

UNIVERSITE DE LIEGE
FACULTE DES SCIENCES APPLIQUEES
LABORATOIRE DE METHODES DE FABRICATION

OPTIMALISATION DES OPERATIONS DE TOURNAGE :
LA METHODE DE LA PUISSANCE DISPONIBLE

J.F. DEBONGNIE

Rapport LMF/D31 , juillet 1993

1. INTRODUCTION

Après deux décennies où les efforts des technologues se sont concentrés sur le problème de la réduction des temps morts d'usinage, on assiste actuellement à un regain d'intérêt pour le processus de coupe lui-même. Ainsi que le fait remarquer MERCHANT [8], la raison de cette espèce de retour aux sources est à chercher dans le fait qu'actuellement, les temps morts ont à ce point décrié que le temps d'usinage proprement dit reprend une part significative dans les coûts.

Les premières recherches relatives à l'optimisation de l'usinage remontent à TAYLOR [1], qui s'efforçait de minimiser le temps de production. Dans la même lignée, on a également déterminé les conditions de coût minimal, et il est bien connu que ces deux repères, coût minimal et production maximale, fixent la frontière du domaine d'usinage productif.

Malheureusement, des considérations de ce genre font fi de la plus forte limitation en dégrossissage, à savoir, *la puissance de la machine*. Cette restriction se fait sentir de plus en plus sévèrement à mesure que les vitesses admissibles par les outils s'accroissent, car en augmentant la vitesse de coupe, on consomme inmanquablement plus de puissance. Il en résulte que les résultats optimisés par la voie taylorienne sont fréquemment situés au-delà des possibilités de la machine et, bien souvent, on se trouve obligé de se ramener à des vitesses plus faibles que prévu, sans trop savoir comment les choisir.

Le problème a certes déjà été traité de manière fort complète, notamment par PINTE et DU MONG [3]. Mais leur algorithme fondé sur les multiplicateurs lagrangiens n'est guère parlant. Le présent papier propose une méthode élémentaire fondée sur une *inversion de la démarche habituelle*: au lieu de chercher d'abord un optimum absolu, puis de le corriger tant bien que mal en fonction des possibilités de la machine, il nous semble plus efficace d'explorer *d'abord* les possibilités de la machine, *puis* de corriger éventuellement les résultats obtenus pour tenir compte des caractéristiques de durée de vie de l'outil. Ce procédé, que l'on peut qualifier de *méthode de la puissance disponible*, permet d'abord de traiter avec bonheur les problèmes de chariotage. En outre, il conduit à des vues nouvelles sur les opérations de dressage.

2. L'OPTIMALISATION DU CHARIOTAGE

Tout algorithme d'optimisation suppose l'existence, d'une part, d'un certain nombre de *données* intangibles et, d'autre part, de *paramètres* qu'il s'agit d'ajuster de manière à obtenir le résultat *le plus satisfaisant*. Sous cette dernière expression se cache la notion de *critère d'optimisation* sur laquelle nous reviendrons. En outre, les divers paramètres sont généralement soumis à un certain nombre de *restrictions* qui limitent leur *domaine d'admissibilité*.

Pour les problèmes de chariotage, nous considérons comme *donnés*:

- La machine
- L'outil à utiliser, qui est supposé choisi tant pour sa composition que pour sa géométrie, y compris les angles de coupe.
- Le diamètre à charioter, noté d .

Sont *ajustables*, les trois paramètres normalement utilisés sur un tour, à savoir:

- l'*avance* (par tour) f ,
- l'*engagement* ou profondeur de passe a ,
- la *fréquence de rotation* N .

C'est donc le triplet (f,a,N) que nous cherchons à ajuster au mieux, en tenant compte des diverses restrictions liées au processus de coupe et à la machine. Mais avant d'entrer dans le vif du sujet, il est nécessaire de rappeler un certain nombre de caractéristiques de l'opération d'usinage envisagée.

3. PARAMÈTRES D'USINAGE FONDAMENTAUX

Tout d'abord, il y a lieu de remarquer que les paramètres d'usinage fondamentaux ne sont pas f , a et N , mais des grandeurs qui leur sont liées. Il s'agit de

- l'*épaisseur de coupe* h , mesurée perpendiculairement à l'arête principale de coupe, à savoir:

$$h = f \sin \kappa_r \quad (1)$$

où κ_r est l'angle de direction de l'arête de l'outil.

- la *largeur de coupe* b , mesurée le long de l'arête principale de coupe,

$$b = a / \sin \kappa_r \quad (2)$$

- la *vitesse de coupe* v , liée à la fréquence de rotation et au diamètre par la relation

$$v = \pi d N \quad (3)$$

Précisons une fois pour toutes que nous travaillons systématiquement dans un système d'unités *cohérent*, bannissant ainsi de nos formules tout facteur correctif d'unités.

La *section de coupe* S est donnée par

$$S = af = bh \quad (4)$$

Le *débit de coupe* Q est le volume de copeaux engendré par unité de temps. Il vaut

$$Q = Sv = afv = bhv \quad (5)$$

4. ENERGIE SPECIFIQUE DE COUPE. FORCE DE COUPE

On appelle *énergie spécifique de coupe* k_c le rapport entre la puissance de coupe P_c et le débit:

$$k_c = P_c / Q \quad (6)$$

Tenant compte du fait que la puissance de coupe est le produit de la force de coupe F_c par la vitesse de coupe, on a encore

$$k_c = \frac{F_c v}{Sv} = \frac{F_c}{S}$$

soit

$$F_c = k_c S \quad (7)$$

ce qui justifie le fait que k_c soit encore appelé *pression de coupe*.

L'énergie spécifique de coupe dépend essentiellement de l'angle de coupe γ_n , ici supposé donné, et de l'épaisseur de coupe. Nous utiliserons l'expression de KIENZLE

$$k_c = k_{c11} h_c^{-m_c} \quad (8)$$

Généralement, l'exposant m_c prend des valeurs comprises entre 0,2 et 0,3. La force de coupe se calcule donc par

$$F_c = k_{c11} b h_c^{1-m_c}$$

Mais nos paramètres pratiques étant f et a , nous préférons écrire

$$F_c = k_{c11}^* a f^{1-m_c} \quad (9)$$

en introduisant la grandeur

$$k_{c11}^* = \frac{k_{c11}}{\sin^m \kappa_r} \quad (10)$$

Le *couple de coupe* est alors donné par

$$C_c = F_c \frac{d}{2} = k_{c11}^* a f^{1-m_c} \frac{d}{2} \quad (11)$$

5. DURÉE DE VIE DE L'OUTIL

L'outil s'usant, il est nécessaire de le remplacer ou de le réaffûter de temps à autre. L'usure de l'outil est mesurée soit par l'usure VB de sa face en dépouille, soit par la profondeur KT du cratère qui s'est formé sur sa face de coupe [2]. On définit a priori une valeur limite de cette usure, et on convient de déclarer l'outil *hors service* lorsque cette valeur est atteinte. On appelle conventionnellement *durée de vie de l'outil* T le temps d'usinage qui, à conditions de coupe constantes, mène à la mise hors service.

Nous admettons que l'outil utilisé vérifie une loi de TAYLOR généralisée de la forme

$$v T^n h^p b^q = K \quad (12)$$

ce qui peut encore s'écrire

$$v T^n f^p a^q = K^* \quad (13)$$

avec

$$K^* = K \sin^{p-q} \kappa_r \quad (14)$$

Au long de sa vie, l'outil enlèvera un volume de matière égal à

$$V = Q T$$

Ce volume enlevé, il faut changer d'outil, ce qui suppose l'arrêt de l'usinage pendant un temps t_o appelé *temps de changement d'outil*. Le temps total nécessaire pour enlever le volume V est donc en fait $(T + t_o)$, ce qui signifie que l'on ne peut compter que sur un *débit moyen*

$$Q_{\text{moy}} = \frac{V}{T + t_o} = \frac{Q}{1 + \frac{t_o}{T}} \quad (15)$$

dont le dénominateur dépend, par le biais de la loi de Taylor (13), des trois paramètres de coupe. La recherche du plus grand débit moyen constitue du reste un des deux critères classiques d'optimisation.

6. COÛT VARIABLE DE L'USINAGE

La partie variable du coût d'usinage d'une pièce s'établit comme suit. Tout d'abord, si une pièce requiert l'enlèvement d'un volume V_p de copeaux, le temps d'usinage sera

$$t_u = \frac{V_p}{Q} \quad (16)$$

où Q est le débit de coupe. A ce temps, il faut ajouter le temps moyen de changement d'outil. Le nombre d'outils correspondant à une pièce est donné par le rapport du temps d'usinage à la durée de vie d'un outil:

$$N_o = t_u / T \quad (17)$$

si bien que l'usinage de la pièce prend en fait un temps ($t_u + N_o t_o$). Le coût variable d'une pièce est alors égal au coût de ce temps, augmenté du coût des N_o outils. En notant M le coût horaire et C_o le coût d'un outil, on obtient donc un coût variable

$$C_1 = M(t_u + N_o t_o) + N_o C_o$$

soit

$$C_1 = M \frac{V_p}{Q} \left(1 + \frac{t_o}{T} + \frac{C_o}{M} \right) \quad (18)$$

La minimisation de ce coût variable constitue le second critère classique d'optimisation.

7. RESTRICTIONS RELATIVES À LA GÉOMÉTRIE DE LA COUPE

Les paramètres géométriques a et f de la coupe sont limités par les conditions suivantes:

7.1 - *Copeau minimal* - Il n'est pas possible d'usiner des épaisseurs aussi faibles que l'on veut. On doit donc avoir

$$h \geq h_{\min} \quad (19)$$

Un ordre de grandeur raisonnable de h_{\min} est 0,05 mm.

7.2 - *Épaisseur maximale* - Pour ne pas engager dans la coupe la partie rectiligne de l'arête secondaire de coupe, on limite h à une fraction du rayon r_ϵ du bec de l'outil:

$$h \leq h_{\max} \quad (20)$$

Il est raisonnable de poser

$$h_{\max} \approx 0,8 r_\epsilon .$$

Les deux conditions (19) et (20) s'écrivent également en fonction de l'avance

$$\frac{h_{\min}}{\sin \kappa_r} \leq f \leq \frac{h_{\max}}{\sin \kappa_r} \quad (21)$$

7.3 - *Largeur minimale de coupe* - Pour que l'outil coupe de façon continue, la largeur de coupe ne peut descendre en-dessous d'une valeur déterminée dépendant du rayon de bec de l'outil:

$$b \geq b_{\min} \quad (22)$$

On peut admettre

$$b_{\min} \approx r_{\epsilon} .$$

7.4 - *Largeur maximale de coupe* - La largeur maximale de coupe dépend de la longueur ℓ de l'arête coupante. Nous écrirons donc

$$b \leq b_{\max} \quad (23)$$

avec une valeur de b_{\max} de l'ordre de

$$b_{\max} = \frac{3}{4} \ell .$$

Les conditions (22) et (23) limitent en fait l'engagement:

$$b_{\min} \sin \kappa_r \leq a \leq b_{\max} \sin \kappa_r \quad (24)$$

7.5 - *Élancement de la coupe* - On appelle *élancement de la coupe* le rapport

$$\sigma = \frac{b}{h} = \frac{f}{a \sin^2 \kappa_r} \quad (25)$$

Un élancement trop faible mène à une coupe concentrée sur la pointe de l'outil, ce qui conduit à une usure prématurée. Lorsqu'au contraire, l'élancement est trop grand, les copeaux ont une forme de ruban dangereux. Il faut donc limiter l'élancement dans les deux sens:

$$\sigma_{\min} \leq \sigma \leq \sigma_{\max} \quad (26)$$

Pour fixer les idées, on peut admettre pour les aciers les valeurs suivantes:

$$\sigma_{\min} = 3 \quad , \quad \sigma_{\max} = 15$$

7.6 - *Etat de surface désiré* - En finition, on désire généralement obtenir un certain état de surface, caractérisé par une valeur maximale de la rugosité arithmétique R_a . L'état de surface théorique est donné par la formule

$$R_a = 0,032 \frac{f^2}{r \varepsilon}$$

Il en résulte donc une restriction supplémentaire sur l'avance:

$$f \leq \left[\frac{R_a r \varepsilon}{0,032} \right]^{1/2} \quad (27)$$

8. LIMITATION DE L'EFFORT DE COUPE

L'effort de coupe a notamment pour effet de déformer la pièce et l'outil, ce qui provoque des erreurs de forme et des vibrations. En outre, un effort trop élevé pourrait désolidariser la pièce de son mandrin [3]. Sans entrer dans les détails, disons qu'il convient donc d'imposer une borne supérieure à la force de coupe:

$$F_c \leq F_{\max} \quad (28)$$

9. LIMITATIONS LIÉES À LA MACHINE

9.1 - Gamme de fréquences de rotation

Il existe de toute manière une fréquence de rotation minimale et une fréquence de rotation maximale, et force sera de choisir N de telle sorte que

$$N_{\min} \leq N \leq N_{\max} \quad (29)$$

9.2 - Puissance disponible

Il est clair que la machine devra être capable de fournir la puissance nécessaire à la coupe. En fait, en-deçà d'une fréquence de rotation N_{nom} dite fréquence *nominale* de rotation, c'est le *couple* qui est limité; au-delà de cette fréquence, c'est la *puissance* qui est limitée. On a donc *au moteur*

$$\begin{cases} P = 2 \pi N C_{\max} & \text{pour } N \leq N_{\text{nom}} \\ P = P_{\text{nom}} & \text{pour } N \geq N_{\text{nom}} \end{cases} \quad (30)$$

A cette puissance, il faut retrancher les pertes dans la machine. Un modèle assez satisfaisant consiste à écrire qu'à l'outil, la puissance disponible est

$$P_{\text{disp}} = \eta_{\text{eff}} (P - P_v) \quad (31)$$

où η_{eff} est le *rendement effectif* et P_v , la *puissance à vide*. Cette dernière est une fonction croissante de la fréquence de rotation. Il est généralement suffisant (fig. 1) de l'approcher par une interpolation linéaire de la forme

$$P_v = 2 \pi N C_v \quad (32)$$

où C_v peut être interprété comme le couple à vide. Au total, on a donc

$$\begin{cases} P_{disp} = \eta_{eff} 2 \pi N (C_{max} - C_v) & \text{pour } N \leq N_{nom} \\ P_{disp} = \eta_{eff} (P_{nom} - 2 \pi N C_v) & \text{pour } N \geq N_{nom} \end{cases} \quad (33)$$

situation qui est représentée à la figure 2 par la courbe OAB. Il est commode dans les raisonnements d'y adjoindre le segment vertical BD au droit de N_{max} . On définit ainsi un ensemble fermé de puissances disponibles limité par le polygone OABDO.

10. DÉTERMINATION DE LA GÉOMÉTRIE DE COUPE

Un premier problème consiste à choisir les dimensions a et f de la coupe *en supposant l'effort de coupe limité*. On détermine d'abord les limites de variation de a et f :

$$\begin{aligned} a_{min} &= b_{min} \sin \kappa_r \\ a_{max} &= b_{max} \sin \kappa_r \\ f_{min} &= h_{min} / \sin \kappa_r \\ f_{max} &= \min \left[\frac{h_{max}}{\sin \kappa_r}, \left(\frac{R_a r \varepsilon}{0,032} \right)^{1/2} \right] \end{aligned} \quad (34)$$

que l'on peut tracer sur un diagramme (fig.3). Sur le même diagramme, on peut encore tracer la courbe

$$F_c = k_{c11}^* a f^{1-m_c}$$

En omettant provisoirement les contraintes liées à l'éclatement de la coupe, la région admissible pour a et f est la zone hachurée de la figure 7. Le choix du couple (a, f) dans cette zone peut être guidé par la remarque suivante. Si l'on impose la durée de vie T de l'outil, la vitesse devra être choisie égale à

$$v = K^* T^{-n} a^{-q} f^{-p}$$

ce qui conduit au débit

$$Q = a f v = (K^* T^{-n}) a^{1-q} f^{1-p} \quad (35)$$

Le débit moyen

$$Q_{\text{moy}} = \frac{Q}{1 + \frac{t_o}{T}}$$

varie, dans ces conditions, comme Q . Etant donné que q et p sont normalement inférieurs à l'unité, le débit croît visiblement avec l'avance et l'engagement. Les solutions productives sont donc situées dans la portion ABCD de la frontière de l'ensemble admissible (fig.3). Bien plus, de A à B, le débit augmente, puisque l'engagement croît; de même, de D à C, puisque l'avance croît. Sur la courbe BC, on a constamment

$$F_{\text{max}} = k_{c11}^* a f^{1-m_c}$$

ce qui implique

$$\frac{da}{a} = - (1 - m_c) \frac{df}{f}$$

Dès lors, par (35),

$$\frac{dQ}{Q} = (1 - q) \frac{da}{a} + (1 - p) \frac{df}{f} = [(1-p) - (1-q)(1-m_c)] \frac{df}{f}$$

soit

$$\frac{dQ}{Q} = [q + (1-q)m_c - p] \frac{df}{f} \quad (36)$$

L'examen de données courantes d'usinage montre que la grandeur entre crochets est généralement *négative*. En d'autres termes, sur la courbe $F_c = F_{\text{max}}$, on augmente le débit en diminuant l'avance ou, ce qui revient au même, en augmentant l'engagement. Le point optimal est donc C, pour autant qu'il satisfasse aux exigences d'élanement. Ce point est défini par les deux relations

$$a = a_{\text{max}} \quad , \quad f = \left(\frac{F_{\text{max}}}{k_{c11}^* a} \right)^{1/(1-m_c)} \quad (37)$$

Si l'élanement est trouvé trop grand, on corrige le choix précédent en choisissant un élanement acceptable σ , ce qui correspond (fig. 4) à la droite d'équation

$$f = \frac{a}{\sigma \sin^2 \kappa_r} \quad (38)$$

Si cette droite croise la frontière de la zone admissible sur la courbe $F_c = F_{\text{max}}$, la solution est donnée par la condition

$$F_{\text{max}} = k_{c11}^* \frac{a^{2-m_c}}{(\sigma \sin^2 \kappa_r)^{1-m_c}}$$

ce qui donne

$$a = \left[\frac{F_{\max} (\sigma \sin^2 \kappa_r)^{1-m_c}}{k_{c11}^*} \right]^{1/(2-m_c)} \quad (39)$$

et on déduit f de la relation (38). Cette solution est acceptable pour autant que la valeur obtenue pour f soit inférieure à f_{\max} . Dans le cas contraire, la solution est située sur AB et s'écrit

$$f = f_{\max}, \quad a = f \sigma \sin^2 \kappa_r \quad (40)$$

Il reste à signaler que dans maints problèmes de dégrossissage, le problème se pose autrement. On part d'un diamètre d_1 pour arriver à un diamètre d_2 . Il faut donc enlever la surépaisseur

$$s = \frac{d_1 - d_2}{2} \quad (41)$$

On se propose d'enlever cette surépaisseur par un certain nombre n de passes *égales*. Le nombre minimal de passes est alors

$$n_{\min} = \text{ent} \left(\frac{s}{a_{\max}} \right) + 1$$

où *ent* désigne la partie entière d'un nombre. Leur nombre maximal est

$$n_{\max} = \text{ent} \left(\frac{s}{a_{\min}} \right)$$

A tout nombre entier n compris entre ces deux extrêmes correspond un engagement admissible

$$a = s/n$$

La productivité croissant avec l'engagement, on choisira de préférence $n = n_{\min}$, ce qui fixe

$$a = s/n_{\min} \quad (42)$$

On calcule alors l'avance par (fig.5)

$$f = \min(f_1, f_{\max}) \quad (43)$$

avec

$$f_1 = \left[\frac{F_{\max}}{k_{c11}^* a} \right]^{1/(1-m_c)} \quad (44)$$

Dans le cas où l'élanement est inadmissible, il faut augmenter n .

Enfin, pour les passes de *finition*, le problème se pose de manière inverse: *étant donné le diamètre d à obtenir, quelle*

surépaisseur faut-il prévoir pour la finition? Cette surépaisseur doit être choisie dans l'intervalle admissible pour l'engagement, aussi petite que possible pour diminuer au maximum les efforts de coupe. L'état de surface délimite souvent les avances de manière sévère. Pour le reste, on utilise les formules (43) et (44). Il est peut-être bon de préciser que les passes de finition doivent être déterminées *en premier lieu*, car ce sont elles qui définissent le diamètre d_2 en fin de dégrossissage.

11. L'USINAGE LÉGER

11.1 - Définitions

Les dimensions géométriques de la coupe étant définies, il reste à déterminer la vitesse de coupe. A ce stade, la puissance de la machine peut être une limitation importante. En effet, la force de coupe est à présent définie, et la puissance de coupe

$$P_c = F_c v$$

croît linéairement avec la vitesse.

Nous parlerons d'*usinage léger* dans le cas où la puissance de la machine est suffisamment grande pour ne pas constituer un obstacle. Dans le cas contraire, nous dirons qu'il s'agit d'un *usinage lourd*. Cette classification dépend *essentiellement* de la machine choisie. Ainsi, une même opération, indépendamment du fait qu'il s'agisse de dégrossissage ou de finition, pourra être légère ou lourde selon que la machine est plus ou moins puissante.

Dans le cadre de l'usinage léger, on n'a donc pas à se soucier de la puissance de la machine, et on peut déterminer des optima *absolus*. Au contraire, en usinage lourd, la machine est essentiellement dimensionnante et les optima que l'on peut obtenir sont *relatifs à la machine*. C'est dire que le choix d'une machine plus puissante permettrait alors d'obtenir de meilleures conditions de coupe, *pour autant que cette machine soit disponible*. En fait, l'usinage lourd est le cadre naturel du dégrossissage dont la stratégie générale est d'enlever autant de matière que la machine le permet.

11.2 - Optimisation taylorienne

Les résultats classiques d'optimisation de l'usinage léger sont bien connus. En 1907, TAYLOR [1] a choisi comme critère d'optimisation le *débit moyen*

$$Q_{\text{moy}} = \frac{afv}{1 + \frac{t_o}{T}}$$

Notant que, pour a et f donnés, la loi de Taylor (14) prend la forme

$$v = K^{**} T^{-n} \quad (45)$$

on obtient

$$Q_{\text{moy}} = \frac{a f K^{**} t}{T^n (1 + \frac{t_0}{T})}$$

expression qui admet un maximum pour une durée de vie

$$T_{\text{PM}} = \frac{1 - n}{n} t_0 \quad (46)$$

On en déduit la vitesse de production maximale v_{PM} par (45).

Un autre critère d'optimisation classique est le minimum du coût variable (18)

$$C_1 = M \frac{V_P}{Q} \left(1 + \frac{t_0 + \frac{C_0}{M}}{T} \right)$$

qui, en vertu de (45), se transforme en

$$C_1 = M \frac{V_P}{afK^{**}} T^n \left(1 + \frac{t_0 + \frac{C_0}{M}}{T} \right) \quad (47)$$

Cette expression admet un minimum pour la durée de vie

$$T_{\text{cm}} = \frac{1 - n}{n} \left(t_0 + \frac{C_0}{M} \right) \quad (48)$$

supérieure à T_{PM} . On en déduit encore la vitesse de coût minimal v_{cm} par (45).

Une étude approfondie de la question conduit aux conclusions suivantes:

- L'utilisation d'une vitesse de coupe supérieure à v_{PM} est toujours anti-économique: le débit moyen décroît et le coût augmente simultanément.

- Dans une situation de *concurrence parfaite*, le gain par unité de temps est maximal pour une certaine vitesse située entre v_{cm} et v_{PM} . C'est la raison pour laquelle l'intervalle $[v_{\text{cm}}, v_{\text{PM}}]$ est souvent qualifié [6] de *plage de haut rendement*.

- Le cas d'un producteur important, confronté à une courbe de demande décroissante est plus complexe. Disons simplement que dans ce cas, l'optimum se déplace en direction du coût minimal [4].

11.3 - Algorithme d'optimisation de l'usinage léger

La première remarque à faire est que les deux limites de durée de vie T_{cm} et T_{PM} sont indépendantes des paramètres géométriques a et f . On peut donc choisir *a priori* une durée de vie T dans cet intervalle. On détermine alors a et f par la méthode décrite en section 10, puis on calcule la vitesse par

$$v = \frac{K^*}{T^n f^p a^q} \quad (49)$$

et la fréquence de rotation s'en déduit par

$$N = \frac{v}{\pi d} \quad (50)$$

Dans le cas d'une machine à variation discrète de la fréquence de rotation, on choisit pour N la valeur de la gamme juste inférieure à la vitesse calculée, de manière à éviter de dépasser la vitesse v_{PM} .

12. CHOIX DE LA VITESSE EN USINAGE LOURD

En usinage léger, la limitation de puissance se trouve au-delà des deux vitesses de référence v_{cm} et v_{PM} . Elle est représentée sur la figure 6 par la verticale P_ρ . En usinage lourd, au contraire, la limite de puissance P_L est située à gauche de l'une au moins de ces deux vitesses. Supposons-la d'abord à gauche de v_{cm} . Comme on peut le constater sur la figure, c'est alors la vitesse v_{PP} de pleine puissance qui permet d'obtenir à la fois le coût minimal et le débit moyen maximal. Le cas intermédiaire d'une limitation intermédiaire P'_L est un peu plus complexe, puisqu'en fonction de la durée de vie choisie, la vitesse optimale en usinage léger peut ou non se situer dans le domaine réalisable. La manière la plus simple de procéder consiste à raisonner dans le diagramme (P,N) (fig.7) dans lequel on a préalablement tracé les frontières du domaine de puissance. Pour a et f donnés, on peut calculer la force de coupe

$$F_c = k_{c11}^* a f^{1-m_c}$$

et le couple

$$C = F_c d/2$$

qui est indépendant de la vitesse. le lieu géométrique des différents points de fonctionnement possibles est la droite d'équation

$$P = 2 \pi N C$$

représentée par la marque C sur la figure 7.

Choisissant comme en usinage léger une durée de vie T, on peut déduire une vitesse v et une fréquence de rotation par les formules (49) et (50). Ceci détermine un point sur la droite C. A ce stade, quatre cas sont possibles:

(i) Le point figuratif X' du fonctionnement est situé dans la zone des puissances disponibles. Il s'agit alors d'un usinage léger et X' est l'optimum cherché.

(ii) Le point figuratif X'' du fonctionnement se trouve en dehors de la zone des puissances disponibles. Dans ce cas, l'usinage est lourd, et il faut diminuer la vitesse de rotation en se maintenant sur la droite C, jusqu'à trouver son point d'intersection X avec la frontière de la zone de puissance disponible. Une telle intersection n'existe que si la droite C a un coefficient angulaire inférieur à la droite OA, soit si

$$C \leq \eta_{\text{eff}} (C_{\text{max}} - C_v) \quad (51)$$

On détermine alors l'intersection de la droite C avec la droite AB, ce qui mène à la condition

$$2 \pi N C = \eta_{\text{eff}} (P_{\text{nom}} - 2 \pi N C_v)$$

d'où

$$N = \frac{\eta_{\text{eff}} P_{\text{nom}}}{2 \pi (C + \eta_{\text{eff}} C_v)} \quad (52)$$

Dans le cas où cette formule mène à une valeur de N supérieure à N_{max} , l'intersection se trouve en fait sur la branche BD de la frontière et il faut poser

$$N = N_{\text{max}} \quad (53)$$

(iii) Il peut encore arriver que le point figuratif de l'usinage X'' soit situé en-deçà de la fréquence de rotation minimale de la machine. Dans ce cas, la durée de vie de référence ne peut être atteinte et il faut, soit modifier l'outil, soit diminuer a et f.

(iv) Enfin, il peut se faire que la condition (51) soit violée. Il faut alors diminuer a et f.

Ainsi présentée, cette méthode peut être considérée comme une correction de l'optimisation taylorienne. Nous préférons, quant à nous, adopter la démarche inverse, que l'on peut qualifier de *méthode de la puissance disponible*.

La première étape consiste toujours à choisir une durée de vie optimale, que nous considérons comme un *minimum* et que nous notons en conséquence T_{min} .

Dans une seconde étape, on détermine directement la fréquence de rotation de pleine puissance N_{pp} par les formules (52) et (53). On en déduit la vitesse

$$v = \pi d N \quad (54)$$

Dans une troisième étape, on calcule la durée de vie correspondante

$$T = \left[\frac{K^*}{v a^q f^p} \right]^{1/n} \quad (55)$$

et on la compare à T_{min} . Si T est supérieur à T_{min} , la solution calculée est la bonne (usinage lourd). Dans le cas contraire, on est en présence d'un usinage léger et il faut se ramener à la durée de vie T_{min} en posant

$$v = \frac{K^*}{T^n a^q f^p} \quad (56)$$

et

$$N = \frac{v}{\pi d} \quad (57)$$

Il reste le cas exceptionnel où $N < N_{min}$, pour lequel il faut modifier l'outil, a ou f .

Comme on peut le constater, la méthode de la puissance disponible revient en fait à considérer l'usinage léger comme l'exception et non le contraire. A l'inverse des méthodes classiques, *c'est ici la machine qui sert de point de départ.*

Le lecteur aura sans doute remarqué que nous n'avons plus envisagé les cas d'impossibilité (iv) évoqué ci-dessus. C'est que, précisément, *on peut construire dans le cadre de notre méthode un algorithme de choix des dimensions de la coupe qui élimine automatiquement ce problème.*

13. CHOIX DES DIMENSIONS DE LA COUPE À PARTIR DE LA PUISSANCE DISPONIBLE

Nous savons donc qu'en usinage lourd, la solution se trouve sur la portion ABD de la frontière de la zone des puissances disponibles (fig. 7). On se déplace sur cette courbe en modifiant les paramètres a et f de la coupe. Proposons-nous de chercher le point de débit maximal, après avoir fixé une fois pour toutes l'éclatement

$$\sigma = b/h$$

ou, ce qui revient au même, le rapport

$$\tau = a/f \quad (58)$$

La puissance de coupe peut s'exprimer en termes de la section S et du rapport τ par la formule

$$P_c = k_{c11}^* S^{1 - \frac{m_c}{2}} \tau^{\frac{m_c}{2}} v \quad (59)$$

On en déduit

$$\frac{dP_c}{P_c} = \left(1 - \frac{m_c}{2}\right) \frac{dS}{S} + \frac{dv}{v}$$

ce qui implique

$$\frac{dS}{S} = \frac{1}{1 - \frac{m_c}{2}} \left[\frac{dP_c}{P_c} - \frac{dv}{v} \right]$$

Il en découle

$$\frac{dQ}{Q} = \frac{dS}{S} + \frac{dv}{v} = \frac{1}{1 - \frac{m_c}{2}} \left[\frac{dP_c}{P_c} - \frac{m_c}{2} \frac{dv}{v} \right] \quad (60)$$

Lors du passage du point D au point B de la frontière, la vitesse reste invariable et comme la puissance augmente, il en est de même du débit. De B à A, on assiste simultanément à une augmentation de la puissance et une diminution de la vitesse, si bien que le débit augmente encore. *C'est donc le point A, à la fréquence nominale de rotation, qui correspond au maximum de débit.*

C'est à partir de ce point, correspondant du reste à la force de coupe maximale, qu'il convient de faire le choix de f et a. On suit pour cela la procédure indiquée en section 10, avec une force maximale définie par

$$F_{\max} = \min (F_{\max P}, F_{\max D}) \quad (61)$$

où $F_{\max D}$ est la force maximale définie par les problèmes de déformation et de vibration et $F_{\max P}$, la force disponible au point A, à savoir

$$F_{\max P} = \frac{P_A}{v_A} = \frac{\eta_{\text{eff}} (P_{\text{nom}} - 2 \pi N_{\text{nom}} C)}{\pi N_{\text{nom}} d} \quad (62)$$

Il ne faudrait pas en déduire que tous les usinages doivent se faire à la fréquence nominale. En effet, le choix particulier de a et f mènera souvent à une force de coupe F_c inférieure à $F_{\max P}$. C'est d'ailleurs toujours le cas lorsque $F_{\max D} < F_{\max P}$. Le

point représentatif de cette force à la fréquence N_{nom} est donc un point A' situé au-dessous de A et correspondant à un couple C_A , (fig. 8). l'optimum lourd est alors le point X, que l'on détermine comme en section 12.

Il est aisé de s'assurer que la méthode indiquée ci-dessus garantit automatiquement la vérification de la condition (51): *le cas d'impossibilité (iv) de la section précédente disparaît donc de l'analyse.*

14. PASSES SUCCESSIVES À VITESSE CONSTANTE

Envisageons à présent le cas d'un dégrossissage par passes successives à vitesse constante, l'avance et l'engagement restant identiques d'une passe à l'autre. Soient d_1 le diamètre à la première passe et d_2 le diamètre à la dernière. Dans ce cas, la force et la vitesse restent constantes, et il en est de même de la puissance. Dans un diagramme (P,N) (fig. 9), toutes les passes sont donc situées sur une même segment horizontal 1-2 joignant les droites représentatives des couples $C_1 = F_c d_1/2$ et $C_2 = F_c d_2/2$. Le débit croissant avec la puissance, il s'agit de trouver la plus haute position possible à ce segment dans la zone des puissances disponibles.

La constance de la vitesse s'écrit

$$v = \pi d_1 N_1 = \pi d_2 N_2$$

Il est clair que la solution idéale est celle de la figure 10, pour laquelle

$$P_c = F_c v = \eta_{\text{eff}} 2\pi N_1 (C_{\text{max}} - C_v) = \eta_{\text{eff}} (P_{\text{nom}} - 2\pi N_2 C_v)$$

ce qui implique

$$\eta_{\text{eff}} C_{\text{max}} 2\pi N_1 + \eta_{\text{eff}} C_v 2\pi (N_2 - N_1) = \eta_{\text{eff}} P_{\text{nom}}$$

En posant

$$x = d_1/d_2 = N_2/N_1 > 1 \quad (63)$$

on obtient

$$2\pi N_1 [C_{\text{max}} + (x - 1) C_v] = P_{\text{nom}}$$

et

$$N_1 = \frac{P_{\text{nom}}}{2\pi [C_{\text{max}} + (x - 1) C_v]} \quad (64)$$

La valeur de N_2 est alors

$$N_2 = x N_1 \quad (65)$$

et la vitesse est donnée par

$$v = \pi d_1 N_1 \quad (66)$$

Quant à la force de coupe, elle se calcule par $F_c = P_c/v$, ce qui donne

$$F_c = \frac{2 \eta_{eff} (C_{max} - C_v)}{d_1} \quad (67)$$

C'est le F_{maxP} dont on a besoin pour choisir les dimensions de la coupe par la méthode de la section 13. Ce choix induit bien souvent une diminution de la force, ce qui nous amène (fig.11) au segment 1'-2' situé nettement à l'intérieur de la zone de puissance. L'optimum lourd s'obtient alors par une homothétie dont le rapport est choisi de manière à placer le point 2'' sur la frontière. La force de coupe effective étant F'_c , le couple au point 2' est

$$C'_2 = F'_c d_2 / 2$$

et le point 2'' est caractérisé par

$$2\pi N_2'' C'_2 = \eta_{eff} (P_{nom} - 2\pi N_2'' C_v)$$

d'où

$$N_2'' = \frac{\eta_{eff} P_{nom}}{2\pi (C'_2 + \eta_{eff} C_v)} \quad (68)$$

pour autant que cette valeur soit inférieure à N_{max} . Dans le cas contraire, il faut poser

$$N_2'' = N_{max}$$

De toute façon, la valeur de N_1'' est

$$N_1'' = N_2'' / x \quad (69)$$

et la vitesse est

$$v = \pi d_2 N_2'' \quad (70)$$

Deux cas particuliers peuvent se présenter. Dans le premier,

la valeur de N_2 calculée par (65) est supérieure à N_{\max} (fig. 12).
Il faut alors poser

$$N_2 = N_{\max} \quad , \quad N_1 = N_2/x$$

Pour le reste, le calcul se déroule de la même façon. Un second cas particulier est celui où N_1 , calculé par (64), est inférieur à N_{\min} . Il faut alors poser (fig. 13)

$$N_1 = N_{\min} \quad , \quad N_2 = x N_1$$

Du reste, il est évident que le problème n'admet pas de solution si

$$x > N_{\max} / N_{\min} \quad .$$

15. PASSES SUCCESSIVES À FRÉQUENCE DE ROTATION CONSTANTE

Dans ce cas, les différentes passes se font à la même fréquence de rotation. La vitesse varie donc d'une passe à l'autre, et le taux d'endommagement de l'outil également. Il convient donc, dans une approche taylorienne, de déterminer la loi d'usure de l'outil. Nous admettrons ici sans discussion le *principe du dommage cumulatif* qui peut s'énoncer comme suit:

Un outil travaillant un temps dt dans des conditions de coupe auxquelles correspond une durée de vie T subit un dommage élémentaire

$$dD = \frac{dt}{T} \quad (71)$$

A la mise hors service de l'outil, le dommage cumulé

$$D(\tau) = \int_0^{\tau} \frac{dt}{T} \quad (72)$$

est égal à l'unité.

Le lecteur intéressé trouvera dans la référence [7] une discussion très détaillée de ce principe.

Dans le cas présent, chacune des passes dure un temps égal t_u , car l'avance est maintenue constante. Les vitesses des différentes passes étant v_1, v_2, \dots, v_p , il correspond à chacune d'elles une durée de vie de la forme

$$T_k = (K^{**}/v_k)^{1/n}$$

Le dommage cumulé après les p passes est donc

$$\mathcal{D} = (K^{**})^{-1/n} t_u \sum_{k=1}^P v_k^{1/n} \quad (73)$$

On appelle *vitesse équivalente* $v_{\text{éq}}$ la vitesse constante qui produirait le même dommage après le même temps d'usinage total (pt_u), ce qui s'écrit

$$\mathcal{D} = (K^{**})^{-1/n} pt_u v_{\text{éq}}^{1/n} \quad (74)$$

La comparaison des équations (73) et (74) fournit la valeur

$$v_{\text{éq}} = \left[\frac{1}{P} \sum_{k=1}^P v_k^{1/n} \right]^n \quad (75)$$

C'est la moyenne d'ordre $(1/n)$ des vitesses. D'autre part, en partant du taux moyen d'endommagement

$$\dot{\mathcal{D}}_{\text{moy}} = \frac{\mathcal{D}}{pt_u} \quad (76)$$

on peut définir une *durée de vie moyenne* T_{moy} par la condition de mise hors service

$$\mathcal{D} = \dot{\mathcal{D}}_{\text{moy}} T_{\text{moy}} = 1 ,$$

ce qui équivaut à

$$T_{\text{moy}} = 1 / \dot{\mathcal{D}}_{\text{moy}} \quad (77)$$

Le rapprochement des conditions (74) et (77) mène alors à une loi de Taylor moyenne

$$v_{\text{éq}} T_{\text{moy}}^n = K^{**} \quad (78)$$

Les raisonnements relatifs à l'optimisation de l'usinage léger restent alors valables, à condition de travailler avec la durée de vie moyenne et la vitesse équivalente.

Dans le cas qui nous occupe, les vitesses sont données par

$$v_k = v_1 \frac{d_k}{d_1}$$

ce qui entraîne

$$v_{\text{éq}} = K_1 v_1 \quad (79)$$

avec

$$K_1 = \left[\frac{1}{p} \sum_{k=1}^p \left(\frac{d_k}{d_1} \right)^{1/n} \right]^n \quad (80)$$

On peut encore mettre la loi de Taylor sous la forme équivalente

$$v_1 T_{\text{moy}}^n = K^{**}/K_1 = K^{***} \quad (81)$$

Le coefficient K_1 étant inférieur à l'unité, la constant K^{***} est *supérieure* à la constante K^{**} . Dès lors, pour une durée de vie donnée, la vitesse de la première passe sera supérieure à la vitesse que l'on pourrait utiliser pour un chariotage à diamètre constant.

Venons-en à la recherche de l'optimum lourd. Sur le diagramme (P-N) (fig. 14), les différentes passes se situent sur une même droite verticale correspondant à leur fréquence de rotation commune. La seule possibilité est d'optimaliser la première passe comme une passe unique, selon la procédure exposée en section 12, à ceci près que la loi de Taylor à prendre en considération est la loi (81).

16. OPTIMALISATION DU DRESSAGE

16.1 - Stratégie

La plupart des tours modernes offrent la possibilité d'effectuer un dressage de deux manières:

- à *vitesse constante*
- à *fréquence de rotation constante*

Le travail à vitesse constante suppose une fréquence de rotation croissante, selon la loi

$$N = \frac{v}{\pi D}$$

où D est le diamètre. Naturellement, cela n'est possible que jusqu'au diamètre où la fréquence de rotation atteint son maximum et, à partir de ce diamètre, on devra travailler à fréquence de rotation constante. Le travail dit à vitesse constante est donc souvent *mixte*. Ce fait suggère la question suivante: *ne peut-on combiner systématiquement les deux modes de travail de manière à minimiser le temps d'usinage?*

Soit à dresser une face entre le diamètre D_A et le diamètre D_C , avec

$$y = D_C / D_A \in [0, 1[\quad (82)$$

Pour les raisons habituelles, l'effort de coupe doit être limité à une valeur F à laquelle correspond, au diamètre D_A , le couple

$$C_A = \frac{F D_A}{2} \quad (83)$$

qui doit être au plus égal au couple maximal disponible:

$$C_A \leq \eta_{\text{eff}} (C_{\text{max}} - C_v) \quad (84)$$

Nous proposons la stratégie suivante: à partir du diamètre D_A , on travaille à *vitesse constante* jusqu'à un certain diamètre

$$D_B = D_A / x, \quad x \in [1, 1/y] \quad (85)$$

puis on achève l'usinage à *fréquence de rotation constante*. Pour une valeur donnée de x , il va de soi (fig.15) que le débit maximal est obtenu pour la plus grande puissance, ce qui a lieu si A se trouve sur la droite C_A et B, sur la courbe de puissance disponible. Cette double condition s'écrit

$$P_{AB} = 2\pi N_A C_A = \eta_{\text{eff}} (P_{\text{nom}} - 2\pi N_B C_v)$$

et, en tenant compte du fait que

$$N_B = \frac{D_A}{D_B} N_A = x N_A$$

on obtient

$$2\pi N_A C_A = \eta_{\text{eff}} (P_{\text{nom}} - 2\pi x N_A C_v)$$

d'où

$$N_A = \frac{\eta_{\text{eff}} P_{\text{nom}}}{2\pi (C_A + x\eta_{\text{eff}} C_v)} \quad (86)$$

et

$$N_B = x N_A \quad (87)$$

Ces valeurs doivent, comme toujours, être éventuellement corrigées pour respecter les conditions

$$N_B \leq N_{\text{max}}, \quad N_A \geq N_{\text{min}} \quad (88)$$

et en cas de correction, il faut recalculer x par

$$x = N_B / N_A \quad (89)$$

Ce détail mis à part, il subsiste un arbitraire, le *choix* de la variable x , c'est-à-dire que diverses évolutions sont possibles dans le diagramme (P,N). Comme le montre la figure 15, à une augmentation de x correspond une diminution de la puissance sur la portion AB soit encore, comme la force est fixée, une diminution de la vitesse constante v_{AB} .

Nous choisirons x de manière à rendre le temps d'usinage minimal. Ce temps, noté t_{AC} , peut se décomposer en un temps t_{AB} d'usinage à vitesse constante et un temps t_{BC} d'usinage à fréquence de rotation constante:

$$t_{AC} = t_{AB} + t_{BC} \quad (90)$$

La vitesse d'avance v_f étant égale à Nf , on a

$$t_{AB} = \int_{D_A}^{D_B} \frac{-dD/2}{N f}$$

avec

$$N = \frac{v_{AB}}{\pi D} = N_A \frac{D_A}{D}$$

ce qui donne

$$t_{AB} = -\frac{1}{2} \int_{D_A}^{D_B} \frac{D dD}{N_A f D_A} = \frac{D_A^2 - D_B^2}{4 N_A f D_A} = \frac{D_A}{4 N_A f} \left[1 - \frac{1}{x^2} \right] \quad (91)$$

On a d'autre part

$$t_{BC} = \int_{D_B}^{D_C} \frac{-dD/2}{N_B f} = \frac{D_B - D_C}{2 N_B f} = \frac{(D_A/x) - D_A y}{2 x N_A f}$$

soit

$$t_{BC} = \frac{1}{2} \frac{D_A}{N_A f} \left[\frac{1}{x^2} - \frac{y}{x} \right] \quad (92)$$

Le temps total d'usinage a donc pour expression

$$t_{AC} = \frac{D_A}{4 N_A f} \left[1 + \frac{1}{x^2} - 2 \frac{y}{x} \right] \quad (93)$$

Tenant compte de la condition (86), on obtient alors

$$t_{AC} = \frac{\pi D_A}{2f\eta_{eff}P_{nom}} [C_A + x\eta_{eff}C_v] \cdot [1 + \frac{1}{x^2} - 2\frac{y}{x}] \quad (94)$$

La dérivée par rapport à x du second membre s'annule pour

$$\eta_{eff}C_v (1 + \frac{1}{x^2} - 2\frac{y}{x}) - \frac{2 - 2xy}{x^3} (C_A + x\eta_{eff}C_v) = 0$$

soit, tous calculs faits, pour

$$x^3 = (2 - 2xy) \frac{C_A}{\eta_{eff}C_v} + x \quad (95)$$

équation qui se résout simplement en itérant sur le schéma

$$x_{m+1} = [(2 - 2x_m y) \frac{C_A}{\eta_{eff}C_v} + x_m]^{1/3} \quad (96)$$

à partir de la valeur initiale $x_0 = 0$ et en limitant supérieurement x à la valeur $1/y$ à chaque itération. Nous sommes donc à présent en mesure de résoudre le problème à *force donnée*.

Mais au départ, il s'agit également de déterminer quelles sont les passes possibles sur le tour. A cette fin, on procède comme ci-dessus, mais avec le point A au couple maximum:

$$C_A = \eta_{eff} (C_{max} - C_v) \quad (97)$$

Ayant déterminé x, on obtient N_A et donc, v_{AB} et P_{AB} , ce qui permet d'obtenir la force disponible F_{maxP} dont on a besoin pour déterminer a et f selon la méthode de la section 13. La section étant choisie, la vraie valeur de la force est connue, et on peut procéder à un *deuxième* calcul de x avec, cette fois,

$$C_A = F D_A / 2 \quad (98)$$

16.2 - Durée de vie

Il faut alors vérifier que la durée de vie est suffisante. Ici encore, le calcul est fondé sur le principe du dommage cumulatif. Le dommage relatif à l'opération complète est

$$D_{AC} = D_{AB} + D_{BC} \quad (99)$$

Le dommage D_{AB} se calcule sans peine, puisque la vitesse est constante:

$$\mathcal{D}_{AB} = \int_0^{t_{AB}} \frac{dt}{T} = [v_{AB}/K^{**}]^{1/n} t_{AB} \quad (100)$$

Entre B et C, on a d'une part

$$v_B = v_{AB}$$

et d'autre part

$$v_C = \frac{D_C}{D_B} v_{AB} = xy v_{AB}$$

Entre ces deux limites, la vitesse varie linéairement en fonction du temps:

$$v = v_{AB} \left[1 - (1 - xy) \frac{t}{t_{BC}} \right]$$

en prenant comme origine des temps le point B. On a donc

$$\mathcal{D}_{BC} = [v_{AB}/K^{**}]^{1/n} \int_0^{t_{BC}} \left[1 - (1 - xy) \frac{t}{t_{BC}} \right]^{1/n} dt$$

Un calcul élémentaire conduit à la valeur

$$\mathcal{D}_{BC} = [v_{AB}/K^{**}]^{1/n} \cdot \frac{n}{n+1} t_{BC} \frac{1 - (xy)^{1+(1/n)}}{1 - xy} \quad (101)$$

Au total, le dommage s'élève donc à

$$\mathcal{D}_{AC} = \mathcal{D}_{AB} + \mathcal{D}_{BC} = [v_{AB}/K^{**}]^{1/n} \cdot \left[t_{AB} + \frac{n}{n+1} t_{BC} \frac{1 - (xy)^{1+(1/n)}}{1 - xy} \right] \quad (102)$$

Le taux moyen d'endommagement, donné par

$$\dot{\mathcal{D}}_{\text{moy}} = \frac{\mathcal{D}_{AC}}{t_{AC}}$$

définit alors la durée de vie moyenne

$$T_{\text{moy}} = 1 / \dot{\mathcal{D}}_{\text{moy}}$$

qui, en vertu de (102) et (93), s'écrit explicitement

$$T_{\text{moy}} = [K^{**}/v_{AB}]^{1/n} \cdot \frac{x^2 + 1 - 2xy}{x^2 - 1 + \frac{2n}{n+1} [1 - (xy)^{1+(1/n)}]} \quad (103)$$

On en déduit la loi de Taylor moyenne

$$v_{\text{éq}} T_{\text{moy}}^n K^{**} \quad (104)$$

avec

$$v_{\text{éq}} = K_1(x, y, n) v_{AB} \quad (105)$$

et

$$K_1(x, y, n) = \left\{ \frac{x^2 - 1 + \frac{2n}{n+1} [1 - (xy)^{1+(1/n)}]}{x^2 + 1 - 2xy} \right\}^n \quad (106)$$

Dans le cas où la durée de vie calculée par ces formules est inférieure à la durée de vie de référence T_{min} , il faut évidemment réduire la vitesse. mais comme le montre la figure 15, cette diminution de la vitesse et, par conséquent de la puissance, peut être mise à profit pour augmenter la valeur de x . Malheureusement, le problème est compliqué par le fait qu'une augmentation de x provoque un accroissement de K_1 , c'est-à-dire de la vitesse équivalente.

Commençons par observer que si l'on connaît la force de coupe et la vitesse v_{AB} , on a

$$N_A = \frac{v_{AB}}{\pi D_A}$$

et la relation

$$P_A = F v_{AB} = P_B = \eta_{\text{eff}} (P_{\text{nom}} - x C_v 2\pi N_A)$$

ce qui permet de calculer x par

$$x = \frac{\eta_{\text{eff}} P_{\text{nom}} - P_A}{\eta_{\text{eff}} C_v 2\pi N_A} \quad (107)$$

(limité supérieurement à la valeur $1/y$), ce qui donne

$$N_B = x N_A$$

valeur qu'il faut éventuellement limiter à N_{max} , auquel cas x prend la valeur

$$x = N_{\text{max}} / N_A$$

On peut donc procéder itérativement comme suit pour ce *troisième* choix de x . A partir d'une valeur arbitraire de x , on calcule K_1 , puis v_{AB} par la loi de Taylor. On en déduit une nouvelle valeur de x par (107), et ainsi de suite jusqu'à stabilisation de x .

Celle-ci se produit d'habitude assez rapidement en raison du fait que la variation de K_1 est modérée.

17. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Nous avons montré sur quelques problèmes d'usinage importants comment la méthode de la puissance disponible permet d'exploiter au mieux les capacités du tour et des outils.

La démarche proposée, conceptuellement simple, permet de traiter manuellement les problèmes les plus élémentaires. Les problèmes plus complexes, comme le dressage, se traitent au mieux dans le cadre d'un programme informatique développé au Laboratoire de Méthodes de Fabrication de l'Université de Liège. Conçu sur le mode conversationnel, ce programme guide et verrouille convenablement l'utilisateur dans les différents choix nécessaires. Outre le choix proprement dit des conditions de coupe, le programme calcule la puissance consommée, le volume enlevé par chaque arête et les forces de coupe.

Moyennant un aménagement infime, il est possible d'introduire des outils *quasi-tayloriens*, c'est-à-dire dont la durée de vie est décrite par une loi du type

$$\frac{1}{T} = A + B v^{1/n}$$

permettant de tenir compte du fait qu'à basse vitesse, la durée de vie ne tend pas vers l'infini. Pour de tels outils, il existe une *vitesse de moindre usure* au sens du Commandant Denis, c'est-à-dire une vitesse où le volume de copeaux enlevé par l'outil est maximal.

En amont de la détermination des conditions de coupe, il reste le problème du *choix de l'outil* dans lequel interviennent un grand nombre de données technologiques dont l'approfondissement et la formalisation demanderont encore d'importants efforts de recherche.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] F.W. TAYLOR - "On the art of cutting metals"
Transactions A.S.M.E., vol 28, paper 1119, 1907
- [2] G. BOOTHROID - *Fundamentals of metal machining and machine tools*
International Student Edition, Mc Graw Hill, 1981
- [3] J.PINTE, W. DU MONG - "Technologie de l'usinage: choix optimal des conditions de coupe en tournage"
Rapport CRIF MC70, CRIF, 21 rue des Drapiers, 1050 Bruxelles, 1981
- [4] J.F. DEBONGNIE - "Considérations économiques relatives à l'usinage léger"
Université de Liège, Rapport LMF/D29, 1993
- [5] J. PETERS - *Theorie van de verspaning I*
Universitas, Antwerpen
- [6] Anonyme - *Guide du tournage*
Sandvik Coromant, 1985
- [7] J.F. DEBONGNIE - "Fondements théoriques des essais accélérés d'usure des outils"
Université de Liège, Rapport LMF/D25, 1993
- [8] M.E. MERCHANT - "Some observations on the past and present research on machining and grinding"
Applied Mech. Rev. vol 46, n°3, march 1993

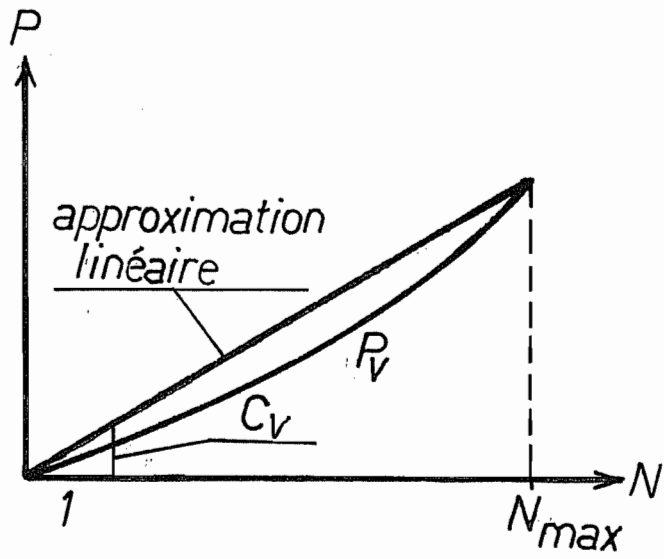


FIG. 1

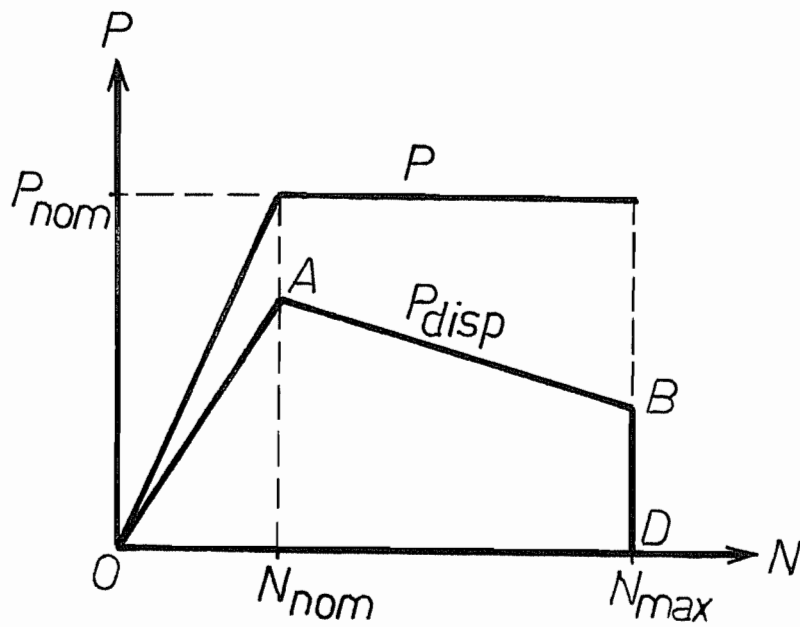


FIG. 2

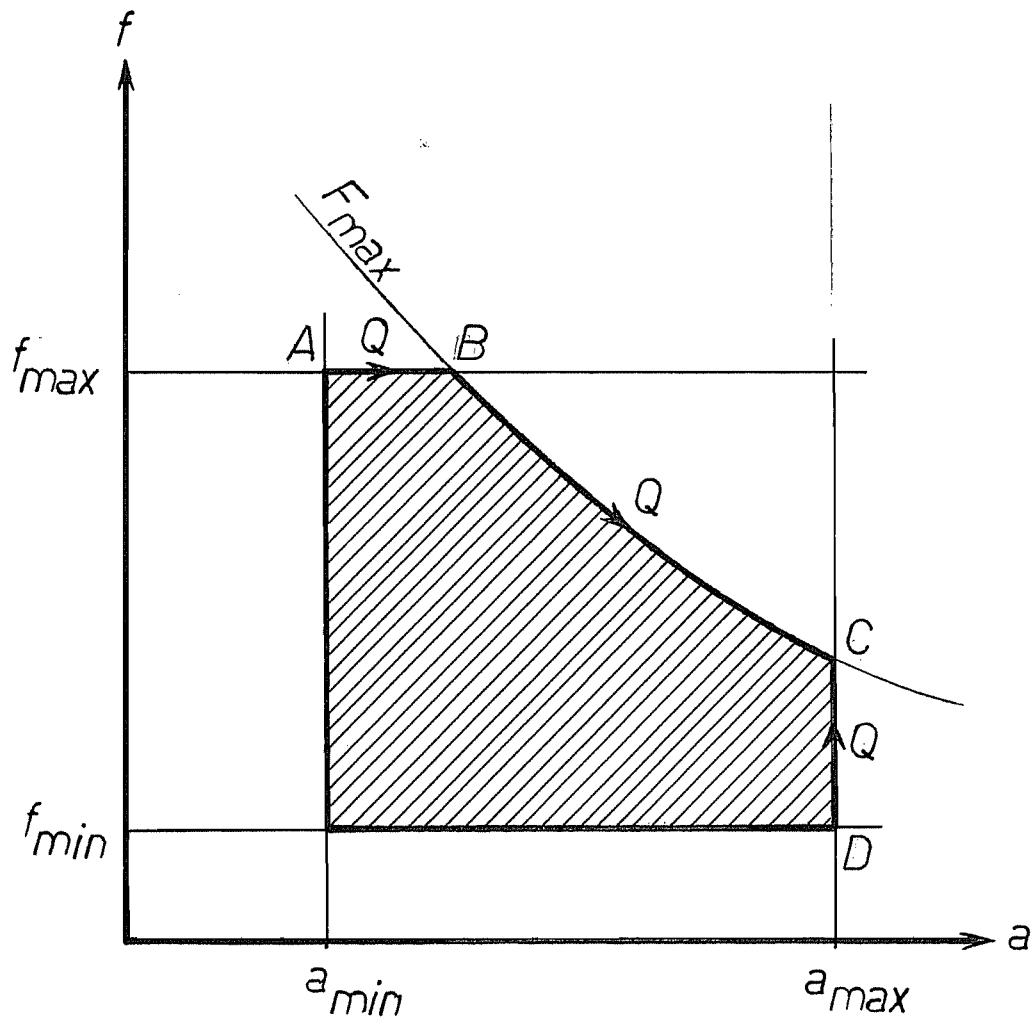


FIG . 3

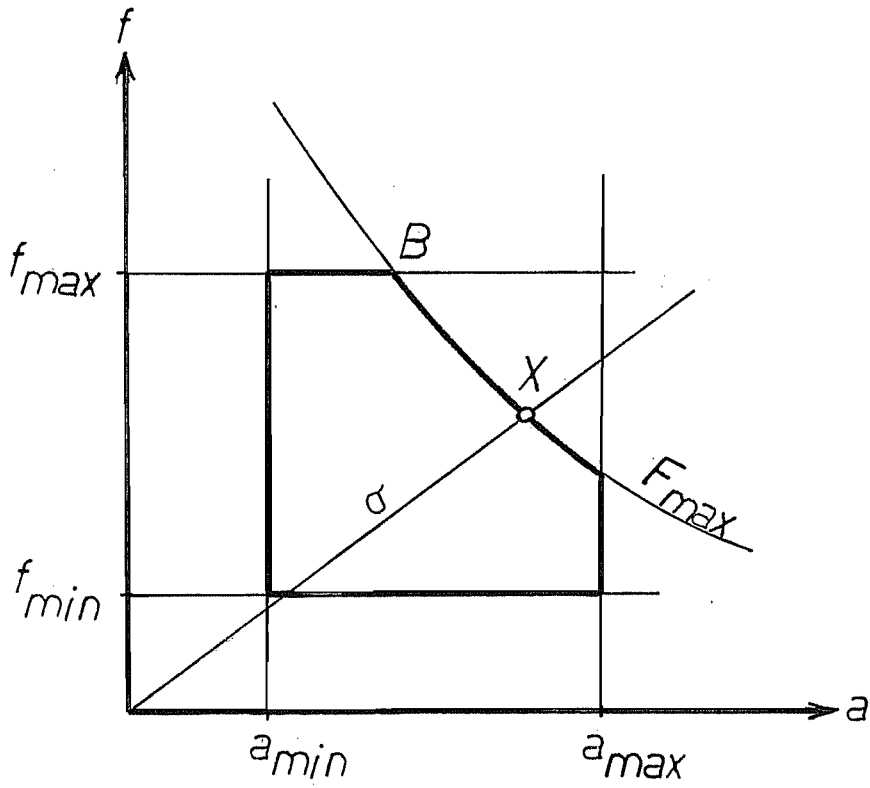


FIG. 4

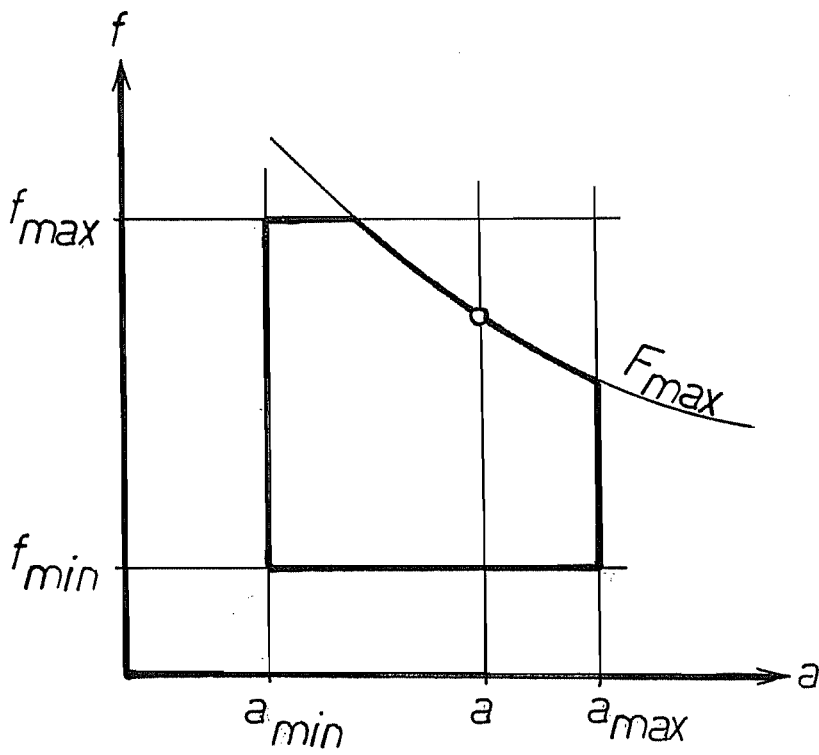


FIG. 5

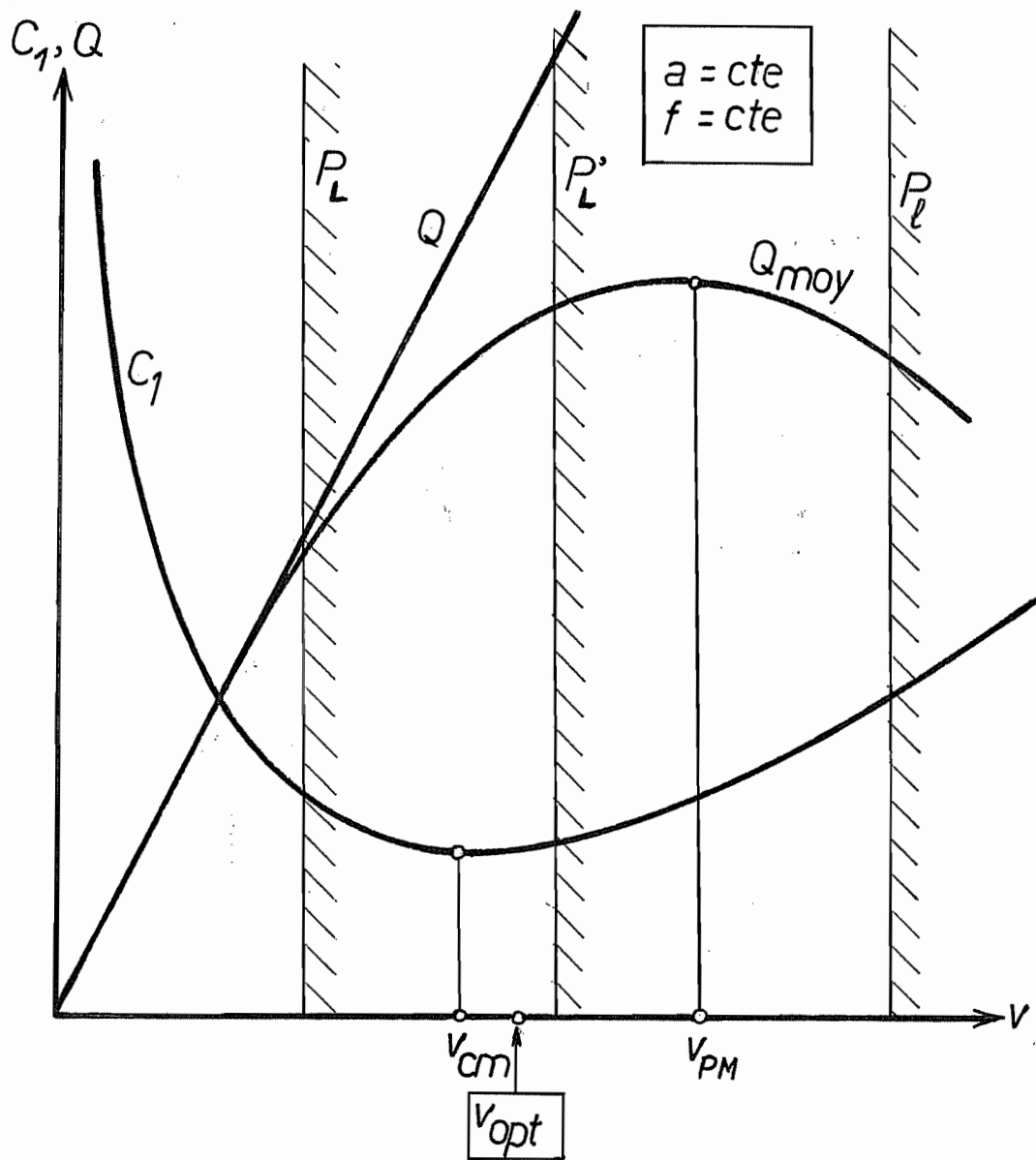


FIG. 6

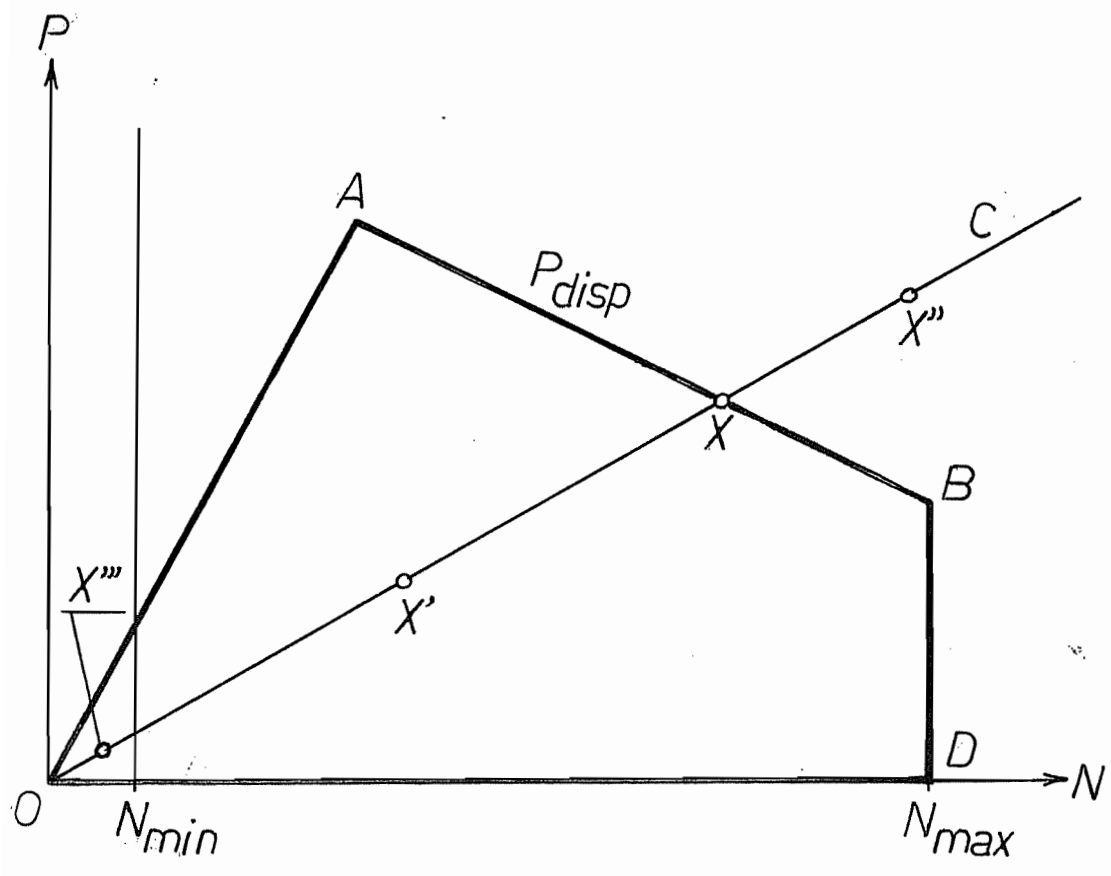


FIG. 7

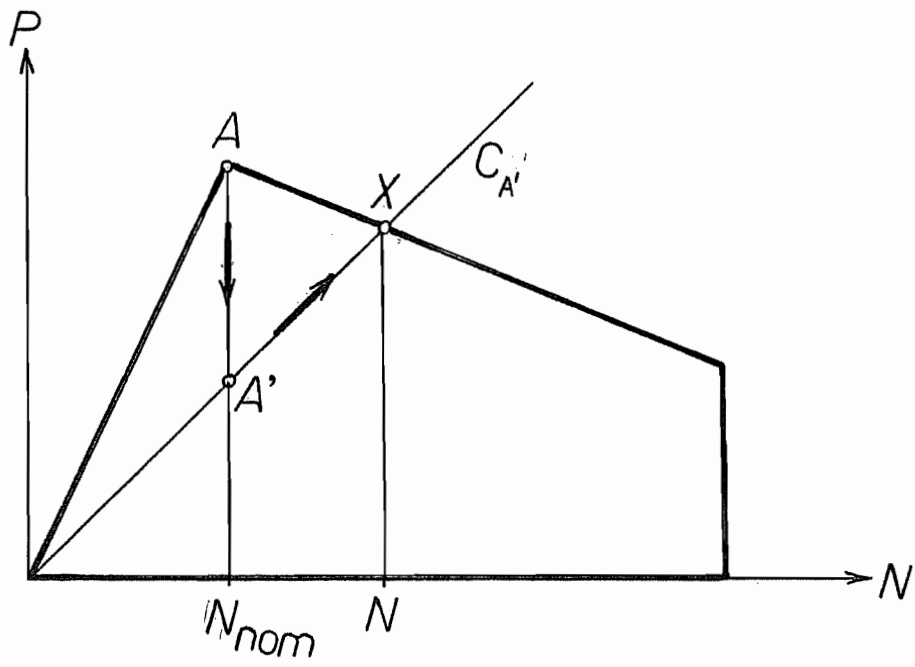


FIG. 8

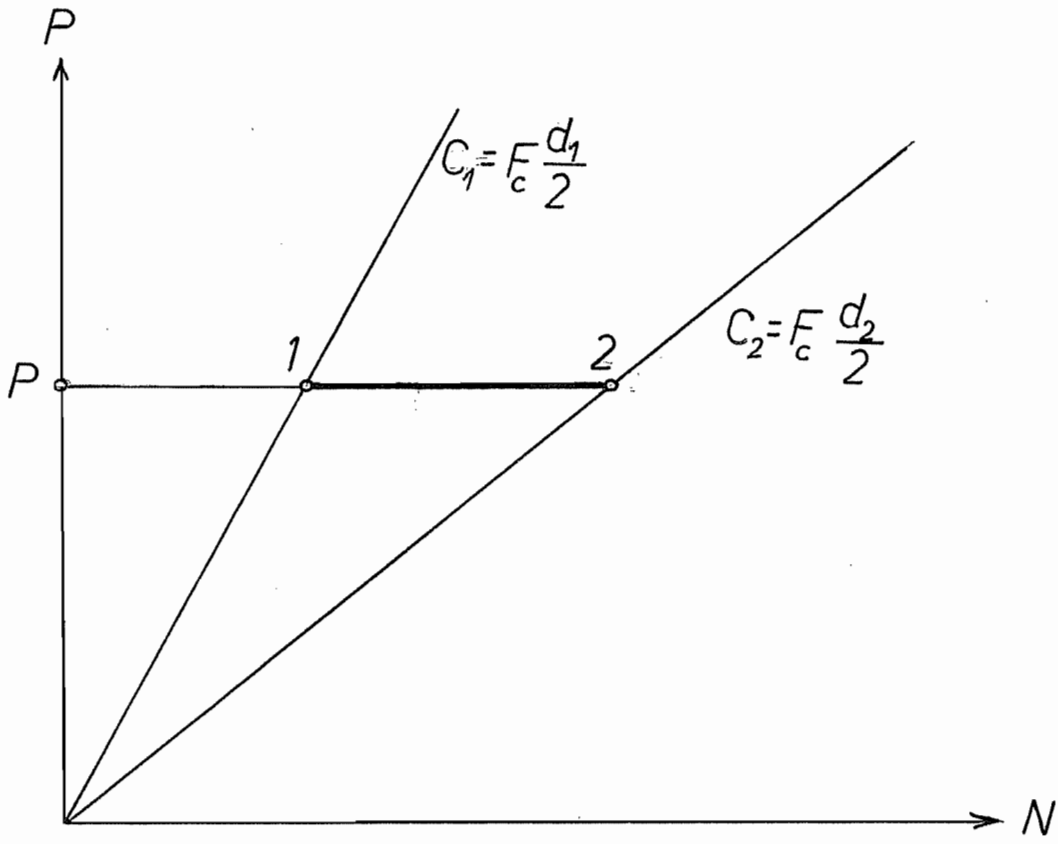


FIG. 9

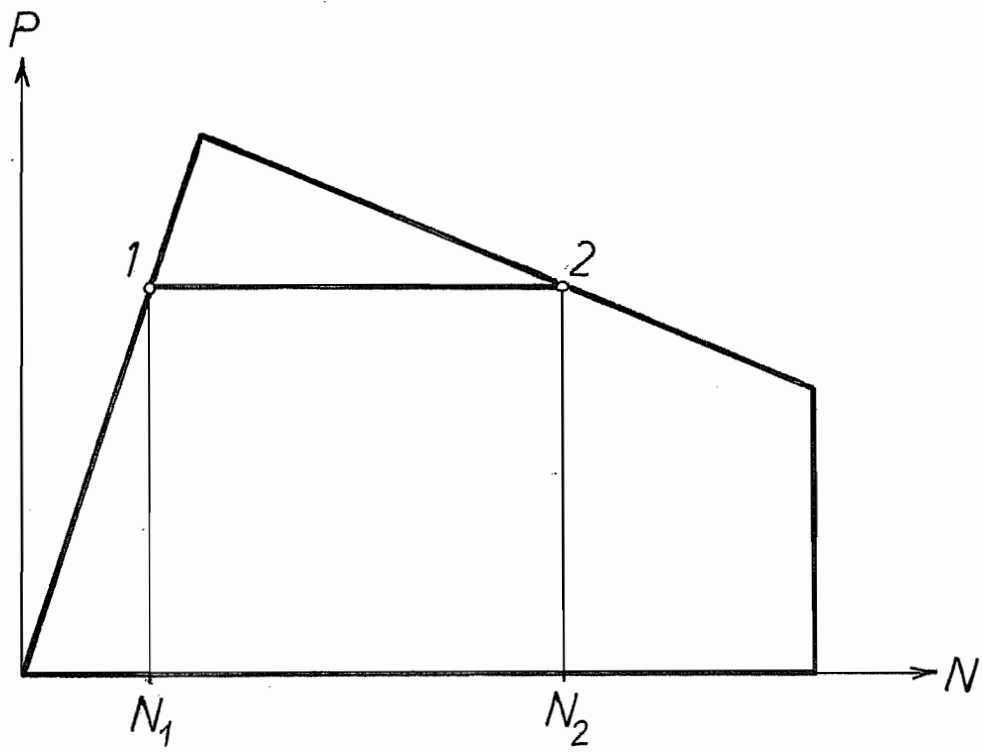


FIG. 10

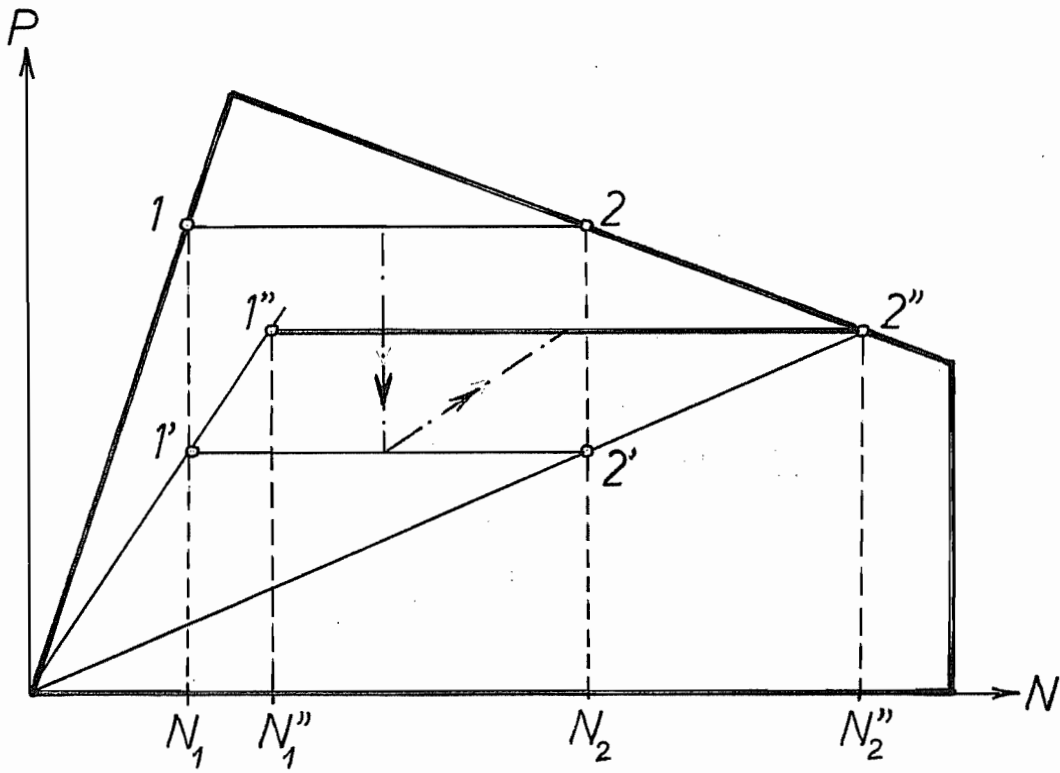


FIG. 11

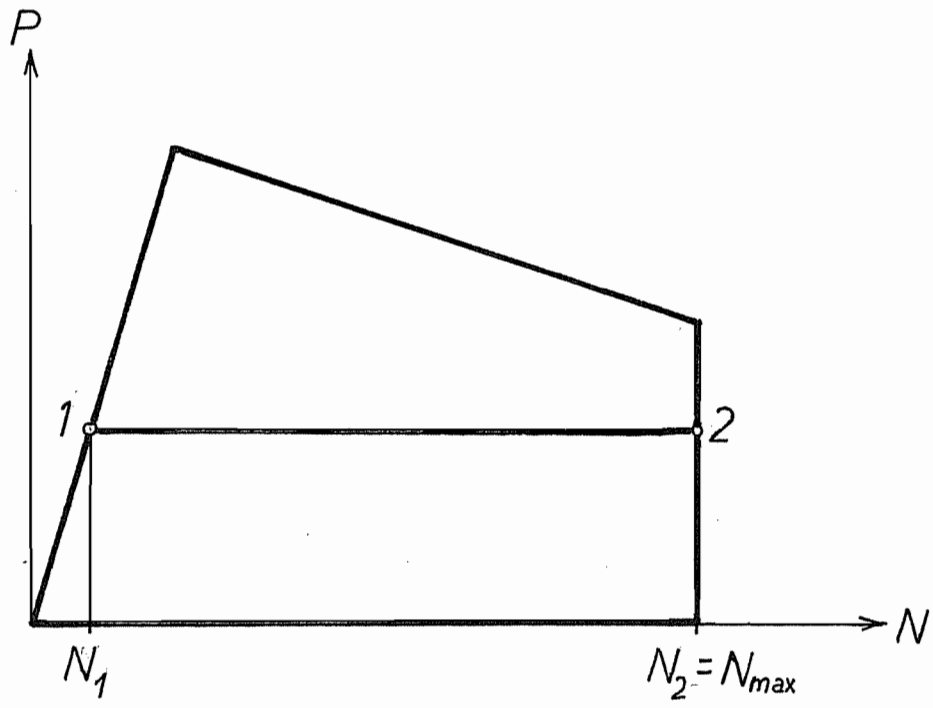


FIG. 12

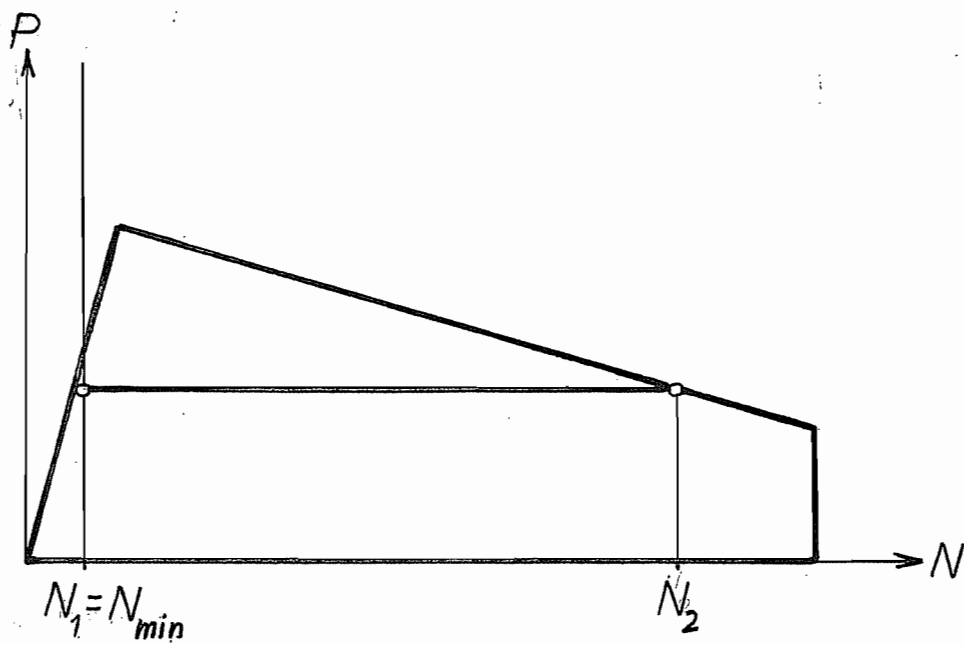


FIG. 13

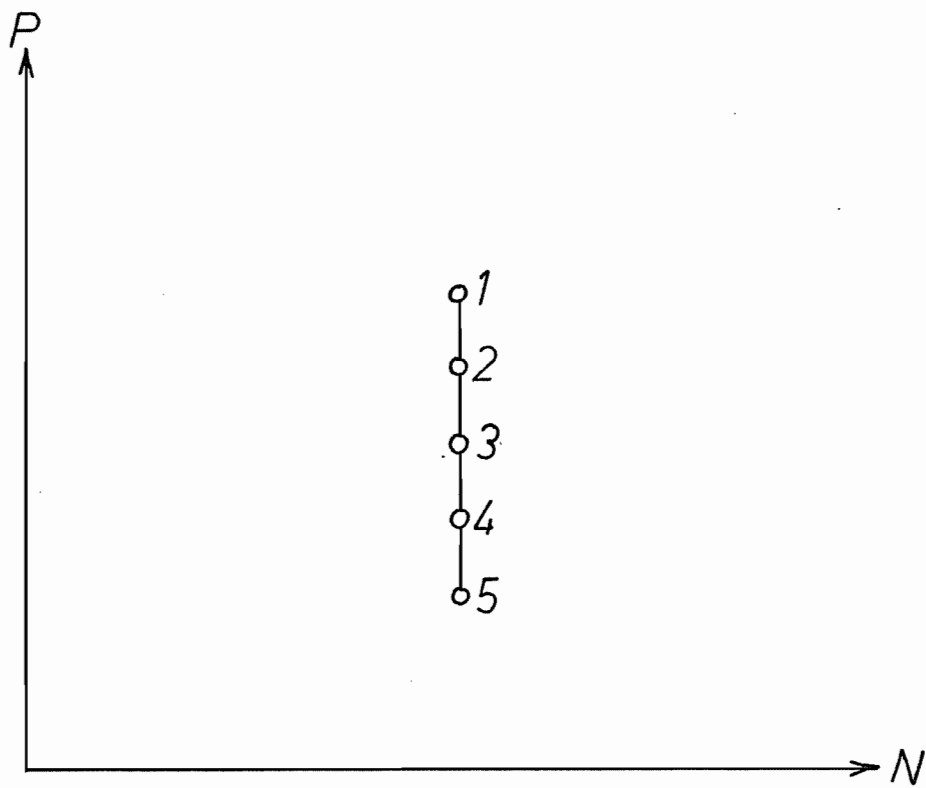


FIG. 14

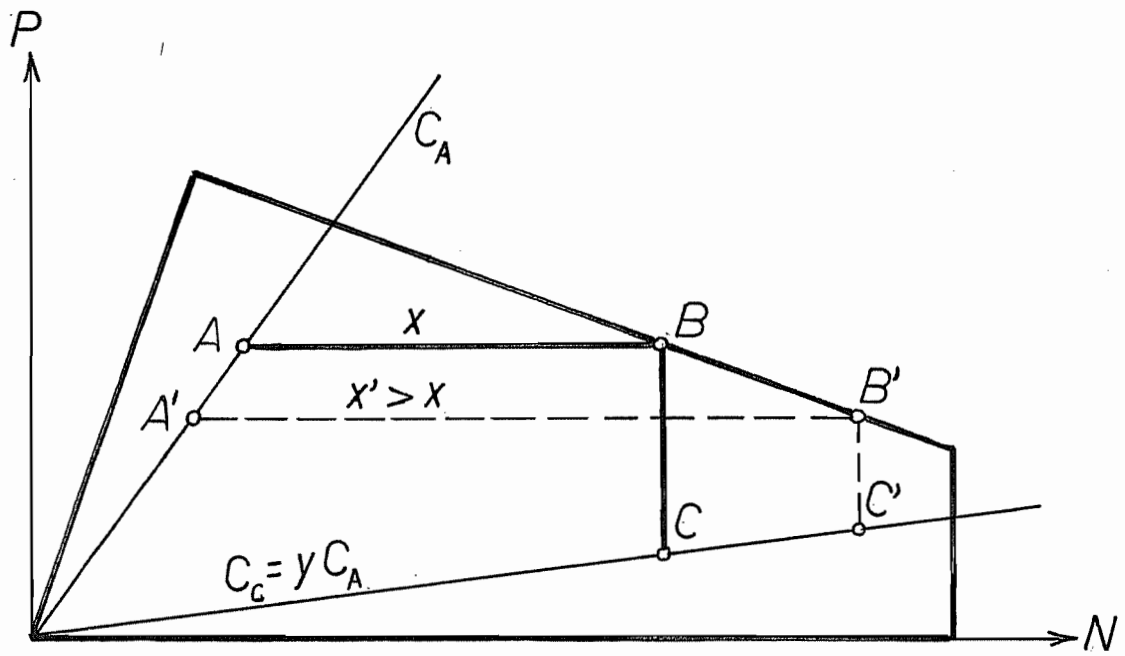


FIG. 15