_{\text{pr.}}$$

2.2.2. Considération générale

Lors d'une analyse globale du processus de "fabrication mécanique", il est évident que le point de vue énergétique morphologique seul ne peut pas motiver un changement de stratégie, puisqu'il représente entre 6 et 12 % de la consommation. Aussi, la considération économique des coûts de fabrication peut jouer le rôle "catalyseur" d'économie d'énergie. Ainsi cette exigence indirecte d'économie d'énergie a probablement toujours été prise en compte par la pression des besoins de "bons" coûts.

II. DELIMITATION DES FRONTIERES DU PROCESSUS GLOBAL DE L'OPERATION INDUSTRIELLE D'USINAGE PAR ENLEVEMENT DE COPEAUX

1. SCHEMA DE PRINCIPE DU PROCESSUS

Se référer à la Figure 1

2. LIMITES DU PROCESSUS

2.1 Matières premières [35]

Les matières premières sont définies par leur contenu énergétique et par l'impact de la récupération des copeaux sur cette valeur.

Exemples :

Acier	7.77	kWh/kg	}	$\Delta \hat{=}$ gain de récupération
Acier récupéré	3.96	kWh/kg		
Aluminium	72.70	kWh/kg	}	$\Delta \hat{=}$ gain de récupération
Aluminium réc.	20.0	kWh/kg		

etc.

2.2. Apport énergétique

2.2.1 Energie électrique

Répartition des provenances :	hydraulique	60 %
	nucléaire	40 %

Valeurs moyennes des rendements :

$\frac{\text{Energie finale}}{\text{Energie primaire}}$	→	hydraulique	80 %
		nucléaire	35 %

Le rendement mixte moyen de l'approvisionnement de l'énergie électrique finale au compteur de l'entreprise est de :

$$E_{f \text{ totale}} = E_{fH} + E_{fN} = E_{f \text{ totale}} \cdot 0.6 + E_{f \text{ totale}} \cdot 0.4 = E_{f \text{ totale}} (0.6 + 0.4)$$

$$E_{p \text{ totale}} = E_{pH} + E_{pN} = \frac{E_{f \text{ tot}} \cdot 0.6}{0.8} + \frac{E_{f \text{ tot}} \cdot 0.4}{0.35} = E_{f \text{ tot}} \left(\frac{0.6}{0.8} + \frac{0.4}{0.35} \right)$$

$$\eta_{\text{mixte}} = \frac{\text{Energie finale}}{\text{Energie primaire}} = \frac{1}{\frac{0.6}{0.8} + \frac{0.4}{0.35}} = 0.52$$

2.2.2 Equilibre des consommations

* Non seulement la consommation réelle est à minimiser mais également la puissance de pointe qui conduit au dimensionnement des installations et à des exigences difficiles de livraison.

* Le travail en 2 ou 3 équipes ou l'utilisation d'équipements robotisés conduit à diviser la puissance de pointe d'un facteur 2,3 ou plus pour une même production journalière.

2.2.3 Part énergétique pour la réalisation des équipements permettant l'exécution de l'opération industrielle d'usinage

Nous avons admis cette part comme étant 2 et 5 % de l'énergie opératoire totale. [6]

2.3 Part énergétique d'amortissement du capital des équipements immobilisés

2.3.1 Expression de la part d'amortissement

Nous la déterminons par l'expression : [6]

$$E_{a.c.i} = \frac{\text{Masse des équipements}}{\text{Durée de fonctionnement} \cdot \text{Production}} \cdot (CE_i - CE_f)$$

$$E_{a.c.i} = \frac{K_m}{N \cdot \dot{Z} \cdot \dot{P}} (CE_{ki} - CE_{kf}) \quad (\text{kWh/kg ou /h de production})$$

Elle doit être calculée de cas en cas et devrait être minimisée (page 16).

2.3.2 Choix de la puissance installée

Le choix de la puissance installée est déterminant quant au contenu énergétique de l'équipement. La détermination de la puissance de réserve est également importante.

2.3.3 Conception des machines

Aux différentes contraintes techniques et technologiques conditionnant la conception des machines devrait venir s'ajouter celle du contenu énergétique global afin de minimiser la part de l'amortissement énergétique du capital immobilisé.

2.4 Part énergétique de l'opération d'usinage par enlèvement de copeaux.

Dans cette étude, par souci de prendre en considération les éléments dominants de l'usinage, nous avons restreint notre analyse à l'acier et aux procédés d'usinage conventionnel (tournage, perçage, fraisage).

2.4.1 Définition de l'énergie de coupe

$$(\text{Energie utile}) \hat{=} \text{Energie de coupe} = W_c$$

2.4.2 Définition de l'énergie spécifique de coupe [4] [26]

$$W_{sp} = \frac{W_c}{\text{Volume copeaux}} = k_c \left[\frac{W \cdot s}{\text{cm}^3} \right] = k_c \cdot 10^{-3} \left[\frac{W \cdot s}{\text{mm}^3} \right] \hat{=} \left[\frac{J}{\text{mm}^3} \right] \hat{=} [\text{M Pa}] = k_c [\text{k Pa}]$$

$$k_c \text{ est la force spécifique de coupe en } \left[\frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \right]$$

et aussi,

$$W_{sp} = \frac{10^3}{\rho} k_c \left[\frac{W \cdot s}{\text{kg}} \right] \hat{=} \left[\frac{J}{\text{kg}} \right] = \frac{1}{3.6 \cdot \rho} k_c \left[\frac{W h}{\text{kg}} \right]$$

Exemple : acier $\cong$ 71,2 Wh/kg copeaux $\hat{=} 256 \text{ kJ/kg copeaux}$

aluminium $\cong$ 12 Wh/kg copeaux

2.4.3 Définition des rendements

$$\eta_{\text{coupe}} = \frac{\text{Energie de coupe}}{\text{Energie totale consommée pendant la durée de coupe}}$$

$$\eta_{\text{énergétique de production}} = \frac{\sum_{i=\text{opérations}} \sum_{j=\text{pièce}} \text{Energie de coupe}}{\text{Somme totale de la consommation pendant toute la durée de la production}}$$

2.4.4 Définition du coût intégral unitaire énergétique (CIUE)

Il est donné par l'expression suivante : [6]

$$\text{CIUE} = \frac{\dot{R}}{\dot{P}} (CE_m - CE_r) - (CE_p - CE_m) + \frac{Km}{N\dot{Z}\dot{P}} (CE_{ki} - CE_{kf}) \quad (\text{page 21})$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{Coût intégral} \\ \text{unitaire} \\ \text{d'énergie} \end{array} \right\} = \begin{array}{l} \text{Pertes de valeurs} \\ \text{énergétiques} \\ \text{dans les rejets} \end{array} - \begin{array}{l} \text{Gain de valeurs} \\ \text{énergétique dans} \\ \text{les produits utiles} \end{array} + \begin{array}{l} \text{Part énergétique} \\ \text{d'amortissement} \\ \text{du capital immobilisé} \end{array}$$

2.4.5 Détermination de l'énergie de coupe optimale

La force de coupe maximum que l'on peut choisir dépend des contraintes maximales admissibles que la machine-outil peut supporter et elle doit être compatible avec la qualité du travail.

Le choix de l'optimum de la gamme d'opérations pour chaque usinage complet doit être réalisé à l'aide d'un système de "bases de données" assisté d'un logiciel de définition et d'optimisation de la durée du temps de production total.

Cette notion du temps minimal ou coût minimal est compatible avec le minimum d'énergie opératoire.

2.4.6 Flux des pièces à produire

- * Le temps de "passage" ou de fabrication d'une pièce, d'un sous-ensemble et du produit doit être minimisé.
- * Tous les stocks doivent être minimisés.
- * Le temps de "changement d'outil" ou de réglage d'une pièce à l'autre doit tendre vers zéro.
- * Le lot optimal de pièces devrait être "1".

3. SITUATION DE LA BRANCHE " VSM " (INDUSTRIE SUISSE DES MACHINES , DES EQUIPEMENTS ELECTRIQUES ET DES METAUX) EN 1990 [27]

• Chiffre d'affaires estimé	43.6 · 10 ⁹ Frs
• Tonnage produit 1990	275 · 10 ³ tonnes
• Effectif des personnes employées	218'628 personnes
• Coût au kg	$\frac{43'600 \cdot 10^6}{275 \cdot 10^6} = 158 \text{ Frs/kg}$
• Consommation énergétique finale	28'008 TJ
• La répartition de l'énergie finale est probablement la suivante :	
éclairage	5.1 %
chauffage locaux	28.4 %
Force Motrice	21.9 % $\Rightarrow$ en valeur $\hat{=}$ 5'410 TJ $\hat{=}$ 1.5 TW h
Production de chaleur	42.7 %
Protection env.	1.9 %

La consommation en énergie électrique finale est pour l'ensemble de 12'862 TJ ou 3,57 TWh.

Il est à remarquer que seulement $\frac{5410 \text{ TJ}}{12'862 \text{ TJ}} = 0,42$ ou 42 % sont consommés par les "Forces motrices", essentiellement l'usinage. Une étude générale d'économie d'énergie électrique de cette industrie devrait évidemment porter aussi sur les 58 % restant.

La consommation en énergie " électrique " primaire est de :

$$\frac{12'862 \text{ TJ}}{0.52} = 24'735 \text{ TJ pour la consommation totale}$$

$$\frac{5410 \text{ TJ}}{0.52} = 10'403 \text{ TJ pour la consommation des "Forces motrices".}$$

III. ANALYSE DES OPERANTS DU PROCESSUS D'USINAGE

1 . CHAINE ENERGETIQUE AMONT

Dans une opération industrielle de transformation de matières premières en produits fonctionnels, les deux apports essentiels d'énergie sont

- l'énergie opératoire (électricité)
- le capital énergétique constitué par les machines

Le bilan énergétique est lié à l'opération industrielle considérée; cependant on peut répéter ce même bilan pour l'usine qui fabrique les machines et celle qui produit et distribue l'énergie et ainsi de suite.

Compte tenu du fait que le capital énergétique amont ne représente que 1 à 5 % de la consommation totale pour chaque opération, il est évidemment inutile de remonter au-delà du deuxième ordre dans la branche des machines. Par contre, il sera nécessaire de remonter à l'énergie primaire, dans la branche "énergie opératoire".

Mais, étant donné que les vecteurs d'énergie utilisés dans notre industrie se résument à l'électricité d'ordre hydraulique et nucléaire, il suffira de rassembler la chaîne en un seul sous-système.

Le rendement mixte moyen a été établi précédemment et il vaut

$$\frac{\text{Energie finale}}{\text{Energie primaire}} = 0,52 \hat{=} 52 \%$$

2 . MATIERE PREMIERE

Il est raisonnable d'admettre que la moitié de l'énergie mondiale consommée par année est utilisée pour faire des métaux et des matériaux. [32]

Aussi la récupération de certains sous-produits, tels que copeaux, sera énergétiquement intéressante sur le plan global d'abord, mais encore plus sur le plan national.

2. 1 Contenu énergétique [35]

Le contenu énergétique s'exprime en Joule/kg ou en KWh/kg.

<u>Métaux</u>	Kwh/kg		
Acier	7.77	}	gain de récupération : 3.81 kWh/kg
Acier récupéré	3.96		
Acier inoxydable	8.86		
Aluminium	72.70	}	gain de récupération : 52.7 kWh/kg
Aluminium réc.	20.00		
Cuivre	13.00		
Zinc	19.00		
Plomb	13.00		
Fonte	3.60		

2.2 Intensité énergétique

Elle s'exprime en Joule/Fr.

L'intensité énergétique est la quantité d'énergie associée à une unité monétaire de valeur ajoutée. Elle permet par exemple de préciser quelle est la part due à l'énergie primaire dans chaque forme de valeur ajoutée à un bien, un produit fonctionnel ou à un service.

<u>Branches</u>	<u>MJprim/Fr</u>			
Métallurgie	40	MJprim/Fr	$\hat{=}$	11.12 kW h/Fr
Machines	6	MJprim/Fr	$\hat{=}$	1.7 kW h/Fr
Horlogerie	4	MJprim/Fr	$\hat{=}$	1.1 kW h/Fr

3. OPERATION INDUSTRIELLE PRINCIPALE

(DEFINITION DES RENDEMENTS ET GRANDEURS PARTICULIERES)

3.1 Energie utile - rendement de coupe

Nous admettons par définition que pour tout le processus industriel d'usinage par enlèvement de copeaux que l'énergie utile est l'énergie de coupe.

La définition du rendement de coupe est alors :

$$\eta_{\text{coupe}} = \frac{\text{Energie de coupe}}{\text{Energie totale consommée pendant la durée de coupe}}$$

3.2 Rendement de production lors d'un cycle complet de fabrication d'une pièce

$$\eta_{\text{production unitaire}} = \frac{i = \text{opérations} \quad \sum \text{Energie de coupe}}{\text{La somme de l'énergie consommée pendant la durée du cycle}}$$

Il est évident que ce rendement est inférieur au rendement de coupe parce qu'il fait intervenir toutes les opérations auxiliaires (transferts sans usinage, changement d'outils, temps morts de la machine comme accélération, freinage...).

3.3 Rendement de production lors d'un cycle complet de fabrication pour une série de pièces

$$\eta_{\text{production série}} = \frac{i = \text{opérations} \quad \sum \text{Energie de coupe}}{\text{Somme de l'énergie consommée du début à la fin d'un cycle complet}}$$

Ce rendement est inférieur au précédent parce qu'il fait intervenir les opérations auxiliaires supplémentaires comme changement de pièces et réglages.

3.4 Rendement énergétique de production et coût intégral unitaire énergétique :

3.4.1

$$\eta_{\text{énergétique de production}} = \frac{i = \text{opérations} \quad j = \text{pièce} \quad \sum \sum \text{Energie de coupe}}{\text{Somme totale de la consommation pendant toute la durée de la production}}$$

Ce rendement est inférieur au précédent parce qu'il fait intervenir les opérations auxiliaires supplémentaires comme temps morts machine à vide, temps morts opérateurs, durée de maintenance et pannes.

Le coût intégral unitaire énergétique (CIUE) est donné par l'expression suivante : [6]

$$CIUE = \frac{\dot{R}}{\dot{P}} (CE_m - CE_r) - (CE_p - CE_m) + \frac{K_m}{N\bar{Z}\dot{P}} (CE_{ki} - CE_{kf})$$

Coût Intégral unitaire d'énergie	=	Perte de valeur énergétique dans les rejets	-	Gains de volumes énergétique dans les produits utiles	+	Part énergétique d'amortissement du capital immobilisé
--	---	---	---	---	---	--

et

$$\frac{\Delta(CEN)}{\text{variation du contenu}} = \frac{- CIUE}{\text{Coût intégral}}$$

énergétique net unitaire d'énergie

avec :

$\dot{M}, \dot{P}, \dot{R}$	=	flux annuels de matière première, produits utiles et rejets
CE_m	=	contenu énergétique spécifique des matières premières (brutes)
CE_p	=	contenu énergétique spécifique des produits utiles
CE_r	=	contenu énergétique spécifique des rejets
K_m	=	masse de la structure technique (machine-outils)
CE_{ki}, CE_{kf}	=	contenus énergétiques spécifiques de K_m initial et final
$\bar{Z}$	=	facteur tenant compte de la durée de fonctionnement de la machine
N	=	nombre d'années

4 . LES PRECEPTES D'OPTIMISATION

Ils s'énoncent comme suit :

1. Minimiser le rejet spécifique d'énergie (maximiser le rendement des machines)
2. Maximiser la valeur de l'énergie rejetée (récupération)

3. Minimiser la valeur de l'énergie d'alimentation
- 4 Maximiser la durée de vie des équipements (les rendre plus résistants à l'usure, etc)·
Minimiser le contenu énergétique des équipements

(concevoir des machines qui continuent à assumer la même fonction, tout en étant plus légères, faites de matériaux moins nobles, de conception plus évoluée, etc...

- 6 Minimiser la valeur de l'énergie utilisée dans la fabrication (exemple : électricité en heures creuses ...)
- 7 Maximiser la valeur résiduelle des équipements (les concevoir de manière à ce qu'ils soient ensuite ré-utilisables...
- 8 Maximiser, pendant la durée de disponibilité des équipements, leur taux de production·

Minimiser toutes les formes de stock

10. Minimiser les modifications dès le début de la fabrication [annexe 8]
11. Minimiser les rebus en cours de fabrication.

IV. ANALYSE DES ELEMENTS QUI INTERVIENNENT DANS LES PRECEPTES D'OPTIMALISATION

1. ENERGIE UTILE DE PRODUCTION DE COPEAUX W_c

* Dans le procédé d'arrachage de la matière, la répartition de l'énergie consommée est en général la suivante:

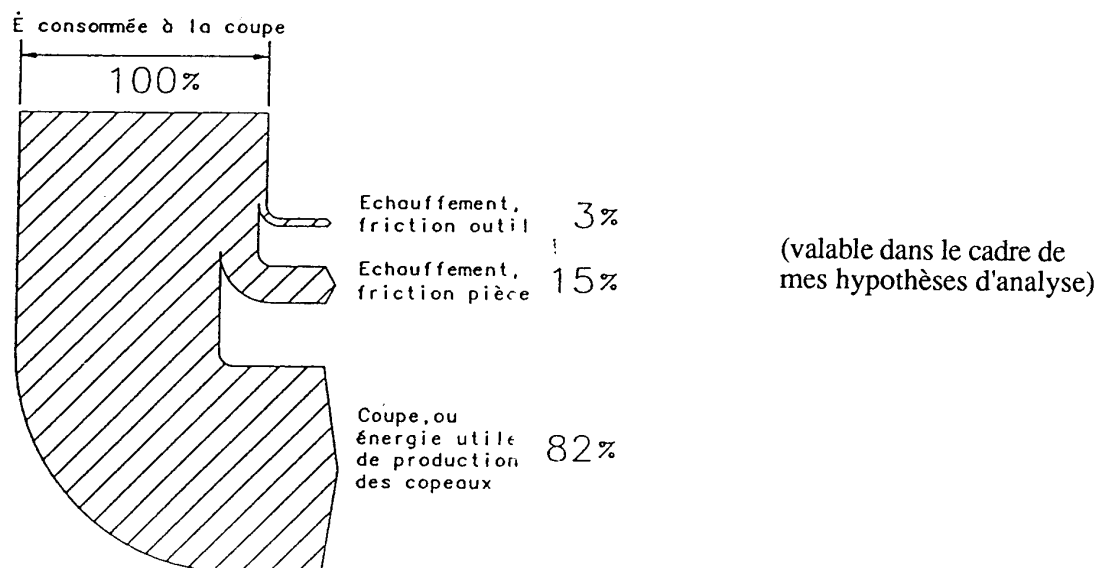


Figure 5

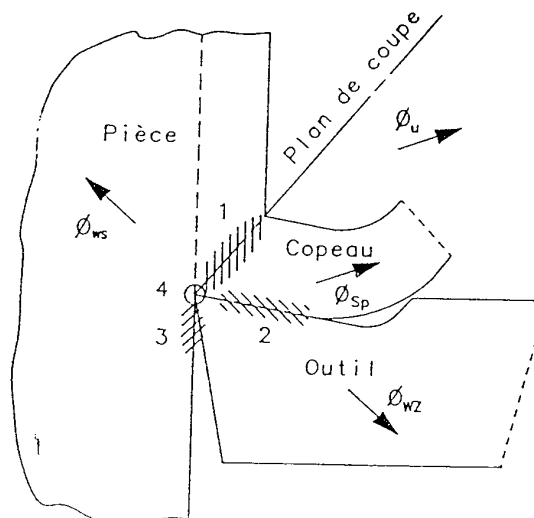


Figure 6

1. 1 Théorie de la coupe

Il est évident que pour maîtriser l'énergie de coupe il y a lieu, en tout premier, de bien comprendre le phénomène physique de la coupe. [26] [2]

Résumé :

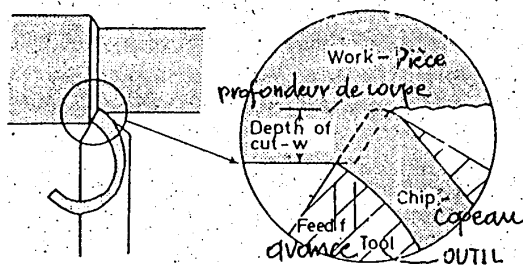
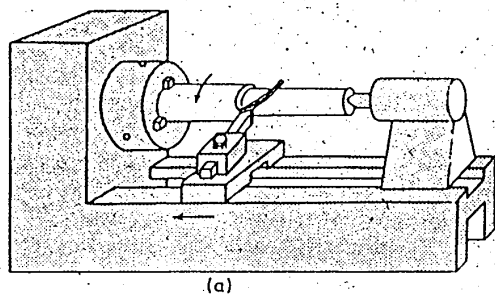


Figure 8 Tournage

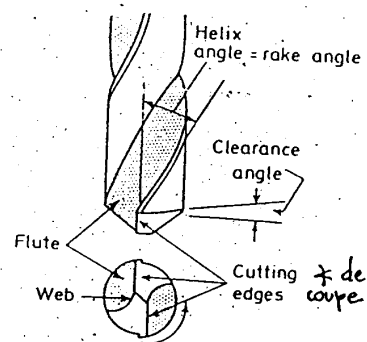


Figure 9 Perçage

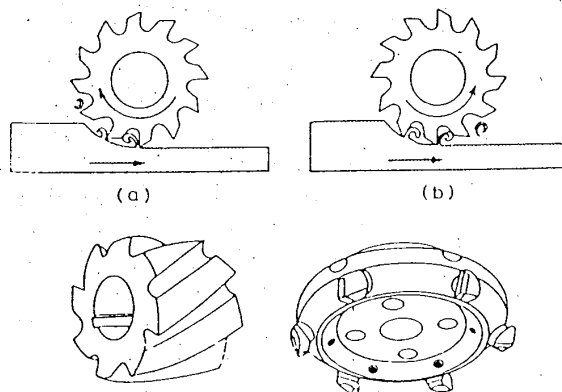


Figure 10 Fraisage

Les outils de coupe et la terminologie :

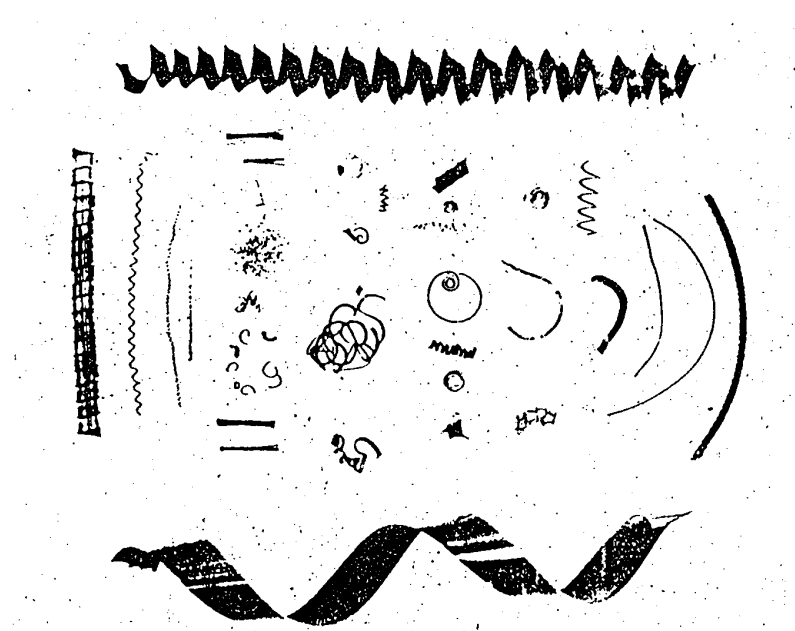


Figure 11

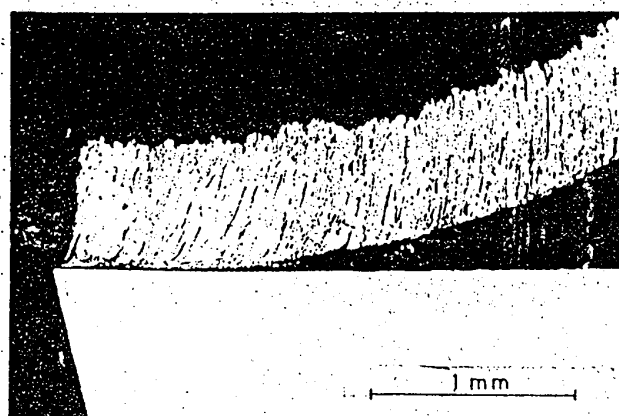


Figure 12

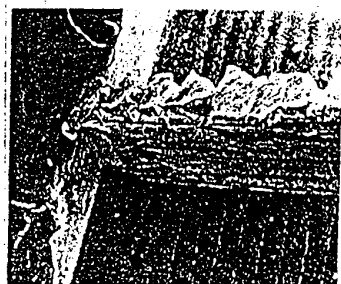
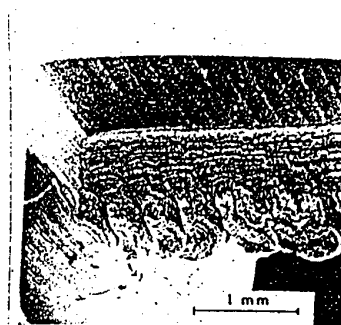


Figure 13

Caractéristique de coupe :

La vitesse de coupe se situe entre 3 et 200 m/min et peut atteindre exceptionnellement 3000 m/min. L'avance varie entre 0,0125 et 2,5 mm par révolution. La profondeur de coupe peut varier de zéro à 25 mm. Il est donc possible d'enlever un volume de matière de 80 à 160 cm³/min, exceptionnellement de 1600 cm³/min.

Géométrie de la coupe :

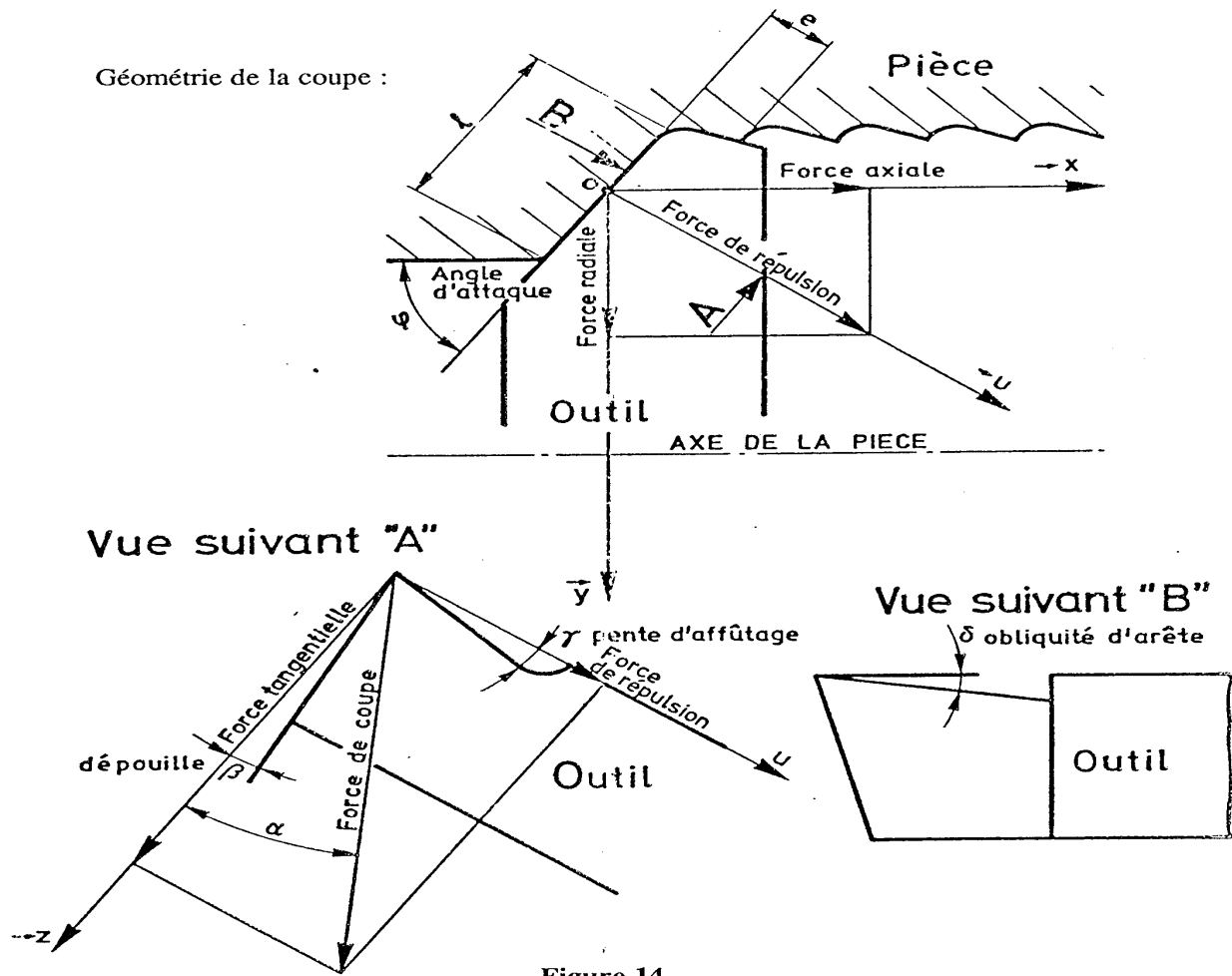


Figure 14

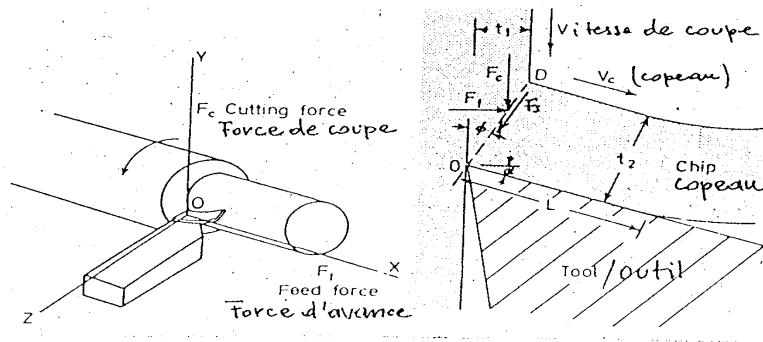


Figure 15

Evaluation de l'énergie de coupe:

La résistance spécifique de coupe est la force à exercer sur l'outil pour "couper" un copeau de 1 mm² de section. Cette résistance spécifique de coupe est à l'évidence fonction de la matière usinée et de sa dureté. Elle est aussi fonction de l'épaisseur du copeau et elle est d'autant plus élevée que le copeau est fin.

En fonction des variables pratiques utilisées pour la détermination des forces, couples et puissances de coupe qui sont la vitesse de coupe (v en m/min), l'avance de l'outil (s en mm/révolution) et la profondeur de passe (a en mm) ainsi que la géométrie de coupe de l'outil, il est défini une valeur de résistance spécifique de coupe k_c en N/mm².

Ainsi nous pouvons écrire les relations suivantes :

$$F_{\text{coupe}} = A \cdot k_c \quad \begin{array}{l} A = \text{section (mm}^2\text{)} \\ k_c = \text{force spécifique de coupe (N/mm}^2\text{)} \end{array}$$

Pour une longueur de copeaux Δl , l'énergie de coupe sera :

$$W_c = F_{\text{coupe}} \cdot \Delta l = A \cdot k_c \cdot \Delta l$$

$$\text{le volume du copeau est : } V = A \cdot \Delta l$$

et l'énergie spécifique par unité de volume ($A \cdot \Delta l$) devient :

$$W_{sp} = \frac{W_c}{V} = \frac{F_c \cdot \Delta l}{A \cdot \Delta l} \left(\frac{\text{N} \cdot \text{mm}}{\text{mm}^2 \cdot \text{mm}} \right) \triangleq \frac{A \cdot k_c \cdot \Delta l}{A \cdot \Delta l} \triangleq k_c \cdot 10^{-3} \left(\frac{\text{J}}{\text{mm}^3} \right) \triangleq (\text{M Pa})$$

Il est important de constater l'identité entre la résistance spécifique de coupe et l'énergie spécifique par unité de volume enlevé.

Cela nous conduit aux remarques suivantes :

1. L'énergie spécifique permet une comparaison énergétique de consommation en fonction des matériaux.
2. Selon la Figure 6 l'énergie nécessaire à la coupe, en tenant compte des frictions, sera donc :

$$W_{sp. \text{ eff.}} = \frac{k_c \cdot 10^{-3}}{0.82} \left(\frac{\text{J}}{\text{mm}^3} \right) \triangleq (\text{M Pa})$$

En fonction de la Figure 15, nous pouvons écrire

$$F_s = F_c \cdot \cos \varphi - F_f \cdot \sin \varphi$$

$$\text{la contrainte de cisaillement est } k_s = \frac{F_s}{A_s}$$

Exprimé en fonction de l'avance (s) et de la profondeur (a), on a:

Exprimé en fonction de l'avance (s) et de la profondeur (a), on a:

$$A_s = \frac{s \cdot a}{\sin \phi} \quad F_s = A_s \cdot k_s = k_s \frac{s \cdot a}{\sin \phi}$$

ainsi k_c est proportionnel à k_s et doit être calculé en fonction de chaque géométrie de coupe différente.

Nous avons admis un ordre de grandeur moyen de 2050 N/mm² pour un acier et environ 450 N/mm² pour l'aluminium.

L'énergie de coupe est en majorité transformée en chaleur dans le copeau. Par exemple pour un acier inoxydable, nous aurions la variation de température suivante :

chaleur spécifique : 0,46 Ws/g.k

section de copeau : 1 mm²

$$k_c = 2050 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{d'où } W_{sp.} = 2050 \cdot 10^{-3} = 2,05 \left(\frac{\text{Ws}}{\text{mm}^3} \right) \hat{=} 2,05 \text{ (M Pa)}$$

$$\text{et } \Delta T = W_{sp} \frac{1}{r} \cdot \frac{1}{c} = \frac{2,05 \cdot 10^{-3}}{7,84 \cdot 0,47} = 569^\circ \text{ C}$$

Les différents procédés d'usinage par enlèvement de matière conduisent aux énergies spécifiques "volumiques" suivantes : [4]

Tournage, fraisage, perçage :	1 à 3	J/mm ³
Rectifiage :	30 à 60	J/mm ³
Etincelage :	100 à 200	J/mm ³
Electro-érosion :	200 à 500	J/mm ³

1.2 Variables de l'énergie de coupe

1. Frottements

L'énergie de coupe spécifique sera minimale lorsque les énergies de friction qui accompagnent la coupe seront minimales

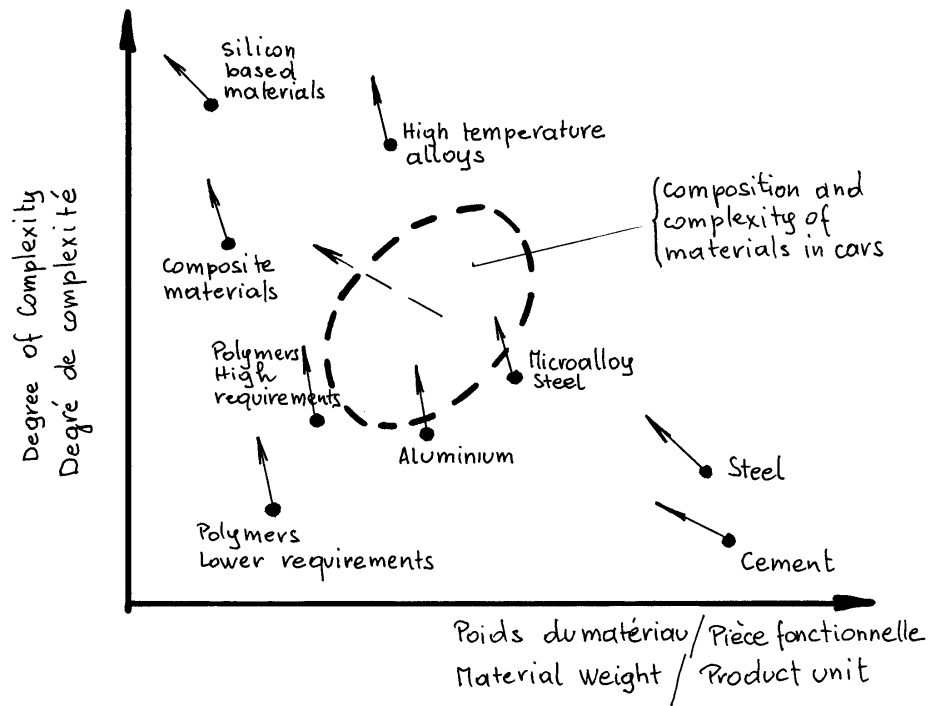
2. Angle du plan de coupe (ϕ) [5]

Les résultats d'études de modèle conduisent à la conclusion que l'énergie de coupe sera minimale pour un angle de dégagement $\alpha = 0$ lorsque l'angle de cisaillement (ϕ) est voisin de 45°.

3. Développement des matériaux [7]

Ces développements vont dans 3 directions complémentaires :

1. Diminution du poids de matière par unité de produit fini, et cela en augmentant la complexité des produits [Fig 16]. Cela est avantageux parce que $P\#m\acute{e}tab \ll P\#m\acute{o}rph$.
2. Utilisation de matériaux dont le contenu énergétique est plus faible, c'est-à-dire qu'ils nécessitent moins d'énergie pour des volumes identiques [Fig 17].
3. Augmentation des vitesses de coupe par amélioration des matériaux des outils de coupe et des lubrifiants [Fig 18].



Correlations and development between the materials complexity and weight per product unit.

Figure 16

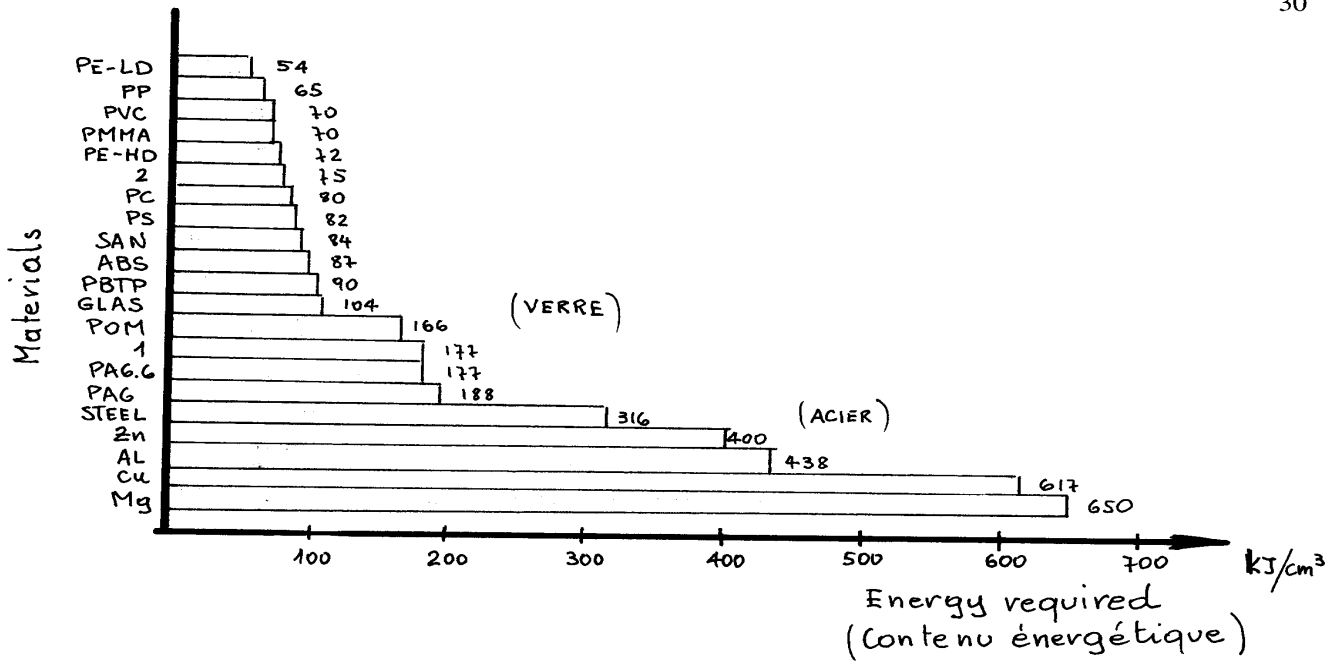


Figure 17
Comparison of the required energy for generating parts of identical volumes

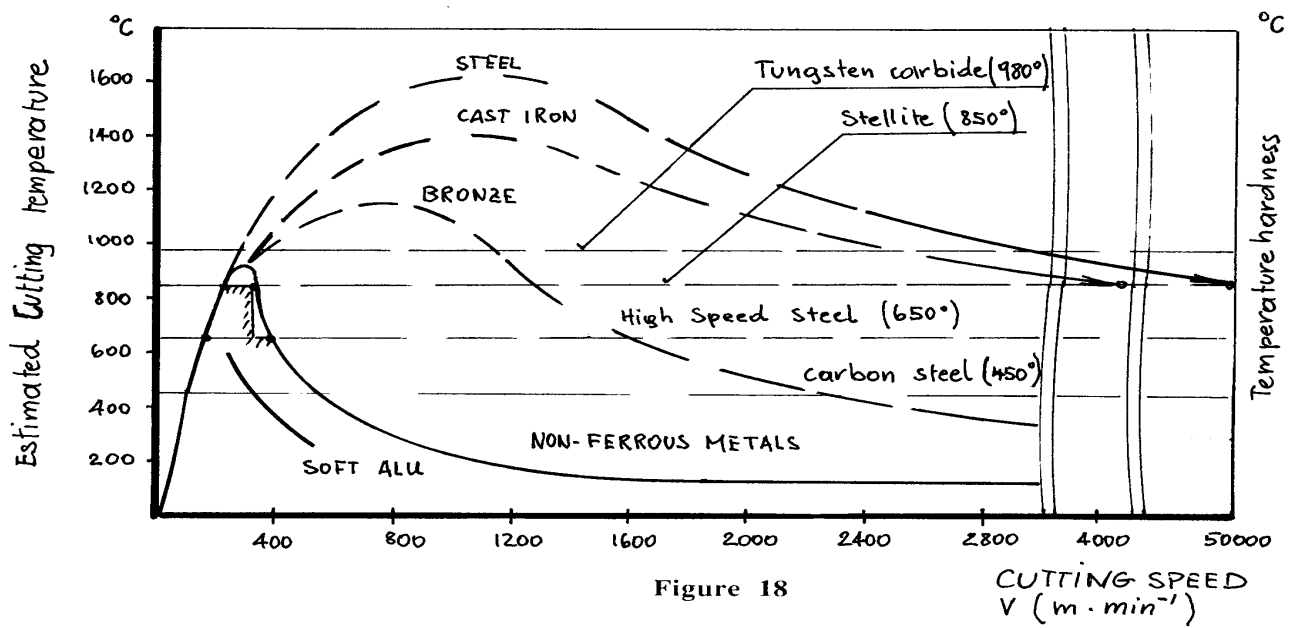


Figure 18

2. ANALYSE DES MACHINES-OUTILS [8]

2.1 Répartition des puissances installées

Pour les différents types de machine-outil CNC et NC, la répartition des puissances installées est la suivante :

Machine-Outil NC	Puissance Broche/ Puiss. Installée (%)	Puissance Axe/ Puiss. Installée (%)	Puissance Auxiliaire/ Puiss. Installée (%)
Fraiseuses	51	37	12
Centres d'usinage	38	38	24
Aléseuses	49	36	15
Tours horizontaux	66	22	12
Tours verticaux	72	21	7

Constatations :

1. Dans les essais nous avons remarqué que le rapport de la puissance moyenne P_m employée pendant le cycle de fabrication à la puissance installée P_{tot} est dans 80 % des cas plus petit que 50 % de cette valeur (page 35).
2. Cependant nous pouvons régulièrement observer que les machines NC ou CNC sont systématiquement équipées de moteurs de plus en plus gros ou puissants. Les constructeurs augmentent les réserves des machines, probablement parce que cela est une exigence, juste ou fausse, du marché.

Cette tendance a plusieurs conséquences sur l'augmentation du contenu énergétique

1. Le choix de moteurs plus puissants conduit à un dimensionnement en conséquence (plus important) de toute l'installation électrique en amont du moteur.
2. Ce choix conduit également à dimensionner en conséquence les éléments mécaniques de la machine comme structure, transmission, broche, etc.

2.2 Influence de la puissance installée sur le poids final de la machine

Une relation pratique donne le poids de la machine en fonction de la puissance totale, et cela pour différents types de machines :

$$G = \left(\frac{P_{tot}}{k} \right)^{1/n}$$

Type de Machine NC	k	n
Centre usinage	0,097	0,604
Tour Horizontal	0,295	0,500
Tour Vertical	3,637	0,289
Fraiseuse	0,3	0,512

Exemple : Tour CNC

11 kW

13 kW

$$G = \left(\frac{11}{0,295} \right)^2 = 1'390 \text{ kg} \quad G = \left(\frac{13}{0,295} \right)^2 = 1'941 \text{ kg}$$

$\Delta G = 551 \text{ kg}$ correspondant à une augmentation du contenu énergétique de la machine de

$$7.72 \text{ kWh/kg} \cdot 551 \text{ kg} = 4'254 \text{ kWh}$$

2.3 Diminution de l'énergie consommée par les auxiliaires

Nous pouvons considérer les états suivants de disponibilité des machines

- * Machine déclenchée (interrupteur armoire principale déclenché)
- * Machine à l'arrêt (interrupteur armoire principale enclenché, auxiliaires enclenchés)
- * Machine à vide (fonctionnement normal mais à charge utile nulle)
- * Machine en charge charge utile plus faible, par exemple finition
charge utile forte, par exemple ébauche
charge utile maximum, correspondant aux
contraintes maximales admissibles de la machine)

Lorsque la machine est déclenchée, l'ensemble de ces auxiliaires le sont également. Cependant lorsque la machine est à l'arrêt, ceux-ci sont systématiquement en fonction. Aussi ils représentent, pendant les durées d'arrêt de la machine, une consommation électrique relativement importante.

Pour des machines examinées nous avons porté dans la tablelle suivante, la puissance installée pour les auxiliaires ainsi que leur consommation électrique par minute d'arrêt.

Type de machine	Puissance aux. installée	Consommation par minute d'arrêt
Tour Schäublin conventionnel	0.14 kW	2.35 Wh
Tour Schäublin CNC	0.48 kW	8.00 Wh
Fraiseuse Mikron CNC	0.39 kW	6.50 Wh
Tour-Fraiseuse MAZAK CNC	5 kW	83.50 Wh
Grosse Fraiseuse-aléseuse CNC	20 kW	334.00 Wh
Cincinetti Milling machine	17 kW	284.00 Wh
Olivetti Hor. Machine Center	6 kW	100.00 Wh
Horizontal Boring machine	2 kW	33.40 Wh

Il est donc évident que si l'opérateur laisse par exemple la machine MAZAK à l'arrêt pendant la pause de midi d'une durée de 75 minutes, la consommation des auxiliaires sera de 83.5×75 6.26 kWh en pure perte.

Il ressort clairement de l'examen que plus les machines sont complexes, plus le nombre et le dimensionnement des auxiliaires est important.

Sont considérés comme auxiliaires les fonctions suivantes

- a) pompe hydraulique
- b) éclairage
- c) évacuation des copeaux
- d) pompe pour liquide de coupe
- e) magasin porte-outils avec accessoires

2.4 Analyse des activités des machines d'un parc [9]

Valeurs mesurées : [Fig 7]

P_m	puissance moyenne pendant la durée du cycle (kW)
P_{min}	puissance minimum (kW)
N_p	nombre de fois où $P = P_p$ exprimé en %
$(t_w)_m$	durée moyenne de production (min)
$(t_i)_m$	durée moyenne de la machine à vide (min)
P_p	pointe de puissance pendant le cycle de production (kW)
MTAR	taux d'activité de la machine (%)
*	machine avec moteur hydraulique
**	machine avec moteur hydraulique et glissière hydrostatique

Nous pouvons tirer des valeurs mesurées les trois renseignements suivants :

1. Le temps moyen d'activité de la machine dans un cycle de production (MTAR) est en moyenne de 64 %
2. Le temps de production représente 60 % du temps de cycle
3. Le rendement moyen de production est d'environ 25 %

Machine	P _{inst}	P _{aux}	Puissance analysée							Activité machine				Energie moyenne			Rendement de production
			P _m	%	P _{min}	%	P _p	%	N _p	MTAR	(t _w) m	(t _i) m	min	totale	à vide	utile estim	
Nr.	KW	KW	KW	$\frac{P_m}{P_{inst}}$	KW	$\frac{P_{min}}{P_{inst}}$	KW	$\frac{P_p}{P_{inst}}$	%	%	%			kwh	kwh	up (%)	
1 *	85	15	30,5	35	10,2	12	64	75	3	70	31	66		49,3	16,5	14,4	29
2	132	17	16	12	5,5	4	24	18	21	61	43	29		19,2	4,8	7,2	37
3 *	47	13	22	46	13	28	27	57	40	67	55	29		30,8	6,3	9,2	29
4	34	4	4,4	13	2,6	8	12	35	2	54	40	38		5,7	2,5	1,6	28
5	34	4	3,9	11	2,3	7	12	35	4	55	30	23		3,5	1,5	0,87	25
6	10	4	4,1	41	1,4	14	8	84	4	53	43	38		5,5	2,5	1,9	34
7	17	7,5	9,3	55	5,1	30	17	100	2	73	93	38		20,3	4,7	4,4	22
8 *	12	5	17	40	12	28	31	74	9	64	28	15		12,2	1,25	2,2	18
9 **	77	25	26,5	34	20	26	73	94	1	77	45	15		26,5	6,2	5,5	20
10	23	3	7,5	33	5,5	24	14	58	1	-	-	-		-	-	-	-
											64	45	32				

Le taux moyen d'activité de la machine est de 64 %.

Le temps moyen d'enlèvement des copeaux est d'environ 60 % de la durée du cycle de production.

Le rendement moyen de production $\frac{\sum \text{énergie de coupe}}{\text{Energie finale consommée}} = \text{environ } 25 \%$

En admettant l'efficacité de coupe de 0,82, le rendement effectif de production est de $0,25 \cdot 0,82 = 0,2 \approx 20 \%$

Figure 7

2.5 Modélisation des activités d'un parc de machines [9]

La consommation énergétique d'un parc de machines-outils dépend essentiellement des trois variables suivantes :

1. Consommation électrique pendant le cycle de production

2. L'activité des opérateurs

3. De la simultanéité de fonctionnement

- Consommation électrique ou "énergie opératoire"

C'est l'énergie mesurée à l'entrée de l'armoire électrique.

- Activité de l'opérateur :

C'est la relation entre le temps de production proprement dit et le temps de présence.

Temps de production = Temps présence - Temps mort

En général pendant les temps morts, la machine est à l'arrêt (non déclenchée)

- Simultanéité de fonctionnement :

Les états d'activité de la machine, des machines d'un parc peuvent être caractérisés par:

- production

- à l'arrêt ou à vide

- déclenché

Nous désignons par simultanéité pour un parc de machines-outils le pourcentage de celles-ci en production. Pour un parc standard, il a été relevé que

51 % des machines sont en production

33 % des machines sont à l'arrêt ou à vide 16 % des machines sont déclenchées

Il ressort de ces remarques que les actions sur la gestion (dynamique) du parc doit conduire à des économies énergétiques non négligeables.

Chez FIAT un modèle de fonctionnement du parc de 160 machines-outils a été réalisé. Il a été vérifié sur l'installation mentionnée et sa concordance reconnue.

Deux modifications simples des états de simultanéité ont donné les résultats suivants

1. Nous exigeons le déclenchement des machines lorsque les "temps morts" (pauses) dépassent 5 min.

Ainsi dans ce parc modélisé de 160 machines les gains possibles seraient les suivants

Energie consommée 15 %

Puissance de pointe: 5 %

2. En plus, nous contraignons l'opérateur à réaliser la même production dans le temps qu'il peut, la différence étant à son bénéfice. Il a été admis que le gain de temps serait de 25 %.

Dans ces conditions, les gains énergétiques possibles seraient alors de

ENERGIE CONSOMMEE: - 31 % PUISSANCE DE POINTE: - 4%

Il est important de prendre aussi en compte la puissance de pointe qui, en plus d'être la plus chère, conditionne le dimensionnement de l'installation électrique, donc de l'énergie capitalisée.

2.6 Amortissement de l'énergie capitalisée

Il s'agit de l'amortissement du capital énergétique immobilisé que nous avons représenté par la formule :

$$\frac{K_m}{N \bar{Z} \dot{P}} (CE_{ki} - CE_{kf}) \quad (\text{page 14})$$

Si la durée de fonctionnement est définie par une valeur proportionnelle à $N \bar{Z} \dot{P}$, alors la part d'amortissement est la même par pièce ou par heure de production; il suffit d'augmenter N en conséquence. Pour au moins deux raisons cela est trop simpliste :

- d'abord le parc de machines doit être adapté régulièrement aux améliorations disponibles et cela avec d'autant plus de chance que N est petit, donc $\dot{P}$ grand;
- ensuite et cela est le plus important, pour une même production, il faut minimiser la valeur de K_m totale ou par des moyens supplémentaires, augmenter $\dot{P}$

Il serait certainement important de faire le calcul d'amortissement pour la durée de production, de coupe effective. Nous nous contenterons, dans une première approche, de considérer l'amortissement pour la durée d'occupation de la machine par l'opérateur.

Soit une machine d'un prix de $0.5 \cdot 10^6$ Frs. L'intensité énergétique de la branche est de 1.7 kWh/Fr. d'où la valeur énergétique de $0.85 \cdot 10^6$ kWh. Comparons les valeurs des coûts énergétique en considérant que la machine est servie par 1, 2 ou 3 équipes et la même machine robotisée. Nous avons admis une durée de fonctionnement de 15 ans.

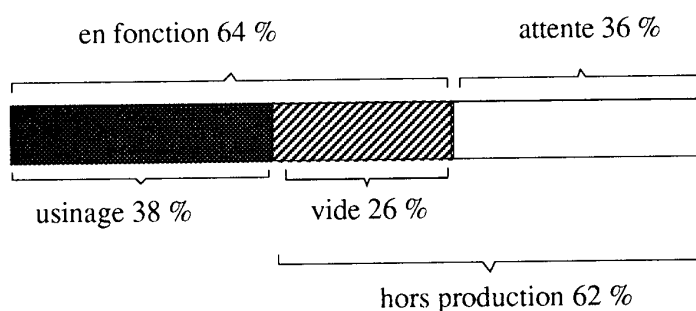
Les résultats sont présentés dans le tableau ci-après :

Capital énergétique investi	Nb d'heures pour 15 ans	Part machine	Part machine	
	kWh primaire	heure	kWh/h	kJ/kg _{prod.}
1 équipe.	0.85 · 10 ⁶ kWh.	25'920	32.79	1260
2.équipe.	0.85 · 10 ⁶ kWh.	51'840	16.39	630 *
3 équipe.	0.85 · 10 ⁶ kWh.	77'760	10.93	420
+ robot	1.27 · 10 ⁶ kWh. (0.85 . 1.5)	109'500	11.59	425

* estimation :
$$\frac{16.39 \cdot 600}{\frac{18.8 \text{ kgc/h}}{0.2}} = 630 \text{ kJ/kg}$$

Remarque:

Si l'on exprime graphiquement les résultats de l'emploi du temps des machines du tableau [7] on obtient :



Dans le cas de ce parc de machines les emplois du temps sont meilleurs que les mesures statiques mentionnées au début.

3 . LA CONVERSION ELECTROMECHANIQUE DANS LES MACHINES-OUTILS

3.1 Schématisation [Fig 19]

Ce schéma respésente les constituants principaux de la conversion électromécanique pour une broche ou un axe.

En complément existe aussi les auxiliaires que nous avons mentionnés dans un chapitre précédent.

3.2.1 *Rapport de transmission*

a) Transmissions tournantes-tournantes (Broches)

$$r = \frac{\Omega_m}{\Omega_e} = \text{rapport de transmission} \quad \begin{array}{l} m = \text{moteur} \\ e = \text{organe entraîné} \end{array}$$

$$r = \frac{\alpha_m}{\alpha_e} \quad \text{et} \quad r = \frac{M_e}{M_m} \quad (\text{sans pertes})$$

La conservation de l'énergie cinétique donne l'expression suivante pour les inerties :

$$J'_{m2} = r^2 J_m$$

J'_m est l'inertie équivalente au moteur, rapportée à l'organe entraîné.

b) Transmissions tournantes-linéaires

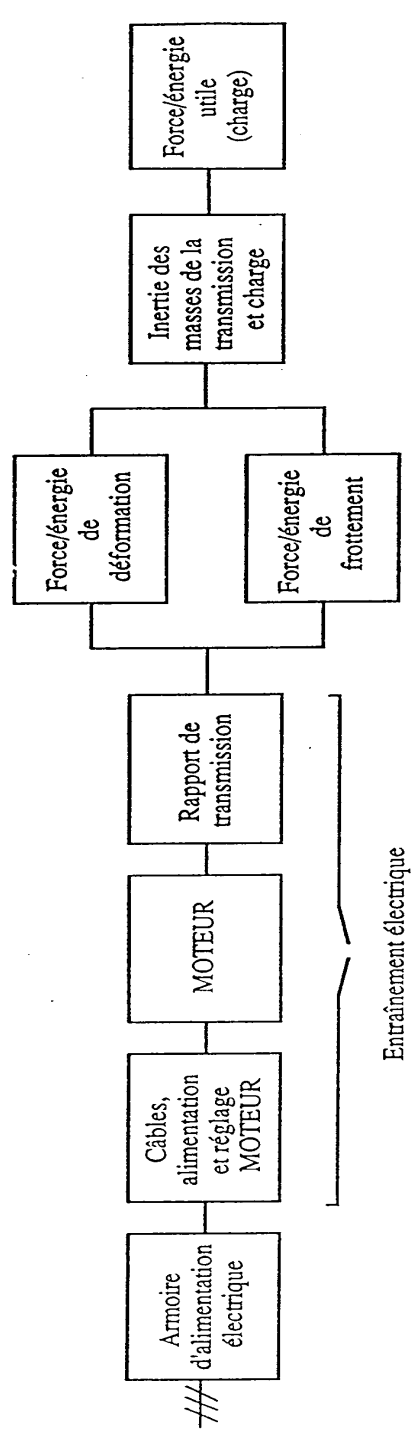
$$k = \frac{\Omega_m}{V_e} \quad k = \frac{\alpha_m}{\Delta x_e}$$

La masse équivalente à l'inertie du moteur a pour expression :

$$m'_m = k^2 J_m$$

L'accélération d'un système présente un maximum pour :

$$r^2 J_m = J_e \quad k^2 J_m = m_e$$



Bilan énergétique global

$$\begin{aligned} \text{Puissance réseau} &= \text{pertes armoire d'alimentation} + \text{Perte réglage et alimentation moteur + câbles} + \text{Pertes Joule} + \text{Puissance d'accélération moteur} + \text{Puissance électro-magnétique} + \text{Pertes frottement et déformation} + \text{Pertes transmission} - \text{Puissance récupérée} \end{aligned}$$

$\underbrace{\hspace{15em}}_{\text{Moteur}}$

$\underbrace{\hspace{15em}}_{\text{Entraînement électrique}}$

Figure 19

3.2.2 Mesure de la puissance de coupe [annexe 5]

Une mesure directe de cette puissance est compliquée et surtout difficile à mettre en oeuvre lors des mesures en atelier. Une méthode facile est la mesure de la puissance en charge (coupe) et de la puissance à vide, la différence étant la puissance de coupe.

A cette méthode simple il y a lieu d'apporter un correctif tenant compte des pertes aux deux régimes de fonctionnement. Ainsi la puissance de coupe corrigée vaut :

$$P_{\text{coupe}} = \frac{1}{a} (P_{\text{charge}} - P_{\text{vide}})$$

$$\text{et } \eta_{\text{coupe}} = \frac{1}{a} \left(1 - \frac{P_{\text{vide}}}{P_{\text{charge}}}\right)$$

Le coefficient a doit se calculer en fonction des éléments constitutifs de la broche ou de l'axe considérés.

Selon le Prof. Dr. Ing. Stute [17], il vaut :

Tour $a = 1,15 \text{ à } 1,25$

Fraiseuse $a = 1,2 \text{ à } 1,45$

3.2.3 Calcul du rendement énergétique de coupe

Pour le calcul du rendement énergétique de coupe, de production, etc. nous avons procédé de la façon suivante :

- Calcul théorique de la puissance de coupe multipliée par le temps de l'opération $\hat{=}$ énergie de coupe.
- Mesure sur les relevés graphiques des enregistrements de la surface totale du début à la fin de l'opération. Cette surface représente la consommation totale pendant l'opération.
- Le quotient nous donne le rendement énergétique de l'opération d'usinage.

3.3 Mesures en site

3.3.1 Département des matériaux EPFL - Atelier mécanique

- **Appareils de mesure**

2 Wattmètres digitaux 500 V / 50 A, triphasé
sortie analogique

1 Enregistreur à 4 pistes KONTRON
cadence des mesures : 1 / 0.2 sec.

- **Echelle des enregistrements**

En ordonnée : P_{eff} instantanée 1 cm $\rightarrow$ 1 kW
échelle max. $\rightarrow$ 10 kW

En abscisse : Durée/Temps 1 cm $\rightarrow$ 2 s

Echelle énergétique

$$1 \text{ mm}^2 \hat{=} 0.1 \text{ kW} \cdot 0.2 \text{ s} = 0.02 \text{ kW}\cdot\text{s}.$$

ou $5.6 \cdot 10^{-3} \text{ Wh}$

* Principe des mesures

Mesure de l'énergie fournie par le réseau en insérant le wattmètre de suite après l'interrupteur principal de l'armoire électrique.

Mesure de l'énergie consommée par la "broche" de suite à l'entrée du contacteur de l'alimentation triphasée de l'entraînement de celle-ci.

* Machines à disposition

Machine SCHAUBLIN - TOUR CNC 128

Moteur broche : Moteur cc, type GF 112 S
 1470 t/min et 6000 t/min à puissance constante
 $P_{\text{ nominale}} : 8.9 \text{ kW}$
 $U_N = 400 \text{ V}$ et $I_N = 28 \text{ A}$
 $J = 0.03 \text{ kg m}^2$; $r_{\text{ induit}} = 1.62 \Omega$

rapport de transmission : $\frac{\text{moteur}}{\text{broche}} = 1$

Moteur axe longitudinal :	2.5 Nm,	3000 t/min,	0.8 kW
Moteur axe transversal :	1.2 Nm,	3000 t/min,	0.38 kW
Moteur tourelle :	1.76 Nm,	2500 t/min,	0.46 kW
Moteur pompe arrosage :		3000 t/min,	0.32 kW
Moteur pompe graissage :		2600 t/min,	0.1 kW

Machine MIKRON - Fraiseuse aléuseuse WF 21 D

Moteur broche : Moteur asynchrone 2 vitesses
 1430 t/min et 2860 t/min
 $P_N = 3.75 \text{ kW}$ 380 V/50 Hz
 Boite de vitesse mécanique

Rapport de transmission : à 1430 t/min = 0.715
à 2860 t/min = 0.715

$$J_{\text{moteur}} = 0.07 \text{ kgm}^2$$

Moteur axe longitudinal :	cc	3.2 Nm,	3000 t/min,	1	kW
Moteur axe transversale :	cc	3.2 Nm,	3000 t/min,	1	kW
Moteur tourelle :	cc	7 Nm,	3000 t/min,	2.2	kW
Moteur pompe arrosage :				0.08	kW
Moteur pompe hydraulique :			1450 t/min	0.25	kW

Machine SCHAUBLIN - Tour universel conventionnel

Résultats des mesures

Les résultats sont récapitulés dans le tableau de la page suivante :

Tableau récapitulatif des mesures

	Opération	W totale	W aux.	W entr. vide	W cinétique	W coupe	η Product.	Je Jm
		Wh	Wh	Wh	Wh	Wh	%	
Tour SCHAUBLIN CNC 128	ébauche	10.96	3.04	1.24	0.22	6.45	59	4.13
	ébauche	16.52	4.48	1.5	0.33	10.21	62	
	ébauche	12.6	2.69	0.9	0.17	8.85	70	
	semi-finition	15.4	9.4	3.25	0.31	2.5	16	
	semi-ébauche	38.5	16.12	4.7	0.33	17.2	45	
	pièce complète	125.5	45.15	19.2	1.26	59.8	48	
Fraiseuse-aléuseuse MIKRON CNC/WF21D	ébauche	90.17	18.25	13.95	0.71	57.25	63	6.21
	ébauche	57.2	17.74	13.5	0.78	25.2	44	
	finition	39.65	17.74	11.6	0.78	9.5	24	
Tour SCHAUBLIN 125	ébauche	12.73	0.98	4.82	0.4	6.52	51	
	ébauche	21.6	1.2	7.0	0.25	13.15	60	

3.3.2 Mesures énergétiques en site de production

1. Lieu: BOBST SA, Prilly
Atelier flexible, pièces pour AUTOPLATINE
2. Types de machines mesurées :
- Tour automatique avec capacité de fraisage MAZAK avec commande MAZAIROL T-3 - Fraiseuse WALDRICH avec commande Sinumerik (Siemens) CNC.
3. Résultats des mesures : [Fig 201
* Consommation énergétique

MAZAK :

$$\frac{W_{\text{coupe}}}{\text{Poids copeaux}} = \frac{3600 \text{ Wh}}{28 \text{ kg}} = 128,6 \text{ Wh/kg c} \hat{=} 462 \text{ kJ/kg c}$$

$$\frac{W_{\text{totale}}}{\text{Poids copeaux}} = \frac{9180 \text{ Wh}}{28 \text{ kg}} = 327,8 \text{ Wh/kg c} \hat{=} 1180 \text{ kJ/kg c}$$

$$\frac{W_{\text{totale}}}{\text{Poids pièce}} = \frac{9180 \text{ Wh}}{78 \text{ kg}} = 120,8 \text{ Wh/kg c} \hat{=} 435 \text{ kJ/kg c}$$

Type de machine	Opération	W totale	W aux.	W entr.vide	W cinétique	W coupe	η product.	Produc- tivité
		Wh	Wh	Wh	Wh	Wh	%	%
<u>MAZAK</u> pièce brute : 106 kg copeaux : 28 kg pièce finie : 78 kg	Ebauche : cycle 42' usinage 27'20"	5,71	1,6	0,84	0,47	2,8	49	64
	Finition : cycle 22' usinage 14'	3,47	1,6	0,57	0,5	0,8	18	
<u>WALDRICH</u> pièce brute : 2815 kg copeaux : 224 kg pièce finie : 2591 kg	Cycle complet d'usinage ébauche et finition avec fraisage, perçage et taraudage	87	36	23,9	2,7	24,4	28	65

Figure 20

$$\frac{W_{\text{coupe}}}{\text{Poids copeaux}} = \frac{24400 \text{ Wh}}{224 \text{ kg}} = 109 \text{ Wh/kg c} \hat{=} 392 \text{ kJ/kg c}$$

$$\frac{W_{\text{totale}}}{\text{Poids copeaux}} = \frac{87000 \text{ Wh}}{224 \text{ kg}} = 388,4 \text{ Wh/kg c} \hat{=} 1398 \text{ kJ/kg c}$$

$$\frac{W_{\text{totale}}}{\text{Poids pièce}} = \frac{87000 \text{ Wh}}{2591} = 33,6 \text{ Wh/kg} \hat{=} 120 \text{ kJ/kg}$$

* Comparaison des valeurs mesurées par rapport aux limites théoriques :

Caractéristiques	Limites théoriques	Mesures	
		MAZAK	WALDRICH
$\frac{\text{Energie de coupe}}{\text{kg de copeaux}}$	256 kJ/kg c	462 kJ/kg c	392 kJ/kg c
$\frac{\text{Energie totale}}{\text{kg de copeaux}}$	-	1180 kJ/kg c	1398 kJ/kg c
$\frac{\text{Energie totale}}{\text{Poids pièce}}$	64,1 kJ/kg	435 kJ/kg	120 kJ/kg
$\frac{\text{Energie morphologique}}{\text{Energie métabolique}}$	0,45 %	9,8 %	3 %

3.3.3 Récapitulation de l'énergie opératoire par machine

Machine/ opération	limites th.	Production coupe	unitaire cycle	Production série	Part capitalisée
	kJ/kg c	kJ/kg c	kJ	kJ/kg c	kJ/kg
Tour CNC Schäublin					
ébauche		460	783		
ébauche		457	1026		
finition		320	980		
pièce complète		750	4620		
Fraiseuse Mikron					
ébauche		430	903		
	210 kJ/kg c 46 256 kJ/kg c				
MAZAK					
ébauche + finition		462	1180	1648	630
WALDRICH					
fraisage, perçage et taraudage		392	1398	2150	610
Moyenne d'analyse	210 + 46	480	1280	1900	620

3.4 Répartition de la consommation de l'énergie opératoire

- Différence Coupe et Friction outil/pièce	46 kJ/kg c
- Différence Coupe + Friction et opération d'usinage (temps égaux)	224 kJ/kg c
Différence usinage et cycle de production unitaire	800 kJ/kg c
- Différence production unitaire et production série	620 kJ/kg c
- Part d'amortissement du capital immobilisé	620 kJ/kg c
Total des différences	2310 kJ/kg c
Energie utile correspondante	210 kJ/kg c
Total	2520 kJ/kg c

La part de l'énergie opératoire faisant intervenir l'énergie électrique finale est de :

$$256 + 224 + 800 + 620 = 1900 \text{ kJ/kg c}$$

Si nous rapportons cette valeur au poids d'une pièce finie hypothétique, nous obtenons la consommation énergétique spécifique suivante :

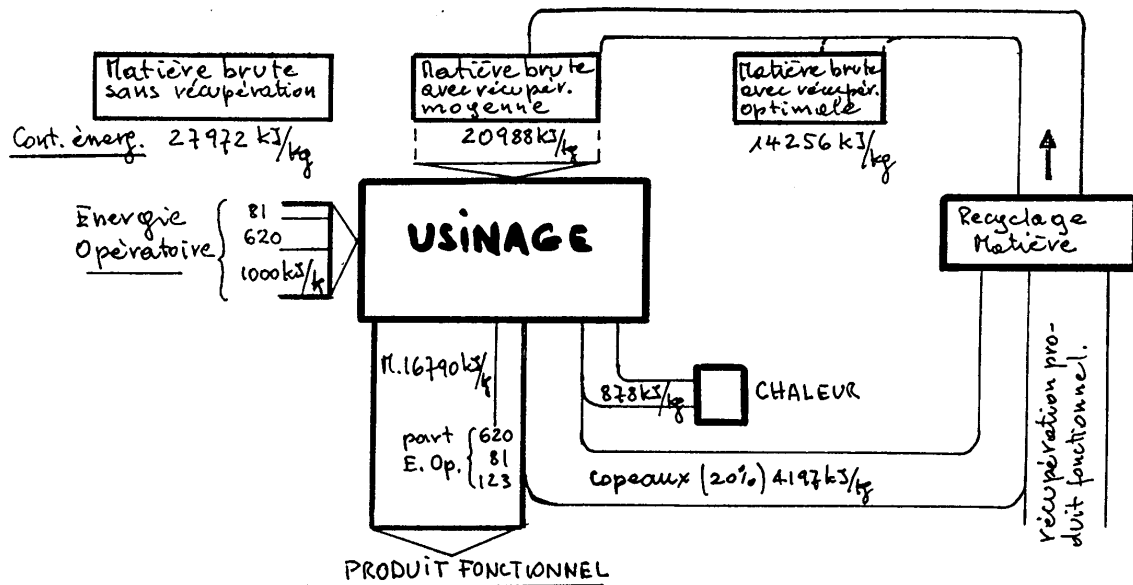
$$\frac{1900 \cdot 20}{80} = 475 \text{ kJ/kg} \quad (\text{énergie finale})$$

La valeur théorique limite correspondante est de 64,1 kJ/kg (énergie finale) (page 10).
Exprimée en Energie primaire, la valeur précédente devient :

$$\frac{475}{0.52} = 913 \text{ kJ}_{pr}/\text{kg} \quad (\text{arrondi à } 1000 \text{ kJ/kg})$$

3.5 Etablissement du bilan énergétique du processus de fabrication par enlèvement de copeaux.

1. Contenu énergétique matière brute (récupération moyenne)	20'988 kJ/kg
2. Résultats moyens des mesures :	
2.1 Consommation énergétique pour production	1'000 kJ/kg
2.2 Energie capitalisée (2 équipes)	620 kJ/kg
2.3 Energie capitalisée en amont 5% (2.1 + 2.2)	81 kJ/kg
Sous-total	22'689 kJ/kg
	=====



50

2.4 L'énergie opératoire est la somme 2.1. + 2.2 + 2.3

1'701 kJ/kg

3. Contenu énergétique produit fonctionnel
(80 % Matière brute + Energie cap. + Energie coupe)

17'614 kJ/kg

4. "Plus-value" énergétique 17'614 - 20'988 =

(-)3'374 kJ/kg

Il y a donc eu SUBSTITUTION ENERGIE — INFORMATION

4. BROCHE

4.1 La puissance de la broche est calculée par l'expression

$$P = \frac{a \cdot s \cdot v}{\eta_c} k_c \quad [W]$$

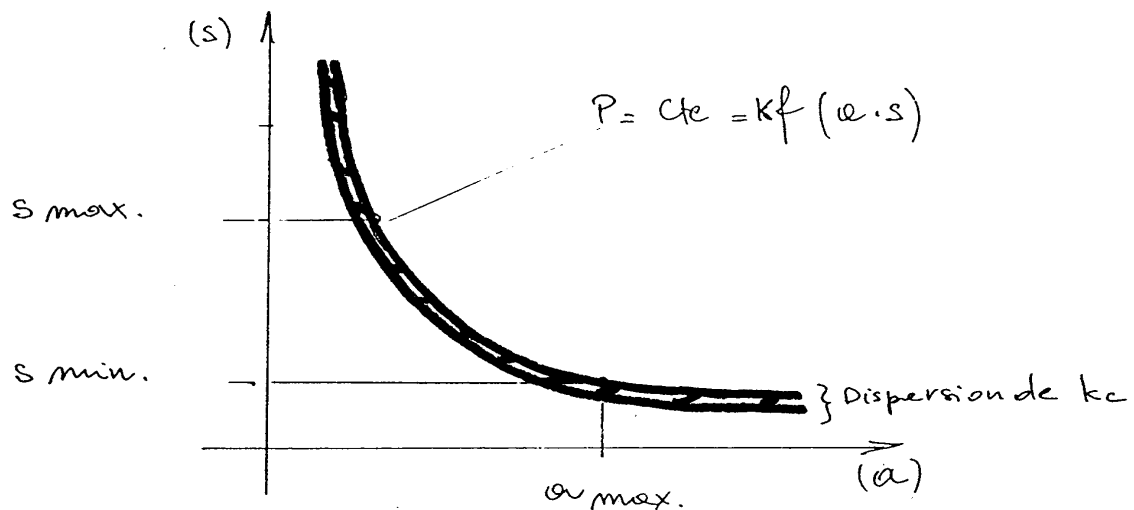
avec k_c = force spécifique de coupe (N/mm^2) $\hat{=}$ (MPa)

v = vitesse de coupe en (m/s)

a = profondeur de passe en (mm)

Lors d'usinages aux contraintes maximales, nous avons la relation suivante entre l'avance et la profondeur de passe :

$$s = f \left(\frac{\text{Constante}}{a} \right)$$



Lorsqu'on veut utiliser la puissance installée, alors on rencontre les limitations suivantes:

s_{max} ---> déterminée par la qualité de surface

s_{min} ---> est l'avance pour a_{max}

a_{max} ---> est choisie de façon économique en fonction de la construction, des matériaux, des outils, de l'usine et de la maintenance de la machine.

4.2 Consommation énergétique pendant l'opération d'usinage : [3]

Nous considérons les 3 états de fonctionnement, accélération, coupe et décélération.

- l'accélération se fait toujours à vide, c'est-à-dire avec l'outil hors de la coupe. Nous avons pour les deux familles de moteurs (asynchrone et synchrone) les expressions suivantes pour les énergies consommées :

$$W_{\text{accélération}} = \begin{cases} (1 + 4 S_N) W_{cin} \\ (1 + 2 \alpha) W_{cin} \end{cases}$$

- Pendant l'usinage nous avons démontré que l'énergie consommée minimale était de :

$$W_c = W_{sp} \cdot \text{Vol. copeaux}$$

et la valeur effective de
$$W_{c \text{ eff.}} = \frac{W_c}{\eta_c}$$

- La décélération ou l'arrêt peut se faire avec récupération de l'énergie cinétique ou sans cette récupération. Les expressions des énergies consommées en relation avec les deux familles de moteurs sont :

$$W_{\text{décélération}} \begin{matrix} \text{(sans récupération)} \end{matrix} = \begin{cases} 4 S_N \cdot W_{cin} \\ 2 \alpha \cdot W_{cin} \end{cases}$$

$$\text{Energie récupérée (- } W_d) = \begin{cases} (1 - 4 S_N) W_{cin} \\ (1 - 2 \alpha) W_{cin} \end{cases}$$

Pour l'opération d'usinage globale nous obtenons :

$$\text{(moteur asyn.)} \quad W_{tot} = (1 + 4 S_N) W_{cin} + \frac{W_{sp} \cdot \text{Vol. copeaux}}{\eta_c} + 4 S_N W_{cin}$$

$$W_{tot} = (1 + 8 S_N) W_{cin} + 1,22 (W_{sp} \cdot \text{Vol. copeaux})$$

$$\text{(moteur syn.)} \quad W_{tot} = (1 + 2 \alpha) W_{cin} + \frac{W_{sp} \cdot \text{Vol. copeaux}}{\eta_c} + 2 \alpha W_{cin}$$

$$W_{tot} = (1 + 4 \alpha) W_{cin} + 1,22 (W_{sp} \cdot \text{Vol. copeaux})$$

Nous savons que : S_N est compris entre 0,05 et 0,15

α est compris entre 0,04 et 0,1

et, en remplaçant par une valeur moyenne dans les expressions précédentes, on a :

$$\text{(m. a.)} \quad W_{tot} = (1 + 8 \cdot 0,1) W_{cin} + 1,22 (W_{sp} \cdot \text{Vol. copeaux})$$

$$W_{tot} = 1,8 W_{cin} + 1,22 (W_{sp} \cdot \text{Vol. copeaux})$$

$$\text{(m. s.)} \quad W_{tot} = (1 + 4 \cdot 0,07) W_{cin} + 1,22 (W_{sp} \cdot \text{Vol. copeaux})$$

$$W_{tot} = 1,28 W_{cin} + 1,22 (W_{sp} \cdot \text{Vol. copeaux})$$

Pour acier et $W_{sp} = 2 \text{ J/mm}^3$, on obtient :

$$(m. a.) \quad W_{tot} = 1,8 W_{cin} + 2,44 (\text{Vol. copeaux}) \quad [J]$$

$$(m. s.) \quad W_{tot} = 1,28 W_{cin} + 2,44 (\text{Vol. copeaux}) \quad [J]$$

Exemple :

- Puissance inst. 8,9 kW (m.s.)

$$I_{tot} = 0,154 \text{ kg m}^2 \quad W_{cin} = 13,5 \text{ kJ} \quad \text{à } 4000 \text{ t/min}$$

$$W_{tot} = 1,28 \cdot 13500 + 2,44 (\text{Vol. copeaux})$$

d'où le Vol. copeaux équivalent est de :

$$\text{Vol. copeaux} = \frac{1,28 \cdot 13500}{2,44} = 7081 \text{ mm}^3 \hat{=} 55 \text{ g}$$

$$\text{Durée éq. à } P = \text{cte est de } \frac{1,28 \cdot 13500}{8900} = 2 \text{ s}$$

- Puissance installée 3,75 kW (m.a.)

$$I_{tot} = 0,471 \text{ kg m}^2 ; \quad W_{cin} = 6,84 \text{ kJ} \quad \text{à } 1600 \text{ t/min}$$

$$W_{tot} = 1,8 \cdot 6840 + 2,44 (\text{Vol. copeaux})$$

d'où le Vol. copeaux équivalent est de :

$$\text{Vol. copeaux} = \frac{1,8 \cdot 6840}{2,44} = 5045 \text{ mm}^3 \hat{=} 39 \text{ g}$$

$$\text{Durée éq. à } P = \text{cte est de } \frac{1,8 \cdot 6840}{3750} = 3,35 \text{ s}$$

4.3 Comparaison entre les énergies cinétiques mesurées, les énergies de coupe et les énergies totales.

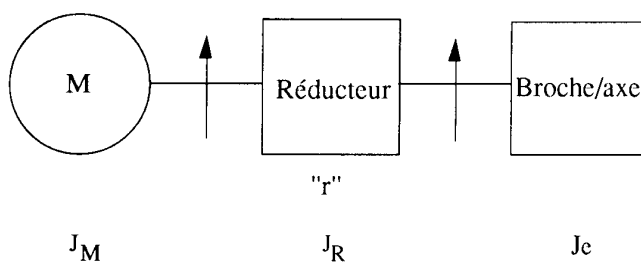
Machines et opérations	W_{tot}	W_{cin}	W_{coupe}	$\frac{W_{cin}}{W_c}$	$\frac{W_{cin}}{W_{tot}}$
	kJ	kJ	kJ	%	%
Tour Schaublin					
ébauche	39,5	0,8	23,2	3,4	2
finition	55,4	1,1	9	12,4	2
complet	451,8	4,5	215	2,1	1
Fraiseuse Mikron					
ébauche	206	2,5	90,7	2,8	1,2
finition	143	2,8	34,2	8,2	2
complet	325	2,8	206	1,4	0,9
Tour outilleur					
ébauche	46	1,4	23	6,1	3,1
MAZAK					
ébauche	$21 \cdot 10^3$	$1,7 \cdot 10^3$	$10 \cdot 10^3$	16,8	8,2
finition	$13 \cdot 10^3$	$1,8 \cdot 10^3$	$2,9 \cdot 10^3$	62 (!)	14
complet	$33 \cdot 10^3$	$3,5 \cdot 10^3$	$13 \cdot 10^3$	27	11
WALDRICH					
complet	$312 \cdot 10^3$	$9,7 \cdot 10^3$	$87,8 \cdot 10^3$	11	3,1

4.4 Analyse de deux broches

Caractéristiques	N° 1	N° 2
Puissance installée	8,9 kW	3,75 kW
Puissance à vide à $V_{\max}$	1,0 kW	0,7 kW
- en charge / ébauche :		
$\eta_{\text{broche}} = \frac{P_c}{P_{\text{tot}}}$	0,82	0,85
$\eta_{\text{coupe}} = \frac{1}{1.2} \left(1 - \frac{P_v}{P_{\text{charge}}}\right)$	0,73	0,64
Pertes mécaniques	1,5 kW	0,6 kW
Pertes électriques	0,9 kW	
- en charge / finition :		
$\eta_{\text{broche}} = \frac{P_c}{P_{\text{tot}}}$	0,66	0,44
$\eta_{\text{coupe}} = \frac{1}{1.35} \left(1 - \frac{P_v}{P_{\text{charge}}}\right)$	0,43	0,34
Pertes mécaniques	0,6 kW	0,6 kW
Pertes électriques	0,29 kW	

5. CHOIX DU RAPPORT DE TRANSMISSION MOTEUR-BROCHE

Soit un entraînement :



Hypothèse : J_e : fixé par la conception

Ω_e : fixée par les performances de la broche (vitesse de coupe)

P_e : fixée par les performances spécifiées à la coupe

$$J_{\text{tot}} = J_M + J_R + \frac{J_e}{r^2}$$

$$[3] \quad M_M = K_M \cdot d^n \quad \text{avec} \quad n = 3,5 \quad \text{m. synchrone ou cc}$$

$$J_M = K_J \cdot d^5 \quad n = 4 \quad \text{m. réluctant ou asynchrone}$$

Nous admettons aussi que le rendement mécanique global est le même quel que soit le rapport de réduction choisi et qu'en plus celui-ci est le même quelle que soit la charge.

La consommation énergétique en régime permanent est donc égale quelles que soient les caractéristiques choisies. Seul donc nous intéresse le régime transitoire d'accélération.

La puissance de coupe P_c est spécifiée. Sont pris en considération pour ce choix les matériaux à usiner (k_s, k_c), les vitesses de coupe et la section maximale du copeau.

Soit " η_c " le rendement de la transmission (déjà défini),

$$\text{d'où} \quad P_m = \frac{P_c}{\eta_c}$$

La détermination de la puissance du moteur conduit à son choix et selon les catalogues à la valeur de " J_M ". Il est évident que le choix final est obtenu par itération.

Nous pouvons exprimer J_R en fonction de " J_M " par l'expression $J_M + J_R = (1 + \alpha) J_M$

" J_e " est déterminé soit par la géométrie de l'outil d'usinage monté sur la broche, soit par la géométrie des pièces à usiner si celles-ci sont fixées sur la broche. Ainsi " J_e " est variable et choisi près de sa valeur la plus grande.

Temps de démarrage - couple de démarrage :

$$T_D = \frac{\Omega_M}{M_M} (J_M + J_r + \frac{J_e}{r^2})$$

$$T_D = \frac{r \Omega_e}{M_M} (J_M + J_r + \frac{J_e}{r^2}) = \frac{\Omega_e}{M_M} \left[(J_M + J_r) r + \frac{J_e}{r} \right]$$

$$T_D \text{ sera minimum pour} \quad \frac{d T_D}{dt} = 0 = J_M + J_r - \frac{J_e}{r^2}$$

$$\text{et} \quad \frac{J_e}{r^2} = J_M + J_r = (1 + \alpha) J_M$$

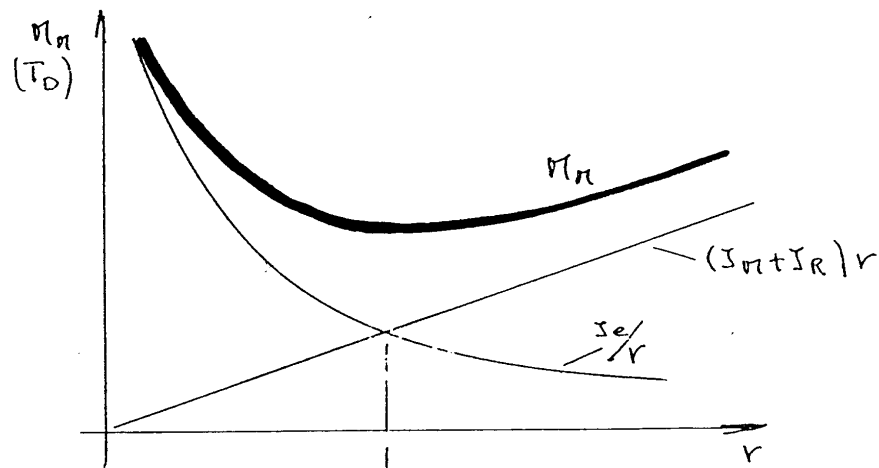
$$r^2 = \frac{J_e}{(1 + \alpha) J_M} ; \quad r = \sqrt{\frac{J_e}{(1 + \alpha) J_M}}$$

J'obtiendrais le même résultat si je calculais le couple minimum M_M .

L'expression de la fonction $M_M = f(r)$ est :

$$M_M = \frac{\Omega_e}{T_D} \left[(J_M + J_R) r + \frac{J_e}{r} \right]$$

Sa représentation est :



$$r = \sqrt{\frac{J_e}{(1 + \alpha) J_M}}$$

Ce choix conduit aussi à l'énergie de démarrage minimale puisque $M_{\min}$ pendant $T_{\min}$.

L'énergie consommée pendant le démarrage vaut :

$$E_D = \frac{J_{\text{tot}} \cdot \Omega^2 M}{2} = \frac{\Omega^2 M}{2} \left(J_M + J_R + \frac{J_e}{r^2} \right)$$

$$E_D = \frac{r^2 \Omega^2 e}{2} \left(J_M + J_R + \frac{J_e}{r^2} \right) = \frac{\Omega^2 e}{2} [(J_M + J_R) r^2 + J_e]$$

en remplaçant r par l'expression trouvée précédemment, on a :

$$E_D = \frac{\Omega^2 e}{2} (J_e + J_e) = 2 \left(\frac{J_e \Omega^2 e}{2} \right)$$

6 AXE : TRANSFERT DE POSITION [3]

Le choix d'un entraînement électrique ne peut pas être dissocié de ses périphériques:

- * la transmission, tournante ou linéaire;
- * l'alimentation;
- * la commande.

Lorsqu'un temps de transfert (temps de déplacement) est imposé pour une charge donnée, le choix du couple du moteur et du rapport de transmission correspondant constituent deux inconnues liées.

Si le moteur est connu a priori, il est possible de montrer que l'optimum satisfaisant la condition de transfert de position dans un temps donné correspond à la relation suivante :

$$r_{\text{opt}} = \sqrt{J_e / J_m}$$

J_m = inertie du moteur

J_e = inertie de l'organe entraîné.

Si cette relation est bien connue, elle ne correspond à aucune réalité pratique. En effet, pour un organe entraîné donné, le moteur n'est pas connu a priori. Le choix du moteur et celui de la transmission sont libres et à optimiser en fonction de plusieurs critères. Les paragraphes qui suivent décrivent une méthodologie générale d'approche.

6.1 Transfert de position

On associe un transfert de position à un profil de vitesse trapézoïdal (Fig. 1). L'accélération et la décélération s'effectuent à couple constant, correspondant aux limites du moteur et de l'alimentation. Le tronçon à vitesse constante correspond à la vitesse limite du moteur. Il est possible de montrer [1] que le bilan énergétique est optimum lorsque les temps respectifs d'accélération (T_a), à vitesse constante ($T_b - T_a$) et de freinage ($T_t - T_b$) sont égaux :

$T_a = T_t / 3 = \text{temps d'accélération}$

$T_t = \text{durée totale du transfert}$

$T_b = \text{instant de début du freinage}$

Dans ces conditions, les pertes du moteur sont minimales.

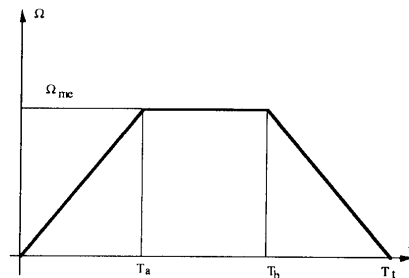


Fig. 1

Soit α_e l'angle total de déplacement (ou x_e le déplacement linéaire total) de l'organe entraîné.

Par intégration, on a les valeurs suivantes :

$$\alpha_e = 2 T_a \Omega_{me} = \frac{2}{3} T_t \Omega_{me}$$

$$(x_e = 2 T_a v_{me} = \frac{2}{3} T_t v_{me})$$

$$\Omega_{me} = \frac{3}{2} \frac{\alpha_e}{T_t} = \text{vitesse maximale}$$

$$(v_{me} = \frac{3}{2} \frac{x_e}{T_t})$$

6.2 - Equation de mouvement avec transmission

On définit le rapport de transmission pour un système tournant (linéaire) comme suit:

$$\begin{aligned}
 r &= \Omega_m / \Omega_e \quad [-] & (k = \Omega_m / v_e \text{ [rad/m]}) \\
 \Omega_m &= \text{vitesse du moteur} & \Omega_e (v_e) &= \text{vitesse de l'organe entraîné} \\
 J_e &= \text{inertie entraînée} \\
 J_e' &= \text{inertie rapportée au moteur} & (J_e' = m_e / k^2) \\
 &= J_e / r^2 & \\
 J_{\text{tot}} &= J_m + J_r + J_e / r^2 & (J_{\text{tot}} = J_m + J_r + m_e / k^2) \\
 J_r &= \text{inertie du réducteur}
 \end{aligned}$$

L'équation du mouvement devient :

$$\begin{aligned}
 J_{\text{tot}} d \Omega_m / dt &= M_m - M_f / r \\
 M_m &= \text{couple moteur} = M_0 = \text{couple maximum} \\
 M_f &= \text{couple de frottement de l'organe entraîné} \\
 \frac{d \Omega_m}{dt} &= r \frac{d \Omega_e}{dt} = r \frac{\Omega_{me}}{T_a} & \frac{d \Omega_m}{dt} &= k \frac{v_{me}}{T_a}
 \end{aligned}$$

D'où l'équation liant les principaux paramètres du transfert :

$$\begin{aligned}
 (J_m + J_r + J_e / r^2) r \Omega_{me} / T_a &= M_0 - M_f / r \\
 ((J_m + J_r + m_e / k^2) k v_{me} / T_a &= M_0 - F_f / k)
 \end{aligned}$$

L'équation ci-dessus établit la corrélation entre le couple du moteur et le temps de transfert souhaité ($T_t = 3 T_a$). Elle contient cependant une inconnue indésirable : l'inertie du moteur J_m , qui dépend du couple M_0 . L'objectif consiste à établir une corrélation entre couple et inertie.

6.3 - Couple en fonction des dimensions

6.3.1 - Moteur polarisé

En se basant sur les lois de similitude [2] on peut poser, en comparant deux moteurs de taille différente, caractérisés par les diamètres respectifs d' et d :

$$d' / d = d^*$$

Pour deux moteurs homothétiques, il est possible de définir la loi d'évolution des principaux paramètres. En se référant à l'annexe 1, on obtient pour le couple, en valeur relative :

$$M^* = d^{*3,5} \quad (\text{à échauffement constant})$$

En valeur absolue

$$M = k_{Mp} d^{3,5}$$

6.3.2- Moteur réluctant

Pour un moteur réluctant (ou un moteur asynchrone), ces mêmes lois deviennent :

$$d' / d = d^*$$

$$M^* = d^{*4} \text{ (à échauffement constant)}$$

En valeur absolue, on obtient :

$$M = k_{Mr} d^4$$

6.3.3 - Forme générale

En regroupant les deux résultats précédents, on peut poser :

$$M = k_M d^n$$

$n = 3,5$ ou 4 selon le type de moteur

6.4 Inertie en fonction des dimensions

Pour un cylindre massif, on a l'expression suivante pour l'inertie :

$$J_m = m \frac{d^2}{8} = \pi \frac{d^2}{4} l \gamma \frac{d^2}{32}$$

γ = masse spécifique [kg/m^3]

l = longueur = εd

$$J_m = \frac{\pi \gamma \varepsilon}{32} d^5 = k_J d^5$$

6.5 Corrélation couple-inertie

Partant de l'expression couple-diamètre, on peut écrire :

$$M = k_M d^n$$

$$d = (M / k_M)^{1/n}$$

En substituant dans l'expression de l'inertie, il vient :

$$J = k_J (M / k_M)^{5/n}$$

L'inertie peut ainsi s'exprimer en fonction du couple.

6.6 Relation couple - rapport de transmission

L'équation finale de la section 2 peut s'exprimer en fonction du couple et du rapport de transmission uniquement, grâce à la relation du paragraphe 3.3 :

$$[k_J (M_O / k_M)^{5/n} + J_r + J_e / r^2] r \Omega_{me} = (M_O - M_f / r) T_a$$

Pour un système entraîné linéaire :

$$[k_J (M_O / k_M)^{5/n} + J_r + J_e / k^2] k v_{me} = (M_O - F_f / k) T_a$$

Cette relation établit une corrélation entre le couple du moteur et le rapport de transmission. Si l'on tire l'expression du rapport de transmission en fonction du couple, on a :

$$\begin{aligned} J_r + k_J (M_O / k_M)^{5/n} &= J_{mr} (M_O) = J_{mr} \\ J_{mr} \Omega_{me} r^2 - M_O T_a r + J_e \Omega_{me} + M_f T_a &= 0 \end{aligned}$$

Deux solutions sont possibles :

$$r = \frac{M_O T_a \pm \sqrt{M_O^2 T_a^2 - 4 J_{mr} \Omega_{me} (J_e \Omega_{me} + M_f T_a)}}{2 J_{mr} \Omega_{me}}$$

Une solution existe à condition que l'expression sous la racine soit positive. Une valeur limite apparaît pour une racine nulle

$$M_O^2 T_a^2 - 4 [J_r + k_J (M_O / k_M)^{5/n}] (J_e \Omega_{me} + M_f T_a) \Omega_{me} = 0$$

Une valeur limite de M_O peut satisfaire l'équation ci-dessus, soit M_{olim} , à laquelle correspond un rapport de transmission limite :

$$r_{lim} = \frac{M_{olim} T_a}{2 J_{mr lim} \Omega_{me}}$$

Pour toute valeur $M_O > M_{olim}$, une solution existe. La valeur limite correspond donc au plus petit moteur possible.

Pour M_O quelconque, il existe deux valeurs du rapport r :

$$r_1 = \frac{M_O T_a + \sqrt{\dots}}{2 J_{mr} \Omega_{me}} \quad \text{et} \quad r_2 = \frac{M_O T_a - \sqrt{\dots}}{2 J_{mr} \Omega_{me}}$$

Seule la valeur r_2 présente un intérêt. En effet, l'énergie cinétique au démarrage est toujours inférieure pour le rapport r_2 :

$$W_{cin r_2} < W_{cin r_1}$$

L'énergie cinétique au démarrage a pour expression :

$$W_{cin} = \frac{1}{2} J_{tot} \Omega_{me}^2 = \frac{1}{2} [k_J (M_O / k_M)^{5/n} + J_r + J_e / r^2] r^2 \Omega_{me}^2$$

L'exemple traité est emprunté à une application d'entraînement linéaire pour une machine à poinçonner des tôles.

Masse entraînée	$m_e = 30 \text{ kg}$	
Course	$x_e = 50 \text{ mm}$	
Temps de transfert	$T_f = 0.25$	$T_a = 0.0667 \text{ s}$
Force de frottement	$F_f = 30 \text{ N}$	

La transmission est assurée par une vis à billes.

Deux cas sont considérés, pour un moteur de type synchrone auto-commuté à aimants permanents :

$M_0 = k_M d^{3.5}$	
$k_{M1} = 1.2 \cdot 10^5$	Moteur avec un couple volumique élevé
$k_{M2} = 6 \cdot 10^4$	Moteur avec un couple volumique moyen

Dans les deux cas, l'inertie de la transmission a été négligée. Le coefficient d'inertie vaut, pour les deux cas :

$$J = k_J d^5 \quad k_J = 768$$

6.7.1 Moteur à performances élevées

Pour ce moteur, on obtient les valeurs limites suivantes :

M_{olim}	$= 55.3 \text{ mNm}$	
k_{lim}	$= 7.22 \cdot 10^3$	correspondant à un pas de la vis de 0.87 mm
d_{lim}	$= 15.5 \text{ mm}$	
J_{mlim}	$= 6.8 \cdot 10^{-7} \text{ kg m}^2$	

Cette solution limite n'est pas acceptable, par suite d'une vitesse maximale de 25'800 t/min. La figure 2 présente le couple, la vitesse et le diamètre du rotor en fonction du pas de la vis (ou du rapport de transmission).

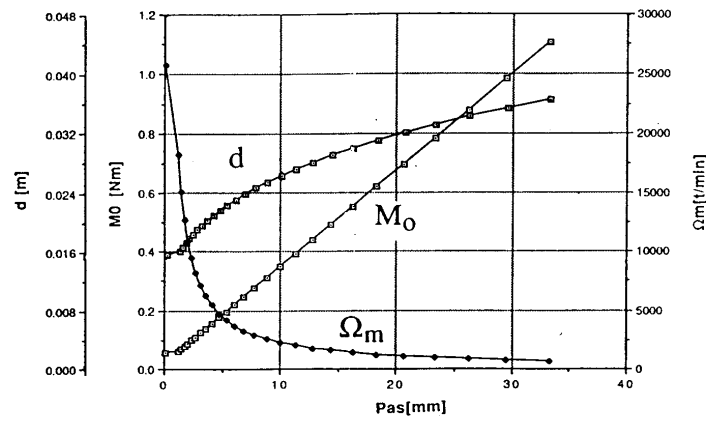


Figure 2

Couple de démarrage, diamètre d'alésage et vitesse maximale
en fonction du pas de la vis
 $k_M = 1.2 \cdot 10^5$

Si on limite la vitesse maximale à 6'000 t/min et le pas de la vis maximum à 15 mm, on obtient une solution comprise entre les deux limites suivantes :

- pas 4 mm $M_0 = 0.152 \text{ Nm}$ $\Omega_m \hat{=} 5'600 \text{ t/min}$
 $d = 21 \text{ mm}$ $J_m = 2.9 \cdot 10^{-6} \text{ kg m}^2$
 Energie au démarrage : 2.6 Joule
- pas 15 mm $M_0 = 0.510 \text{ Nm}$ $\Omega_m \hat{=} 1'500 \text{ t/min}$
 $d = 29.2 \text{ mm}$ $J_m = 1.65 \cdot 10^{-5} \text{ kg m}^2$
 Energie de démarrage : 2.3 Joule

La solution correspondant au pas de 4 mm est la plus intéressante en termes d'investissement (moteur plus petit)

6.7.2 - Moteur à performances moyennes

Les valeurs limites pour ce moteur sont :

$$\begin{aligned}
 M_{0\text{lim}} &= 313 \text{ mNm} \\
 k_{\text{lim}} &= 1.28 \cdot 10^3 \quad \text{correspondant à un pas de la vis de 4.93 mm} \\
 d_{\text{lim}} &= 31 \text{ mm} \\
 J_{m\text{lim}} &= 2.19 \cdot 10^{-5} \text{ kg m}^2 \quad \text{Energie au démarrage : 4.6 Joule}
 \end{aligned}$$

La vitesse maximale correspondante est de 4'570 t/min, valeur acceptable.

La figure 3 présente également les caractéristiques de couple, de vitesse et de diamètre en fonction du pas de la vis.

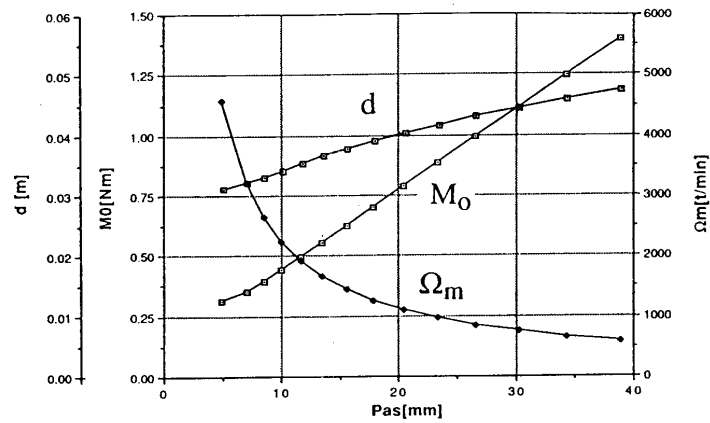


Fig. 3

Couple de démarrage, diamètre d'alésage et vitesse maximale en fonction du pas de la vis

$$k_M = 6 \cdot 10^4$$

Si le pas est également limité à 15 mm, les valeurs correspondantes deviennent :

- pas 15 mm $M_0 = 610 \text{ mNm}$ $\Omega_m \hat{=} 1'500 \text{ t/min}$
 $d = 37 \text{ mm}$ $J_m = 5.6 \cdot 10^{-5} \text{ kg m}^2$
 Energie au démarrage : 2.8 Joule

6.8 Conclusions

La méthodologie décrite présente l'avantage de permettre une analyse sans a priori de la solution optimale pour le choix d'un moteur et d'une transmission. S'il n'y a généralement pas d'optimum, il existe en revanche une solution la plus favorable compte tenu de contraintes telles que vitesse maximale, résolution, pas de vis, transmission limite, etc. La démarche illustre l'importance des performances du moteur (facteur k_m), associées au type de construction.

Cette méthodologie doit bien sûr encore être confrontée aux catalogues, qui discrétisent les réalisations.

6.9 Liste des symboles

d	diamètre	a	accélération
J	inertie	a	aimant
j	densité du courant	b	bobinage
k	coefficient	b	freinage
k	rapport de transmission tournant-linéaire	e	relatif à l'organe entraîné
l	longueur	f	de frottement
m	masse	J	d'inertie
n	exposant	lim	limite
r	rapport de transmission tournant-tournant	M	de couple
S	surface	m	moteur
t	temps	p	polarisé
T	instant	r	réluctant
ΔT	échauffement	f	de transfert
v	vitesse	o	à vitesse nulle
x	position, course	r	rapporté
W	énergie		
α	angle		
β	coefficient de convection		
γ	masse spécifique		
ε	rapport l/d		
Λ	perméance		
θ	potentiel magnétique		
Ω	vitesse angulaire		

65 Indices

6.10 Compléments

6.10.1 Moteur polarisé - lois de similitude

Le couple vaut :

$$M = \frac{d \Lambda_{ab}}{d\alpha} \theta_a \theta_b$$

Λ_{ab} = perméance mutuelle entre aimant et bobine

θ_a = potentiel de l'aimant

θ_b = potentiel de la bobine

$$\Lambda_{ab}^* = \left(\frac{\mu S}{l} \right)^* = d^*$$

$$\theta_a^* = (H_0 l_a)^* = H_0^* l_a^* = 1 \cdot d^* = d^*$$

$$\theta_b^* = (J S)^* = J^* d^{*2}$$

D'où :

$$M^* = J^* d^{*4}$$

A échauffement constant, selon l'annexe 3, on a :

$$J^* = 1 / \sqrt{d^*}$$

D'où :

$$M^* = d^{3,5}$$

En se référant à [3], le coefficient de proportionnalité entre couple et $d^{3,5}$ est donné en fonction des dispositions constructives :

$$M = k_{Mp} d^{3,5}$$

6.1 0.2 Moteur réluctant - lois de similitude

Le couple vaut :

$$M = \frac{1}{2} \frac{d \Lambda}{d \alpha} \theta_a \theta_b^2$$

Λ = perméance

θ_b = potentiel du bobinage

$$\Lambda^* = d^*$$

$$\theta_b^* = J^* d^{*2}$$

$$M^* = J^{*2} d^{*5}$$

A échauffement constant, selon l'annexe 3, on a :

$$J^* = 1 / \sqrt{d^*}$$

D'où :

$$M^* = d^{*4}$$

En se référant à [3], le détail du calcul du coefficient de proportionnalité est donné :

$$M^* = k_{Mr} d^4$$

6.10.3 Echauffement - lois de similitude

L'échauffement ΔT peut s'exprimer comme suit, en ne prenant en compte que la convection de surface :

$$\Delta T = \frac{\text{Pertes}}{\beta S_\beta}$$

$$\text{Pertes} = P_{\text{Joule}} = 3 J^2 V$$

V = volume de cuivre

β = coefficient de convection [$W / m^2 K$]

S_β = surface de convection

$$P_{J^*} = J^{*2} d^{*3}$$

$$\beta^* = 1$$

$$S_{\beta^*} = d^{*2}$$

$$\Delta T^* = J^{*2} d^*$$

Si l'on impose un échauffement indépendant de la taille (limite thermique des isolants), on a :

$$\Delta T^* = 1 = J^* \sqrt{d^*}$$

$$J^* = 1 / \sqrt{d^*}$$

7 . PREPARATION DES GAMMES D'OPERATIONS [18]

Selon les résultats des essais effectués à ce jour, il apparaît relativement clairement que le processus de fabrication qui conduit au coût minimal (principalement durée minimale), conduit également à une consommation d'énergie minimale et au meilleur rendement.

Il est évident que la réalisation de la fabrication d'une pièce peut suivre différents plans d'opérations avec différentes gammes d'opérations. La recherche du coût minimal dans le respect des tolérances de longueurs, de géométrie et d'état de surface de la pièce est le but constant.

De façon simplifiée, en respectant les conditions précédentes, faire travailler la machine, les outils et la pièce à leurs contraintes maximales admissibles avec une gamme d'opérations dont la durée est optimisée, conduit au but fixé : coût favorable, énergie consommée minimale et rendement optimal. Nous avons sous-entendu que le choix de la machine est cohérente par rapport à l'usinage à effectuer.

- Gammes des opérations

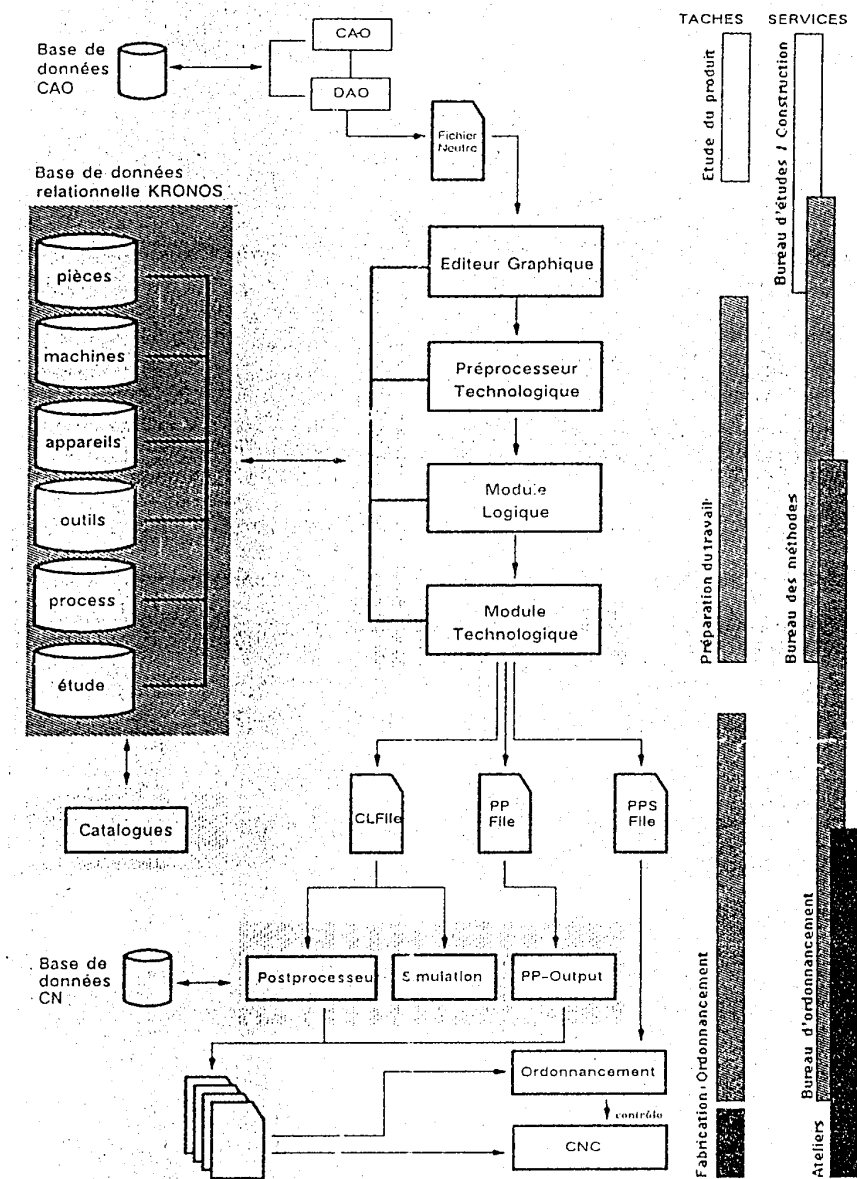
L'établissement d'une gamme est à chaque fois "l'invention d'un processus de fabrication". On serait tenté au départ de le poser en terme de transition de la pièce finie, mais on remarque vite que le "produit fini" est la gamme d'usinage; le cahier des charges que forment les performances du produit fini est le dessin de l'objet à usiner.

Actuellement l'établissement des gammes est encore fait en fonction de l'expérience professionnelle des "agents de méthode", aussi l'optimisation n'est pas systématique. La génération automatique des gammes de fabrication est un problème sur lequel les adeptes des "systèmes experts" et de "l'IA" se cassent le nez depuis trente ans environ.

L'IMECO/DME de l'EPFL et la société GROSSENbacher à Saint-Gall ont développé le système "KRONOS". C'est un système CAPP (computer Aided Process Planning) ou en français : conception assistée par ordinateur des gammes de fabrication. L'organisation de ce système est représentée à la Fig. 21.

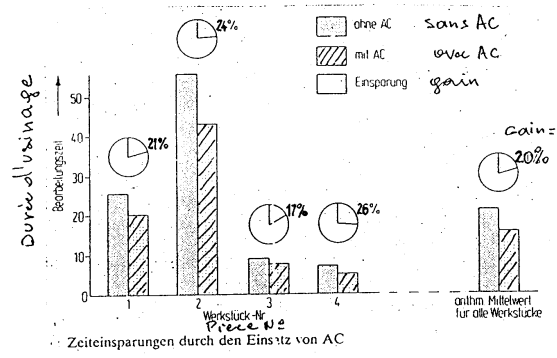
Dans le même sens, il y a dix à quinze ans déjà, les promoteurs des réglages adaptatifs (AC) et de la répartition automatique de la coupe, embarqués sur machines, pouvaient démontrer un gain d'instruction à la commande numérique d'environ 30 % et surtout un gain de temps d'exécution d'environ 20 %. [17] [Fig. 23 et 221.

Ces résultats devraient certainement être confirmés, voir améliorés, par l'emploi de "CAPP", tel KRONOS.



Organisation générale de Kronos.
(Document EPFL / Grossenbacher A.G., St-Gall)

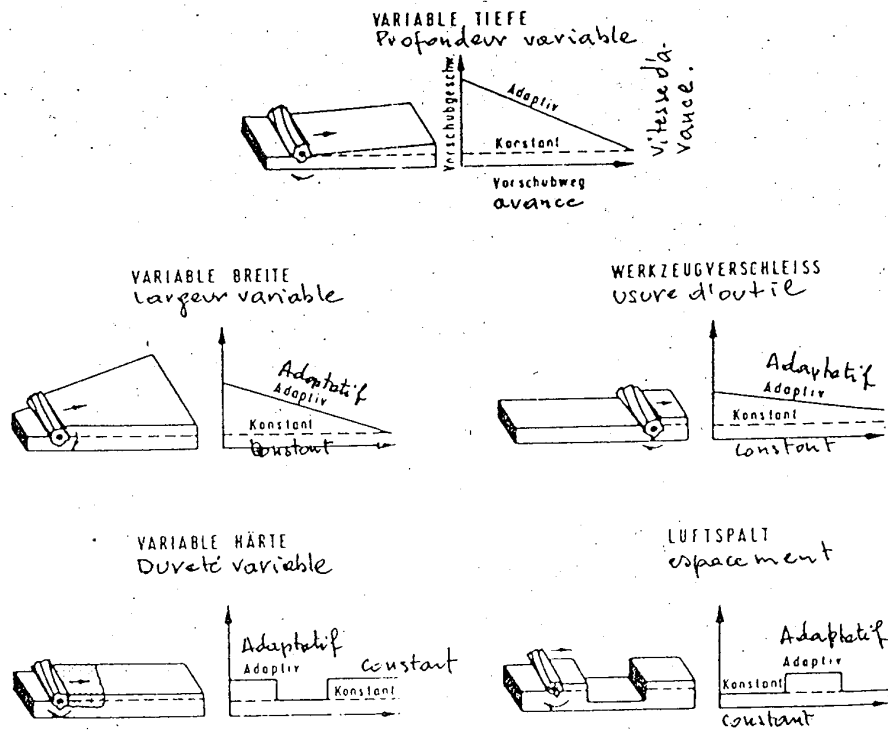
Figure 21



Gain de temps par l'utilisation de système AC

moyenne arithmétique par pièce

Figure 22



Änderung der Vorschubgeschwindigkeit in Abhängigkeit von Störeinflüssen

Variation de la vitesse d'avance en fonction de contraintes différentes

Figure 23

8 MACHINES-OUTILS MULTIBROCHE

Sur une machine-outil à plusieurs broches, celles-ci peuvent être dépendantes, semidépendantes ou indépendantes, par rapport aux paramètres des opérations d'usinage. (vitesse de coupe, avance, profondeur de coupe, combinaison matériau-outil, type d'usinage et qualité d'usinage).

Certainement les broches indépendantes présentent le maximum de flexibilité et de gain de temps. Elles sont probablement aussi les plus coûteuses.

Avec une machine mono-broche les opérations d'usinage sont exécutées les unes après les autres. Dans les cas des machines multibroches elles peuvent avoir lieu, si ce n'est complètement, au moins partiellement simultanément. Cela permet un meilleur dimensionnement des broches, une meilleure utilisation de la puissance installée, une durée de service raccourcie en conséquence des auxiliaires.

L'emploi de machines-outils multibroches devraient probablement permettre d'abaisser la part d'amortissement énergétique de 11 kWh/h à 5,5 kWh/h et de réduire les temps d'usinage d'au moins 50 %. [Fig.24]

Fall	Anzahl der W. zeuge	Drehzahl	Vorschub	VSS Bearb. v. streichen	Bearbeitungs-Beispiel	Zeitlicher Ablauf der Bearbeitung
1	$m = 1$					t_{s1}
2	$m > 1$	gleich	gleich	gleich		t_{s1}
3			gleich	ungleich		t_{s2}
4			ungleich	gleich		t_{s1}
5			ungleich	ungleich		t_{s2}
6			gleich	gleich		t_{s1}
7	in fester Relation zueinander $\frac{n_1}{n_2} = \frac{v_1}{v_2}$	gleich	ungleich	gleich		t_{s2}
8		ungleich	gleich	gleich		t_{s3}
9		ungleich	ungleich	gleich		t_{s1}
10	beliebig	gleich	gleich	gleich		t_{s1}
11		gleich	ungleich	gleich		t_{s2}
12		ungleich	gleich	gleich		t_{s1}
13		ungleich	ungleich	gleich		t_{s2}

Figure 24

9 ATELIER FLEXIBLE ET ORGANISATION "JUSTE-A-TEMPS" [11, 24, 25]

Nous ne pouvons pas entrer dans les détails de ce chapitre et nous renvoyons le lecteur aux références indiquées. Ces trois références sont récentes puisque publiées en 1991.

- Définition de l'atelier flexible

Un atelier flexible permet la production automatique de pièce de types divers, mais de même famille morphologique, et en quantité variable. Les opérateurs n'interviennent pas directement dans le processus de fabrication et limitent essentiellement leurs interventions à l'entretien; l'ordonnancement de la production est géré par un système informatique.

- Méthodes d'ordonnancement [25]

Trois méthodes sont connues et appliquées séparément ou en combinaison. Ce sont

- La méthode KANBAN-JIT (Just in Time)
- La méthode MRP-2 (Material Requirements Planning)
- La méthode HPP (Hierarchical Production Planning)

Ces méthodes d'organisation et de gestion sont fondées sur la recherche et l'élimination systématique de toute forme de gaspillage : gaspillage de temps, de pièces, d'énergie, de capacité et de potentialité dont dispose l'entreprise. Ces méthodes sont d'abord un état d'esprit et ce n'est pas pour rien que leur emploi et leur évolution nous viennent du JAPON. Elles devraient permettre de sensibiliser chaque participant aux avantages qui y sont associés.

- réduction des stocks des en-cours
- suppression des files d'attente aux postes de travail
- amélioration permanente de la qualité des produits et des processus de fabrication
- responsabilisation des ouvriers
- relation efficace de partenariat avec les fournisseurs
- forte diminution des pannes de machine par une maintenance préventive
- réduction des surfaces d'exploitation
- raccourcissement du cycle de production

Il n'est aujourd'hui pas possible de figurer les résultats énergétiques de l'application de ces organisations, mais force nous est de constater que dans le processus de fabrication considérée que d'abord la part de production effective constituant le chiffre d'affaire est en moyenne au moins 50 % plus faible que la production nette totale (en tenant compte des stocks finis et des en-cours), et qu'ensuite la part énergétique de la gestion correspond à une consommation spécifique d'environ 2'000 kJ/kg c par rapport à 500 kJ/kg c consacrés à la coupe par la machine.

V. ESTIMATION DU POTENTIEL D'ECONOMIE D'ENERGIE PRIMAIRE

1. Les informations et statistiques de la répartition des énergies sont globales et il est difficile d'en tirer des chiffres précis.
2. Pour y remédier nous nous sommes basés sur la statistique globale de l'Industrie Suisse des machines (VSM) pour la valeur absolue de la consommation électrique annuelle. Pour le reste, c'est -à-dire, pour nos calculs d'estimations nous prenons en compte les valeurs des consommations spécifiques que nous avons trouvées.

$$W_{sp} \text{ théorique de coupe} \hat{=} 123 \text{ kJ}_{pr}/\text{kg} \quad (\text{page 10})$$

$$W_{sp} \text{ consommée par le cycle de production} \hat{=} 1701 \text{ kJ}_{pr}/\text{kg} \quad (\text{page 50})$$

$$\text{La différence est de} \quad 1701 - 123 = 1578 \text{ kJ}_{pr}/\text{kg}$$

Ainsi le rendement théorique du cycle de production globale est de :

$$\frac{W_{sp} \text{ th. de coupe}}{W_{sp} \text{ cons. cycle prod.}} = \frac{123}{1701} = 0,073 \hat{=} 7,2 \%$$

3. Pour calculer nos estimations nous ne nous baserons que sur la consommation d'énergie électrique finale.

Le rendement de l'opération de production peut alors se calculer de la façon suivante :

$$W_{sp} \text{ de coupe} \hat{=} 256 \text{ kJ/kg c} \quad (\text{page 10})$$

$$W_{sp} \text{ consommée pendant le cycle de production} \hat{=} 1900 \text{ kJ/kg c} \quad (\text{page 48})$$

$$\eta_{production} = \frac{256}{1900} = 0,135 \hat{=} 13,5 \%$$

En tenant compte de l'efficacité de la coupe (page 23) on obtient effectivement :

$$13,5 \cdot 0,82 = 11 \%$$

Nous avons déterminé (page 12) que la consommation en Suisse pour le procédé d'usinage était de 4328 TJ.

Ainsi la consommation théorique minimale utile est de :

$$4328 \text{ TJ} \cdot 0,11 = 476 \text{ TJ}$$

La différence de $4328 - 476 = 3852 \text{ TJ}$ constituerait l'économie potentielle MAXIMALE d'énergie électrique finale.

Etablissons les consommations énergétiques par étape du procédé : (page 48)

- outil de coupe et Broche

210 kJ/kg c	}	$\Delta = 270 \text{ kJ/kg c}$
480 kJ/kg c		

- cycle de production unitaire

480 kJ/kg c	}	$\Delta = 800 \text{ kJ/kg c}$
1280 kJ/kg c		

- Production série (gestion)

1280 kJ/kg c	}	$\Delta = 620 \text{ kJ/kg c}$
1900 kJ/kg c		

- La répartition potentielle des gains possibles en fonction des éléments et considérations présentés dans les chapitres précédents peut être estimée à :

Conception outil et Broche	20 % $\hat{=}$ $\Delta = 216 \text{ kJ/kg c}$
Cycle sur machine (gammes)	35 % $\hat{=}$ $\Delta = 520 \text{ kJ/kg c}$
Production série (gestion)	40 % $\hat{=}$ $\Delta = 372 \text{ kJ/kg c}$

La nouvelle consommation spécifique serait alors de

$$210 + 216 + 520 + 372 = 1318 \text{ kJ/kg c}$$

et le nouveau $\eta_{\text{production}} = \frac{210}{1318} = 0,16 \hat{=} 16 \% \quad (11 \%)$

- Calcul de la valeur absolue du gain concernant la partie "outil de coupe et Broche" :

L'énergie consommée spécifique est de 270 kJ/kg c, correspondant à une valeur absolue de

$$\frac{4328 \text{ TJ} \cdot 270}{1900} = 615 \text{ TJ}$$

$$\frac{615 \cdot 216}{270} = 492 \text{ TJ}$$

$$\} \text{ gain } \hat{=} \Delta = 123 \text{ TJ } \hat{=} 34,2 \text{ GWh}$$

- Calcul des gains pour l'ensemble du processus :

1) Gain pour la méthode (JIT) devrait permettre une réduction de la production nette de 150 % à 120 % soit un gain énergétique de :

$$\begin{array}{lll} 150 \% & \text{--->} & 4328 \text{ TJ} \\ 120 \% & \text{--->} & 3462 \text{ TJ} \end{array}$$

- 2) Amélioration du rendement de production basé sur la nouvelle énergie utile 1) :

$$\text{Consommation utile : } 3462 \text{ TJ} \cdot 0,11 = 380 \text{ TJ}$$

Le nouveau rendement étant de 16 % au lieu de 11 % on obtient la consommation totale par

$$\frac{380 \text{ TJ}}{0,16} = 2375 \text{ TJ} \quad \text{au lieu de} \quad 3462 \text{ TJ} \quad \text{ou} \quad 4328 \text{ TJ}$$

- 3) L'économie potentielle devient alors :

Energie tot. actuelle - nouvelle consommation 1) + 2) :

$$\begin{aligned} 4328 - 2375 &= 1953 \text{ TJ} \\ &\hat{=} \underline{542,5 \text{ GWh}_{\text{finale}}} \end{aligned}$$

- Le calcul de l'énergie installée (primaire) est de :

$$\frac{542,5}{0,52} = 1043 \text{ GWh}_{\text{pr}}$$

et la puissance installée équivalente pour des consommations par 1 et 2 équipes de travail est de

$$\frac{1043000 \text{ MWh}}{1728} = \underline{604 \text{ MW}_{\text{pr}}}$$

et

$$\frac{1043000 \text{ MWh}}{3456} = \underline{302 \text{ MW}_{\text{pr}}}$$

4. Détermination du niveau d'investissement :

Rappel des chiffres :

- Gain "outil de coupe et Broche" :	34,2 GWh
- Gain "Gestion production" :	508,3 GWh
Total	542,5 GWh

Les économies annuelles possibles sont :

$$34,2 \text{ GWh} \hat{=} 34,2 \cdot 10^6 \text{ kWh} \cdot 0,12 \text{ Fr/kWh} = 4,14 \cdot 10^6 \text{ Frs}$$

$$\text{et } 508,3 \text{ GWh} \hat{=} 508,3 \cdot 10^6 \text{ kWh} \cdot 0,12 \text{ Fr/kWh} = 60,99 \cdot 10^6 \text{ Frs}$$

Ainsi "l'incentive" ou stimulant indirect pour les constructeurs suisses serait de 4,14 millions de francs par an.

Si l'on rapporte ce chiffre à la valeur du chiffre d'affaire de la branche "Construction de machines-outils" soit Frs. 4'178 millions, on trouve :

$$\frac{4,14}{4178} = 0,001 \hat{=} 0,1 \%$$

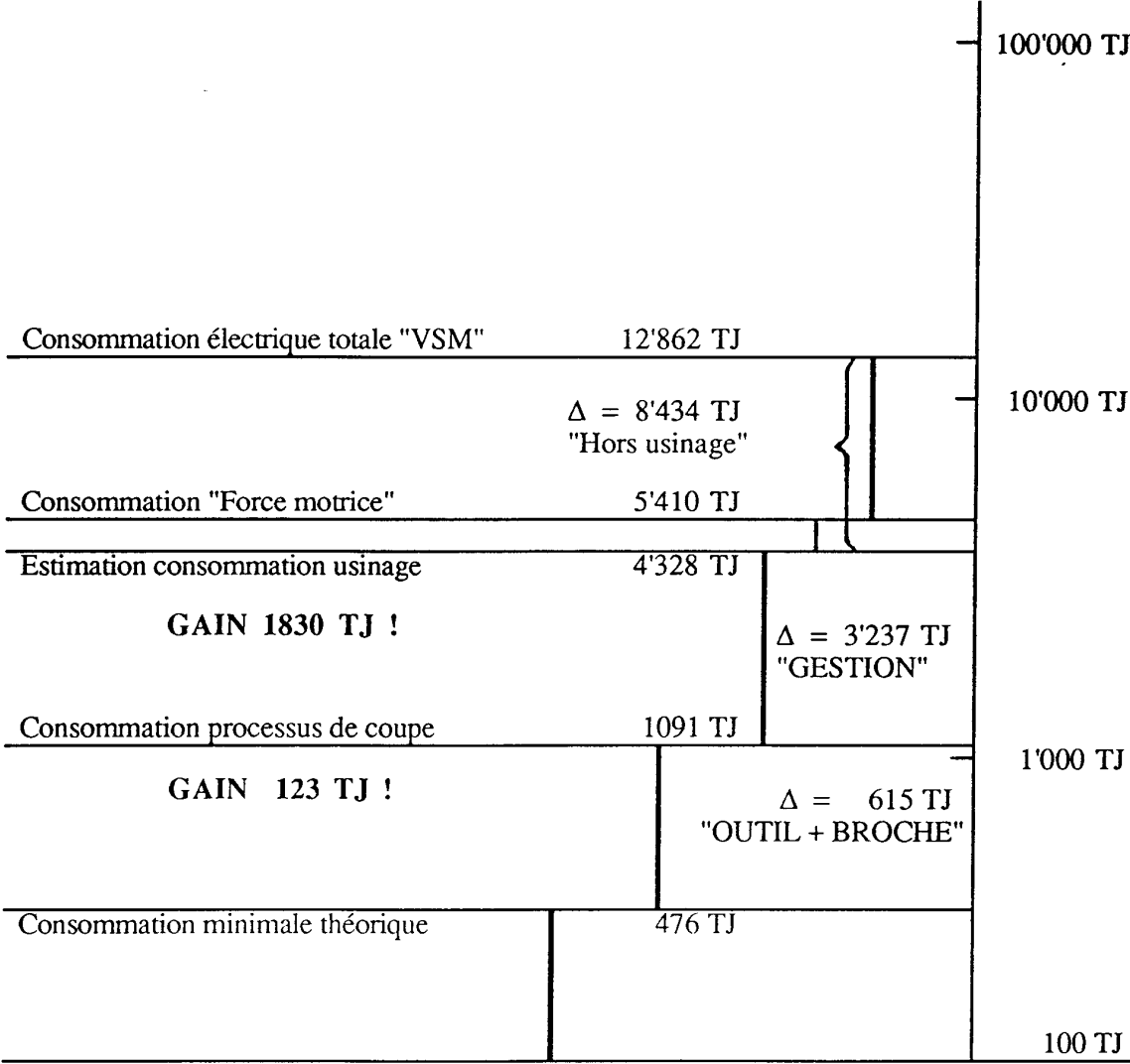
Il en est différemment pour l'ensemble de la branche considérée du point de vue utilisateur. Dans ce cas "l'incentive" ou stimulant devient :

$61 \cdot 10^6 \text{ Frs}$	pour un amortissement sur 1 an, et
$122 \cdot 10^6 \text{ Frs}$	pour un amortissement sur 2 ans, et
$152,5 \cdot 10^6 \text{ Frs}$	pour un amortissement sur 2,5 ans.

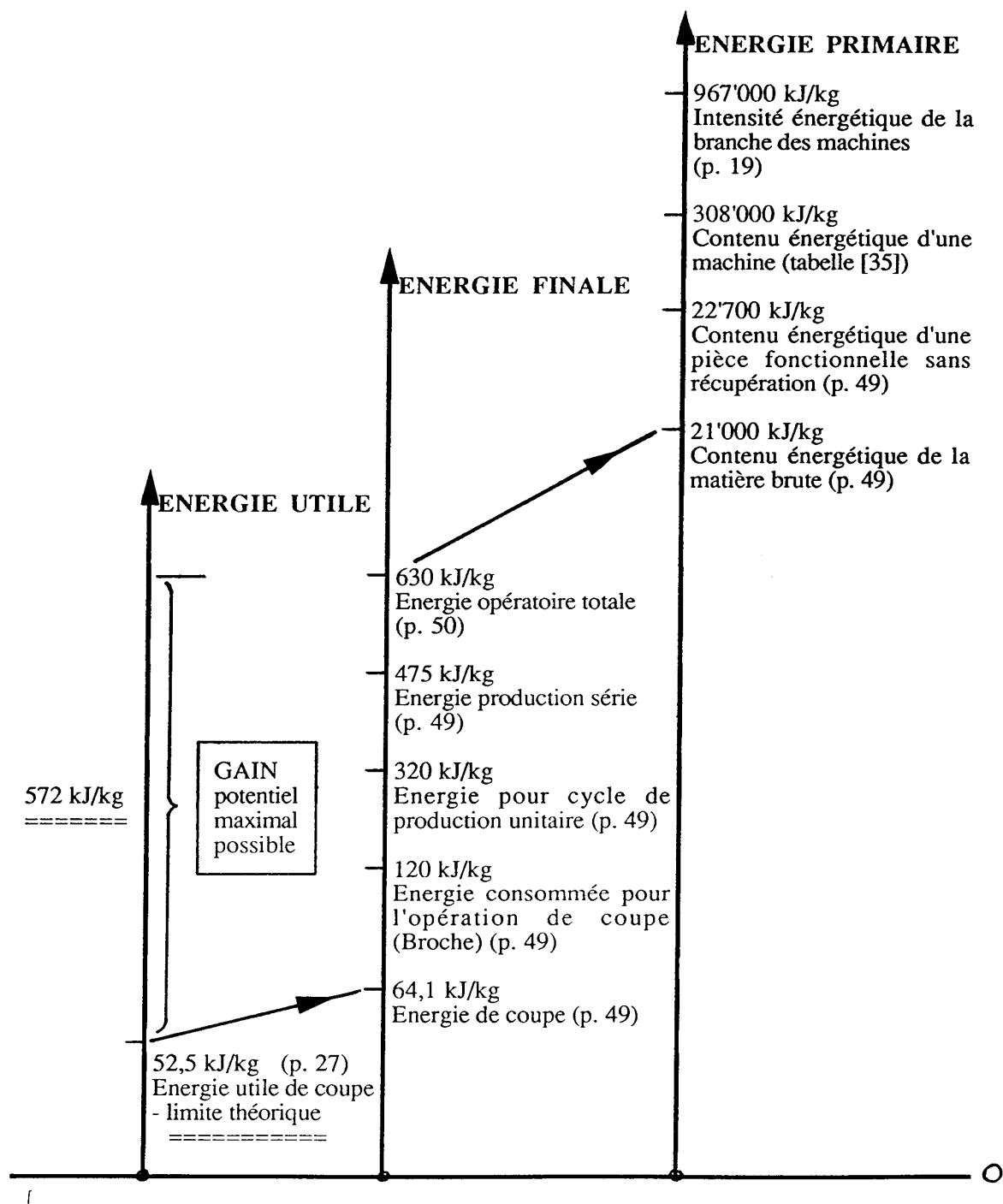
Si l'on admet que l'effort pourrait être fait par les 50 entreprises les plus importantes du "VSM", cela représenterait pour chacune d'elle un investissement de l'ordre de :

$$\frac{152,5 \cdot 10^6}{50} = 3,052 \cdot 10^6 \text{ Frs} \quad \text{pour un "pay back" de 2,5 ans}$$

Il nous paraît intéressant de porter ce chiffre à la connaissance des entreprises du VSM.



ECHELLE DES ENERGIES SPECIFIQUES pour chaque étape du processus de fabrication mécanique



VI. CONCLUSIONS

VALEURS ECONOMIQUES :

1. - Coût énergétique électrique USINAGE :

$$4328 \text{ TJ} \hat{=} 1,2 \cdot 10^9 \text{ kWh à } 0,12 \text{ Fr/kWh} = \underline{144 \cdot 10^6 \text{ Frs}}$$

- chiffre d'affaire ou coût USINAGE : $5,5 \cdot 10^9 \text{ Frs}$ (estimé, page 3)
- rapport $\frac{\text{coût électricité usinage}}{\text{coût usinage}} = \frac{144 \cdot 10^6}{5500 \cdot 10^6} = 0,0262 \hat{=} \underline{2,62 \%}$

2. - Coût énergétique "électricité" de la branche (VSM) :

$$12'862 \text{ TJ} \hat{=} 3,57 \text{ TJ} \hat{=} 3,57 \cdot 10^9 \text{ kWh à } 0,12 \text{ Fr/kWh} = \underline{428,4 \cdot 10^6 \text{ Frs}}$$

- chiffre d'affaire de la branche (VSM) : $43,6 \cdot 10^9 \text{ Frs}$
- rapport $\frac{\text{coût électricité total}}{\text{ch. d'affaire "branche"}} = \frac{428,4 \cdot 10^6}{43'600 \cdot 10^6} = 0,0098 \hat{=} \underline{0,98 \%}$

QUANTIFICATION DES ECONOMIES

- 1. Conception (Broche + technique de coupe) = 123 TJ
- 2. Gestion usinage = 1830 TJ

REFLEXIONS

Comme nous l'avons mentionné en page 12, dans le système économique actuel, les considérations énergétiques ne peuvent être une motivation suffisante d'utilisation rationnelle de l'électricité, même si en chiffre absolu cela représente des coûts d'environ 144 Millions de Frs. pour l'usinage et 428 millions de Frs. pour l'ensemble de la branche, mais seulement 2,62 et 0,98 % en valeur relative.

Cependant les contraintes des coûts de production sont inéluctables et conduiront, comme ils l'ont déjà fait jusqu'à présent, à une réduction des temps d'usinage et de stockage etc. et par là même à une économie d'énergie électrique.

Les effets les plus importants d'utilisation rationnelle de l'électricité se feront dans la partie "gestion" de la production. Cette partie comprend la mise en place d'ateliers flexibles, la conception de machines avec des fonctions complémentaires (page 3), l'ordonnancement selon les méthodes (JIT, MPR-2, etc.) ainsi que le travail en 2 équipes ou robotisé (probablement que la 3ème équipe ne sera pas nécessaire).

Il est évident que ces transformations de structures vont se faire sur 10 à 15 ans parcequ'il faut tenir compte des moyens en place et aussi de la nouvelle situation économique-sociale (transfert et suppression de places de travail) que cela entraînera et qu'il faut solutionner en parallèle.

Le secteur secondaire, générateur de richesse par excellence, sera conduit inexorablement dans cette restructuration et l'utilisation rationnelle de l'électricité en sera un sous-produit.

VII. LISTE DES REFERENCES

- [1] Werkzeuge und Werkzeugmaschinen, D.H. Bruins. Carl Hanser Verl., 1973.
- [2] Cours du Prof. Pruvot, Comportement dynamique des broches. EPFL, 1989
- [31] Cours du Prof. Jufer, Conversion électromécanique. EPFL, 1990.
- [4] Der Energiebedarf bei trennenden Fertigungsverfahren, Dr. Ing. R. Reeber. Werkstatt und Betrieb 1 1 3, 1980.
- [5] The minimum Energy Principle for the cutting process in Theory and Experiment, J.H. Dantzenberg, P.C. Veenstre et A.C.H. Van der Wolf. Annals of CIRP 1981.
- [6] Energétique Industrielle, R. Le Goff. Tech. et Doc., 1988.
- [7] The impact of Engineering Materials on the Developpment of Fabrication Process, Janet Peklenik. Annals of CIRP, 1982.
- [8] NC Machine Tools as Electric Energy Users, G.F. Micheletti. Annals of CIRP, 1981.
- [9] Energy Savings by proper Machine Tools Management, R., Ipolito. MM 79.
- [10] CIM - Computer Integrated Manufacturing, Prof. Dr. Ing. G. Steinmetz. München, VDI-Berichte.
- [11] Modèles mathématiques pour la gestion efficace des ateliers flexibles, Dr. M. Widmer. PPR, 199 1.
- [12] Manufacturing and Human Labor as Information Processes, R.V. Ayres. Int. Inst. for Applied Syst. Anal., 1987.
- [13] Possibility for Substitution between Energy, Time and Information, Daniel Spreng, Prof. ETH. 1991.
- [14] Net Energy Analysis, Daniel Spreng. Praeger-, 1988.
- [15] Marché Suisse des Machines, Machines du futur, Futur des machines, Pierre Pahud. 1988.
- [16] New method measuring and calculating the energy efficiency, cutting torque and cutting Force, Ji Chuang. Machines Tools, 1988.
- [17] Optimierung der Fertigung Prozesses. Pi-of. Ing. Stute. Carl Hanser Verl., 1978.
- [18] Le CFAO / l'intelligence synthétique, Prof. Pruvot, EPFL. Marché suisse des machines, 1991.
- [19] Automatic, computerized optimization of multispindle Drilling with probalistic Tool life, D. Batva.
- [20] Schnittwertermittlung bei simultanen Mehrwerkzeugbearbeitung, W. Eversheim, D. Pfan. Annals of CIRP, 1975.
- [21] Energy conservation in the Metalworking Industry, Th. G. Byrer. SME, Int. tool and Eng. conf., 1975.

- [22] A search for new manufacturing Process, P. Rosenthal, M.T. McAdams. Journal of Eng. for Industry, 1964.
- [23] Problems of the thermodynamics of contact processes and Wear of cutting tool in machining of Metals, F. Ya. Yakubor. 1984.
- [24] Le "Juste-à-temps" Walter Goddard. Ed. du Moniteur 1990.
- [25] Systèmes de gestion industrielle, Yves Rossier. PPR, 1991.
- [26] Metal cutting, E.M. Trent. Butterworths, 1984.
- [27] VSM "Panorama" 1990.
- [28] Maîtrise de l'énergie dans les industries mécaniques (Agence française pour la maîtrise de l'énergie). 1990.
- [29] Entraînements électriques, Prof. M. Jufer. Cours EPFL, 1989.
- [30] Documents de calcul des moteurs /MAXON MOTOR.
- [31] Some Design measures to minimize the Electric Energy consumption of Machine-Tools, A. de Filippi. Proceedings of the 4th Conf. on Prod. Eng. Tokyo, 1980.
- [32] Energy, materials and manning, W.O. Alexander. Elsevier Publ. Comp., 1982.
- [33] CIM, La vitesse de croisière, Rapport 199 1.
- [34] A statistical analysis of the cutting System based on an energy principle. J. Peklenik, T. Rosedale. University of Birmingham, 1967.
- [35] Thèse EPFL N° 623, N. A. Kohler, 1986
- [36] Mehr als eine Ansicht, Bulletin ASE/UCS 82, Prof. Dr. D. Spreng, 1991

VIII. LISTE DES SYMBOLES UTILISES

E_p	=	Energie primaire (électrique)
E_f	=	Energie finale (électrique)
$E_{a.c.i}$	=	Part énergétique d'amortissement du capital des équipements immobilisés
K_m	=	masse de la structure technique considérée (machine)
$\bar{Z}$	=	facteur tenant compte de la durée de fonctionnement de la machine
N	=	nombre d'années
CE_{ki}	=	contenu énergétique spécifique de K_m initial
CE_{kf}	=	contenu énergétique spécifique de K_m final
W_c	=	Energie de coupe
W_{sp}	=	Energie spécifique de coupe
k_c	=	Force spécifique de coupe
CE_M	=	contenu énergétique spécifique des matières premières (brutes)
CE_p	=	contenu énergétique spécifique des produits utiles
CE_r	=	contenu énergétique spécifique des rejets
$\dot{M}, \dot{P}, \dot{R}$	=	flux annuels de matière première, produits utiles et rejets
ϕ_{ws}	=	flux de chaleur vers la pièce
ϕ_u	=	flux de chaleur vers l'environnement
ϕ_{sp}	=	flux de chaleur vers les copeaux
ϕ_{wz}	=	flux de chaleur vers l'outil
$W_{sp\ eff}$	=	Energie spécifique de coupe effective (copeaux)
v	=	vitesse de coupe
s	=	avance en mm/révolution
a	=	profondeur de passe en mm
Vol	=	volume des copeaux
F_s	=	Force de cisaillement
A_s	=	section de cisaillement
k_s	=	Force spécifique de cisaillement
S_N	=	glissement nominal à la fréquence maximale
α	=	$R_{iN}/U_N = R_{iN}/(k_{\Omega})$

IX.ANNEXES

ANNEXE 1

COMPLEMENT RELATIF AUX ENTRAINEMENTS

1 . CYCLE COMPLET

- Pour un cycle complet, le bilan énergétique est donné par la relation suivante :

$$\begin{aligned}
 W_{\text{réseau}} &= \int_{t_i}^{t_f} U \cdot I \cdot dt = \\
 &= \int_{t_i}^{t_1} P_{\text{acc.}} dt + \int_{t_1}^{t_2} P_{\text{perm.}} dt + \int_{t_2}^{t_3} P_{\text{ch.rég.}} dt + \int_{t_3}^{t_f} P_{\text{déc.}} dt
 \end{aligned}$$

- Le rendement énergétique pour un cycle est :

$$\eta_{\text{production}} = \frac{W_{\text{utile}}}{W_{\text{réseau}}}$$

dans le cas de l'usinage par enlèvement de copeaux on a :

$$\eta_{\text{production}} = \frac{k_c \cdot \text{Vol.copeaux}}{W_{\text{réseau}}}$$

$$(1) \quad \text{Broche : } \eta_{\text{production}} = \frac{k_c \cdot \text{Vol.copeaux}}{W_{\text{réseau}}}$$

$$(2) \quad \text{Axe : en général } \eta_{\text{production}} = 0$$

2. PHASES DE FONCTIONNEMENT

Masse en rotation ou en translation

2. 1. Accélération

Soit : J_m = Inertie du moteur

J_r = Inertie du réducteur ou de la transmission

J_e = Inertie de la charge entraînée (outil ou pièce)

m_e = masse entraînée

$r = \frac{\Omega_m}{\Omega_e}$ = rapport de transmission (rotatif)

$k = \frac{\Omega_m}{v_e}$ = rapport de transmission (linéaire)

M_s = couple de charge constant dû à un frottement sec ou/et à une charge constante

F_s = force de la charge constante dû à un frottement sec ou/et à une charge constante

M_v = couple de frottement visqueux ($M_v = \xi \Omega_e$)

F_v = force de frottement visqueux ($F_v = \psi v_e$)

ϵ_d = accélération angulaire

α_d = accélération linéaire

2.1.1 Sans frottement :

$$\text{- rotation : } W_{\text{cin}} = \frac{1}{2} [(J_m + J_r) r^2 + J_e] \Omega_e^2$$

$$\text{ou } W_{\text{cin}} = \frac{1}{2} \left[(J_m + J_r) + \frac{J_e}{r^2} \right] \Omega_m^2$$

$$\text{- translation : } W_{\text{cin}} = \frac{1}{2} [(J_m + J_r) k^2 + m_e] v_e^2$$

$$\text{ou } W_{\text{cin}} = \frac{1}{2} \left[(J_m + J_r) + \frac{m_e}{k^2} \right] \Omega_m^2$$

2.1.2 Avec frottement :

Soit : Ω_{es} et v_{es} = vitesse stabilisée

$$\Omega_{es} = \frac{rM_o - M_s}{\frac{r^2 M_o}{\Omega_o} + \xi} \quad \text{et} \quad v_{es} = \frac{kM_o - F_s}{\frac{k^2 M_o}{\Omega_o} + \psi}$$

ε_d et α_d = accélération à l'enclenchement

$$\text{- Rotation : } W_{cin} = \frac{1}{2} \left[(J_m + J_r) r^2 + J_c + \frac{m_s + M_v}{\varepsilon_d} \right] \Omega_{es}^2$$

$$\text{- Translation : } W_{cin} = \frac{1}{2} \left[(J_m + J_r) + \frac{m_c}{k^2} + \frac{F_s + F_v}{\alpha_d} \right] k^2 v_{es}^2$$

2.2 Régime permanent

2.2 Régime permanent (Ω_{es} et/ou v_{es} = cte)

$$\text{- Rotation : } W_{perm} = \int_{t_i}^{t_f} (M_s + M_v) \Omega_{es} \cdot dt = (M_s + M_v) \Omega_{es} \cdot t$$

$$\text{- Translation : } W_{perm} = \int_{t_i}^{t_f} (F_s + F_v) v_{es} \cdot dt = (F_s + F_v) v_{es} \cdot t$$

2.3 Changement de régime

$$\text{2.3 Changement de régime} \quad (\Omega_2 - \Omega_1) = \pm \Omega'_{es}$$

$$(v_2 - v_1) = \pm v'_{es}$$

$$\text{- Rotation : } W_{ch.r.\oplus} = \frac{1}{2} \left[(J_m + J_r) r^2 + J_c + \frac{M'_s + M_v}{\varepsilon'_d} \right] \Omega'^2_{es}$$

$$\text{et} \quad W_{ch.r.\ominus} = \frac{1}{2} \left[(J_m + J_r) r^2 + J_c - \frac{M'_s + M_v}{\varepsilon'_d} \right] \Omega'^2_{es}$$

$$\text{- Translation : } W_{ch.r.\oplus} = \frac{1}{2} \left[(J_m + J_r) + \frac{m_c}{k^2} + \frac{F'_s + F_v}{\alpha'_d} \right] k^2 v'^2_{es}$$

$$\text{et} \quad W_{ch.r.\ominus} = \frac{1}{2} \left[(J_m + J_r) + \frac{m_c}{k^2} - \frac{F'_s + F_v}{\alpha'_d} \right] k^2 v'^2_{es}$$

2.4 Décélération - arrêt

2.4.1 A rrêt

L'énergie cinétique est dissipée par les frottements et par M_e et/ou F_e si $\neq 0$.

2.4.2 Freinage

L'énergie de freinage à fournir est égale à l'énergie cinétique moins les pertes par frottement et la charge si M_e et/ou $F_e \neq 0$.

- Rotation :
$$W_{\text{freinage}} = \frac{1}{2} \left[(J_m + J_r)r^2 + J_e + \frac{M''_s + M_v}{\varepsilon''_d} \right] \Omega'^2_{es}$$
- Translation :
$$W_{\text{freinage}} = \frac{1}{2} \left[(J_m + J_r)r^2 + \frac{m_e}{k^2} + \frac{F''_s + F_v}{\alpha''_d} \right] k^2 v'^2_{es}$$

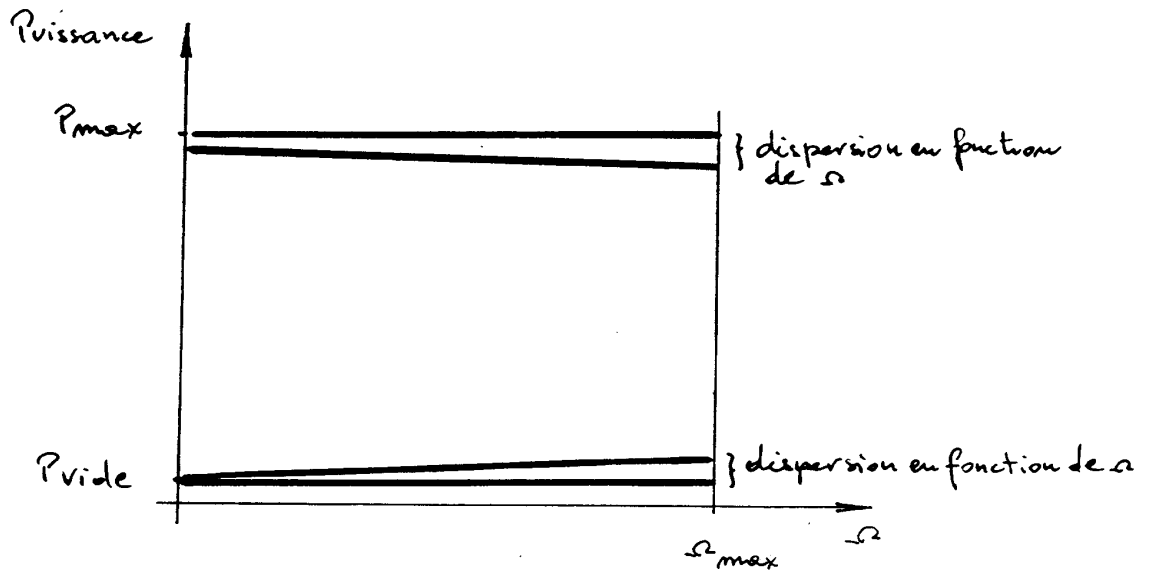
2.4.3 Récupération

C'est tout ou partie de l'énergie précédente qui peut être récupérée.

3. CARACTERISTIQUES DES CHARGES CONSIDEREES "BROCHE ET AXE"

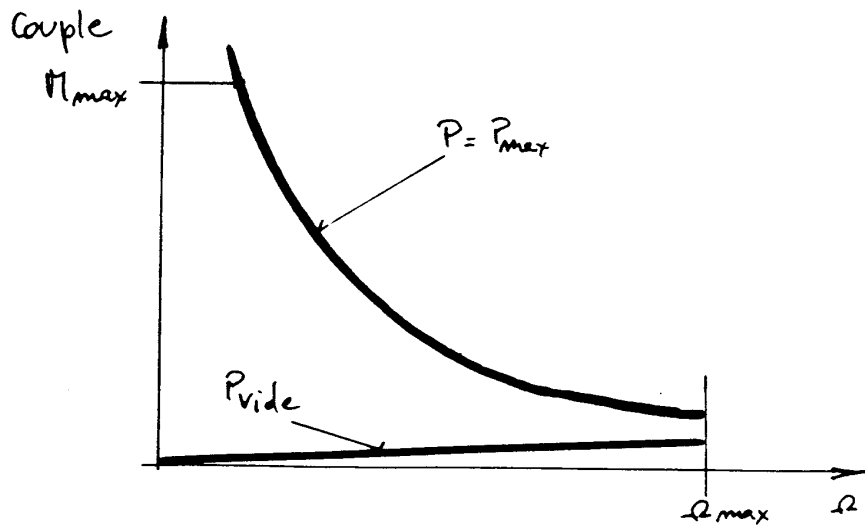
3.1 Broche

Les caractéristiques sont les suivantes :



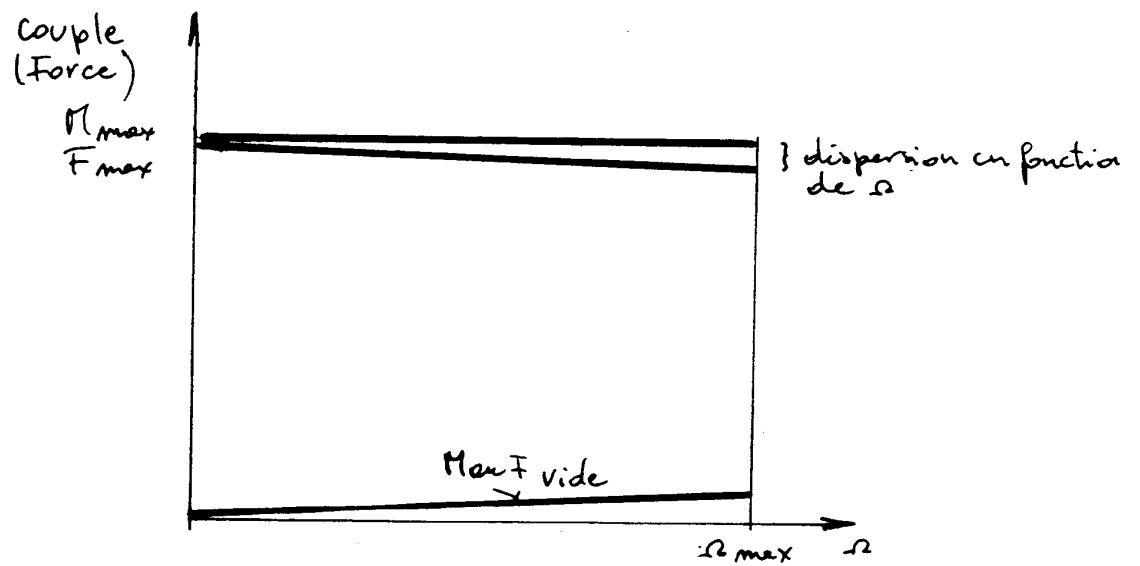
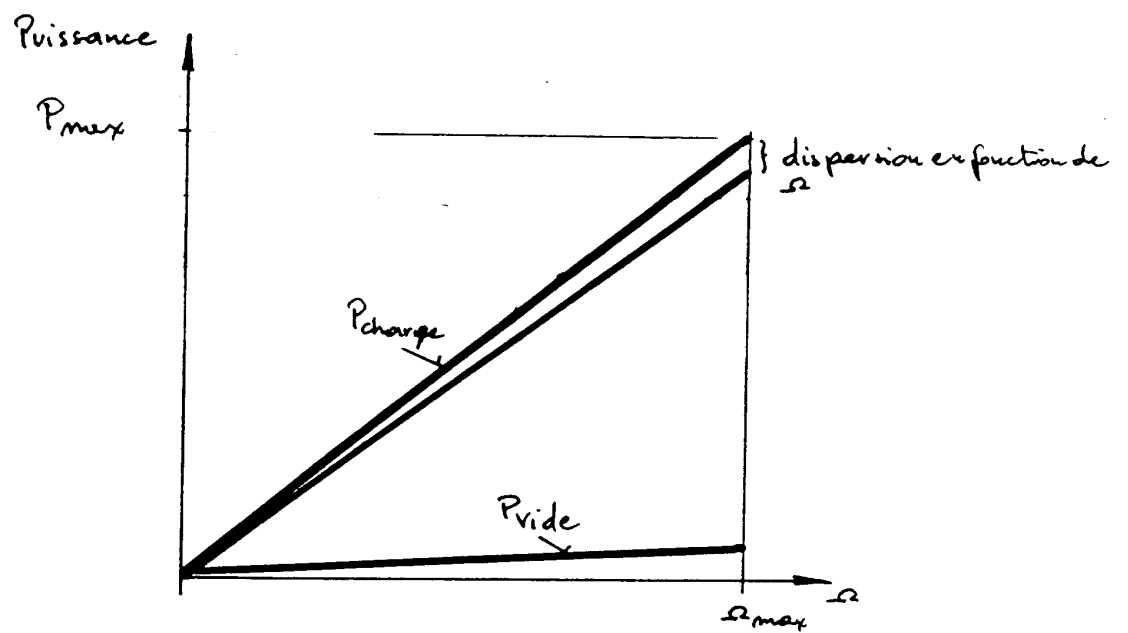
$$P_{\text{vide}} = (M_s + M_v) \Omega$$

$$P_{\text{max}} = P_N + \text{Pertes} = k c v \cdot a \cdot s + P_{\text{vide}} \text{ const.}$$



$$M_{\text{vide}} = \frac{P_{\text{vide}}}{\Omega}$$

$$M_{\text{max}} = \frac{P_N + \text{Pertes}}{\Omega_{\min}} = \frac{k c \cdot \Omega_{\max} \cdot a \cdot s}{\Omega_{\min}} + \frac{M'_s}{\Omega_{\min}} = k c \cdot \Omega_{\max} \cdot a \cdot s + M'_s$$



4 . RECAPITULATION DES PERTES D'UN ENTRAINEMENT ELECTRIQUE

4.1

Nous avons déterminé (page 64) que le gain spécifique pour l'opération de coupe est de :
270 kJ/kgc correspondant en valeur absolue à

$$123 \text{ TJ} \hat{=} 34,2 \text{ GWh}$$

4.2

Nous avons défini en annexe 1 (page 82) les énergies intervenant dans le cycle complet d'une opération de coupe. Elles sont :

$$W_{\text{réseau}} = \int_{t_i}^{t_f} U \cdot I \cdot dt = \int_{t_i}^{t_1} P_{\text{acc.}} dt + \int_{t_1}^{t_2} P_{\text{perm.}} dt + \int_{t_2}^{t_3} P_{\text{ch.rég.}} dt + \int_{t_3}^{t_f} P_{\text{perm.}} dt$$

Chacune des puissances intervenantes sont énumérées dans l'annexe 1.

4.3

Nous avons aussi trouvé que le rendement de coupe exprimé en énergie spécifique est le suivant :

$$\eta_{\text{coupe}} = \frac{210 \text{ kJ/kgc}}{480 \text{ kJ/kgc}} = 0,4375 \hat{=} 43,75 \%$$

4.4.

Le bilan des pertes peut s'établir de la façon suivante :

$$\int_{t_i}^{t_f} P_{\text{acc.}} dt$$

4.4.1

Pour des opérations simples cette énergie est de l'ordre de 1 à 2 % de l'énergie totale de coupe.
Pour des opérations de "copiage" elle peut être d'environ 10 %.

4.4.2

Les différentes valeurs de l'énergie cinétiques des moteurs sont données dans l'annexe 2.

Pour un moteur de l'ordre de 11 kw, cette énergie vaut 0,6 kJ.

La valeur de J_c étant spécifiée par la conception, il y a lieu de choisir judicieusement le rapport de transmission.

$$\int_{t_1}^{t_2} P_{\text{perm.}} dt$$

4.4.3

Ce régime de fonctionnement capitalise la majorité des pertes (à juste titre !)

Ces pertes représentent en valeur relative par rapport à la puissance nominale du moteur les niveaux suivants :

- Armoire électrique = 1 %
- Pertes alimentation et réglage "convertisseur" # 3 à 5 %
- Pertes dans les câbles # 5 % en moyenne!
(fonction de la longueur et du choix de la section)
- Pertes du moteur : 10 à 15 %
- Pertes de la transmission 5 à 8 %

Le total des pertes en "régime permanent" est de 24 à 34 %

$$\frac{\int_{t_2}^{t_3} P_{\text{ch.rég.}} dt}{\quad} \quad 4.4.4 \quad \text{Cette énergie devrait en général être une fraction de l'énergie d'accélération}$$

$$\frac{\int_{t_3}^{t_f} P_{\text{déc.}} dt}{\quad} \quad 4.4.5 \quad \text{Cette énergie devrait également être une fraction de l'énergie d'accélération}$$

5 .

Ainsi la répartition de l'énergie consommée pendant l'opération de coupe se répartit en 44 % d'énergie utile et 56 % de pertes, dont 4 à 6 % pour les régimes transitoires. Le solde des pertes se répartit proportionnellement aux valeurs des rendements des puissances instantanées, soit :

env. 8 11 15 8	pour l'efficacité de coupe pour l'armoire, le convertisseur, les câbles pour le moteur pour la transmission	
42	≐	270 kJ/kgc
		≐
		34,2 GWh

Ainsi le moteur représente dans cette répartition la valeur la plus élevée. Il faut dire que c'est "lui" le convertisseur d'énergie !!

RECUPERATION DE LA CHALEUR DEGAGEE PAR LES MACHINES-OUTILS

Exemples d'installations:

1 GILLETE - FRANCE

Cette entreprise a installé un dispositif de récupération de chaleur sur les machines de son atelier de fabrication de rasoirs à Annecy.

L'investissement concerne la réutilisation des basses calories inutilisées et rejetées à l'atmosphère après refroidissement (600 th/h à 20° C). Cette charge thermique est relevée par 2 pompes à chaleur. Une première PAC dessert l'installation de chauffage à air chaud et ventilation de l'atelier sud, d'où une réduction des besoins calorifiques précédemment fournis par la chaufferie centrale. Une seconde PAC dessert une installation de climatisation, ce qui permet de supprimer, en limite, les appoints calorifiques.

Performances :

Le débit de l'air soufflé dans toutes les zones est de 98'000 m³/h. L'économie réalisée est de 86,3 tep. dans l'usine Nord et de 26,2 tep. dans l'autre, soit un total de 112,5 tep/an. Le temps de retour brut est de 16 mois.

Bilan financier

	1979	1980	1981
Coût de l'investissement	263 kF		
Economies réalisées :			
- à la chaufferie Fuel domestique (2'253 hl)	224 kF	366 kF	417 kF
- surconsommation d'électricité (310'000 kWh)	- 66 kF	- 76 kF	- 87 kF
Total	156 kF	290 kF	330 kF
Cumul		446 kF	776 kF
Temps de retour brut		1 an et 4 mois	

Bilan énergétique

La surconsommation	310'000 kWh	-->	3 x 310'000 kWh (Fuel)
			930'000 kWh
1 litre Fuel	-->	10 kWh	
d'où 930'000 kWh _{Fuel}	-->	93'000 l	-->
Economie réelle :	2'253 hl - 930 hl	=	1'323 hl
			=====

2. ETABLISSEMENTS BOUY

Ils ont réalisé pour leur nouvelle usine de St-Hilaire de Vaust une installation de récupération de la chaleur dégagée par les 44 machines-outils de l'atelier. Après passage sur des électrofiltres et une double batterie de filtres finisseurs, l'air est directement recyclé dans l'atelier.

Economie d'énergie : grâce à l'excellente isolation thermique du bâtiment, il n'y a jamais eu de relance de chauffage de jour; la chaleur dégagée par les machines compense les déperditions. L'économie d'énergie primaire s'élève à 85 tep./an.

Bilan financier :

	1979	1980	1981
Investissement	137 kF		
Economies réalisées :			
Electricité (35'000 kWh)		77 kF	88 kF
Cumul			165 kF
Temps de retour brut		2 saisons de chauffage	

3. CITROEN

L'entreprise CITROEN a installé un réseau d'eau destiné à collecter la chaleur dégagée sur les machines-outils de son atelier flexible de MEUDON. Les machines-outils comprennent des circuits hydrauliques qui commandent les opérations auxiliaires (avance, recul de pièces, etc.). Des petites pompes de 3 à 4 kW marchent en permanence pour alimenter les accumulateurs. Lorsque ces accumulateurs ne sont pas en charge, l'énergie des pompes est transformée pour une grande part en chaleur.

Le réseau collecte cette chaleur et une PAC la valorise pour chauffer les bureaux.

COMPORTEMENT ENERGETIQUE DES MOTEURS AU DEMARRAGE ET AU FREINAGE

1. MOTEURS A COURANT CONTINU

1.1 Démarrage direct ou avec rhéostat, à excitation constante

Equation de tension

$$U = (R_m + R_s) i + k \Omega$$

R_m = résistance du moteur

R_s = résistance série

$R_t = R_m + R_s$ = résistance totale

k = coefficient de tension induite

U_o = tension d'alimentation

Ω_o = vitesse à vide = U_o / k

L'énergie dissipée au démarrage à vide au rotor vaut :

$$W_d = \int_0^{\Omega_o} R_t i^2 dt$$

$$R_t i = U_o - k \Omega = k (\Omega_o - \Omega)$$

$$M = \text{couple} = k i$$

$$i = M / k$$

$$M = J d \Omega / dt$$

$$J = \text{inertie totale}$$

$$W_d = \int_0^{\Omega_o} (\Omega_o - \Omega) J d \Omega = J \Omega_o^2 / 2 = W_{cin}$$

L'énergie dissipée au démarrage est égale à l'énergie cinétique. Elle se répartit entre le rotor et la résistance série de façon proportionnelle aux résistances respectives :

$$W_{dm} = W_{cin} R_m / R_t$$

$$W_{ds} = W_{cin} R_s / R_t$$

L'inertie totale est la somme des inerties du moteur (J_m) et de la charge externe (J_e) rapportée.

1.2 Régime permanent

Le courant correspondant vaut :

$$I_c = M_c / k$$

Energie dissipée :

$$W_p = \int_0^t R_t I^2 dt = R_t M^2 / k^2 \cdot t$$

1.3 Freinage

1.3.1 Par ralentissement

Si le moteur ralentit sous l'effet de la charge et des frottements, l'énergie dissipée est égale à l'énergie cinétique.

1.3.2 En court-circuit

Si le freinage est réalisé par court-circuit ou sur une résistance série, toute l'énergie cinétique est détruite dans la résistance totale

$$W_f = W_{cin} = W_{Rm} + W_{Rf}$$

1.4 Tension variable

1.4.1 Démarrage

Avec une alimentation à tension variable, le démarrage sera réalisé de telle façon que le courant soit constant, en général égal au courant nominal :

$$U = R I_N + k \Omega \quad (\text{Fig. 1})$$

La tension croît linéairement avec la vitesse.

L'énergie dissipée au démarrage vaut :

$$W'_d = \int_0^{t_d} R I_N^2 dt$$

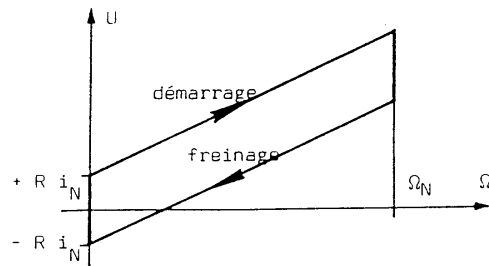


Fig. 2

$$R I_N = \alpha U_0$$

$$k I_N = \frac{1}{2} d \Omega / dT$$

$$k I_N = \frac{1}{J} d \Omega / dt$$

Par substitution :

$$U_0 = \text{tension en fin de démarrage} = k \Omega_0$$

$$W'_d = \alpha J \Omega_0^2 = 2 \alpha W_{cin}$$

α est compris entre 0.04 et 0.1 selon la taille du moteur.

1.4.2 Freinage avec récupération

Avec une source de tension variable, il est possible d'effectuer un freinage avec récupération. En imposant la même condition qu'au démarrage, on a :

$$U = - R I_N + k \Omega \quad (\text{Fig. 1})$$

L'énergie dissipée au rotor au freinage vaut :

$$W_F = \int R I_N^2 dt$$

$$R I_N = \alpha U_0$$

$$W_F = 2 \alpha J \Omega_0^2$$

L'énergie dissipée au freinage vaut donc :

$$W_F = 2 \alpha W_{cin}$$

L'énergie récupérée vaut ainsi :

$$W_{récupérée} = (1 - 2\alpha) W_{cin}$$

2 . MOTEUR ASYNCHRONE

2. 1 Démarrage à fréquence constante

En se basant sur le schéma équivalent du moteur asynchrone (Fig. 2), on peut écrire :

R'_r = résistance rotorique rapportée

I'_r = courant rotorique rapporté

s = glissement

Le couple a pour expression :

$$M = 3 R'_r I'^2_r / (s \Omega_s) = P_J / (s \Omega_s)$$

L'énergie dissipée au rotor vaut :

$$W_r = \int_{td} P_J dt$$

$$P_J = M s \Omega_s$$

A vide, $M = J d \Omega / dt$

$$W_r = J \Omega_s \int_0^{\Omega_s} s d \Omega$$

$$s = (\Omega_s - \Omega) / \Omega_s$$

$$W_r = J \Omega_s^2 / 2 = W_{cin}$$

Dans ce cas également, l'énergie dissipée au rotor est égale à l'énergie cinétique totale.

On a également des pertes Joule importantes au stator. On peut approcher ce dernier terme comme suit :

$$R_s \simeq R'_r$$

$$I_s \simeq I'_r$$

$$W_s \simeq W_r$$

L'énergie totale dissipée au démarrage vaut ainsi :

$$W_d \simeq 2W_r = 2 W_{cin}$$

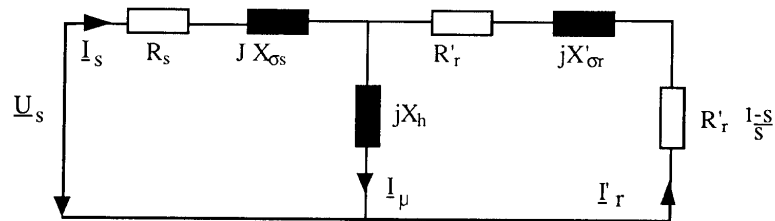


Fig. 2

2.2 Freinage à courant continu

Le freinage d'un moteur asynchrone peut s'effectuer en excitant le stator à courant continu, par exemple avec deux phases en série. Toute l'énergie cinétique apparaît au rotor sous forme thermique.

$$W_F = W_{cin}$$

2.3 Freinage par inversion de phase

Le freinage par inversion de phase obéit aux équations développées en 2.1.

$$W_{rF} = J \Omega_s \int_0^{-\Omega_s} s d \Omega$$

$$W_{rF} = 3 J \Omega_s^2 / 2 = 3W_{cin}$$

L'énergie dissipée au rotor vaut 3 fois l'énergie cinétique. L'énergie cinétique proprement dite représente un tiers de ce terme, les deux autres tiers provenant du réseau. Si l'on considère l'énergie dissipée au stator comme étant à peu près égale, on a au total :

$$W_F \approx 2 W_{rF} = 6 W_{cin} \quad \text{et fournit par réseau } 6 W_{cin} - 1 W_{cin} = 5 W_{cin}$$

C'est un procédé très mauvais sur le plan énergétique, mais relativement simple.

2.4 Démarrage à fréquence variable

Pour un démarrage à fréquence variable, le couple maximum conserve une amplitude constante si la tension est proportionnelle à la fréquence :

$$U_s \sim f$$

Dans ces conditions, l'écart de vitesse pour un couple donné (couple nominal) a la forme suivante :

$$\Delta \Omega = \Omega_s - \Omega_r = \text{constante.}$$

En conséquence, la pente de la caractéristique de couple est constante :

$$M / \Delta \Omega = \text{constante}$$

Les pertes Joule rotoriques ont pour expression :

$$P_r = \Delta \Omega M$$

$$= \Delta \Omega J d \Omega / dt$$

$$W_r = \int P_r dt = \int \Delta \Omega J d \Omega = J \Delta \Omega \int_0^{\hat{\Omega}_s} d \Omega$$

$$= J \hat{\Omega}_s \Delta \Omega = 2 \frac{\Delta \Omega}{\Omega_s} \frac{J \hat{\Omega}_s^2}{2}$$

$$\Delta \Omega / \hat{\Omega}_s = s_N = \text{glissement nominal à fréquence maximale}$$

$$W_r = 2 s_N W_{cin}$$

En admettant des pertes Joule statoriques égales aux pertes Joule rotoriques, on a :

$$W_{s+r} = 4 s_N W_{cin} = W_d$$

De façon semblable, on peut montrer qu'au freinage, l'énergie dissipée vaut :

$$W_f = 4 s_N W_{cin}$$

D'où, pour l'énergie récupérée :

$$W_{récupérée} = (1 - 4 s_N) W_{cin}$$

Remarque : L'ensemble des valeurs démontrées est résumé au tableau 1 de la page 98.

Moteur	Courant continu		Asynchrone		Synchrone auto-commuté $I = \text{cste}$
	$U = \text{cste}$	$I = \text{cste}$	$f = \text{cste}$	$f = \text{var}$	
Démarrage à vide					
Energie th rotor	W_{cin}	$2 a W_{\text{cin}}^*$	W_{cin}	$2 sN W_{\text{cin}}$	—
Energie th stator	—	—	W_{cin}	$2 sN W_{\text{cin}}$	$2 a W_{\text{cin}}^*$
Energie réseau	$2 W_{\text{cin}}$	$(1 + 2 a) W_{\text{cin}}$	$3 W_{\text{cin}}$	$(1 + 4 sN) W_{\text{cin}}$	$(1 + 2 a) W_{\text{cin}}$
Freinage en court-circuit					
Energie stator (rotor)	W_{cin}	—	—	—	W_{cin}
Energie réseau	0	—	—	—	0
Freinage à courant continu					
Energie th rotor	—	—	W_{cin}	—	—
Energie réseau cc	—	—	W_{cin}	—	—
Freinage avec récupération					
Energie th stator	—	—	—	$2 sN W_{\text{cin}}$	$2 a W_{\text{cin}}$
Energie th rotor	—	$2 a W_{\text{cin}}$	—	$2 sN W_{\text{cin}}$	—
Energie récupérable	—	$(1 - 2 a) W_{\text{cin}}$	—	$(1 - 4 sN) W_{\text{cin}}$	$(1 - 2 a) W_{\text{cin}}$
Freinage par inversion de phases					
Energie th stator	—	—	$3 W_{\text{cin}}$	—	—
Energie th rotor	—	—	$3 W_{\text{cin}}$	—	—
Energie fournie par réseau	—	—	$5 W_{\text{cin}}$	—	—

Tableau 1

Comparaison caractéristiques énergétiques des différents types de moteurs par gamme de puissance

Puissance kW	Servomoteur AXEM *		Servomoteur (balais) *		Servomoteur sans balai *		Moteur cc *		Moteur asynchrone *		Moteur asynchrone Dahlander *	
	kW/kg	Nm/kg	kW/kg	Nm/kg	kW/kg	Nm/kg	kW/kg	Nm/kg	kW/kg	Nm/kg	kW/kg	Nm/kg
≤ 300 W	0.07	0.22	0.038	0.15					0.057	0.19	0.046	0.16
≤ 1kW	0.16	0.49	0.09	0.29	0.24	0.63			0.1	0.34	0.084	0.29
≤ 3.1 kW	0.13	0.4	0.13	0.4	0.24	0.69			0.09	0.31	0.098	0.32
~ 5 kW	0.13	0.4	0.11	0.57	0.325	0.94			0.09	0.31	0.098	0.32
~ 8 kW			0.12	0.91	0.44	1.05			0.11	0.35	0.11	0.38
~ 13 kW					0.38	1.15	0.158	0.33	0.11	0.35	0.1	0.33
~ 20 kW					0.38	1.19	0.21	0.5	0.12	0.38	0.11	0.37
~ 30 kW							0.29	0.6	0.12	0.38	0.12	0.39
~ 40 kW							0.28	0.82	0.14	0.43	0.13	0.43
~ 50 kW							0.33	0.97	0.14	0.43	0.13	0.43

* Capacité énergétique de conversion

Réflexions sur le tableau précédent

Il ressort de façon évidente que le moteur ou servomoteur sans balai à commutation électronique représente les caractéristiques énergétiques les plus favorables et cela par rapport à tous les autres types de moteurs.

Le rapport est 2 à 3 x supérieur par rapport au moteur à courant continu et aux moteurs asynchrones.

Pour l'énergie cinétique d'accélération aux vitesses nominales les énergies consommées sont les suivantes :

Puissance nominale	Moteurs sans balai	Moteurs cc	Moteurs asynchrones	Moteur AXEM	
3 kW	0.022	0.21	0.089	0.101	Wh
13 kW	0.17	0.96	0.75		Wh
20 kW	0.42	0.9	1.24		Wh

Là aussi les énergies consommées sont de 2 à 10 x inférieures pour le moteur autocommuté par rapport aux autres types de moteurs.

ANNEXE 5

COMPLEMENT A LA METHODE DE MESURE DE LA PUISSANCE, DU COUPLE ET DE LA FORCE DE COUPE [16]

Dans le problème qui nous intéresse, il est impératif de mesurer l'énergie du couple et de la force de coupe afin de pouvoir comparer cette énergie utile avec la consommation totale d'énergie.

Une mesure directe de cette énergie est compliquée et difficile à mettre en oeuvre lors de mesures en atelier, sur les machines.

La méthode consiste à mesurer avec des wattmètres adaptés la puissance en charge (coupe) et à vide et d'ensuite calculer le couple et la force de coupe.

La forme simplifiée :

$$P_{\text{coupe}} = P_{\text{charge}} - P_{\text{vide}} \quad [\text{W}]$$

$$\text{et} \quad M_{\text{coupe}} = \frac{(P_{\text{charge}} - P_{\text{vide}})}{\Omega} \quad [\text{Nm}]$$

$$\text{et} \quad F_{\text{coupe}} = \frac{(P_{\text{charge}} - P_{\text{vide}})}{\Omega \cdot r} \quad [\text{N}]$$

avec r = rayon d'application de F_{coupe}

Cette méthode de mesure est simple mais il faut apporter un correctif. En effet, on n'a pas tenu compte pour le régime en charge et à vide, des différences des pertes moteur et des éléments de la transmission.

Le correctif a été défini par des études du Prof. Stute et plus récemment par J.I. Chuan . [16]

On doit donc écrire : $P_{\text{charge}} = P_{\text{vide}} + \text{Pertes} + P_{\text{coupe}}$

et aussi : $P_{\text{charge}} = P_{\text{vide}} + a \cdot P_{\text{coupe}}$

avec a = coefficient lié au type de machine-outil et aux éléments de la transmission mécanique.

$a = 1,15 \text{ à } 1,25$ pour un TOUR

$a = 1,25 \text{ à } 1,56$ pour une FRAISEUSE

Selon J.I. Chuang, les formules pour la détermination de (a) sont :

$$a_m = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \eta_i} \quad \text{et} \quad b = P_n \left(\frac{1}{\eta_n} - 1 \right) - P_{cv}$$

$$P_{mv} = \frac{1}{2b} \left[-P_n \sqrt{P_n^2 + 4b(P_{vide} - P_{ev})} \right] P_n$$

$$P_{cn} = \frac{1}{a_m} (P_n - P_{mv}) \quad \text{et} \quad a_2 = \frac{b \cdot a_m^2}{P_n^2} \quad \text{et} \quad a_1 = a_m + 2 a_2 P_{mv}/a_m$$

$$\text{d'où} \quad a = \frac{3}{4} a_2 P_v + a_1$$

avec η_i = rendement en charge des éléments de la transmission

a_m, b, a_2, a_1 : résultats intermédiaires de calcul

P_n, η_n, P_{ev} : la puissance nominale mesurée, le rendement nominal et la puissance à vide mesurée au moteur principal.

P_{mv} : La puissance à vide sans les pertes électriques

P_{cn} : La puissance nominale de coupe.

Nous obtenons ainsi les formules corrigées suivantes :

$$P_{coupe} = \frac{1}{a} (P_{charge} - P_{vide}) \quad [W]$$

$$M_{coupe} = \frac{(P_{charge} - P_{vide})}{a \cdot \Omega} \quad [Nm]$$

$$\text{et } F_{coupe} = \frac{(P_{charge} - P_{vide})}{a \cdot \Omega \cdot r} \quad [N]$$

$$\text{et } \eta_{coupe} = \frac{P_{coupe}}{P_{charge}} = \frac{(P_{charge} - P_{vide})}{a \cdot P_{charge}}$$

$$\eta_{coupe} = \frac{1}{a} \left(1 - \frac{P_{vide}}{P_{charge}} \right)$$

=====

Puissance installée 8,9 kW

- L'inertie du moteur étant de $0,03 \text{ kg m}^2$, l'inertie de l'ensemble entraînée ramenée au moteur est de $0,124 \text{ kg m}^2$.
Dans ce cas le rapport de transmission est "1".

La puissance de maintien de la broche à la $V_{\max}$ de 4'000 t/min est de 2 kW. Elle correspond aux pertes cinétiques à vide.

Puissance en charge : 5,3 kW

Puissance à vide : 0,6 kW

$$\eta_{\text{coupe}} = \frac{1}{a} \left(1 - \frac{P_v}{P_{ch}} \right) = \frac{1}{1.15} \left(1 - \frac{0.6}{5.3} \right) = 0,77 \hat{=} 77 \%$$

Energie totale mesurée $\hat{=}$ 16,5 Wh

Energie de coupe $4,08 \text{ kW} \cdot 0,0021 = 0,0086 \text{ kWh} \hat{=} 8,6 \text{ Wh}$

$$\eta_{\text{énergétique coupe}} = \frac{8.6}{16.5} = 0,52 \hat{=} 52 \%$$

Volume copeaux $\hat{=}$ 0,123 kg

$$W_{\text{sp coupe}} = \frac{16.5}{0.123} = 134 \text{ Wh/kgc} \hat{=} 482 \text{ kJ/kgc}$$

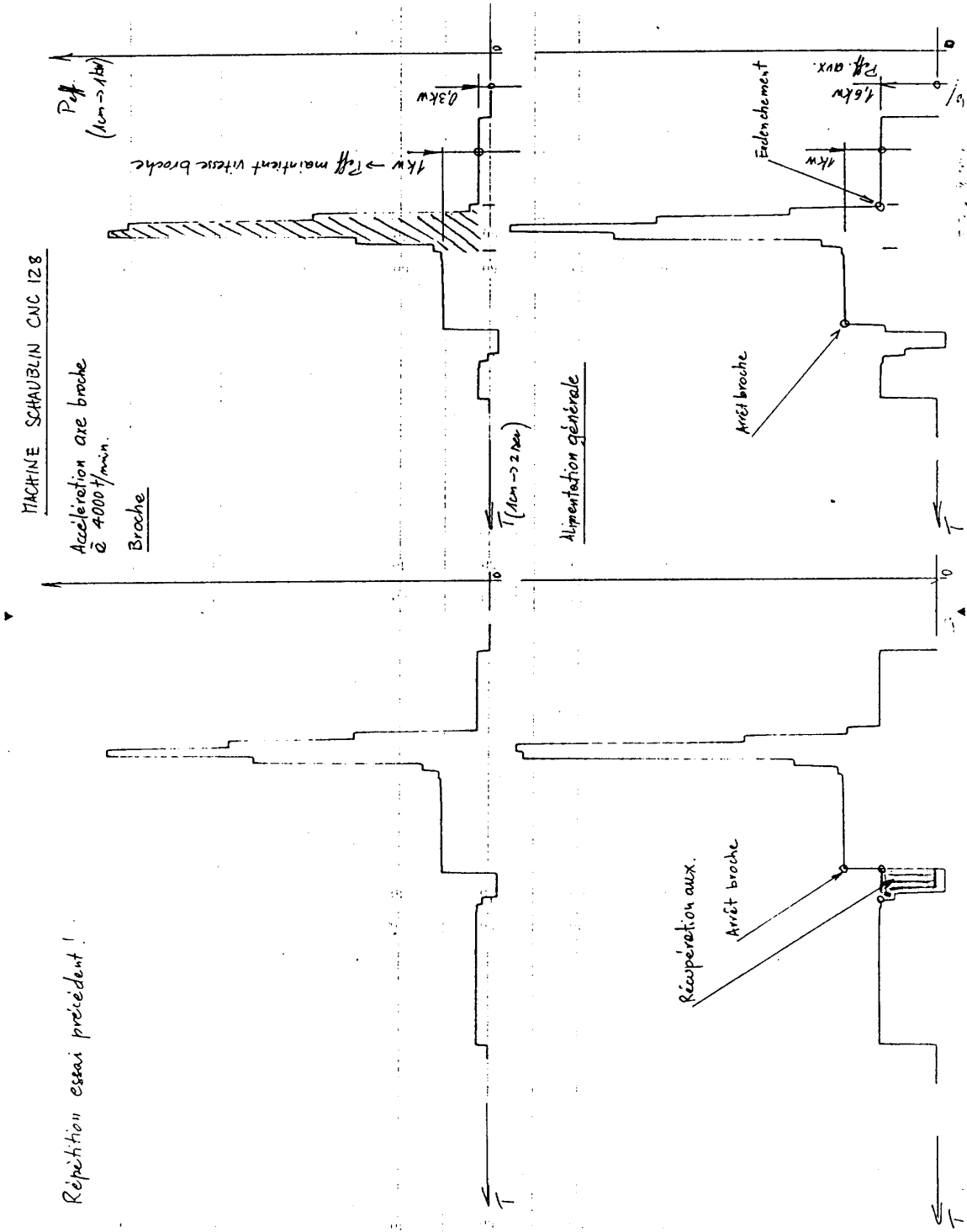


ABB Corporate Research

Lars Gertmar
S-721 78 Västerås

P.M.

From SECRC/KEC Date 92-01-06
On development Trends and Strategies for
Energy Effective and Smart Motors

Ref Aalborg/AUC 920122

Page
13

Potential energy savings by increased motor efficiencies

(from our chapter in Vattenfall's Electricity-conference)

US Dept of Energy Arthur D Little Argonne National Lab		US Electric motor population 1977					
		Electric motor size, horsepower					
		<1	1-5	5.1-20	21-50	51-125	>126
Total number, millions		660.	55.	10.5	3.3	1.7	1.0
Average life, years		12.9	17.1	19.4	21.8	28.5	29.3
Weighted average size, hp		0.26	2.1	11.9	32.5	86.7	212.
Average efficiency, %		65.	77.	82.5	87.5	91.	94.
Average load, % of full load		70.	50.	60.	70.	85.	90.
Average capacity factor, %		3.5	7.	17.4	27.7	37.5	43.2
Total annual use, TWh		30.5	33.9	103.4	155.2	337.7	573.3
Total annual motor energy 1234 TWh							

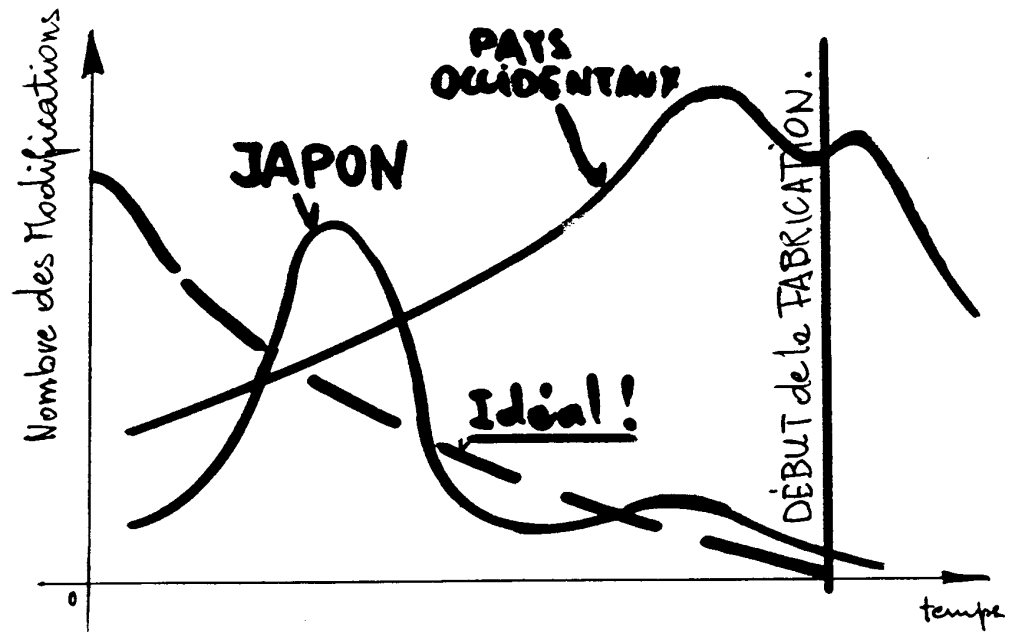
Table 8 Electric motor population by sizes, numbers, etc.

Asea Brown Boveri ABB Corporate Research		Motor energy savings					
		Based on US Electric motor population 1977					
		Electric motor size, horsepower					Total energy savings % of 1977's 1234 TWh
		<1	1-5	5.1-20	21-50	51-125	>126
Average efficiency, %		65.	77.	82.5	87.5	91.	94.
Total annual use, TWh		30.5	33.9	103.4	155.2	337.7	573.3
Annual savings, TWh if the losses are reduced							
by 33 %		4.6	3.1	6.8	7.1	10.8	11.9
by 50 %		6.5	4.4	9.9	10.3	15.9	17.7
							3.6 % 5.2 %

Table 9 Estimations of electric motor energy savings by increased motor efficiencies

ANNEXE 8

CONSEQUENCE ENERGETIQUE DES MODIFICATIONS ET REBUS [33]é



évolution du projet

Si les courbes présentées ci-dessus sont plutôt une mesure de l'efficacité de l'application des actions préétablies de l'assurance qualité, elles sont également une mesure quantitative des pertes énergétiques provoquées par les modifications qui concourent à la production de rebus.

Il est évident que pour des situations identiques à celle évoquée par Adrien Werlen, chef du département mécanique de l'EOV :

L'expérience vécue chez OERLIKON-BUERLE où, en augmentant les coûts préventifs de 10 à 30 %, on a pu faire baisser les frais de contrôle de 40 à 15 % et la proportion des produits non conformes de 50 à 5 %" mérite toute l'attention !

Ainsi la production de rebus par modification est une source certainement non négligeable de consommation énergétique à pure perte.

Il en va de même pour la fabrication des pièces non conformes ou rebus.

- Pour ces deux catégories de pertes énergétiques une étude statistique pourrait nous donner une indication quantitative de ces pertes.

- Une fois de plus, l'application des actions préétablies de l'assurance qualité (AQ), probablement bien maîtrisée au Japon, a probablement beaucoup de retard dans les pays occidentaux et aussi en Suisse.