

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

68/87

وزارة التعليم والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement et de la Recherche Scientifique

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

المركز الوطني للتعدد التقني
BIBLIOTHEQUE
Ecole Nationale Polytechnique

DEPARTEMENT : GENIE MECANIQUE

102

PROJET DE FIN D'ETUDES

SUJET

Etude d'un système d'autocorrection de la trajectoire d'outil pour la compensation des erreurs provenant du refoulement d'un système élastique machine-pièce.

Proposé par :
K. BALAZINSKI

Etudié par :
K. YAHIAOUI

Dirigé par :
K. BALAZINSKI

PROMOTION
JUIN 1987

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement et de la Recherche Scientifique

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
المكتبة — BIBLIOTHEQUE
Ecole Nationale Polytechnique

DEPARTEMENT : GENIE MECANIQUE

PROJET DE FIN D'ETUDES

SUJET

Etude d'un système d'autocorrection de la trajectoire d'outil pour la compensation des erreurs provenant du refoulement d'un système élastique machine-pièce.

Proposé par :
K. BALAZINSKI

Etudié par :
K. YAHIAOUI

Dirigé par :
K. BALAZINSKI

PROMOTION
JUIN 1987

Département : Génie Mécanique

دائرة : هندسة ميكانيكية

Promoteur : BALAZINSKI

موجه : بالازينسكي

Elève Ingénieur : YAHIAOUI Karim

تلميذ مهندس : يحيوي كريم

الموضوع: دراسة نظام تصحيح ذاتي لمسار الأداة لتدارك الأخطاء الناجمة عن دفع المنظومة المرنة المتكونة من الآلة و القطعة.

الملخص: يتعلق هذا العمل بدراسة إمكانيات تصحيح الأخطاء الناتجة عن حوادث الدفع أثناء التصنيع بين ذنبتين، بدون استعمال مسندة، وهذا بتصحيح مسار الأداة على مغرطة ذات قيادة عددية.

Sujet : Etude d'un système d'autocorrection de la trajectoire d'outil pour la compensation des erreurs provenant du refoulement d'un système élastique machine-pièce.

Résumé : Ce travail fait l'objet de l'étude des possibilités de correction des erreurs dues aux événements de refoulement lors de l'usinage entre pointes, sans utilisation de lunette, par correction de la trajectoire d'outil sur tour à commande numérique.

Subject : Study of self-correction system of a trajectory's tool for compensation errors due to upsetting of an elastic machine tool system.

Abstract : This work consists in the study of the error correction possibilities due to events of upsetting during machining between centres, without using steady-rest, by correcting the trajectory's tool in a digital control lathe.

DEDICACES

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

Je dédie ce travail

*A mes chers parents qui se sont sacrifiés
pour me voir atteindre ce but.*

A ma grand-mère.

A mon frère.

A mes sœurs.

A tous mes amis (es).

*A tous ceux qui m'ont aidé de près
ou de loin.*

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier

Monsieur BALAZINSKI, maître-assistant à
L'E.N.P., pour l'aide précieuse et les conseils
qu'il m'a prodigué tout au long de mon
travail.

Tout les professeurs qui ont contribué à ma
formation d'INGENIEUR, en particulier ceux
du département de GENIE MECANIQUE.

Messieurs C. AÏT SALEM et B. BERRABAH qui
me furent d'une grande aide pour la ré-
alisation de mon polycopé.

Madame BALAZINSKA pour son aide dans la
réalisation des programmes informatiques.

Monsieur J. RIVAT pour ses encouragements
constants.

SOMMAIRE

Pages

- PRINCIPALES NOTATIONS UTILISÉES

- INTRODUCTION

- CHAPITRE I : GENERALITES ET DEFINITIONS

I.1 - But	4
I.2 - Notion de flexion	5
I.3 - Notion d'élasticité	5
I.4 - Notion de rigidité	6
I.5 - Notion de flexibilité	6
I.6 - Actions résultantes de la coupe du métal	7
I.6.1 - Effort de coupe	8
I.6.2 - Effort d'avance F_a et effort de pénétration F_p	10
I.7 - Usinage entre pointes	10
I.8 - Usinage avec lunette	11
I.9 - Axes associés aux mouvements (ISO 841)	12
I.9.1 - Axe Z de mouvement	12
I.9.2 - Axe X de mouvement	13
I.9.3 - Axe Y de mouvement	13
I.9.4 - Mouvements de rotation	13

- CHAPITRE II : ETUDE DE LA DEFORMATION
 ELASTIQUE DES ENSEMBLES
 D'UNE MACHINE

II.1. Equation de la déformation élastique
 des ensembles d'une machine 15

II.2. Etude de la courbe $\chi_m = f(\beta)$ 17

 II.2.1. Calcul d'extremum 17

II.3. Tracé des courbes $\chi_m = f(\beta)$ 18

- CHAPITRE III : ETUDE DE LA DEFORMATION
 D'UNE EBAUCHE

III.1. Equation de la déformation élastique
 d'une ébauche 21

III.2. Etude de la courbe $\chi_{éb} = f(\beta)$ 21

 III.2.1. Calcul d'extremum 22

III.3. Trace des courbes $\chi_{éb} = f(\beta)$ 23

- CHAPITRE IV : ETUDE DE LA DEFORMATION
 DU SYSTEME ELASTIQUE
 MACHINE - PIECE

IV.1. Equation de la déformation du système
 élastique machine-pièce 26

IV.2. Etude de la fonction $\chi_{\text{sys}} = f(\beta)$	26
IV.2.1. Calcul d'extremum	27
IV.2.2. Cas particulier	28
IV.3. Tracé des courbes $\chi_{\text{sys}} = f(\beta)$	28

- CHAPITRE V : DÉFORMATION DE L'OUTIL

V.1. Déformation verticale	31
V.2. Déformation horizontale	32
V.3. Déformation totale	33

- CHAPITRE VI : APPROCHE MATHÉMATIQUE POUR
LA RÉOLUTION DU PROBLÈME
DE REFOULEMENT

VI.1. Présentation du problème	36
VI.2. Essai de la fonction négative	38
VI.2.1. Exemple	41
VI.3. Réflexion sur la fonction négative	48
VI.3.1. Exemple	49
VI.4. Conclusion	52

- CHAPITRE VII : RÉOLUTION DU PROBLÈME DE
REFOULEMENT PAR SIMULATION

VII.1. Approche du problème	54
VII.2. Solution proposée	55
VII.3. Conclusion	62
- CONCLUSION GENERALE	63
- ANNEXE : EXEMPLES D'EXECUTION	
I. Programme abaque	65
II. Programme coordonnées	71
- BIBLIOGRAPHIE	

TABLE DES TABLEAUX

Pages

- Tableau I.1 - Pression spécifique.....	10
- Tableau I.2 - Efforts d'avance et de pénétration.....	11
- Tableau VI.1 - Flèche résultante.....	41
- Tableau VI.2 - 1 ^{ère} itération.....	42
- Tableau VI.3 - 2 ^{ème} itération.....	42
- Tableau VI.4 - 3 ^{ème} itération.....	44
- Tableau VII.1 - Flèche de la pièce.....	55
- Tableau a.....	72

TABLES DES FIGURES

	Pages
Fig. 1 - Déformation d'une ébauche.....	2
Fig. I.1- Poutre travaillant à la flexion.....	5
Fig. I.2- Efforts de coupe.....	17
Fig. I.3- Lunettes.....	12
Fig. I.4- Tour.....	12
Fig. II.1- Déformation de la machine.....	15
Fig. II.2- Déformation de la pièce due à la machine.....	19
Fig. III.1- Déformation sous l'effort de coupe.....	20
Fig. III.2- Flèche d'une ébauche.....	21
Fig. III.3- Déformation due à la rigidité de la pièce.....	24
Fig. IV.1 - Déformation totale du système.....	26
Fig. IV.2- Déformation due à l'élasticité du système machine-pièce.....	30
Fig. V.1- Déformation verticale.....	31
Fig. V.2- Déformation horizontale.....	32
Fig. V.3 - Déformation totale.....	34
Fig. VI.1- Epaisseur du copeau réellement enlevée.....	39
Fig. VI.2- Fonction négative.....	40
Fig. VI.3- Effet tonneau (sans correction).....	43
Fig. VI.4- Effet de la 1 ^{ère} itération.....	45

Fig. VI.5 - Effet de la 2 ^{ème} itération	46
Fig. VI.6 - Effet de la 3 ^{ème} itération	47
Fig. VI.7 - Epaisseur de copeau constante	48
Fig. a - Interpretation des résultats	71

PRINCIPALES NOTATIONS UTILISEES



- c : coefficient de proportionalité entre l'effort de coupe et l'effort de pénétration.
- ϵ : angle de direction d'outil.
- d : diamètre de la pièce à usiner.
- F_x : effort de pénétration.
- j : rigidité.
- k : pression spécifique de coupe.
- l : longueur de la pièce.
- p : profondeur de passe.
- R_r : résistance à la rupture.
- T_a : déviation totale de l'outil.
- w : flexibilité.
- x : flèche.
- $\chi_{éb}$: refoulement de la pièce en court d'usinage.
- χ_m : refoulement de la machine.
- χ_{syst} : refoulement du système élastique machine-pièce.
- γ_a : coefficient de correction.
- δ : déviation due à la déformation de l'outil.

- INTRODUCTION -

Les solides réels, sans exception, se déforment sous l'action d'un effort, même très faible: leurs déformations sont en général trop petites pour être observées directement et il faut employer des instruments de précision pour les mesurer.

Lors du façonnage d'une ébauche, la machine outil, le montage d'usinage, la pièce elle même, l'outil et le porte-outil forment un système élastique que nous désignerons sommairement par le terme de système élastique machine-pièce.

Dès qu'un effort de coupe même peu important est développé, la pièce et l'outil tendent à se repousser. Ils cèdent à cette répulsion dans les limites où le permettent le cumul des jeux de leurs liaisons ou les déformations élastiques dans l'ensemble outil-machine-pièce.

Lorsque la rigidité des ébauches est insuffisante, leur ablocage produit des déformations élastiques qui compromettent la précision dimensionnelle et géométrique.

Si la rigidité d'un arbre monté entre pointes est insuffisante, l'effort de coupe engendre des flexions élastiques susceptibles de fausser la forme cylindrique de l'arbre qui prend la forme d'un tonneau

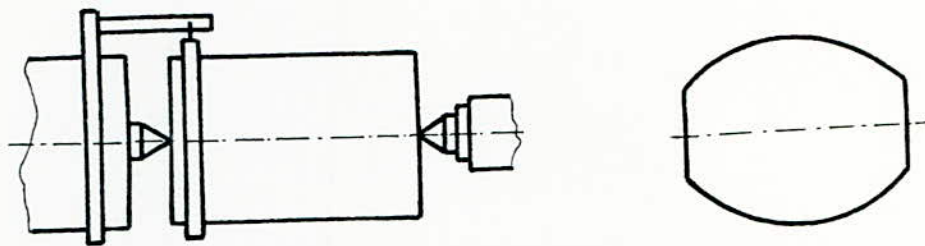


Fig. 1 - déformation d'une ébauche

Plusieurs études ont été faites pour comprendre ce phénomène. Les plus récentes que nous ayons pu trouver remontent à 1970.

Des solutions pratiques ont été élaborées pour éviter ce phénomène.

Pour les différentes machines comme la fraiseuse, la perceuse, la raboteuse, etc, les structures formant le corps de la machine, ont été renforcées, on a ajouté des appuis aux niveaux des endroits les plus susceptibles à la déformation, on a changé les formes, etc, cela a permis de réduire au minimum les erreurs dues au refaulement.

Quand au tournage (qui fera l'objet de votre

étude), où le phénomène est le plus évident, la solution adoptée est l'utilisation d'une lunette.

Seulement, on peut se demander si son utilisation se justifie encore à l'époque du tour à commande numérique. Pourquoi ne pas utiliser un programme qui évite les erreurs de refoulement en corrigeant la trajectoire de l'outil. Cela nous économisera de l'argent, on n'aura pas à acheter la lunette avec le tour, et du temps lors de son montage sans compter les difficultés que cela engendre.

Toutefois, la lunette est loin d'être déclassée et fera le bonheur des tourneurs pendant encore un bon nombre d'années.

Néanmoins, nous venons par cette présente étude ouvrir de nouveaux horizons qui permettront réflexion à bon nombre de chercheurs en leur donnant une nouvelle vision de l'usinage entre pointes.

Qui sait! Peut être que dans quelques années la lunette n'existera plus.

- CHAPITRE · I -

GENERALITES ET DEFINITIONS

I 1- BUT :

Selon la rigidité d'une ébauche et l'importance de l'effort de coupe, il se produit lors de l'usinage d'une pièce des déformations et des refoulements des éléments du système élastique machine-pièce; il en résulte des défauts de forme de la surface usinée.

Lors du tournage entre pointes par exemple, l'ébauche fléchit et il en résulte une pièce en forme de tonneau. Pour éviter ce phénomène, il faut utiliser une lunette.

Le but de notre travail est de voir s'il est possible de se passer de la lunette et éviter les conséquences du refoulement par correction de la trajectoire d'outil sur un tour à commande numérique.

Une étude complète du phénomène de refoulement d'un système élastique machine-pièce

dépasse largement notre cadre de travail. Pour cela, nous nous sommes restreint à l'étude du cas du tournage entre-pointes, et plus précisément à éliminer l'effet de l'une des principales causes du refoulement.

I.2 - NOTION DE FLEXION :

La pièce est encastrée à l'une de ses extrémités dans un support ou bien elle repose par ses extrémités sur deux appuis. Elle est soumise à l'action d'une force F située dans un plan passant par son axe et perpendiculaire à cet axe. La pièce qui tend à se courber travaille à la flexion (fig. I.1).

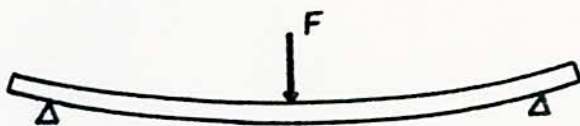


Fig. I.1 - poutre travaillant à la flexion

I.3 - NOTION D'ELASTICITE :

L'élasticité est la propriété que possèdent les corps de se déformer sous l'action d'un effort et de revenir exactement à leur forme initiale lorsque

l'effort a cessé.

On dit que la déformation est élastique.

Pour les aciers de construction $E = 20000$ à 22000 daN/mm^2

I. 4 - NOTION DE RIGIDITE :

La rigidité est définie comme étant le quotient de la force appliquée par la valeur de la déformation produite par cette force.

$$j = \frac{F}{Y}$$

où F : l'effort appliqué

Y : le refoulement produit par la force appliquée

I. 5 - NOTION DE FLEXIBILITE :

La flexibilité est la valeur inverse de la rigidité.

$$W = \frac{1}{j}$$

Soit donc

$$W = \frac{Y}{F}$$

La rigidité et la flexibilité des ensembles d'une machine ne sont pas calculées, mais établies expérimentalement.

I.6 - ACTIONS RESULTANTES DE LA COUPE DU METAL :

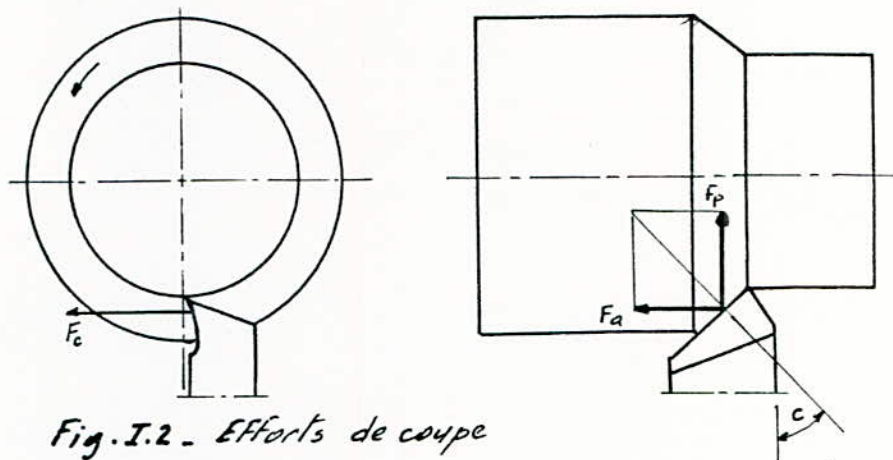


Fig. I.2. Efforts de coupe

La coupe du métal suppose la pénétration de l'outil dans la pièce et le mouvement relatif de la pièce par rapport à l'outil.

Au contact de la pièce et de l'outil, des actions de contact prennent naissance sur la face d'attaque.

Pour définir ces actions, on a mesuré expérimentalement leurs composantes suivant trois directions perpendiculaires :

- la première est parallèle au vecteur vitesse de coupe V_c ;
- la seconde est parallèle au vecteur vitesse du mouvement d'avance V_a qui, sur les machines-outils, est perpendiculaire au vecteur vitesse de coupe ;
- la troisième est normale à la surface usinée, donc

parallèle au vecteur vitesse du mouvement de pénétration, dans le cas du travail à l'outil de forme.

On les appelle :

\vec{F}_c , effort de coupe, parallèle au vecteur vitesse de coupe V_c ;

\vec{F}_a , effort d'avance, parallèle au vecteur vitesse d'avance V_a ;

\vec{F}_p , effort de pénétration, normale à la surface usinée.

I.6.1 - Effort de coupe :

L'effort de coupe peut être évalué par des formules empiriques ; par exemple, on utilise la formule : $F_c = apk$, p étant la profondeur de passe, a l'avance et k la pression spécifique de coupe. Une autre formule, plus complexe, est la suivante : $F_c = K(1 - K'b) q^m p^n$ où K, K', m, n , sont des coefficients dépendant de la matière usinée, des conditions de coupe, et b, q, p , respectivement l'avance, l'angle d'affûtage et la profondeur de passe.

Certains ateliers établissent leurs propres formules et d'autres agissent d'après leur expérience, ce qui laisse encore une large marge d'étude aux chercheurs dans ce domaine.

Pour notre part, vue l'absence totale de document donnant les valeurs des différents coefficients des

formules du genre $F_c = C_p \cdot a^4 \cdot H_b^n$, nous avons adopté pour l'ensemble de notre étude la formule $F_c = a p K$.

Différents essais ont montré que l'effort de coupe F_c est plus important que F_a et F_p . La valeur trouvée pour F_c est proportionnelle à la section du copeau.

$$\text{On a : } F_c = K \cdot S \quad \text{avec } S = a \cdot p$$

F_c est l'effort de coupe en Newton;

S est la section du copeau en millimètres carrés;

K est un coefficient, appelé résistance spécifique à la coupe ou pression spécifique de coupe, en Newton par millimètres carrés;

a est l'avance par tour en millimètres;

p est la profondeur de passe en millimètres.

La valeur de K varie avec la nature du métal travaillé, la forme de l'outil, la qualité de l'affûtage et les conditions d'arrosage.

On peut admettre, en première approximation, que K est proportionnel à la résistance à la rupture du métal et que l'on a :

$$K = 3 \text{ à } 4 (R_r) \quad \text{pour les aciers ;}$$

$$K = 4 \text{ à } 5 (R_r) \quad \text{pour les fontes.}$$

Selon la norme AFNOR , NFE 66-303 on a :

Matière à usiner	R (daN/mm ²)	Pression spécifique K (daN/mm ²)	
		Outils ARS	Outils carbure
Aciers	$40 < R$	—	160
Aciers	$40 < R < 60$	180	250
Aciers	$60 < R < 90$	225	350
Aciers	$90 < R < 110$	270	400

Tableau I.1 - Pression spécifique

I.6.2 - Effort d'avance F_a et effort de pénétration F_p :

Les essais ont montré que les efforts F_a et F_p sont, eux aussi, proportionnels à la section du copeau et à la résistance spécifique de coupe. Par suite, F_a et F_p sont proportionnels à l'effort de coupe F_c . Les valeurs de F_a et F_p dépendent de l'angle de direction d'outil.
(tableau I.2)

I.7 - USINAGE ENTRE POINTES :

La pièce est supportée par :

- une pointe vive, axée dans la broche
- une contre-pointe, mobile en translation

L'entraînement en rotation de la pièce se fait

par un dispositif d'entraînement.

Type d'outil	Métal travaillé	F_a	F_p
Outil à charioter angle de direction $\hat{c} = 45^\circ$	Fonte	$1/3 F_c$	$1/3 F_c$
	Acier	$2/5 F_c$	$2/5 F_c$
Outil à charioter angle de direction $\hat{c} = 30^\circ$	Fonte	$1/4 F_c$	$1/3 F_c$
	Acier	$1/3 F_c$	$1/2 F_c$
Outil couteau	Fonte	} $2/3 F_c$	sensible!
	Acier		nul
Outil pelle	Fonte	sensible!	} $2/3 F_c$
	Acier	nul	

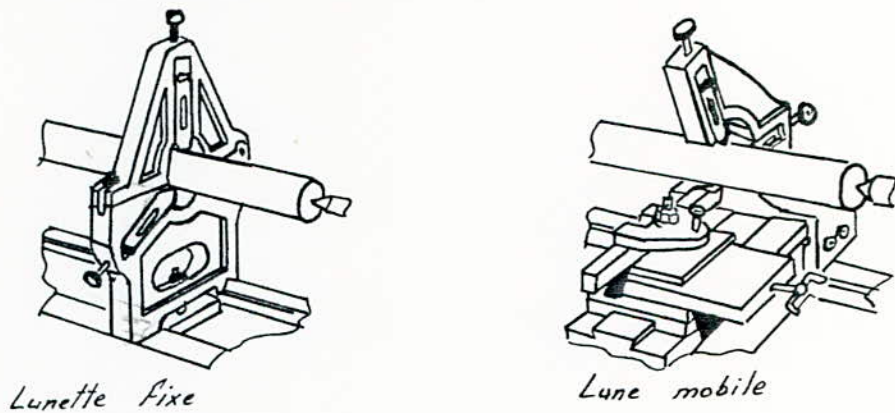
Tableau I.2 - Efforts d'avance et de pénétration

I.8 - USINAGE AVEC LUNETTE :

Les pièces longues et minces peuvent subir une flexion pendant le tournage, et ainsi le diamètre devient imprécis ; de plus des marques de vibrations peuvent apparaître à la surface de la pièce. Pour éviter la flexion on emploie la lunette. Celle-ci possède des mâchoires glissantes, réglables, entre lesquelles tourne

la pièce. Il existe des lunettes fixes et mobiles : la lunette fixe est solidaire du banc du tour, la lunette mobile se fixe sur le chariot porte-outil.

Fig.I.3 - Lunettes



I.9 - AXES ASSOCIES AUX MOUVEMENTS : (ISO.841)

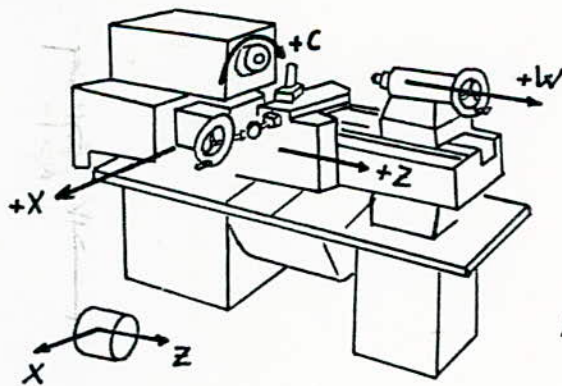


Fig.I.4 - Tour

I.9.1 - Axe Z de mouvement :

Il caractérise l'axe de la broche si la machine ne possède qu'une seule broche. Dans le cas de l'étau-limeur et de la raboteuse, l'axe z est perpendiculaire

à la surface de bridage de la pièce.

Le sens positif de z est celui qui provoque une augmentation de la distance entre la pièce et le porte-outil.

I.9.2 - Axe X de mouvement :

Il caractérise le mouvement radial dans le cas du tour ou de la rectifieuse. Dans le cas de la fraiseuse c'est l'axe situé à droite quand on regarde la face avant de la broche. Dans le cas de la raboteuse ou l'étau-limeur, c'est le mouvement de travail. Le sens positif est celui qui tend à augmenter la distance pièce-outil.

I.9.3 - Axe Y de mouvement :

Il est tel que le trièdre x, y, z soit direct.

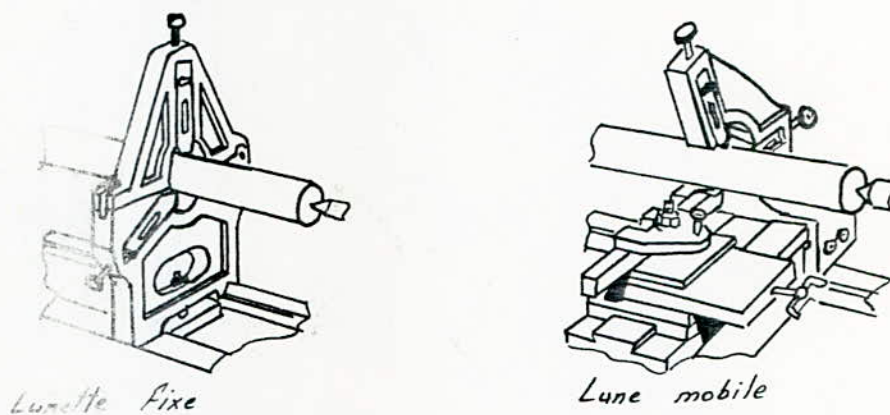
I.9.4 - Mouvements de rotation :

Ils sont caractérisés par A, B, C et définissent la rotation autour de x, y, z respectivement.

Le sens positif est défini opposé au sens trigonométrique.

la pièce. Il existe des lunettes fixes et mobiles : la lunette fixe est solidaire du banc du tour, la lunette mobile se fixe sur le chariot porte-outil.

Fig. I.3 - Lunettes



I.9 - AXES ASSOCIES AUX MOUVEMENTS : (ISO 841)

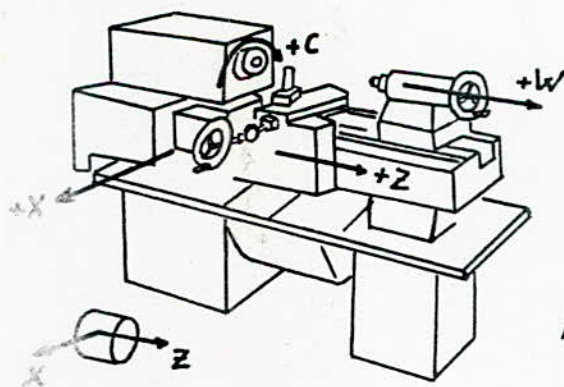


Fig. I.4 - Tour

I.9.1 - Axe Z de mouvement :

Il caractérise l'axe de la broche si la machine ne possède qu'une seule broche. Dans le cas de l'étau-limeur et de la raboteuse, l'axe Z est perpendiculaire

- CHAPITRE · II -

ETUDE DE LA DEFORMATION ELASTIQUE DES ENSEMBLES D'UNE MACHINE

L'expérience de la fabrication des pièces mécaniques et de leur montage a montré que les écarts d'usinage sont inévitables et qu'en réalisant une machine, il est impossible d'assurer une précision absolue.

Les éléments de la machine ne font pas que se déformer, ils changent également leur position relative par suite de l'existence des jeux et de l'élasticité des joints ; aussi, la rigidité des ensembles, n'est-elle pas calculée, mais établie expérimentalement.

Donc dans ce qui suit nous ne tiendrons pas compte des jeux car ils sont compris dans les valeurs des différentes rigidités (ou flexibilités).

Dans ce chapitre, nous supposons l'ébauche à usiner et l'outil comme étant parfaitement rigides.

$$\chi_m = \chi_{ch} + \chi_z \quad \text{avec} \quad \chi_z = \chi_p + K$$

Déterminons la valeur K . Pour cela considérons les triangles semblables $A'B'B''$ et $A'C''C'''$.

$$\text{On a :} \quad \frac{K}{\chi_c - \chi_p} = \frac{z}{l} \Rightarrow K = (\chi_c - \chi_p) \frac{z}{l}$$

donc

$$\chi_z = \left(\frac{l-z}{l} \right) \chi_p + \left(\frac{z}{l} \right) \chi_c$$

Ce qui donne donc pour le refoulement total de la machine :

$$\chi_m = \chi_{ch} + \left(\frac{l-z}{l} \right) \chi_p + \left(\frac{z}{l} \right) \chi_c \quad (*)$$

La flexibilité est déterminée par la formule $W = \frac{\chi}{F_x}$,

on a donc :

$$W_{ch} = \frac{\chi_{ch}}{F_x} \quad ; \quad W_p = \frac{\chi_p}{F_A} \quad ; \quad W_c = \frac{\chi_c}{F_B}$$

Les réactions dues à F_x sont :

$$F_A = F_x \cdot \frac{l-z}{l} \quad ; \quad F_B = F_x \cdot \frac{z}{l}$$

donc

$$W_{ch} = \frac{\chi_{ch}}{F_x} \Rightarrow \chi_{ch} = F_x \cdot W_{ch}$$

$$W_p = \frac{\chi_p}{F_x \cdot \frac{l-z}{l}} \Rightarrow \chi_p = F_x \cdot \left(\frac{l-z}{l} \right) W_p$$

$$W_c = \frac{\chi_c}{F_x \cdot \frac{z}{l}} \Rightarrow \chi_c = F_x \cdot \left(\frac{z}{l} \right) W_c$$

Donc en remplaçant dans l'équation (*) on obtient :

$$X_m = F_x \left[|x|_{ch} + \left(\frac{l-z}{l} \right)^2 |x|_p + \left(\frac{z}{l} \right)^2 |x|_c \right]$$

avec $|x|_m = \frac{\lambda_m}{F_x}$

soit donc

$$|x|_m = |x|_{ch} + \left(\frac{l-z}{l} \right)^2 |x|_p + \left(\frac{z}{l} \right)^2 |x|_c$$

II.2 - ETUDE DE LA COURBE $X_m = f(z)$:

$$X_m = F_x |x|_{ch} + \frac{l^2 - 2lz + z^2}{l^2} F_x |x|_p + \frac{z^2}{l^2} |x|_c$$

donc

$$X_m = \frac{F_x (|x|_p + |x|_c)^2}{l^2} z^2 - \frac{2F_x |x|_p}{l} z + F_x (|x|_{ch} + |x|_p)$$

II.2.1 - Calcul d'extremum :

$$\frac{dX_m}{dz} = \frac{2F_x (|x|_p + |x|_c)}{l^2} z - \frac{2F_x |x|_p}{l} = 0$$

$$\Leftrightarrow 2F_x (|x|_p + |x|_c) z - 2F_x l |x|_p = 0$$

$$\Leftrightarrow z = l \frac{|x|_p}{|x|_p + |x|_c} \quad ; \quad \left(\text{si } |x|_p = |x|_c \text{ alors } z = \frac{l}{2} \right)$$

Regardons s'il s'agit d'un minima ou d'un maxima :

$$\frac{d^2 X_m}{dz^2} = \frac{2F_x (|x|_p + |x|_c)}{l^2} > 0$$

donc $z = l \frac{|x|_p}{|x|_p + |x|_c}$ est un minimum

II. 3 - TRACE DES COURBES $X_m = f(z)$

$$\chi_m = F_x \left[w_{ch} + \left(\frac{\ell - \bar{z}}{\ell} \right)^2 w_p + \left(\frac{\bar{z}}{\ell} \right)^2 w_c \right]$$

TABLEAU DES VALEURS:

\bar{z}	0	0,1 ℓ	0,2 ℓ	0,3 ℓ
$\left(\frac{\ell - \bar{z}}{\ell} \right)^2$	1	0,81	0,64	0,49
$\left(\frac{\bar{z}}{\ell} \right)^2$	0	0,01	0,04	0,09
χ_m	$F_x [w_{ch} + w_p]$	$F_x [w_{ch} + 0,81 w_p + 0,01 w_c]$	$F_x [w_{ch} + 0,64 w_p + 0,04 w_c]$	$F_x [w_{ch} + 0,49 w_p + 0,09 w_c]$

0,4 ℓ	0,5 ℓ	0,6 ℓ	0,7 ℓ
0,36	0,25	0,16	0,09
0,16	0,25	0,36	0,49
$F_x [w_{ch} + 0,36 w_p + 0,16 w_c]$	$F_x [w_{ch} + 0,25 w_p + 0,25 w_c]$	$F_x [w_{ch} + 0,16 w_p + 0,36 w_c]$	$F_x [w_{ch} + 0,09 w_p + 0,49 w_c]$

0,8 ℓ	0,9 ℓ	1,0 ℓ	—
0,04	0,01	0	—
0,64	0,81	1	—
$F_x [w_{ch} + 0,04 w_p + 0,64 w_c]$	$F_x [w_{ch} + 0,01 w_p + 0,81 w_c]$	$F_x [w_{ch} + w_c]$	—

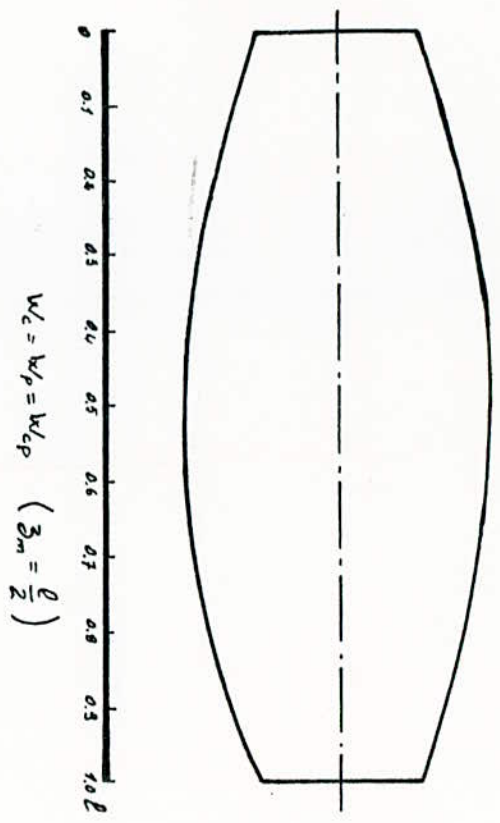
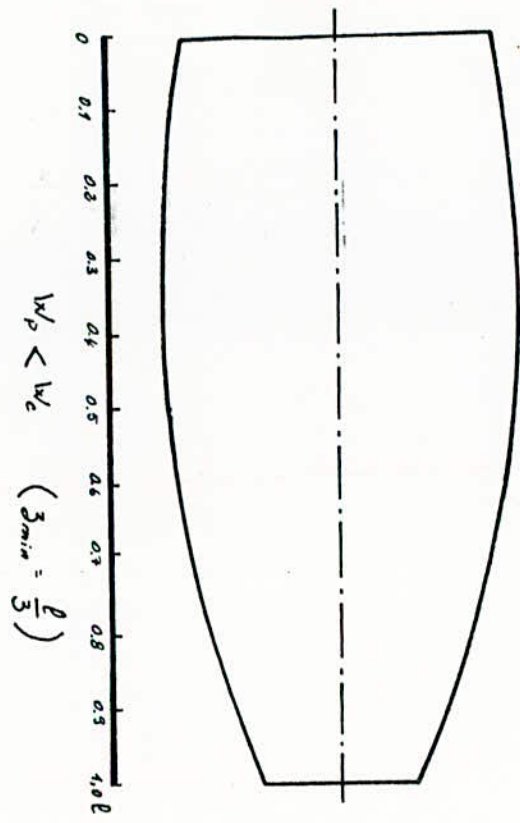
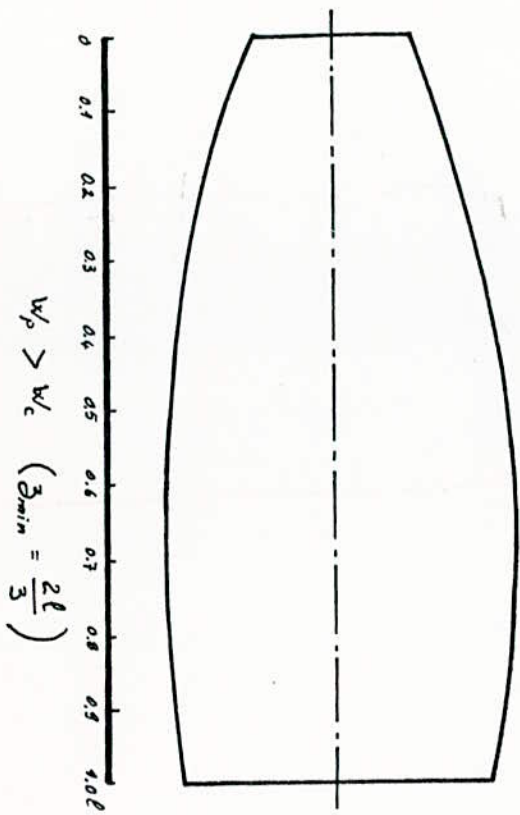


Fig. II.2 - Déformation de la pièce due à la machine

— CHAPITRE. III —

ETUDE DE LA DEFORMATION ELASTIQUE D'UNE EBAUCHE

A l'inverse du chapitre précédent, nous supposons une pièce parfaitement homogène, montée entre pointes sur un tour, également parfait à tous points de vue. Supposons de plus que l'arête tranchante de l'outil conserve une trajectoire parfaitement parallèle à l'axe géométrique des pointes.

Supposons que sous l'effet de la force F_x , la pièce fléchisse et que cette flexion reste élastique.

axe neutre déformé

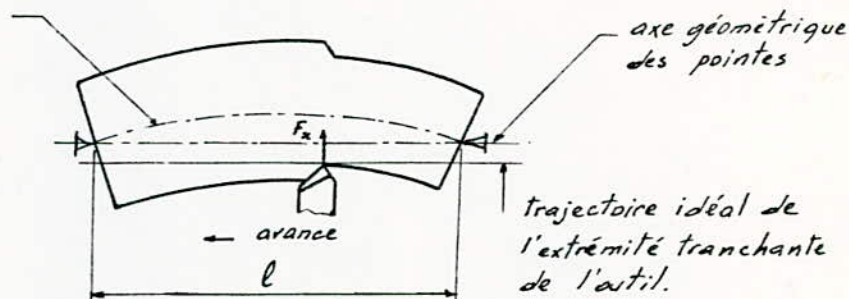


Fig. III.1 - Déformation sous l'effort de coupe

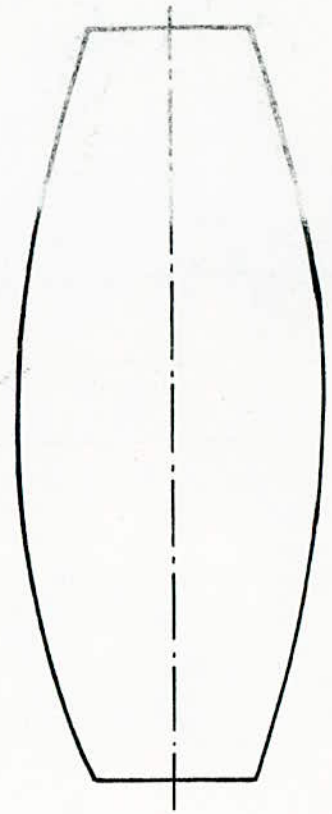
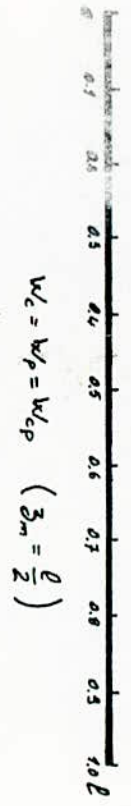
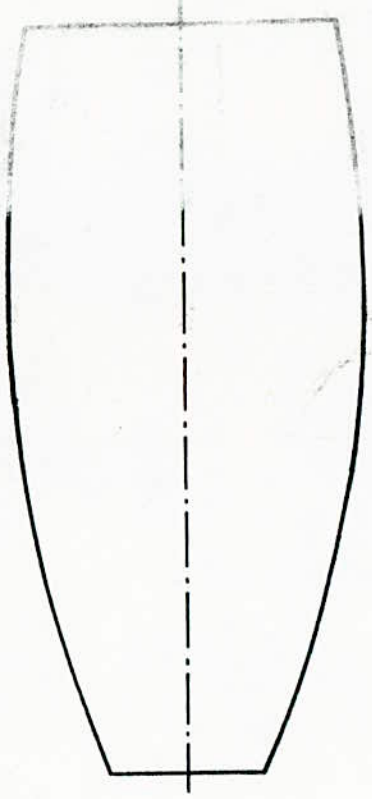
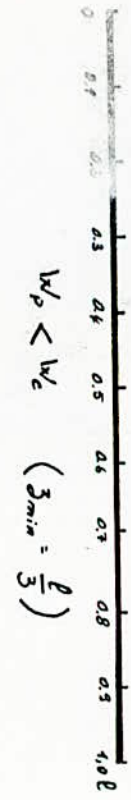
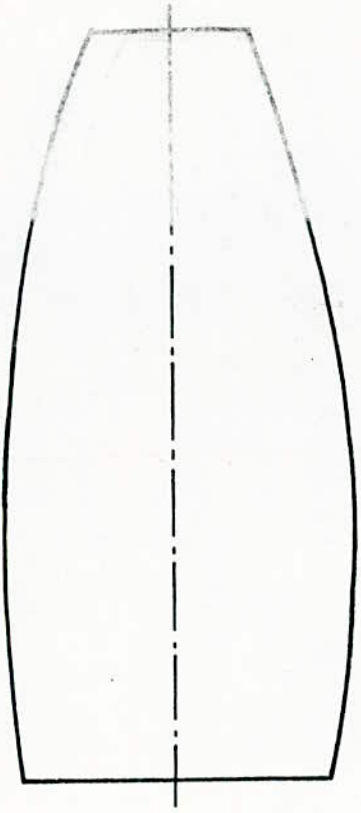
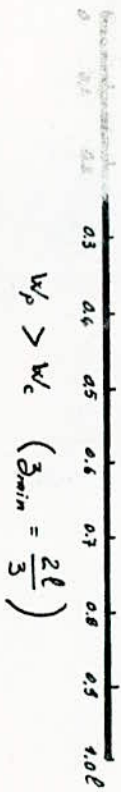


Fig. II.2 - Déformation de la pièce due à la machine

III.1-EQUATION DE LA DEFORMATION ELASTIQUE D'UNE EBAUCHE :

Sous l'action de la composante de l'effort F_x , nous avons une déformation élastique de l'ébauche.

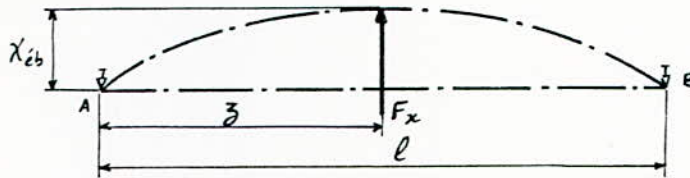


Fig. III.2 - Flèche d'une ébauche

Les réactions dues à F_x sont :

$$F_A = F_x \cdot \frac{b}{l} \quad ; \quad F_B = F_x \cdot \frac{a}{l}$$

L'équation de la déformation est :

$$X_{éb} = \frac{F_x}{3EJ} \cdot \frac{(l-z)^2 \cdot z^2}{l} \quad \text{ave} \quad \eta = \frac{\pi d^4}{64}$$

de plus on a :

$$w'_{éb} = \frac{X_{éb}}{F_x} = \frac{1}{3EJ} \cdot \frac{(l-z)^2 \cdot z^2}{l}$$

III.2- ETUDE DE LA COURBE $X_{éb}=f(z)$:

$$X_{éb} = \frac{F_x}{3EJ} \cdot \frac{(l^2 - 2lz + z^2) \cdot z^2}{l}$$

donc

$$X_{éb} = \frac{F_x}{3EJl} z^4 - \frac{2F_x}{3EJ} z^3 + \frac{F_x l}{3EJ} z^2$$

II.2.1- Calcul d'extremum:

$$\frac{d\chi_{éb}}{dz} = \frac{4F_x}{3EJl} z^3 - \frac{2F_x}{EJ} z^2 + \frac{2F_x l}{3EJ} z = 0$$

$$\Leftrightarrow z \left(\frac{4F_x}{3EJl} z^2 - \frac{2F_x}{EJ} z + \frac{2F_x l}{3EJ} \right) = 0$$

$$\Leftrightarrow \begin{cases} z = 0 \\ \frac{2}{3l} z^2 - z + \frac{l}{3} = 0 \end{cases} \quad (*)$$

La résolution de l'équation (*) donne :

$$z_1 = \frac{l}{2} \quad ; \quad z_2 = l$$

Nous avons donc des extremums pour

$$z = 0 \quad ; \quad z = \frac{l}{2} \quad ; \quad z = l$$

$$\text{On a : } \frac{d^2\chi_{éb}}{dz^2} = \frac{4F_x}{EJl} z^2 - \frac{4F_x}{EJ} z + \frac{2F_x l}{3EJ}$$

$$\text{Pour } z = 0 : \quad \frac{d^2\chi_{éb}}{dz^2} = \frac{2F_x l}{3EJ} > 0$$

la dérivée seconde est positive, donc pour $z = 0$,
la flèche de l'ébauche est minimale.

$$\text{Pour } z = l : \quad \frac{d^2\chi_{éb}}{dz^2} = \frac{2F_x l}{3EJ} > 0$$

la dérivée seconde est positive, donc pour $z = l$,

la flèche de l'ébauche est minimum.

$$\text{Pour } z = \frac{l}{2} : \frac{d^2 \chi_{éb}}{dz^2} = - \frac{F_x l}{3EJ} < 0$$

la dérivée seconde est négative, donc pour $z = \frac{l}{2}$, la flèche de l'ébauche est maximale.

III. 3 - TRACE DES COURBES $\chi_{éb} = f(z)$:

$$\chi_{éb} = \frac{F_x}{3EJ} \cdot \frac{(l-z)^2 \cdot z^2}{l}$$

TABLEAU DES VALEURS

z	0	$0,1l$	$0,2l$	$0,3l$	$0,4l$
$\frac{(l-z)^2 \cdot z^2}{l}$	0	$0,0081 l^3$	$0,0256 l^3$	$0,0441 l^3$	$0,0576 l^3$
$\chi_{éb}$	0	$\frac{0,0550 F_x l^3}{Ed^4}$	$\frac{0,1739 F_x l^3}{Ed^4}$	$\frac{0,2996 F_x l^3}{Ed^4}$	$\frac{0,3913 F_x l^3}{Ed^4}$

$0,5l$	$0,6l$	$0,7l$	$0,8l$	$0,9l$	$1,0l$
$0,0625 l^3$	$0,0576 l^3$	$0,0441 l^3$	$0,0256 l^3$	$0,0081 l^3$	0
$\frac{0,4246 F_x l^3}{Ed^4}$	$\frac{0,3913 F_x l^3}{Ed^4}$	$\frac{0,2996 F_x l^3}{Ed^4}$	$\frac{0,1739 F_x l^3}{Ed^4}$	$\frac{0,0550 F_x l^3}{Ed^4}$	0

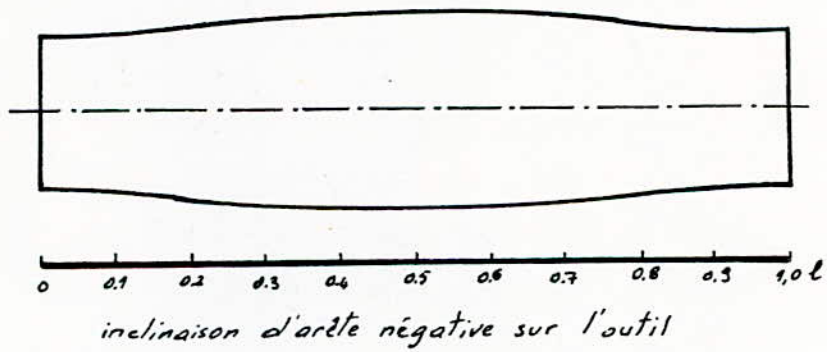
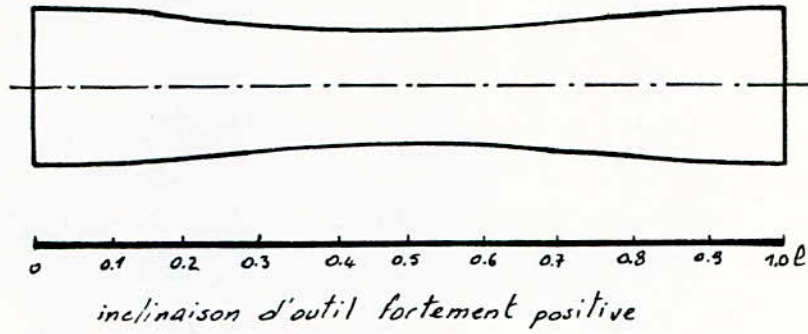


Fig. III.3 - Déformation due à la rigidité
de la pièce.

— CHAPITRE .IV —

ETUDE DE LA DEFORMATION DU SYSTEME ELASTIQUE MACHINE - PIECE

Le système élastique machine-pièce est sollicité en usinage par l'effort F qui produit des déformations élastiques, ainsi que par les déplacements des éléments du système résultant des jeux dans les articulations. La grandeur des déformations élastiques et des refoulements est définie, d'une part, par l'effort F et, d'autre part, par la rigidité du système élastique, c'est-à-dire par son aptitude à résister à l'effort appliqué. Il en résulte des défauts de forme de la surface usinée et donc, la dispersion des côtes à observer. La précision des positions relatives des éléments d'une machine est compromise encore plus par les déformations élastiques dues aux sollicitations mécaniques, les déformations thermiques, ainsi que par l'usure normale des pièces en service.

IV.1- EQUATION DE LA DEFORMATION DU SYSTEME ELASTIQUE MACHINE-PIECE :

Durant l'usinage, les deux phénomènes déjà étudiés se produisent simultanément, ce qui fait que les refoulements déjà engendrés s'ajoutent.

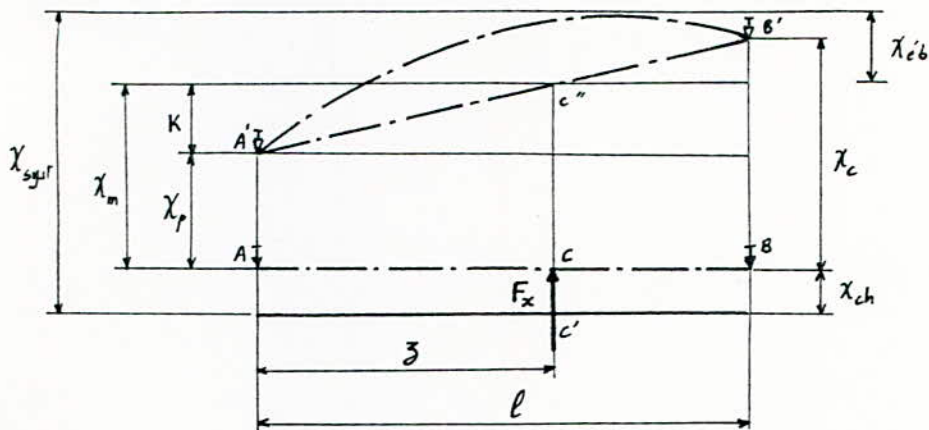


Fig-IV.1- Déformation totale du système

$$\chi_{syst} = \chi_m + \chi_{ib} \quad \text{et} \quad W_{syst} = W_m + W_{ib}$$

Compte tenu des expressions de χ_{ib} et χ_m , on a :

$$\chi_{syst} = F_x \left[W_{ch} + W_p \left(\frac{l-z}{l} \right)^2 + W_c \left(\frac{z}{l} \right)^2 + \frac{1000}{3EJ} \cdot \frac{(l-z) \cdot z^2}{l} \right]$$

La flèche est donnée en microns.

IV.2- ETUDE DE LA FONCTION $\chi_{syst} = f(z)$:

$$\chi_{syst} = F_x \left[W_{ch} + W_p \left(\frac{l-z}{l} \right)^2 + W_c \left(\frac{z}{l} \right)^2 + \frac{1000}{3EJ} \cdot \frac{(l-z) \cdot z^2}{l} \right]$$

$$\Leftrightarrow \chi_{syst} = F_x \left[\frac{1}{3EJl} z^4 - \frac{2}{3EJ} z^3 + \frac{l^3 + 3EJ(W_p + W_c)}{3EJl^2} z^2 - \frac{2W_p}{l} z + (W_{ch} + W_p) \right]$$

IV.2.1_ Calcul d'extremum :

Reprenons l'équation :

$$\chi_{\text{sys}} = F_x \left[w_c l + w_p \left(\frac{l-z}{l} \right)^2 + w_c \left(\frac{z}{l} \right)^2 + \frac{1000}{3EJ} \cdot \frac{(l-z) \cdot z^2}{l} \right]$$

donc

$$\frac{d\chi_{\text{sys}}}{dz} = F_x \left[w_p \frac{2(l-z)(-1)}{l^2} + w_c \frac{2z}{l^2} + \frac{1000}{3EJ} \cdot \frac{2z(l-z) + 2z^2(l-z)(-1)}{l} \right]$$

soit donc

$$\frac{d\chi_{\text{sys}}}{dz} = \frac{2F_x}{l} \left[\frac{2 \cdot 1000}{3EJ} z^3 - \frac{1000l}{EJ} z^2 + \left(\frac{1000l^2}{3EJ} + \frac{w_p}{l} + \frac{w_c}{l} \right) z - w_p \right]$$

en posant $\frac{d\chi_{\text{sys}}}{dz} = 0$,

on obtient

$$\frac{2 \cdot 1000}{3EJ} z^3 - \frac{1000l^2}{EJ} z^2 + \left(\frac{1000l^2}{3EJ} + \frac{w_p}{l} + \frac{w_c}{l} \right) z - w_p = 0 \quad (1)$$

Posons $x = z - \frac{l}{2}$, donc $z = x + \frac{l}{2}$

ce qui fait :

$$(1) \Leftrightarrow \frac{2 \cdot 1000}{3EJ} x^3 + \left(-\frac{1000l^2}{6EJ} + \frac{w_p + w_c}{l} \right) x + \frac{w_c - w_p}{2} = 0$$

donc

$$x^3 + 3 \left[-\frac{l^2}{12} + \frac{EJ}{2 \cdot 1000l} (w_p + w_c) \right] x + 2 \cdot \frac{3EJ}{8 \cdot 1000} (w_c - w_p) = 0$$

ou bien

$$x^3 + 3px + 2q = 0 \quad (2)$$

$$\text{avec } \begin{cases} p = \frac{EJ}{2 \cdot 1000l} (w_p + w_c) - \frac{l^2}{12} \\ q = \frac{3EJ}{8 \cdot 1000} (w_c - w_p) \end{cases}$$

La résolution de cette équation du troisième degré permet de définir x_1 , x_2 et x_3 dont les valeurs permettent de calculer les z_i par substitution.

IV.2.2- Cas particulier:

Lorsque la flexibilité de la poutree et de la contre-poutree est la mme, on a :

$$W_c - W_p = 0 \quad \Rightarrow \quad q = 0$$

donc

$$(2) \Leftrightarrow x^3 + 3px = 0$$

$$\Leftrightarrow x(x^2 + 3p) = 0$$

On obtient donc 3 solutions $x_1 = 0$, $x_2 = -\sqrt{-3p}$ et $x_3 = \sqrt{-3p}$ avec

$$p = \frac{EJ W_{pc}}{1000 l} - \frac{l^2}{12}$$

or pour une surface cylindrique $J = \frac{\pi d^4}{64}$

$$\text{donc} \quad p = \frac{1,08 d^4 W_{pc}}{l} - \frac{l^2}{12}$$

IV.3 - TRACE DES COURBES $X_{\text{sys}} = F(z)$:

La méthode du calcul des refoulements maxima et minima du système élastique machine-pièce présente quelques inconvénients. Pour cela, nous tracerons les différentes courbes $X_{\text{sys}} = F(z)$ par la méthode discrète qui consiste en un tracé point par point que

l'on joindra par des segments de droite.

TABLEAU DES VALEURS

\bar{z}	0	0,1	0,2	0,3
χ_{syst}	$F_x \cdot W/m$	$F_x (W/m + W' \epsilon b)$	$F_x (W/m + W' \epsilon b)$	$F_x (W/m + W' \epsilon b)$

0,4	0,5	0,6	0,7
$F_x (W/m + W' \epsilon b)$	$F_x (W/m + W' \epsilon b)$	$F_x (W/m + W' \epsilon b)$	$F_x (W/m + W' \epsilon b)$

0,8	0,9	1,0	—
$\bar{F}_x (W/m + W' \epsilon b)$	$F_x (W/m + W' \epsilon b)$	$F_x \cdot W/m$	—

l'on joindra par des segments de droite.

TABLEAU DES VALEURS

\bar{z}	0	0,1	0,2	0,3
χ_{sys}	$F_x \cdot W_m$	$F_x (W_m + W'_{\text{é}b})$	$F_x (W_m + W'_{\text{é}b})$	$F_x (W_m + W'_{\text{é}b})$

0,4	0,5	0,6	0,7
$F_x (W_m + W'_{\text{é}b})$	$F_x (W_m + W'_{\text{é}b})$	$F_x (W_m + W'_{\text{é}b})$	$F_x (W_m + W'_{\text{é}b})$

0,8	0,9	1,0	—
$F_x (W_m + W'_{\text{é}b})$	$F_x (W_m + W'_{\text{é}b})$	$F_x \cdot W_m$	—

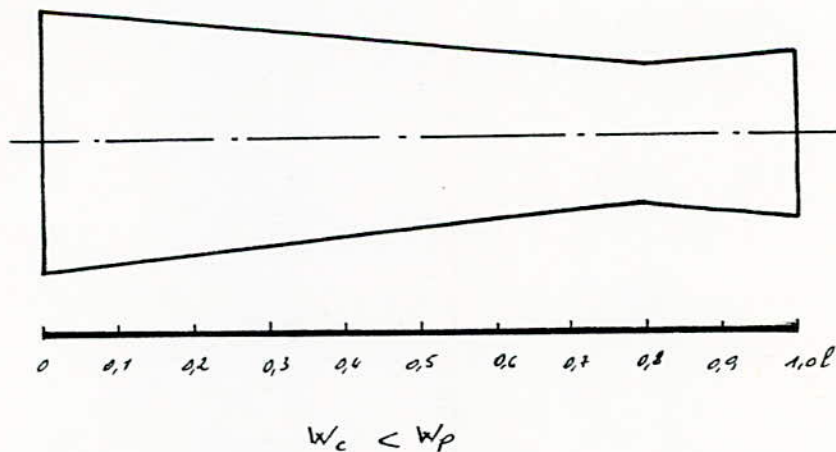
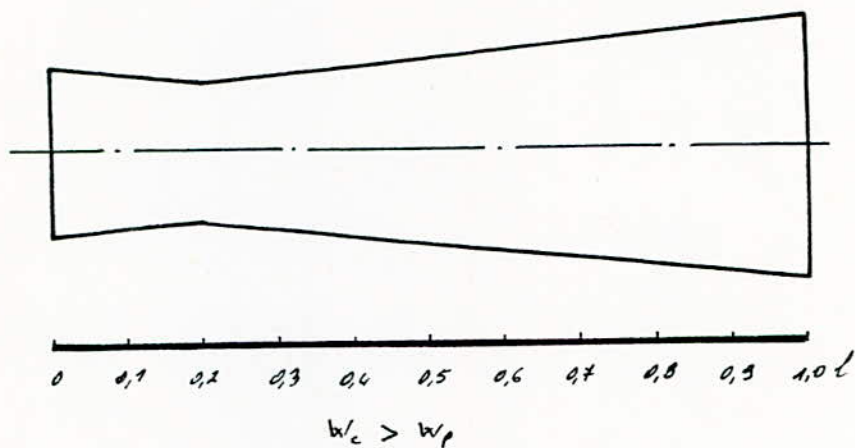
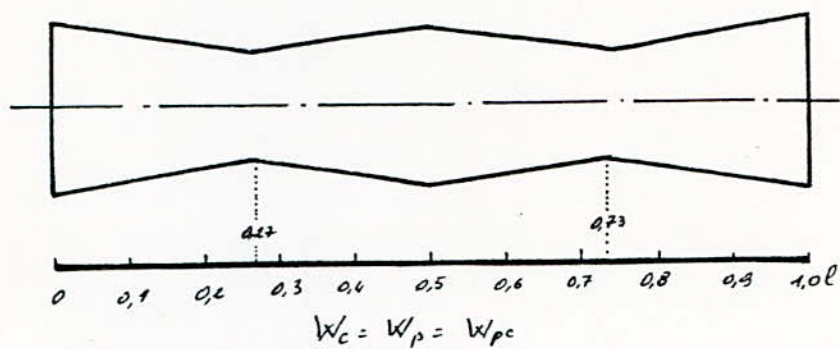


Fig. IV.2. Déformation due à l'élasticité du système
machine - pièce

— CHAPITRE . V —

D E F O R M A T I O N D E L ' O U T I L

Le déplacement de la pointe de l'outil de coupe par rapport aux axes de rotation de la pièce usinée, due à la déformation causée par la force de coupe peut être attribué à l'effet de deux composantes F_v et F_h .

V.1_ D E F O R M A T I O N V E R T I C A L E :

Soit j_v la rigidité verticale du système.

Le déplacement vertical δ_v causé par la composante verticale F_v de l'effort de coupe est :

$$\delta_v = \frac{F_v}{j_v}$$

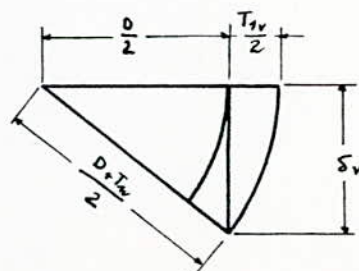
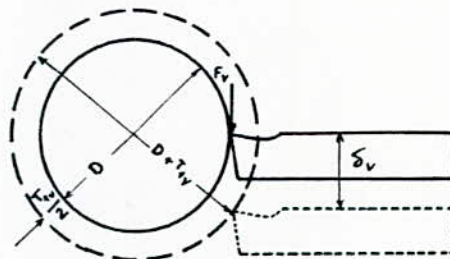


Fig. V.1_ déformation verticale

A partir de la figure V.1 , on peut écrire :

$$\begin{aligned} \delta_v^2 + (0,5 D)^2 &= [0,5(D + T_{1v})]^2 \\ \Rightarrow T_{1v} &= -D + D \left(1 + \frac{4\delta_v^2}{D^2} \right)^{1/2} \\ &= \frac{2\delta_v^2}{D} \quad \text{en négligeant les ordres supérieurs} \\ &= \frac{2}{D} \left(\frac{F_v}{j_v} \right)^2 \end{aligned}$$

V. 2_ DEFORMATION HORIZONTALE :

Considérons que la pointe de l'outil se déplace horizontalement de la valeur δ_h sous l'effet de la composante horizontale F_h . Cette nouvelle position va augmenter le diamètre nominal de la valeur $2\delta_h$.

On a :

$$\begin{aligned} T_{1h} &= 2\delta_h \\ &= \frac{2F_h}{j_h} \end{aligned}$$

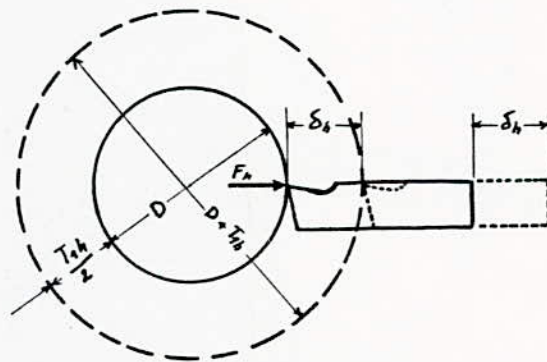


Fig.V.2 - Déformation horizontale

V.3 - DEFORMATION TOTALE :

En pratique les deux composantes F_v et F_h de l'effort de coupe agissent simultanément produisant un déplacement total T_1 dû aux déplacements δ_v et δ_h .

A partir de la figure V.3, on peut établir :

$$\begin{aligned} \left(\frac{D+T_1}{2}\right)^2 &= \left(\frac{D}{2} + \delta_h\right)^2 + \delta_v^2 \\ \Rightarrow T_1^2 + 2T_1 D - 4(\delta_h^2 + \delta_v^2 + D\delta_h) &= 0 \\ T_1 &= -D + \left[D^2 + 4(\delta_v^2 + \delta_h^2 + \delta_h D)\right]^{1/2} \\ &= \frac{2}{D}\delta_h^2 + \frac{2}{D}\delta_v^2 + 2\delta_h \quad \text{en négligeant les ordres supérieurs} \\ &= T_{1h} + T_{1v} + \frac{T_{1h}^2}{2D} \\ &= \frac{2}{D} \left[\frac{F_v^2}{d_v^2} + \frac{F_h^2}{d_h^2} + \frac{F_h}{d_h} \cdot D \right] \\ &= \frac{2F_h^2}{D} \left[R^2 \cdot \frac{1}{d_v^2} + \frac{D}{F_h} \cdot \frac{1}{d_h} + \frac{1}{d_h^2} \right] \end{aligned}$$

avec R égal au rapport $\frac{F_v}{F_h}$.

En utilisant le terme de flexibilité $W = \frac{1}{d}$, on a :

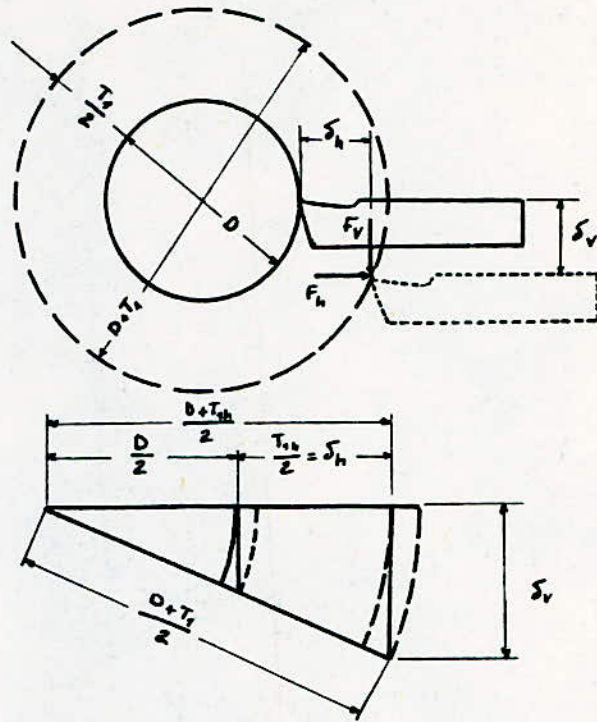
$$W_h = \frac{1}{d_h} \quad ; \quad W_v = \frac{1}{d_v}$$

donc

$$T_1 = \frac{2F_h^2}{D} \left[R^2 \cdot W_v^2 + \frac{D}{F_h} \cdot W_h + W_h^2 \right]$$

Cela montre que la déviation T_1 due à la déformation de l'outil, dépend de la composante horizontale F_h de la force de coupe, du rapport $\frac{F_v}{F_h}$, de la flexibilité horizontale W_h et de la flexibilité verticale W_v du système.

Fig. V.3. Déformation totale



— CHAPITRE . VI —

APPROCHE MATHÉMATIQUE POUR LA RÉSOLUTION DU PROBLÈME DE REFOULEMENT

Les efforts et réactions de taillage se manifestent dans toute la machine sous forme de poussées variées qui interviennent soit directement, soit par effet de couple. Ainsi, dans le chariotage sur tour :

- L'effort de coupe tend à soulever ou fléchir la pièce et la broche. Sa réaction plaque le trainard sur le dessus du banc, récupère par basculement les jeux de guidage ou de portage du système porte-outil ; également elle fait fléchir l'outil, etc.
- L'effort d'avance donne principalement une poussée axiale supportée par la butée. Sa réaction tend à faire rattraper, par rotation les divers jeux de guidage du trainard.
- L'effort de pénétration tend à fléchir la pièce, à pousser la broche sur ses coussinets.

Sa réaction, dirigée vers l'opérateur rattrape, les jeux « vers l'arrière ».

VI.1. PRESENTATION DU PROBLEME :

Comme nous venons de le citer, il y a un certain nombre de facteurs qui interviennent dans le phénomène du refoulement du système élastique machine pièce,

- déformation due à la rigidité des éléments de la machine ;
- déformation due aux jeux de la machine ;
- déformation due à la déformation de l'outil ;
- déformation due à l'effort de pénétration ;
- déformation due à l'effort de coupe ;
- déformation due à la rigidité de la pièce usinée ;
- déformation due au poids propre de la pièce ;
- déformation due à la force d'inertie.

Nous pouvons dire sous toute réserve de vérification par la pratique (chose qui nous a fait défaut), que les erreurs de forme sont essentiellement dues aux cinq derniers points cités ci-dessus.

Dans ce qui va suivre, nous nous sommes efforcés de trouver une solution pour réduire les déformations dues à l'effort de pénétration.

Le problème étant posé, réduire les déformations dues à l'effort de pénétration ou en d'autres termes éliminer l'effet de l'effort de pénétration; il fallait néanmoins le résoudre.

Pour ce faire, nous avons commencé par supposer ce qui suit :

- l'influence de l'effort de coupe est mise de côté et ne sera pas prise en considération;
- le poids de la pièce est négligeable;
- l'influence de la force d'inertie est minimisée en choisissant judicieusement la vitesse de rotation et en considérant le poids de la pièce à usiner négligeable.

Quand à la rigidité de la pièce, il fallait compter avec; car, comme nous l'avons déjà cité, les solides réels, sans exception, se déforment sous l'action d'un effort même très faible. Il fallait donc en tenir compte.

Selon la littérature, pour éviter les déformations élastiques qui engendreraient des défauts géométriques lors d'un usinage entre pointes, sans utilisation de lunette, il faut minimiser la section du copeau et procéder en plusieurs passes, chose qui était très vraisemblable, car si on enfonce encore plus l'outil, la pièce se déforme encore plus, et on ne fera qu'augmenter le phénomène de refoulement au lieu de le réduire. Il faut donc usiner tout en reculant l'outil.

Comme le titre de notre projet l'indique, il fallait corriger le phénomène du refoulement par correction de la trajectoire d'outil. Le problème était là. Quelle trajectoire choisir? On ne pouvait reculer au hasard!

Une certaine réflexion et des échanges d'idées avec différentes personnes, nous tournèrent vers une solution mathématique. La fonction négative était la plus appropriée.

VI.2 - ESSAI DE LA FONCTION NEGATIVE :

Effectivement, connaissant l'équation de la déformation élastique de la pièce ou en d'autres ter-

mes la flèche résultante de l'effort de pénétration, il suffit de donner à l'outil une trajectoire ayant pour équation celle de la déformation élastique de la pièce, mais dans le sens inverse; ce qui revient à annuler l'effet de la flèche tout en en tenant compte.

Essayons d'éclaircir cela par un schéma.

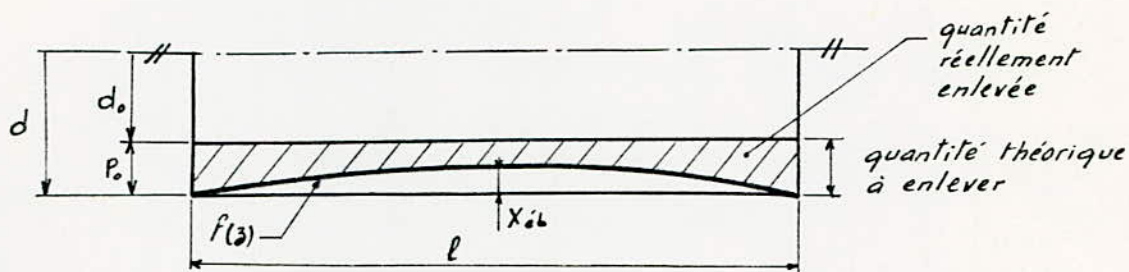


Fig. VI.1 - épaisseur de copeau réellement enlevée

Soit une pièce de diamètre d et de longueur l à usiner sur un tour, entre pointes; nous n'utiliserons bien sur pas de lunette.

Proposons nous de lui enlever une épaisseur p_0 sur le rayon.

Sous l'effet de l'effort de pénétration, la pièce fléchit de la quantité $x_{éb} = \frac{F_x}{3EJ} \cdot \frac{(l-z)^2 \cdot z^2}{l}$ (calculé au chap. III), qui augmente au fur et à mesure que l'outil avance vers le milieu de la pièce. Donc au lieu d'enlever un copeau d'épaisseur régulière

p_0 , l'outil n'enlève que la quantité hachurée (Fig. VI.1)

Regardons la figure suivante,

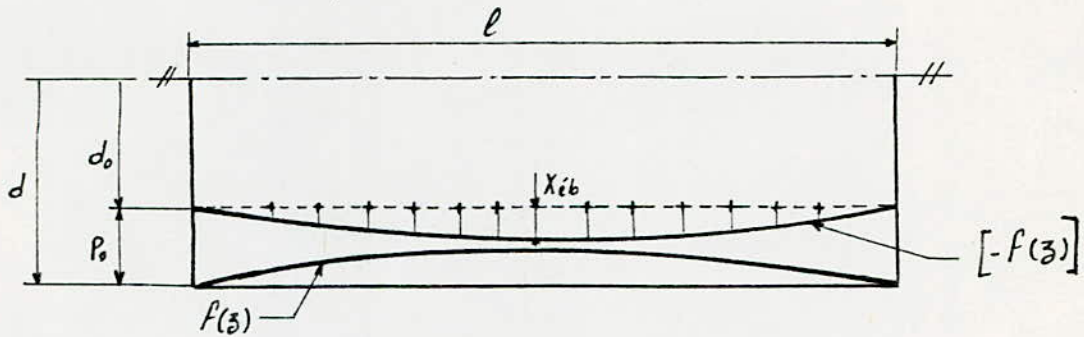


Fig. VI.2. Fonction négative

Donnons à l'outil la trajectoire " $-f(z)$ " comme indiqué sur la Figure VI.2. Sous l'effet de l'effort de pénétration, la pièce fléchit en chaque point de sa longueur, au fur et à mesure que l'outil avance, de la quantité déjà calculée $x_{éb}$. Donc, en joignant les sommets des différentes flèches engendrées, on devrait obtenir après usinage, un cylindre parfait, de diamètre d_0 , comme indiqué sur la figure VI.2.

Nous nous sommes donc proposés de vérifier cette théorie sur un exemple.

VI. 2.1 - Exemple:

Soit à usiner une pièce en acier laminé de résistance $R_r = 600 \text{ N/mm}^2$, de diamètre $d = 20 \text{ mm}$ et de longueur $l = 500 \text{ mm}$.

On utilisera pour cela un outil à charioter à angle de direction $\hat{c} = 30^\circ$.

Nous nous proposons d'enlever une épaisseur de copeau de $6,4 \text{ mm}$ sur le rayon avec une avance par tour de $0,4 \text{ mm}$.

On a :

$$\hat{c} = 30^\circ \Rightarrow F_x = \frac{1}{2} F_c = \frac{1}{2} K a p$$

$$\text{Acier} \Rightarrow E = 2 \cdot 10^5 \text{ N/mm}^2$$

$$R_r = 600 \text{ N/mm}^2 \Rightarrow K = 2500 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{Pièce circulaire} \Rightarrow J = \frac{\pi d^4}{64}$$

Donc les flèches qui résulteraient de l'effort de pénétration sont :

(on obtient les valeurs entre $0,5l$ et $1,0l$ par symétrie).

Tableau VI.1. - Flèche résultante

\bar{x} [mm]	0	50	100	150	200	250
$\chi_{éb}$ [mm]	0	0,687	2,173	3,743	4,889	5,243

Donnons maintenant à l'outil la trajectoire $-f(z)$ et regardons les résultats obtenus.

Nous calculerons à chaque fois la profondeur de passe (P_{eff}), donnée à l'outil, c'est à dire $p - f(z)$ et, à chaque fois nous calculerons la flèche qui résulterait de cette nouvelle profondeur de passe.

z [mm]	0	50	100	150	200	250
$\chi_{éb}$ [mm]	0	0,687	2,173	3,743	4,889	5,243
P_{eff} [mm]	6,4	5,713	4,227	2,657	1,511	1,095
$\chi'_{éb}$ [mm]	0	0,614	1,435	1,554	1,154	0,908

Tableau VI.2. 1^{ère} itération

En consultant le tableau VI.2, nous remarquons que nous diminuons considérablement la flèche. Nous avons donc penser à continuer dans ce sens, dans l'espoir d'annuler complètement la flèche. Nous avons donc fait une deuxième itération, puis une troisième; ce qui a donné:

z [mm]	0	50	100	150	200	250
P_{eff} [mm]	6,4	5,099	2,792	1,103	0,357	0,187
$\chi'_{éb}$ [mm]	0	0,548	0,948	0,589	0,273	0,155

Tableau VI.3. 2^{ème} itération

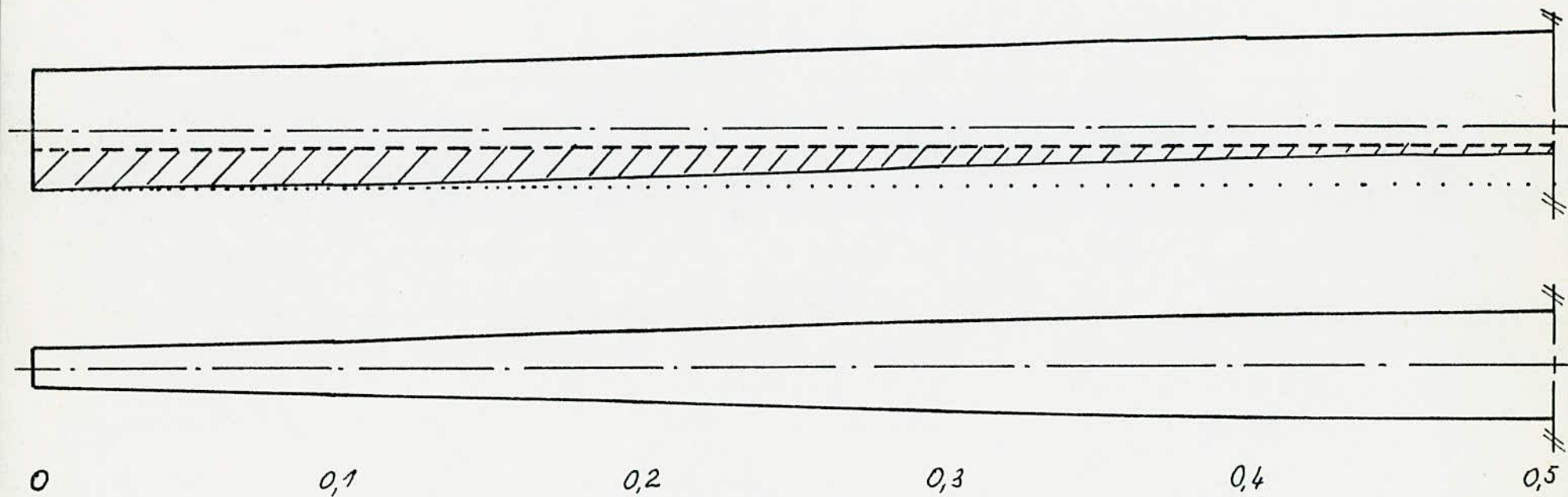


Fig. VI.3 - Effet tonneau (sans correction)

δ [mm]	0	50	100	150	200	250
P_{eff} [mm]	6,4	4,551	1,844	0,514	0,084	0,032
χ''_{cb}	0	0,489	0,626	0,301	0,064	0,026

Tableau VI.4. 3^{ème} itération

Une chose bizarre se passa cependant. Nous avons remarqué que la flèche au niveau $\frac{l}{2}$, qui était très importante, a rapidement et considérablement diminué, tandis que du côté des pointes (c'est à dire des appuis), la flèche diminuait lentement. Nous avons donc décidé de faire des tracés pour mieux comprendre ce qui se passait. Voir les figures VI.3 à VI.6

Grande fut notre déception lorsque nous analysâmes les dessins obtenus.

Effectivement, nous voyons sur la figure VI.3 l'effet obtenu après un usinage sans correction (un tonneau), sur la figure VI.4 (qui correspond à la 1^{ère} itération), l'effet obtenu après correction.

Nous sommes vraiment déçu car nous voyons que l'effet a été amplifié; il résulte un tonneau

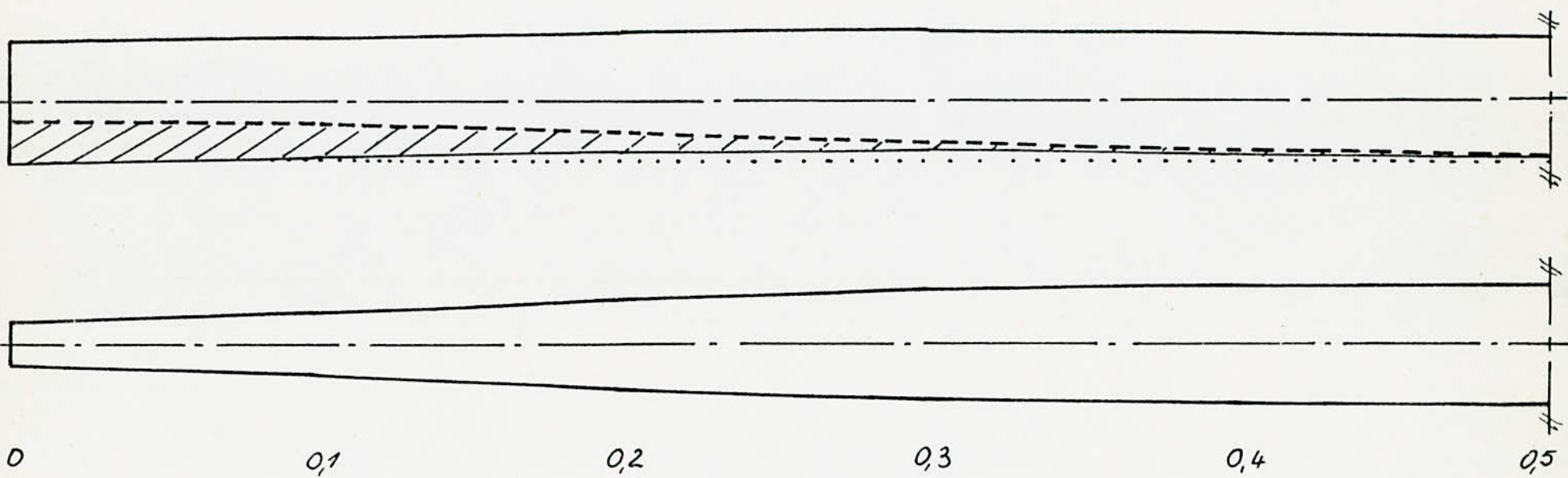


Fig. VI.4 - Effet de la 1^{ère} itération

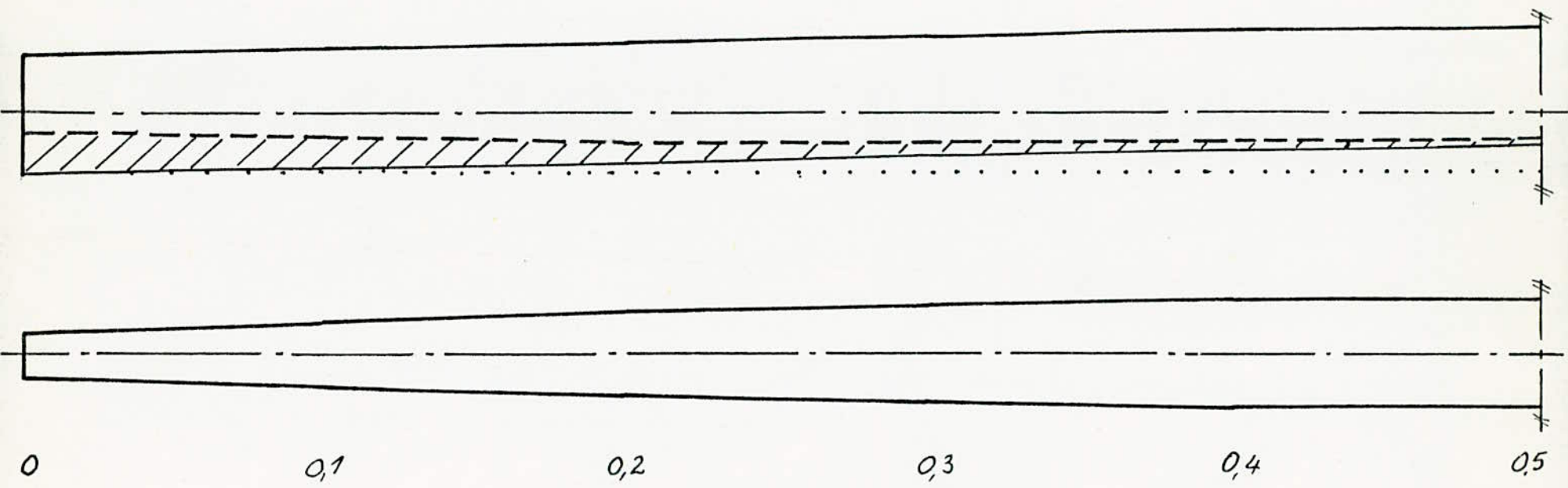


Fig. VI. 5. Effet de la 2^{ème} itération

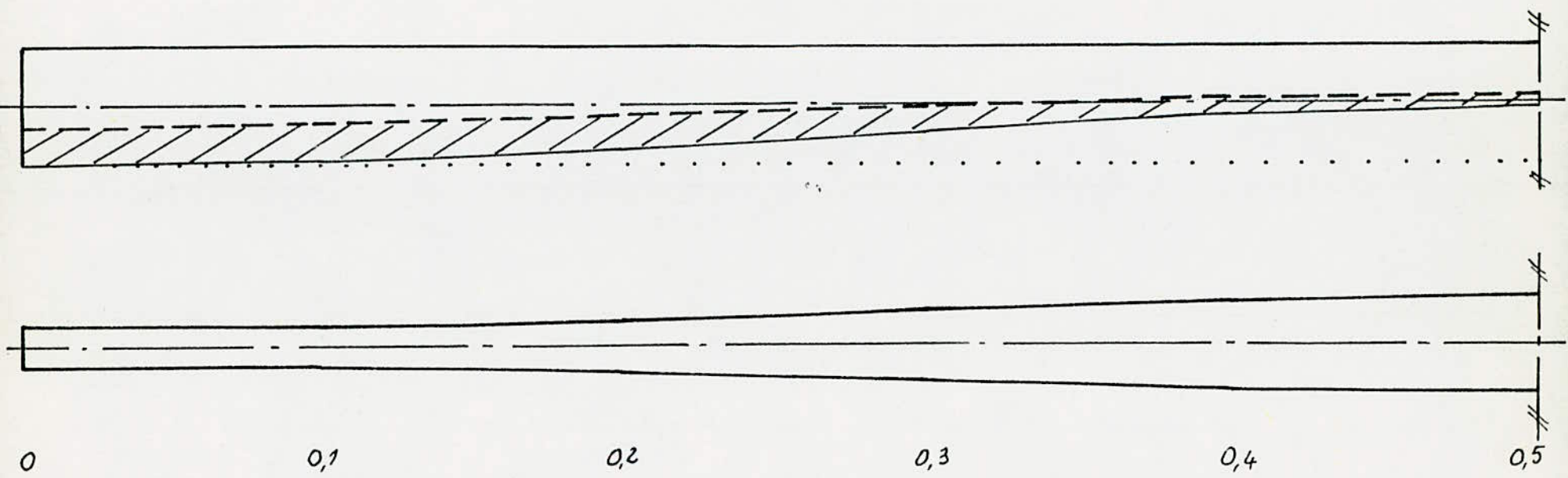


Fig. VI.6 - Effet de la 3^{ème} itération

beaucoup plus épais.

Néanmoins, en consultant la figure VII.6 (qui correspond à la 3^{ème} itération), nous remarquons que plus nous nous enfonçons dans la pièce, plus le résultat de la correction est meilleur car le tonneau obtenu est moindre, c'est à dire plus fin; chose qui nous donna matière à réfléchir.

VI.3 - REFLEXION SUR LA FONCTION NEGATIVE:

Après avoir réfléchi plus profondément au problème, nous avons remarqué que nous avions fait une erreur de raisonnement.

Nous avons conclu qu'il était plus correcte de raisonner sur l'épaisseur du copeau réellement enlevée que sur la flèche due à la déformation de la pièce.

Considérons la figure suivante:

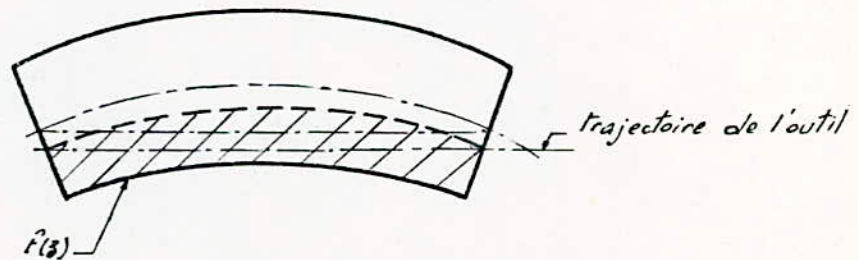


Fig.VI.7 - épaisseur de copeau constante

Si nous effectuons un usinage sans correction, la quantité de matière enlevée est celle comprise entre la trajectoire de l'outil et la trajectoire d'équation $f(z)$: donc un copeau d'épaisseur irrégulière. Or, obtenir un cylindre parfait revient à enlever un copeau d'épaisseur régulière, c'est à dire, enlever la quantité de matière hachurée (fig. VI.7), qui est comprise entre la trajectoire d'équation $f(z)$ et la trajectoire en pointillé.

Donc si nous calculons les flèches engendrées par l'effort de pénétration, et si nous donnons à chaque fois à l'outil une profondeur de passe égale à $p_0 + f(z)$, nous obtiendrons un cylindre parfait. Appliquons cette hypothèse par un exemple.

VI.3.1_ Exemple :

Nous nous proposons d'usiner des pièces en acier laminé $R_r = 400 \text{ N/mm}^2$ avec un outil au carbure d'angle de direction $i = 30^\circ$.

On donnera à chaque fois à l'outil, la profondeur de passe $p = p_0 + f(z)$, et nous calculerons l'épaisseur du copeau réellement enlevé (P_{eff}), en tenant compte des déformations engendrées par l'effort

de pénétration.

Exemple 1: $d = 50 \text{ mm}$; $p_0 = 10 \text{ mm}$

• $z = 0,1 \ell$

• $z = 0,5 \ell$

l/d	sans correction P_{eff} [mm]	avec correction P_{eff} [mm]
4	9,998873519	9,999999872
5	9,997799842	9,999999518
6	9,996198121	9,999998552
7	9,993962767	9,999996352
8	9,990988153	9,999991882
9	9,98716879	9,99983535
10	9,982398737	9,999369016
11	9,976572718	9,999345115
12	9,969585017	9,9990749
13	9,961330024	9,99850467
14	9,951702133	9,99766735
15	9,940595736	9,99647109
16	9,927905225	9,99480239
17	9,913524993	9,9925221
18	9,897349432	9,98946288
19	9,879272934	9,98542501
20	9,859189892	9,98017254

l/d	sans correction P_{eff} [mm]	avec correction P_{eff} [mm]
4	9,991308018	9,999992443
5	9,983023473	9,999971182
6	9,970664561	9,999913944
7	9,953416409	9,999782996
8	9,930464144	9,999516481
9	9,90992893	9,999019762
10	9,864187782	9,998155506
11	9,819233938	9,996732361
12	9,765316487	9,994492362
13	9,701620557	9,991096968
14	9,627331274	9,986111806
15	9,541633764	9,978990043
16	9,443713155	9,969054499
17	9,332754573	9,955478356
18	9,207943144	9,937264598
19	9,068463996	9,913224064
20	8,913502256	9,88195227

Exemple 2: $d = 10 \text{ mm}$; $p_0 = 2 \text{ mm}$

$$\cdot z = 0,1 \ell$$

$$\cdot z = 0,5 \ell$$

ℓ/d	sans correction $P_{eff} [\text{mm}]$	avec correction $P_{eff} [\text{mm}]$
4	1,998873519	1,999999366
5	1,997799842	1,999997580
6	1,996198127	1,999992773
7	1,993962767	1,999981776
8	1,990988153	1,999959393
9	1,987168679	1,999917679
10	1,982398737	1,999845097
11	1,976572718	1,999725582
12	1,969585017	1,999537464
13	1,961330024	1,999252317
14	1,951702133	1,998833658
15	1,940595736	1,998235567
16	1,927905225	1,997401172
17	1,913524993	1,996261036
18	1,897349432	1,994731431
19	1,879272934	1,992712488
20	1,859189892	1,990086257

ℓ/d	sans correction $P_{eff} [\text{mm}]$	avec correction $P_{eff} [\text{mm}]$
4	1,991308018	1,999962225
5	1,983023473	1,999855899
6	1,970664561	1,999569716
7	1,953416409	1,998914985
8	1,930464144	1,997582383
9	1,900992893	1,995098796
10	1,864187782	1,990777521
11	1,819233938	1,983661815
12	1,765316487	1,972461825
13	1,701620557	1,955484854
14	1,627337274	1,93055901
15	1,541633764	1,894950197
16	1,443713155	1,845272473
17	1,332754573	1,77739177
18	1,207943144	1,686322969
19	0,931536003	1,566120397
20	0,91502255	1,409761336

Nous remarquons que les résultats obtenus avec correction sont bien meilleurs que ceux obtenus par un usinage sans correction. Seulement, l'apparition du tonneau n'a pas été complètement éliminée. Nous obtenons un tonneau beaucoup plus fin : nous tendons donc vers le cylindre. Effectivement, prenons par exemple le cylindre de diamètre 50 mm, à la position $z = 0,5l$ et effectuons un usinage sans correction ; nous avons l'apparition d'une flèche de 1,086497745 mm. Il en résulte une épaisseur de copeau enlevée égale à 8,913502255 mm au lieu de 10 mm. Par contre, si nous effectuons un usinage avec correction, nous enlevons une épaisseur de copeau de 9,88195227 mm. Donc une amélioration de 9,68 %.

Pour le diamètre $d = 10$ mm, au lieu d'enlever 2 mm, nous enlevons seulement 0,913502255 mm sans correction et 1,409761326 mm avec correction, donc une amélioration de 24,813 %.

La correction n'est donc pas totale.

VI. 4 - CONCLUSION :

Nous remarquons pour les deux cas cités ci-dessus, c'est à dire pour $d = 50$ mm, il reste encore \approx

enlever 1,18% de la profondeur de passe initialement prévue p_0 . Pour $d = 10 \text{ mm}$, il reste encore à enlever 29,51% de p_0 . On n'obtient pas un cylindre parfait. Cela s'explique par le fait qu'en prenant $p = p_0 + f(z)$, nous augmentons la profondeur de passe. Ceci augmente l'effort de coupe, donc l'effort de pénétration, et par conséquent la flèche. Ce qui fait que nous n'enlevons pas l'épaisseur de copeau voulue.

Cependant, le fait d'obtenir un meilleur résultat veut dire que la profondeur de passe et la flèche n'augmentent pas dans les mêmes proportions. C'est à dire qu'une grande augmentation de la profondeur de passe n'engendre pas une grande augmentation de la flèche. Il faut donc jouer sur la rapidité des deux phénomènes.

Donc pour corriger entièrement le phénomène du refoulement, il faut augmenter la profondeur de passe. Une question se pose, dans quelles proportions?

— CHAPITRE. VII —

RESOLUTION DU PROBLEME DE REFOULEMENT PAR SIMULATION

Comme cela est de coutume en mécanique, il fallait en revenir à une relation empirique.

Seulement, nous ne disposons pas de tour à commande numérique.

Pour palier à ce problème, nous avons décidé de faire une simulation sur ordinateur.

VII.1_ APPROCHE DU PROBLEME :

Notre but est de faire des essais. C'est à dire donner différentes profondeurs de passe et mesurer l'épaisseur du copeau réellement enlevé jusqu'à atteindre l'épaisseur initialement prévue p_0 , donc obtenir un cylindre correct.

Il fallait partir de la profondeur de passe $p = p_0 + f(z)$ et l'augmenter petit à petit jusqu'à éliminer complètement l'effet du refoulement.

Pour ce faire, nous avons écrit la profondeur de pas-

se à donner à l'outil comme étant $p = p_0 + b \cdot f(\bar{z})$ et augmenté au fur et à mesure le coefficient b , jusqu'à atteindre un cylindre parfait, c'est à dire avoir une épaisseur du copeau réellement enlevée égale à p_0 , et cela en tenant compte du phénomène de refoulement bien sûr.

VII. 2 _ SOLUTION PROPOSEE :

Nous devons simuler l'opération d'usinage.

Pour cela, nous avons pris un cylindre en acier laminé $R_r = 400 \text{ daN/mm}^2$, de diamètre $d = 50 \text{ mm}$ et de longueur $l = 300 \text{ mm}$. Nous avons convenu de lui enlever une profondeur de passe $p = 1,6 \text{ mm}$ avec une avance par tour de $a = 0,4 \text{ mm}$.

Nous avons d'abord calculé les flèches pour les différentes positions de l'outil.

\bar{z} [mm]	0	30	60	90	120	150
χ_{i6} [mm]	0	$6,083 \cdot 10^{-4}$	$1,922 \cdot 10^{-3}$	$3,312 \cdot 10^{-3}$	$4,326 \cdot 10^{-3}$	$4,694 \cdot 10^{-3}$

Tableau VII.1- Flèche de la pièce.

Nous donnons ensuite une profondeur de passe $p > p_0$ et nous calculons la flèche engendrée f . L'épaisseur du copeau réellement enlevée est $p_1 = p - f$.

La différence $p_1 - p_0$ entre l'épaisseur du copeau enlevée et l'épaisseur du copeau qu'on doit enlever, doit être inférieure à un micron. Si non, on augmente p , et on refait l'opération.

Pour ne pas augmenter la profondeur de passe anarchiquement, nous l'avons écrite sous la forme $p = p_0 + b \cdot f(z)$ et on augmente le coefficient b de 0,01 en 0,01. Nous avons donc commencé de la profondeur de passe $p = 1,6 + f(z)$.

Après calcul, nous avons trouvé $b = 1,01$ quelque soit la position de l'outil.

Donc pour éviter le phénomène de refoulement, il faut donner à l'outil une profondeur de passe $p = p_0 + 1,01 f(z)$ en chacune de ses positions.

Pour vérifier l'exactitude de cette relation, nous avons fait varier p_0 de 0,5 à 10 mm. La différence $p_1 - p_0$ restait toujours inférieure à un micron.

A priori, la formule $p = p_0 + 1,01 f(z)$ est valable.

Pour mieux apprécier cela, nous avons refait les calculs pour un diamètre de 10 mm, en gardant toujours le même rapport $\frac{L}{d} = 6$. La différence $p_1 - p_0$ reste encore inférieure à un micron.

Nous avons donc commencé à augmenter le rapport

$\frac{\ell}{d}$. La valeur $\frac{\ell}{d} = 10$ dépassée, l'erreur $p_1 - p_0$ commence à augmenter. La formule $p = p_0 + 1,01 f(z)$ ne reste plus valable. Il fallait donc à chaque fois déterminer la valeur du coefficient b qui donnerait une différence $p_1 - p_0$ inférieure à un micron, pour chaque position de l'outil et pour différentes valeurs de la profondeur de passe et du rapport entre la longueur et le diamètre de la pièce.

Pour cela, nous avons posé $p = p_0 + (1 + \gamma_a) f(z)$
avec $f(z) = \frac{64 c K_a}{3 E \pi \left(\frac{d}{p}\right)} \left(\frac{\ell}{d}\right)^3 \left[\left[\left(\frac{x}{\ell}\right) - 2 \right] \left(\frac{x}{\ell}\right) + 1 \right] \left(\frac{x}{\ell}\right)^2$
où

c - coefficient qui dépend de l'angle de direction d'outil;

x - correspond au z de la normalisation ISO 841.

et établit le programme suivant:

```

10 REM  abaque
20 DIM X (9,17) , Y (9,17)
30 WIDTH LPRINT 132
40 CLS
50 XL=.1
60 INPUT "c";C
70 INPUT "Ka"; K
80 INPUT "a";A
90 INPUT "E";E
100 INPUT "d";D1
110 INPUT "d/p";DPO
120 INPUT "1/d"; LD1
130 CLS
140 KEY OFF

```

```

160 SCIZZY C
160 LOCATE 1,10:PRINT "a=",0,"k="; K,"f=";A,"E=";E,"D=";D,"C=";C,"DQ=";DQ,"LD=";LD
170 LOCATE 5,15:PRINT "x(1)=";X1
180 LOCATE 2,11:PRINT "Va"
190 LOCATE 13,78:PRINT "1/2"
200 LINE (20,20)-(20,170)
210 LINE (20,170)-(500,170)
220 FOR I=1 TO 4
230 Y=40+(I-1)*43.2
240 LINE (17,Y)-(20,Y)
250 NEXT I
260 FOR I=1 TO 6
270 Y=20+(I-1)*13.6
280 LINE (X,170)-(X,173)
290 NEXT I
300 XB=20 / 570
310 FX=24 * 2 * X * X / (3 * X * 3 + 24 * 5926 * X)
320 FY=((X-21) * X * 14 * X * X * 2
330 FX=FX * 57
340 FOR I =1 TO 9
350 DO=I + 10 * E
360 PO=DO / DQ
370 FOR J =1 TO 17
380 LD=J + 3
390 B=1
400 FX2=FX * LD * 3 / DQ
410 P=PO + B * FX2
420 DP1=DO / P
430 TXB=FX * LD * 3 / DQ
440 IF ABS(P-PO-FX3) >=.001 THEN 480
450     Y(I, J )=B+1
460     X(I, J )=LD
470     GOTO 500
480 B =B + 1.001
490     GOTO 410
500 IF DO > D1 OR LD1 > LD2 THEN GOTO 540
510 YB=Y(I, J )
520 XB=X(I, J )
530 YB=1
540 NEXT J
550 NEXT I
560 YMAX=0
570 FOR I =1 TO 9
580 FOR J =1 TO 17
590 IF YMAX < Y(I, J ) THEN YMAX=Y(I, J )
600 NEXT J
610 NEXT I
620 YE=YMAX / 150
630 FOR I =1 TO 9
640 FOR J =2 TO 17
650 IF J=17 THEN GOTO 710

```

```

660 X2=CC+X(I, J)/XE
670 Y2=170-Y(I, J) /YE
680 X0=CC+ X(I, J) *XE
690 Y0=170-Y(I, J) *YE
700 LINE(X1,Y1)-(X2,Y2)
710 IF X0 < 0 OR Y0 < 0 THEN GOTO 760
720 CIRCLE (X1,Y1),5
730 NL =CINT(Y1/8)
740 NO =CINT(X1/8)-15
750 LOCATE NL ,NO : PRINT "Ye=",Y0
760 NEXT J
770 NL =CINT(Y2/8)
780 NO =CINT(X2/8)-1
790 IF NO > 75 THEN NO=75
800 LOCATE NL ,NO : PRINT "Xd=",X0
810 NEXT I
820 LOCATE 23,1
830 END
840 XL=XL+1
850 LOCATE 24,1:INPUT "APPUYEZ SUR F5 pour obtenir Ye pour la prochaine position
n de l'outil",REP$
860 IF REP$="CONT" GOTO 690
870 IF XL > 5 THEN GOTO 890
880 GOTO 130
890 END

```

Le programme a pour but principale le tracé d'abaques qui donneraient la valeur de γ_a en fonction du rapport $\frac{l}{d}$, pour les différentes positions de l'outil.

Donc, connaissant le rapport entre la longueur et le diamètre de la pièce qui on veut usiner, on lit sur l'abaque la valeur de γ_a .

Un petit calcul effectué de côté, nous permet ensuite de déterminer la profondeur de passe à donner à l'outil en injectant la valeur de γ_a dans la formule

$$P = P_0 + (1 + \gamma_a) F(z)$$

Pour éviter les erreurs de lecture, le programme affiche la valeur exacte de γ_a et indique sa position sur l'abaque en l'encerclant.

Pour être plus rigoureux, nous avons préparé le programme suivant :

```

10 REM profondeur de passe
20 DIM P(10), Z(10), D(10)
30 CLS
40 INPUT "a", A
50 INPUT "b", B
60 INPUT "c", C
70 INPUT "e", E
80 INPUT "d", D
90 INPUT "p0", P(0)
100 INPUT "l", L
110 CLS
120 KEY OFF
130 DP(0)=D/P(0)
140 LD=L/D
150 DX(0)=P(0)
160 Z(0)=0
170 FX1=64*D*B*K*Y*LD*B*(C*B*D*DP(0)*B,1416926)
180 FOR I=1 TO 10
190 XL=FX1
200 FX=(XL-2)*XL+1)*XL*B
210 FX=FX)*FX
220 D=1
230 P(I)=P(0)+B*FX
240 IF ABS(P-P(I)-FX)>.001 THEN 270
250 B=B+.001
260 GOTO 230
270 DX(I)=P(I)-P(I-1)
280 Z(I)=XL*L
290 NEXT I
300 LOCATE 5,10:PRINT "Z"
310 LOCATE 1,25:PRINT "DX"
320 FOR I=0 TO 10
330 NL=I+9
340 LOCATE NL,10:PRINT Z(I)
350 LOCATE NL,20:PRINT DX(I)
360 NEXT I
370 END

```

Nous introduisons les différents paramètres qui définissent le matériau à usiner, le matériau de l'outil, l'angle de direction d'outil, la longueur de la pièce, son diamètre et l'épaisseur du copeau à enlever et on obtient les coordonnées z et dx qui définissent les différentes positions de la pointe de l'outil lors de l'usinage avec correction.

Les valeurs z et dx seront directement introduites dans les différents blocs du programme de l'opération d'usinage.

VII.3_ CONCLUSION :

D'après ce que nous venons de voir, il est théoriquement possible lors d'un usinage entre pointes, sans utilisation de lunette, d'éliminer l'effet de l'effort de pénétration par simple correction de la trajectoire d'outil.

On réduit ainsi les erreurs de forme de la pièce par rapport à un chariotage sans correction.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Après avoir établi la théorie de la déformation des différents paramètres influants sur l'exactitude de la géométrie d'une pièce usinée entre pointes, sans utilisation de lunette, nous avons procédé à l'élimination de l'un d'eux, qui est l'effort de pénétration.

Nous pensons sincèrement, qu'on peut éviter les défauts géométriques tout en se passant de lunette.

Pour cela nous espérons que ce sujet aura une suite, afin de pouvoir éliminer les différents facteurs qui ont été énumérés. Une étude de synthèse permettra de dire si nous pourrions réellement nous passer de la lunette.

Nous regrettons tout de même l'indisponibilité de tour à commande numérique pour la vérification des résultats théoriques.

ANNEXE

EXEMPLES D'EXECUTION

Soit à usiner une pièce en acier laminé de résistance $R_r = 400 \text{ N/mm}^2$, de diamètre $d = 10 \text{ mm}$ et de longueur $l = 200 \text{ mm}$, avec un outil à angle de direction $\hat{c} = 30^\circ$.

Nous enlèverons une profondeur de passe $p_0 = 2 \text{ mm}$ avec une avance par tour $a = 0,4 \text{ mm}$.

I. PROGRAMME ABAQUE:

Nous introduisons les valeurs suivantes:

$$c = 0,5$$

$$K = 1600$$

$$a = 0,4$$

$$E = 2 \cdot 10^5$$

$$d = 10$$

$$d/p = 5$$

$$l/d = 20$$

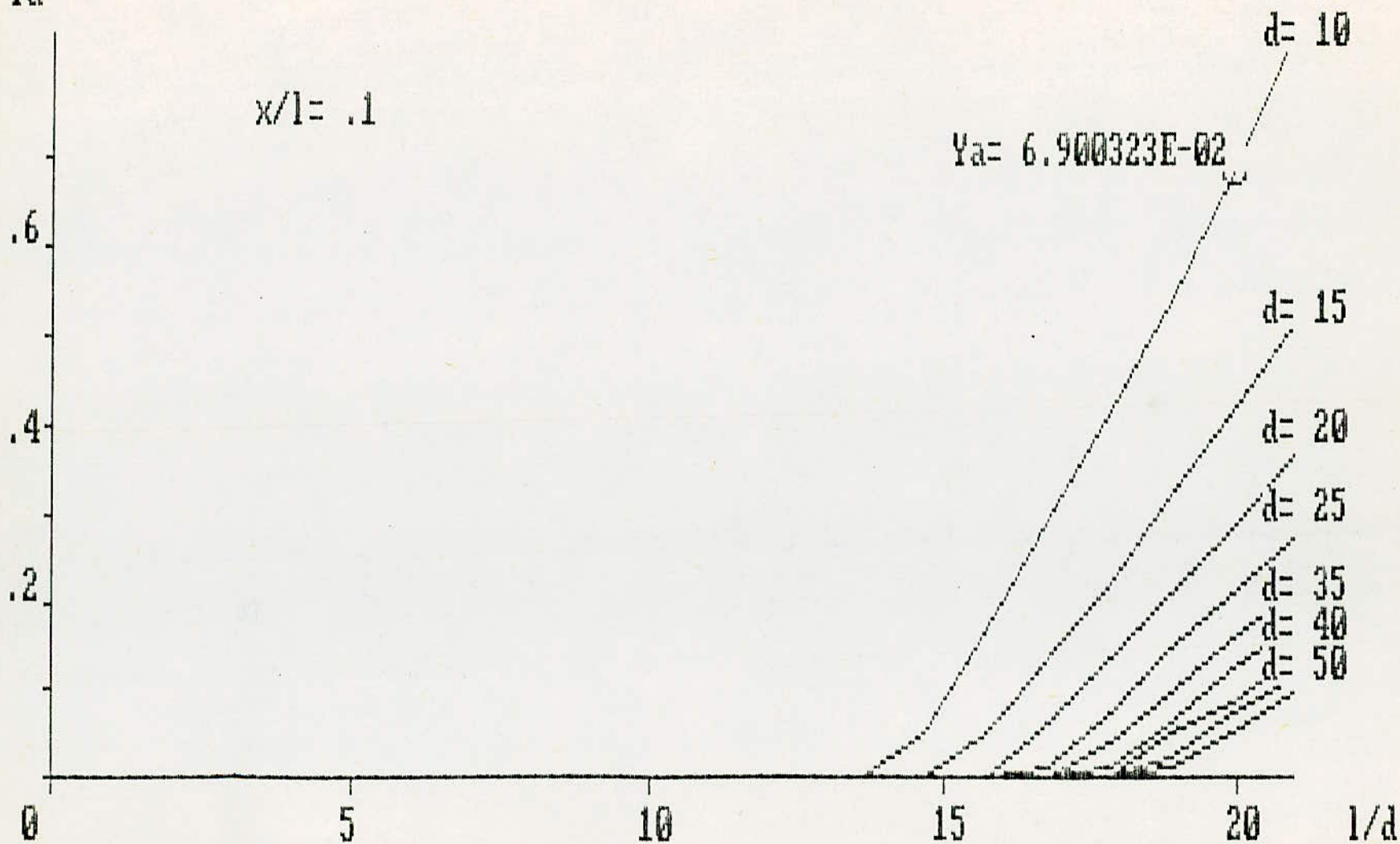
On obtient les résultats suivants:

$c = .5$ $K = 1600$ $a = .4$ $E = 200000$ $d/p = 5$ $l/d = 20$

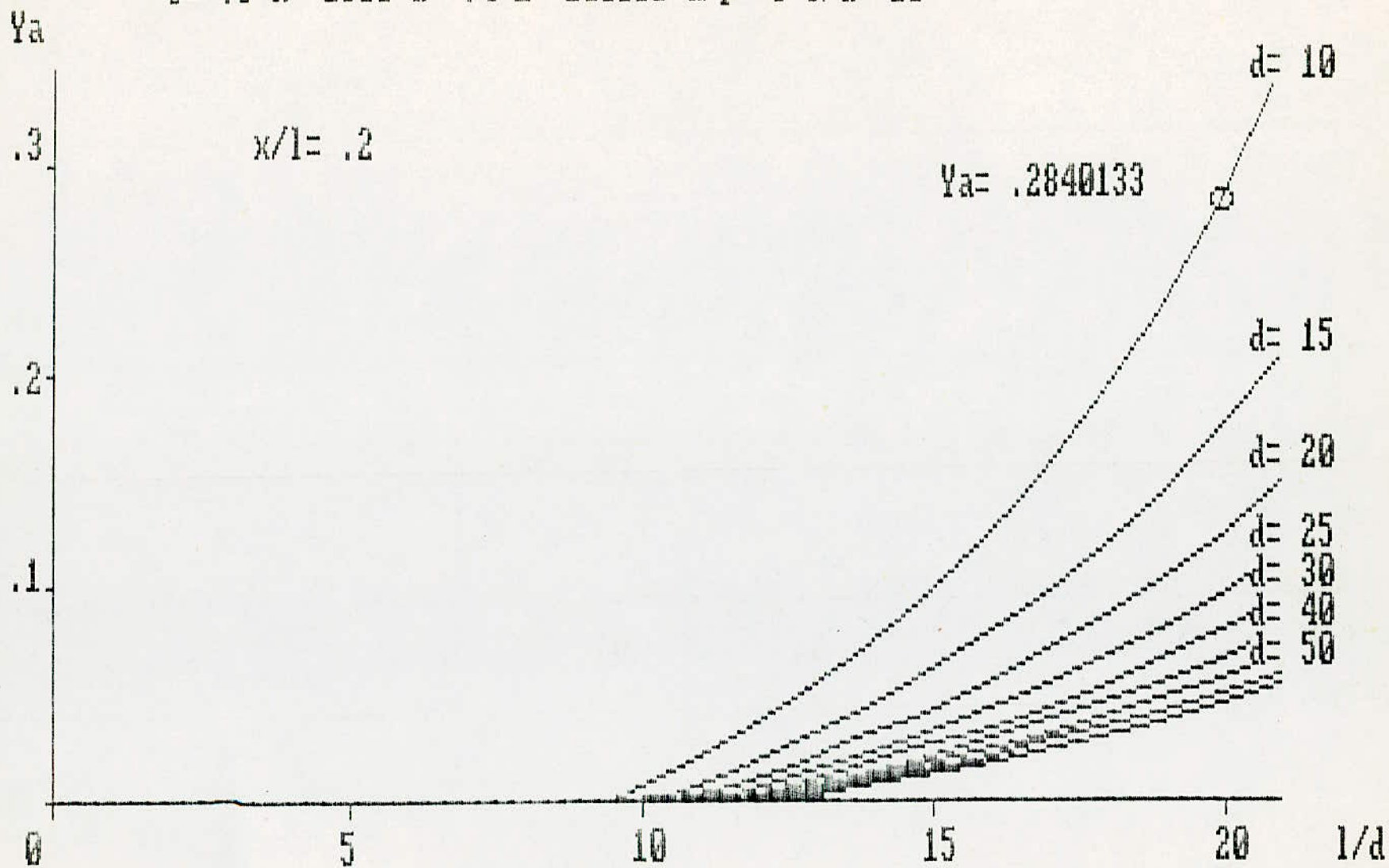
γ_a

$x/l = .1$

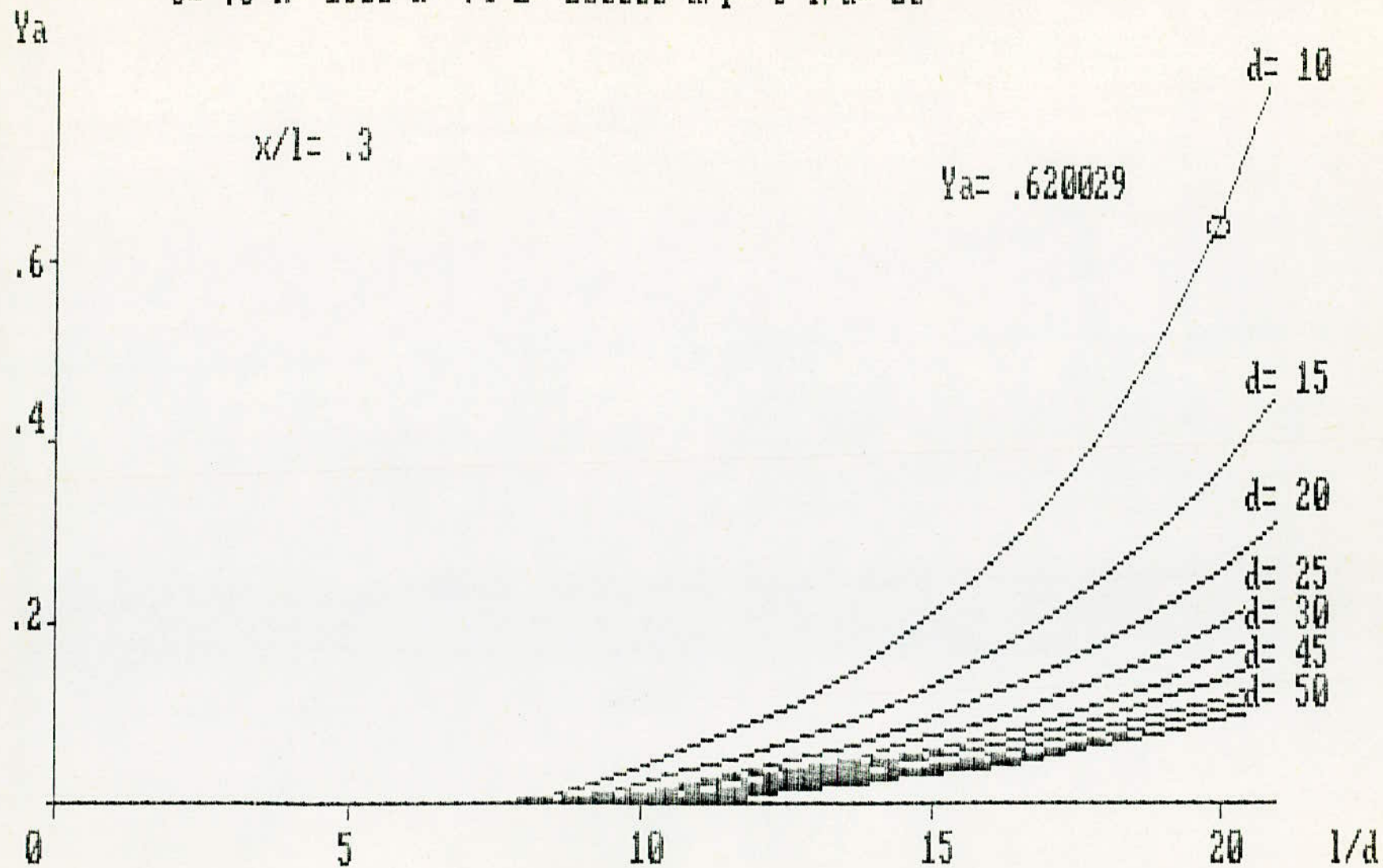
$\gamma_a = 6.900323E-02$



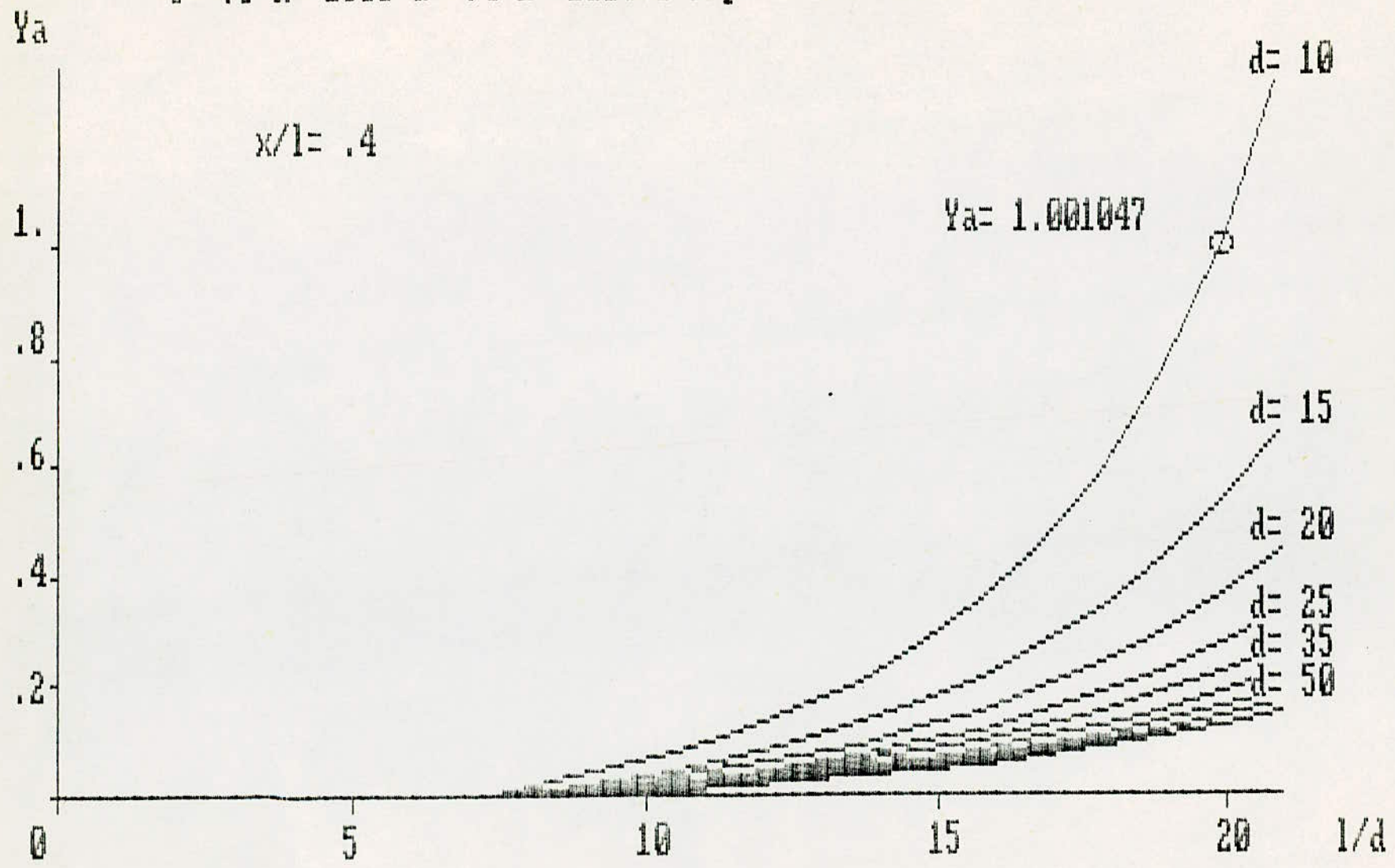
$c = .5$ $K = 1600$ $a = .4$ $E = 200000$ $d/p = 5$ $l/d = 20$



$$c = .5 \quad K = 1600 \quad a = .4 \quad E = 2000000 \quad d/p = 5 \quad l/d = 20$$



$c = .5$ $K = 1600$ $a = .4$ $E = 200000$ $d/p = 5$ $l/d = 20$

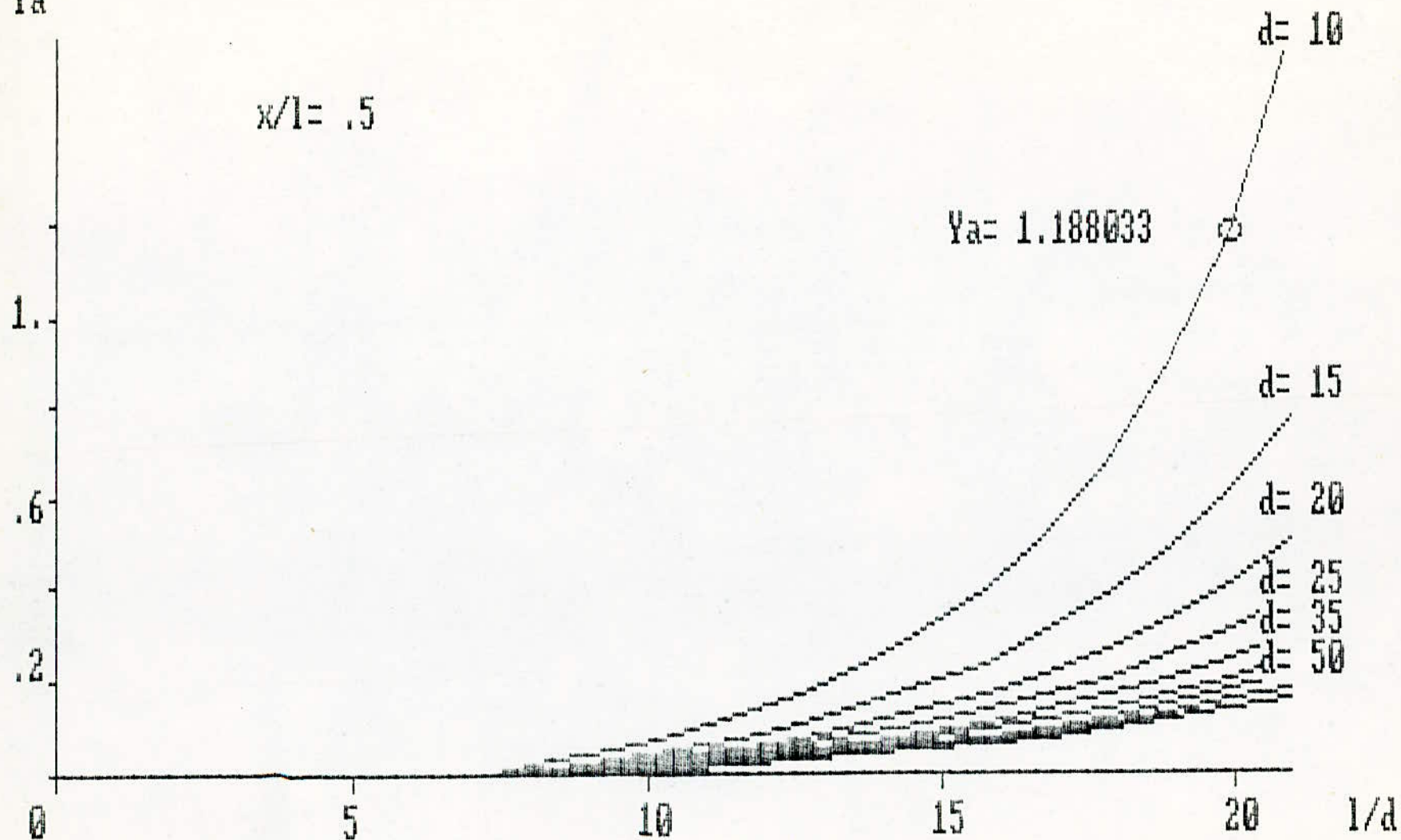


$c = .5$ $K = 1600$ $a = .4$ $E = 2000000$ $d/p = 5$ $l/d = 20$

Y_a

$x/l = .5$

$Y_a = 1.188033$



II. PROGRAMME COORDONNEES :

Le programme donne pour les dimensions de la pièce, citées ci-dessus : (tableau a)

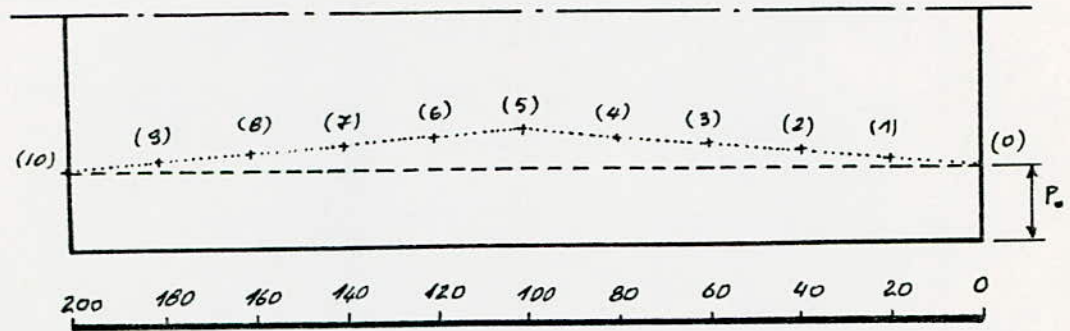


Fig. a - interprétation des résultats

Pour l'exploitation des résultats, un nombre positif veut dire avancer l'outil de la valeur indiquée. Un signe moins veut dire reculer.

Du tableau a, on peut lire qu'au point (0) l'outil est réglé à $p_0 = 2 \text{ mm}$.

Pour passer à la position (1), on avance l'outil de 0,14 mm.

Pour passer à la position (2), on avance l'outil de 0,30 mm.

Ainsi jusqu'au point (5).

- du point (5) au point (6), on recule l'outil de 0,08 mm.
etc ...

Pour passer du point (9) au point (10), on retire l'outil de 0,14 mm.

Tableau a

Z	dX
0	2
20	.14081
40	.3042195
60	.3216033
80	.2346835
100	8.518148E-02
120	-8.518171E-02
140	-.234683
160	-.321604
180	-.3042103
200	-.1408107

BIBLIOGRAPHIE

[1] R. NEVEU

"Technologie générale professionnelle t.2"

Editions Dunod (1958)

[2] SALAH M. SAID

"Static compliance of the centre lathe processing system"

International journal of machine tools and manufacture

Pergamon Press (1965) Vol. 4, pp. 223-241

[3] L. GEMINARD

"Construction mécanique

tome 1 : Eléments de projet"

Editions Dunod (1966)

[4] R.L. MURTHY

"Interaction of machine tool and workpiece rigidities"

International journal of machine tools and manufactures

Pergamon Press (1970) Vol. 10, pp. 317-325

[5] V. KOVAN

"Technologie de la construction mécanique"

Editions Mir (1970)

[6] H. GERLING

"Les machines-outils"

Editions Eyrolles (1978)

[7] R. DIETRICH

"La construction mécanique

tom 2: Méthodes, Fabrication, Normes"

Editions L'usine Nouvelle (1982)

[8] A. CAMPA

"Technologie professionnelle générale pour les mécaniciens"

Editions Foucher (1983)



