

E.P.L

COURS MECA2453
Partie Usinage

J.F. Debongnie

GENERALITES SUR LA COMMANDE NUMERIQUE DES MACHINES-OUTILS

1. INTRODUCTION

Dans les machines-outils traditionnelles, c'est-à-dire purement mécaniques, *un seul* mouvement d'avance peut être automatique. Ainsi, sur un tour parallèle, on peut entraîner automatiquement le chariot principal, ce qui engendre des cylindres; *ou* (mais non *et*) le chariot transversal, ce qui engendre des plans. Pour des mouvements d'avance plus complexes, il faut utiliser des artifices : règle à tourner cône, dispositif de copiage, etc.... Ces mouvements d'avance automatique sont obtenus par une transmission mécanique liée à la broche.

En commande numérique, chaque mouvement d'avance a son moteur propre et donc *indépendant*. La commande simultanée de ces mouvements est réalisée par un *directeur de commande numérique* qui exécute un *programme* établi par l'opérateur. Chaque mouvement commandé numériquement est appelé *axe*. Selon les applications en vue, on utilise des machines à 2, 3, 4, 5 axes, parfois plus.

2. PRINCIPE DE L'ASSERVISSEMENT D'UN AXE

2.1 - Commande en boucle fermée

La commande d'un axe peut être schématisée comme suit (fig. 1) : un moteur commande le mouvement du chariot à l'aide d'une vis à billes précontrainte (la précontrainte a pour objet d'éliminer les jeux). La position réelle du chariot x_r est mesurée à chaque instant par un capteur de position. La comparaison de cette position réelle avec la valeur de consigne x_c produit un signal qui, convenablement amplifié, est transmis au moteur, qui corrigera la position. C'est ce que l'on appelle une *commande en boucle fermée*.

2.2 - Mesures directes et indirectes

Nous n'entrerons pas dans le détail de la description des différents types de capteurs, analogiques ou numériques, absolus ou incrémentaux. Bien plus importante est la distinction entre mesure *directe* et mesure *indirecte*.

- La *mesure directe* consiste à mesurer la position du chariot par rapport au bâti, généralement à partir d'une *règle* pour un mouvement rectiligne. Elle fournit donc indiscutablement la position exacte du chariot.
- La *mesure indirecte* consiste à placer un appareil de mesure appelé *résolveur* sur la vis d'entraînement du chariot. Souvent plus facile à réaliser, cette mesure est entachée d'erreurs liées aux déformations de la vis et de son contact avec l'écrou. Ce procédé est donc intrinsèquement *moins précis* que la mesure directe. Cet aspect des choses doit être pris en considération lors de l'achat éventuel d'une machine-outil, car il conditionne la qualité du travail qu'elle réalisera.

2.3 - Commande en boucle fermée de la vitesse

Il existe aussi, le plus souvent, imbriquée à la commande précédente, une commande en boucle fermée de la vitesse d'avance, la mesure étant faite par une dynamo tachymétrique.

3. GENRES DE COMMANDES

Les commandes peuvent être classées suivant les relations qu'elles permettent de réaliser entre les mouvements le long des divers axes.

3.1 - Commande point à point (fig. 2)

Cette catégorie englobe les machines dont la table se déplace en mouvement rapide d'un point au suivant, la trajectoire étant *sans importance*, car l'usinage n'intervient que lorsque la position prescrite est atteinte. On trouve ce type de commande sur les perceuses, les machines à souder par points, etc...

3.2 - Commande paraxiale (fig. 3)

Outre un fonctionnement identique au précédent, la trajectoire de l'outil peut, *avec une vitesse d'avance donnée*, s'effectuer suivant un mouvement rectiligne et parallèle à l'un des axes de la table, X, Y ou Z. Ce type de commande se trouve sur aléseuses, fraiseuses, tours, etc...

3.3 - Commande de contournage (fig. 4)

Ce genre de commande est muni d'un système d'interpolation linéaire et circulaire et permet d'usiner un plan incliné par rapport aux axes, une courbe dans le plan, etc... On trouve ce type de commande sur fraiseuse, tours, centres d'usinage, machines d'électro-érosion à fil, grignoteuses, etc....

4. NOMBRE D'AXES COMMANDES

Un second critère de classification des commandes numériques est le *nombre d'axes commandés*.

4.1 - Deux axes

C'est la commande classique des *tours parallèles*, où l'axe Z est le déplacement du chariot principal et l'axe X, le déplacement du chariot transversal.

4.2 - Deux axes et demi

On trouve ce système sur certaines machines à trois mouvements d'avance comme les aléseuses-fraiseuses. L'interpolation ne peut se faire que selon deux axes à la fois, le troisième étant bloqué : interpolation X-Y avec Z bloqué, ou Y-Z avec X bloqué, ou Z-X avec Y bloqué. Le plan d'interpolation est spécifié par le programme.

Ce système permet d'obtenir un grand nombre de pièces par contournages successifs en suivant les lignes de niveau. Il suffit à la plupart des problèmes de moulistes, qui utilisent à cette fin des fraises-boules.

4.3 - Trois axes

Ici, les trois axes peuvent être déplacés et contrôlés simultanément, grâce à une interpolation dans l'espace. (Aléseuses-fraiseuses, centres d'usinage, etc...)

4.4 - Quatre axes

Sur aléseuse-fraiseuse, un quatrième axe est par exemple la rotation de la table.

4.5 - Cinq axes

Toujours sur aléseuse-fraiseuse, on ajoutera par exemple le déplacement du fourreau de la broche ou une inclinaison de celle-ci. Les machines d'électro-érosion à fil sont généralement à cinq axes.

4.6 - Six axes et plus

Les possibilités sont multiples.

4.7 - Remarque

Il va sans dire que la programmation devient de plus en plus complexe à mesure que le nombre d'axes augmente. Très rapidement, la nécessité d'aide informatique à la programmation se fait sentir.

5. DENOMINATION DES AXES

Pour toutes les machines-outils à broche tournante, on appelle Z l'axe de la broche. Les mouvements perpendiculaires à Z sont appelés X et Y. Parmi ceux-ci, X désigne normalement le mouvement de plus grande amplitude, l'autre étant Y. Il existe dans certains cas des mouvements *secondaires* parallèles à X, Y et Z, que l'on appelle alors U, V, W respectivement. Les mouvements de rotation autour des axes X, Y et Z sont appelés respectivement A, B, C. Les sens positifs sont généralement définis par rapport à la pièce et souvent, leur orientation est rappelée sur le clavier de la machine-outil. Ces dispositions sont illustrées sur les figures 5, 6 et 7.

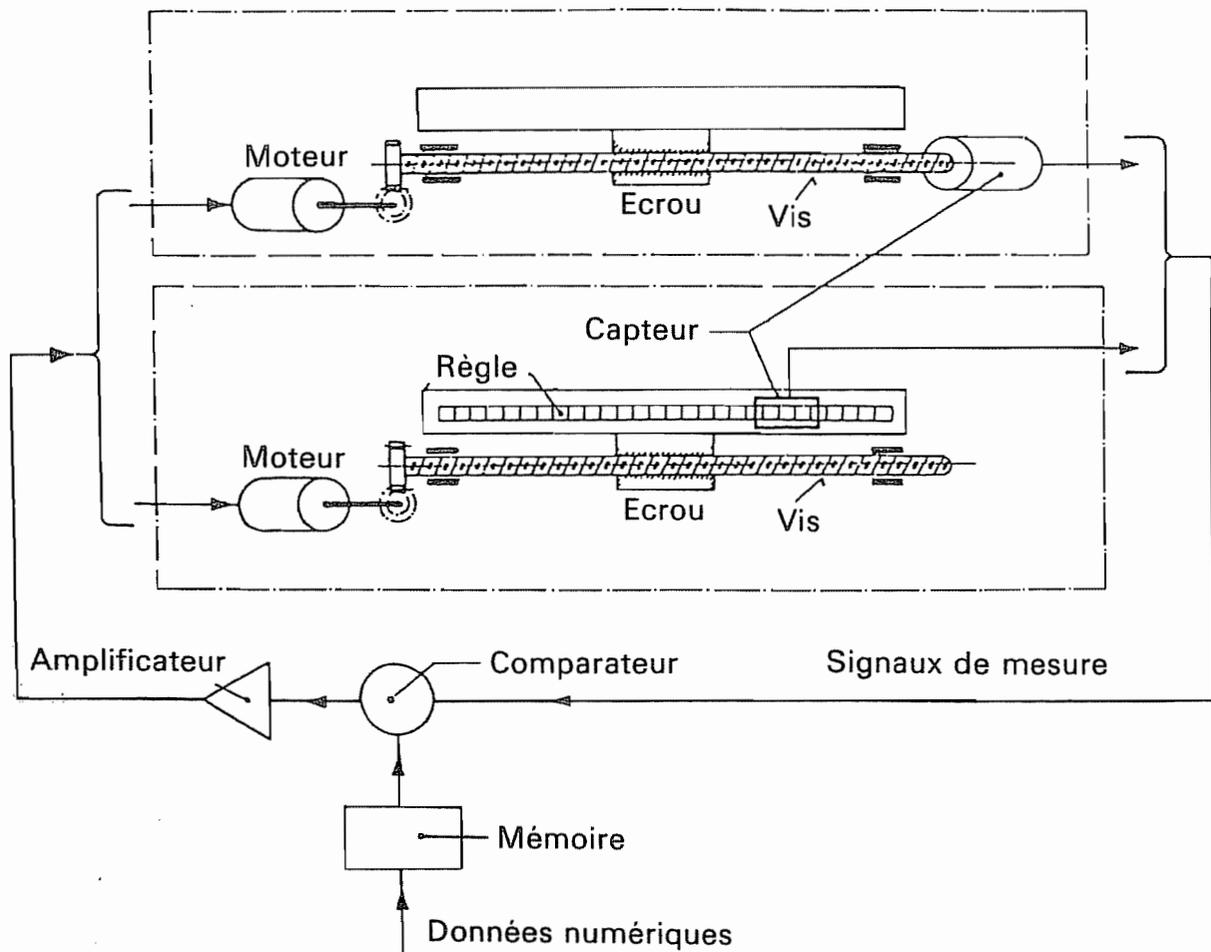


Fig. 1:
Les éléments de base d'un mouvement commandé numériquement

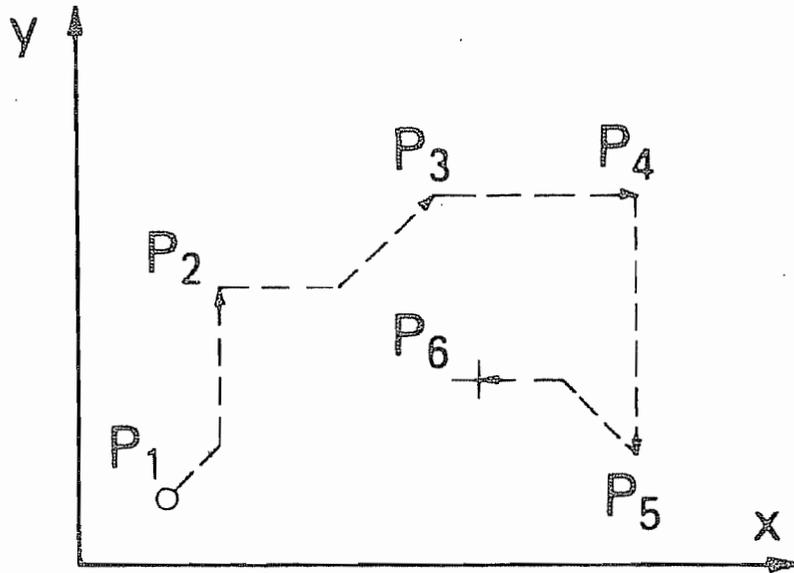


Fig. 2:
 Commande point par point

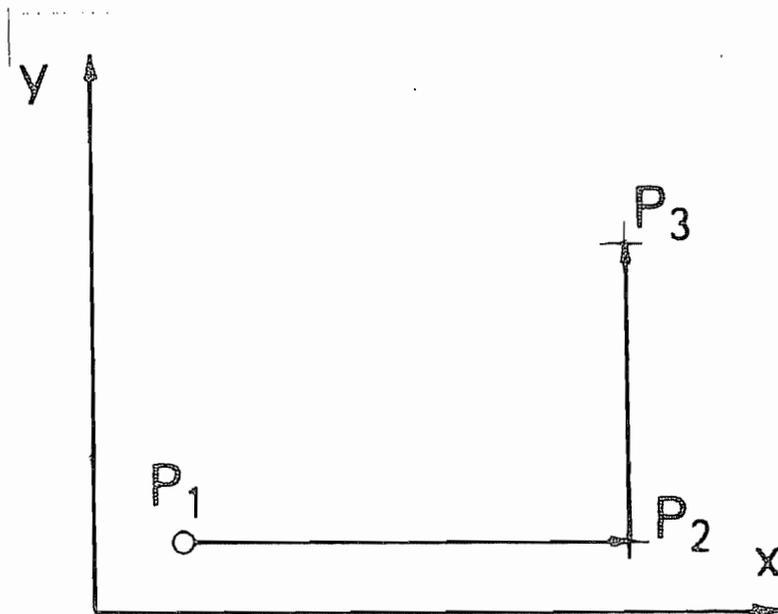


Fig. 3:
 Commande paraxiale

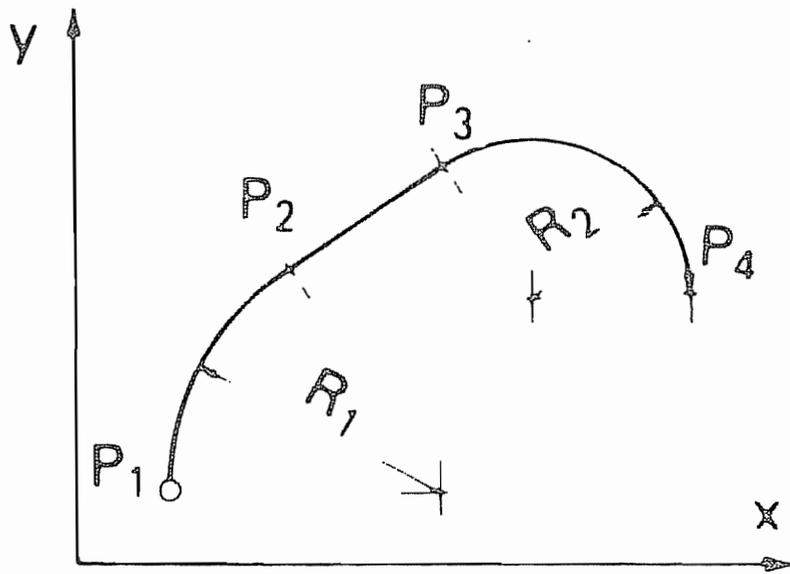


Fig. 4:
Commande de
contournage

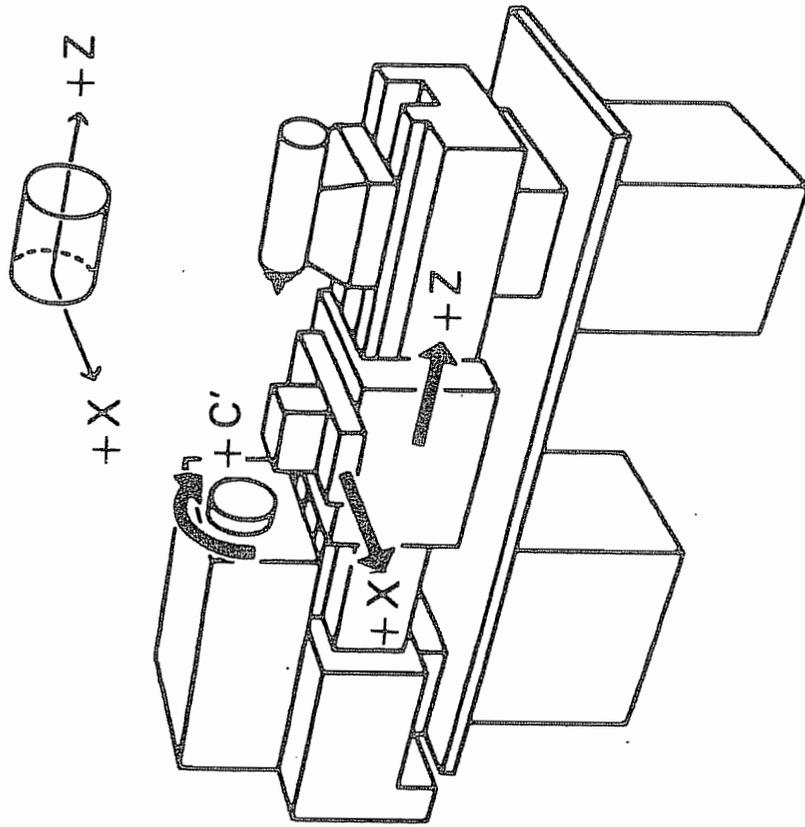


Fig. 5:
Désignation des axes
et sens de comptage sur le tour

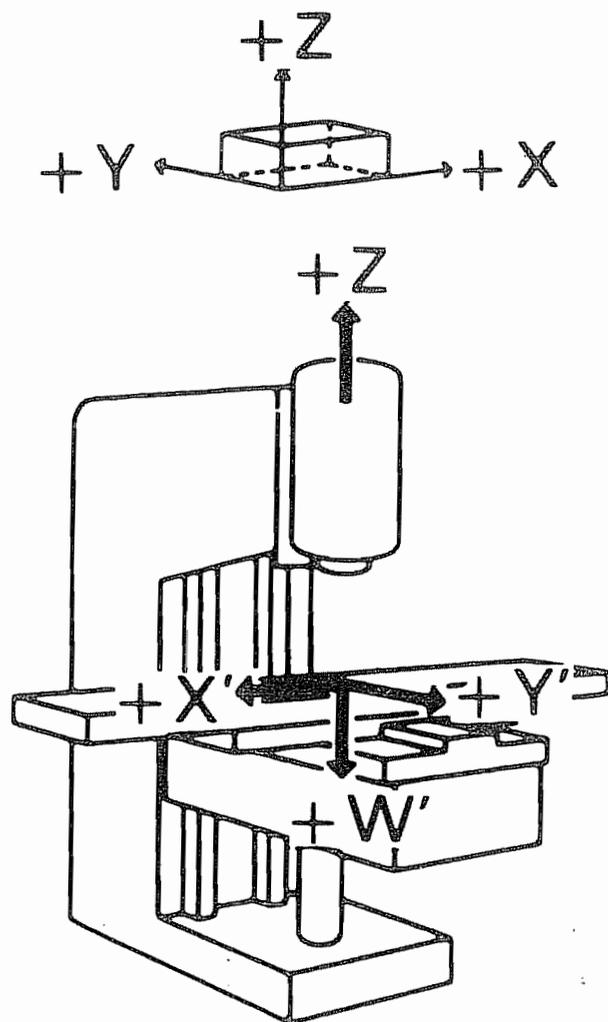


Fig. 6 :
Désignation des axes et sens de
comptage sur la fraiseuse

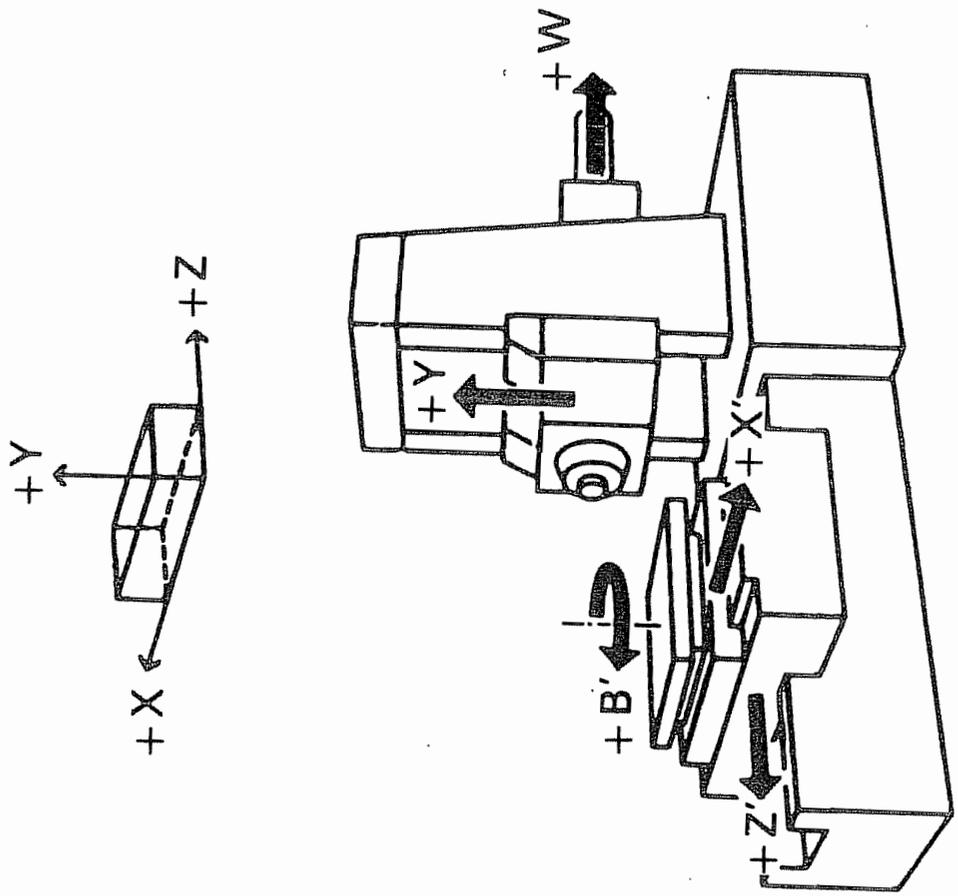


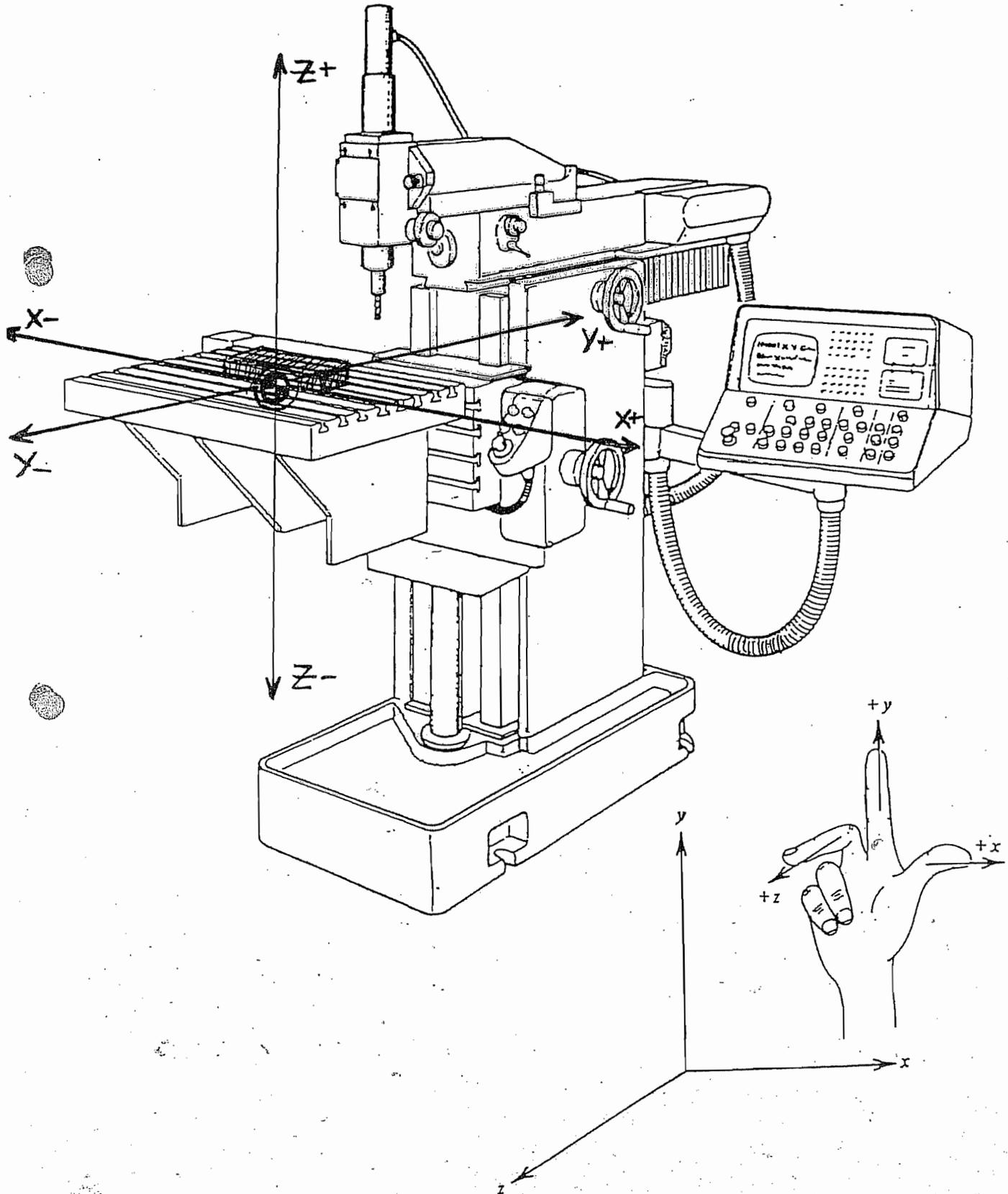
Fig. 7 :
Désignation des axes et sens de
comptage sur l'aléuseuse

PROGRAMMATION

C.N.C.

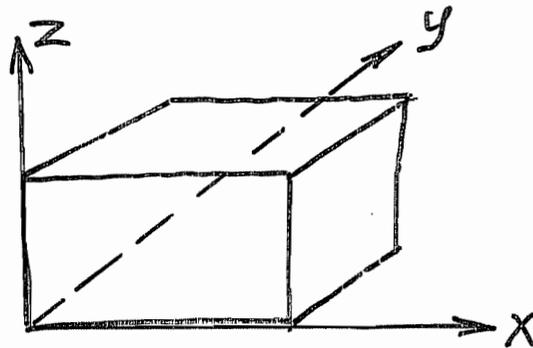
PROF. J.F. DEBONGNIE

FRAISEUSE - ALESEUSE UNIVERSELLE

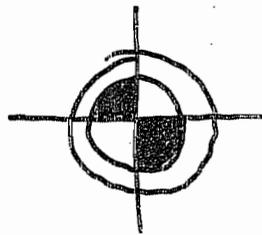


GÉOMÉTRIE

3 AXES

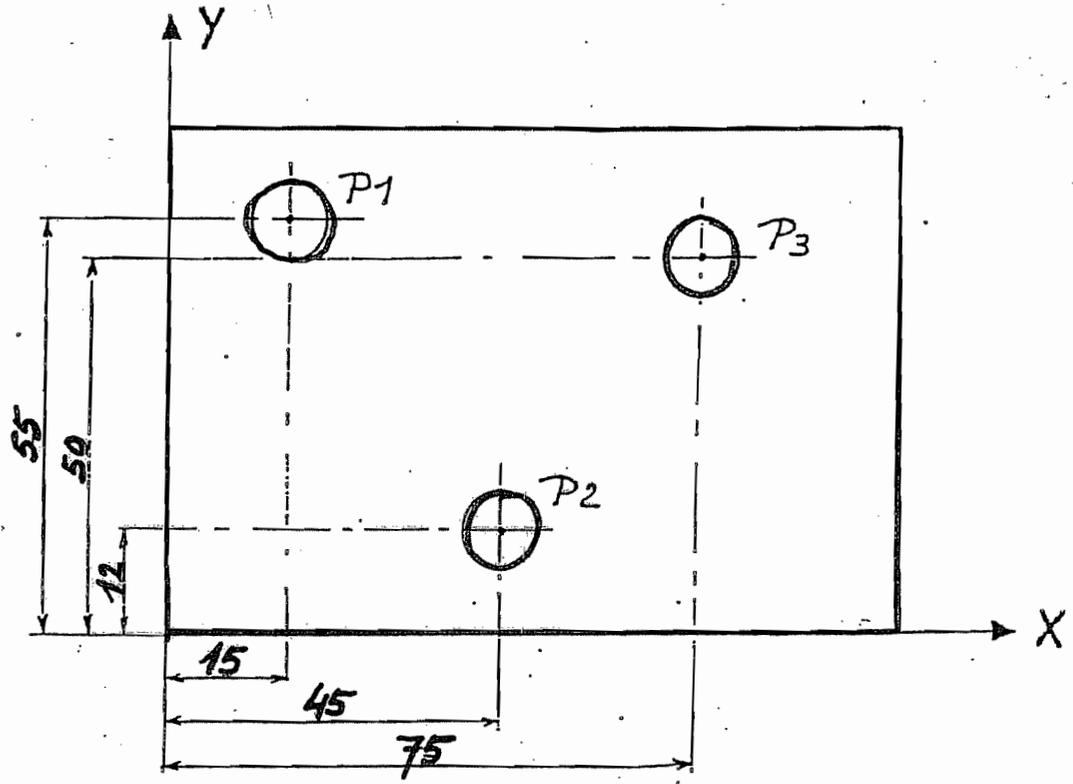


ORIGINE : ZÉRO PROGRAMMÉ (ZP)

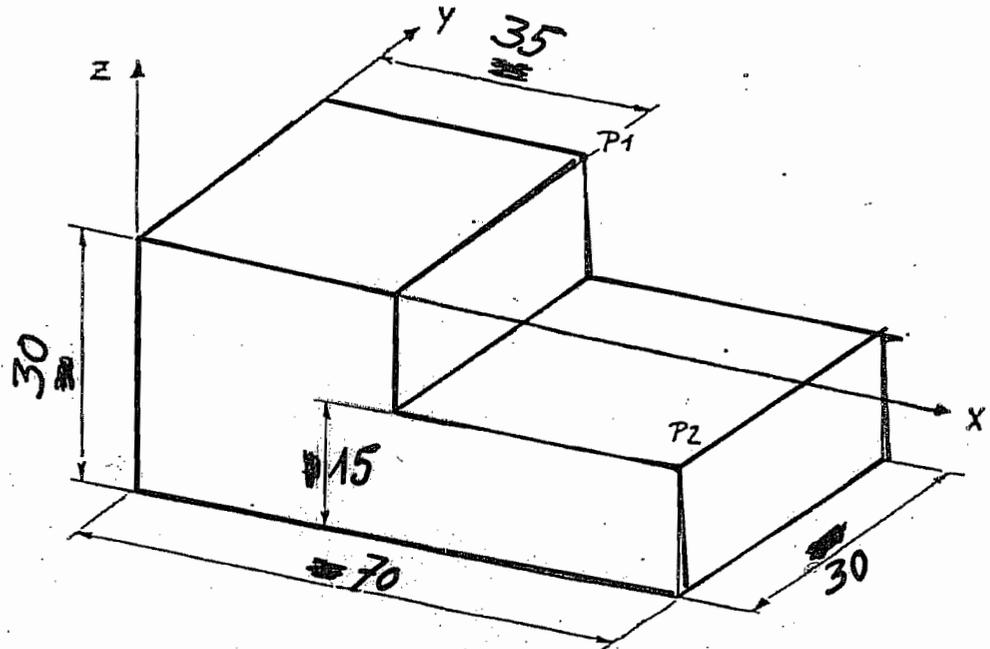


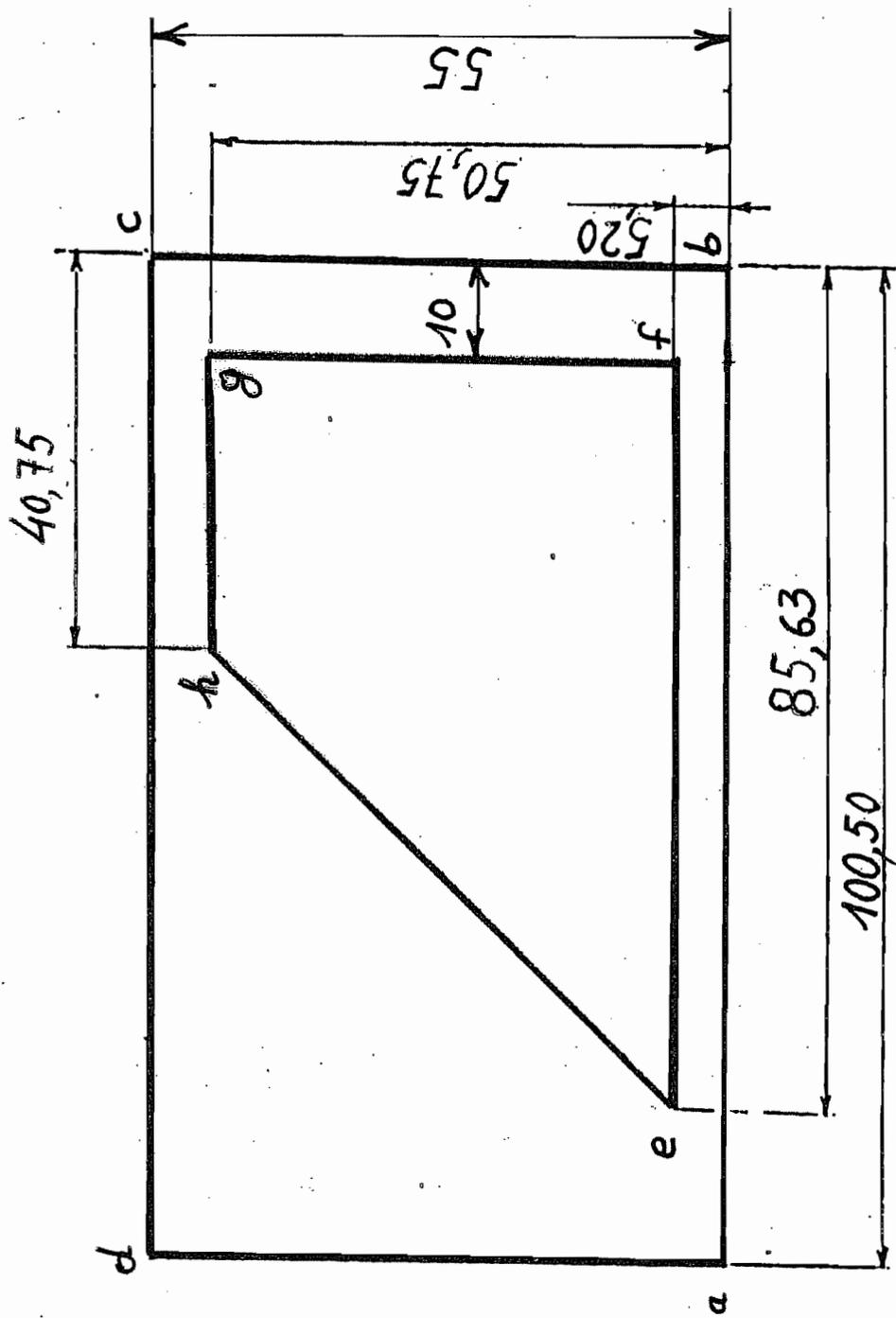
n'importe où sur la pièce
→ faire un choix rendant
les choses simples !

Y
Y
Y



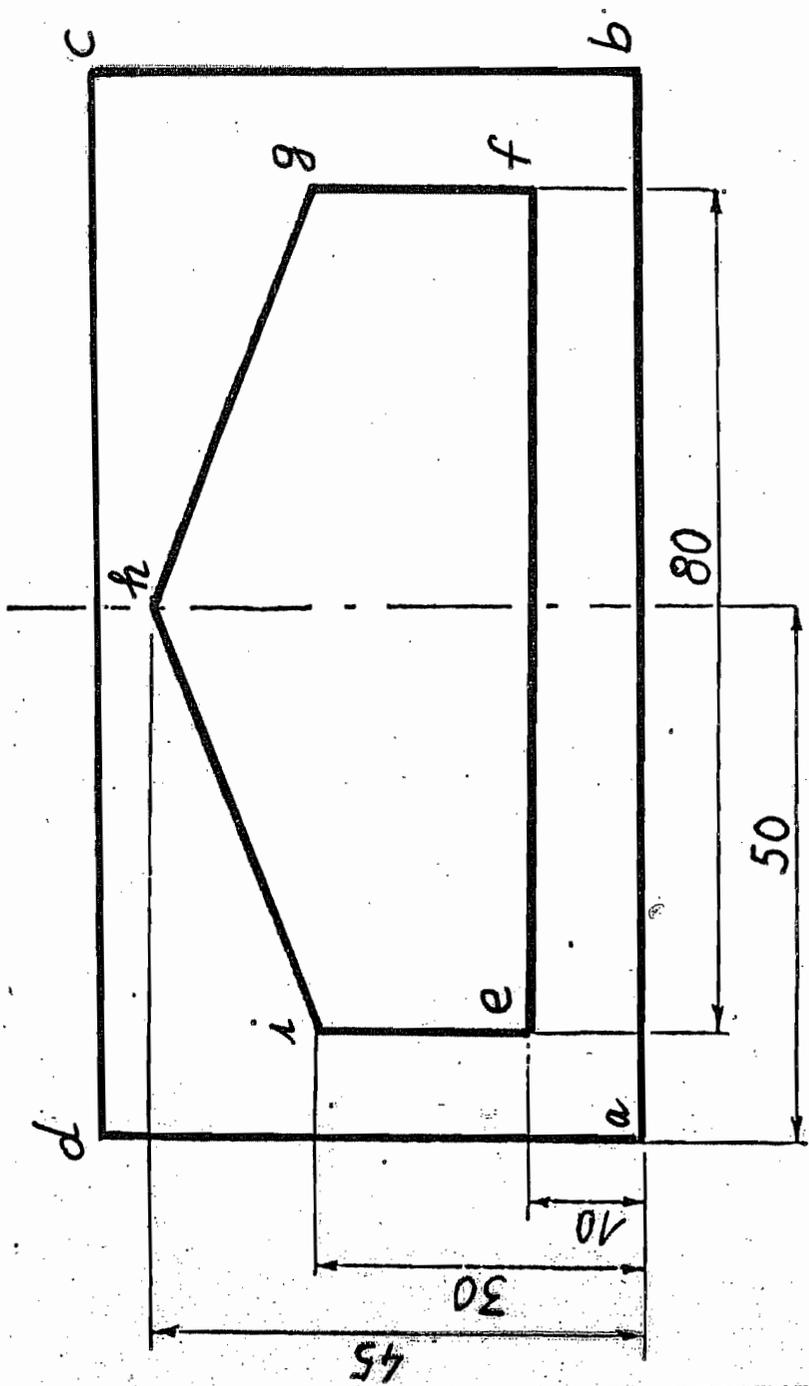
Y Z
Y Z





• CHOISIR L'ORIGINE

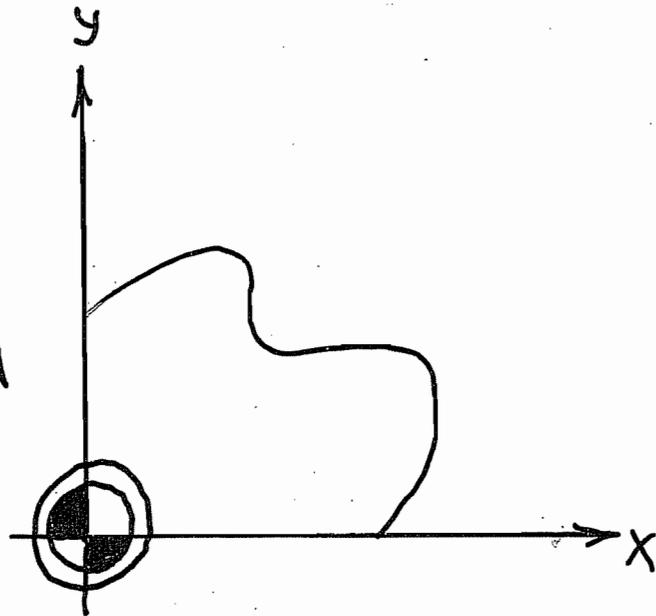
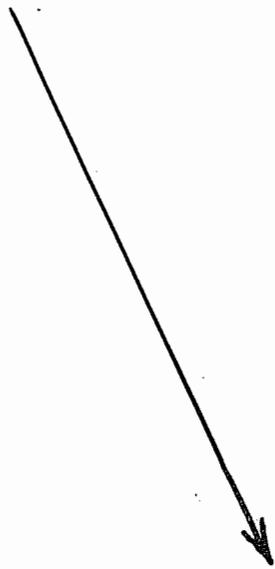
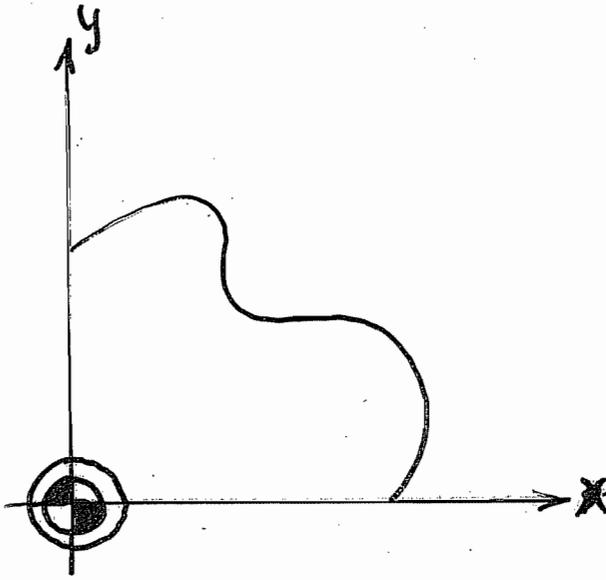
• COTER a...h



• CHOISIR

L'ORIGINE

• COTER a...i



ON PEUT DÉPLACER L'ORIGINE
EN COURS D'USINAGE

→ FACILITÉ DE RÉPÉTITION, P. EX.

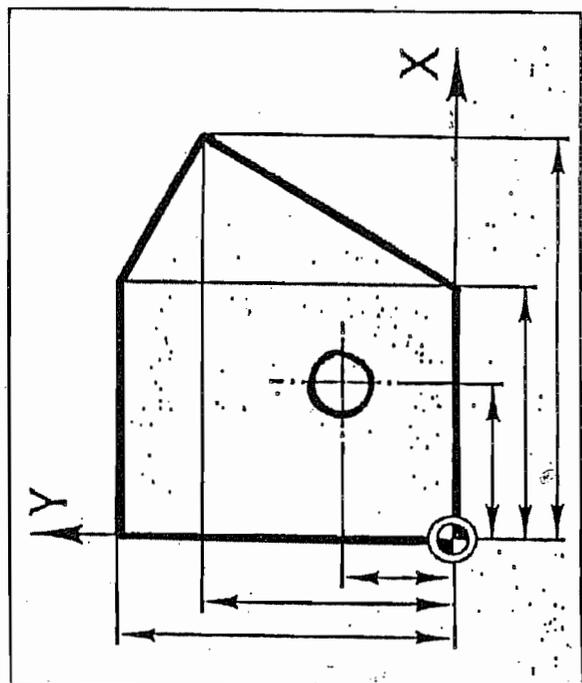
ABSOLUE : COORDONNEES DU POINT D'ARRIVEE

[G90]

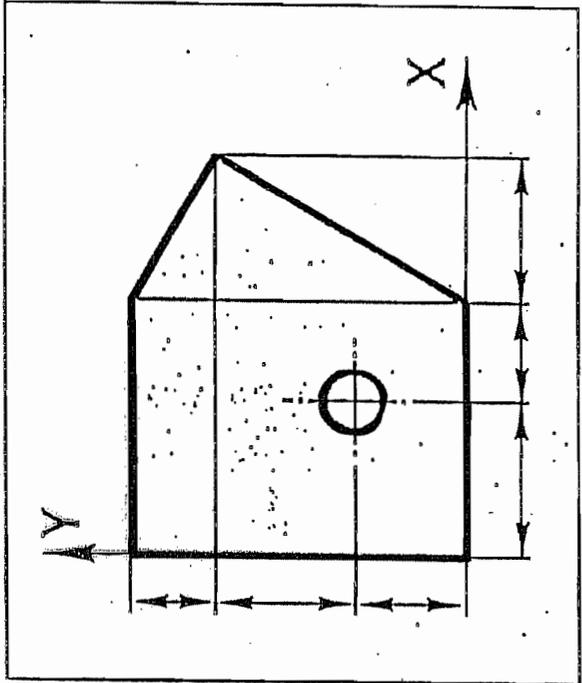
RELATIVE OU INCRÉMENTALE :
COMPOSANTES DU DÉPLACEMENT

[G91]

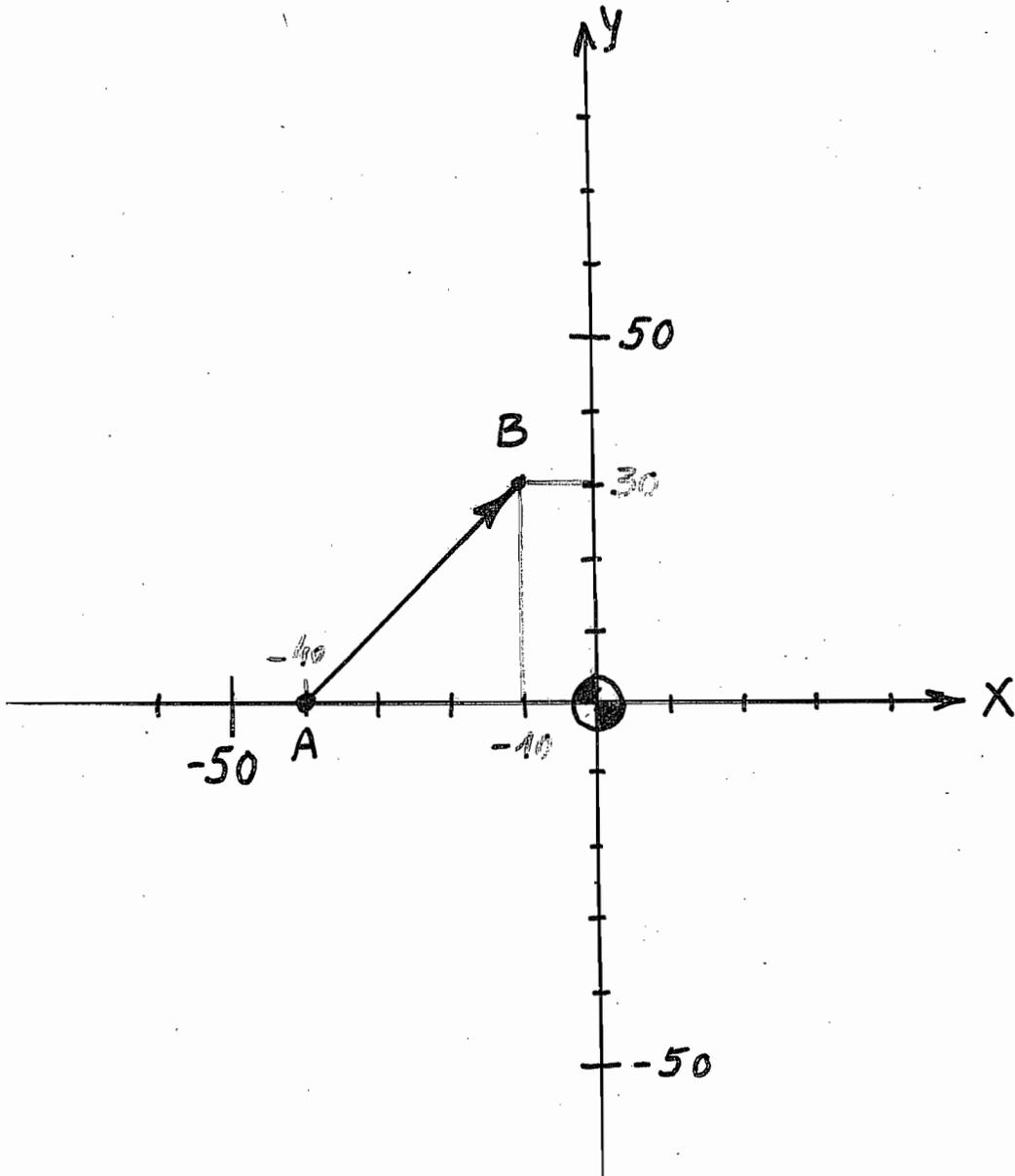
COTATION



Cotation en absolu



Cotation en relatif



ALLER DE A à B

ABSOLU : G 90 X-10 Y+30

RELATIF : G 91 X+30 Y+30

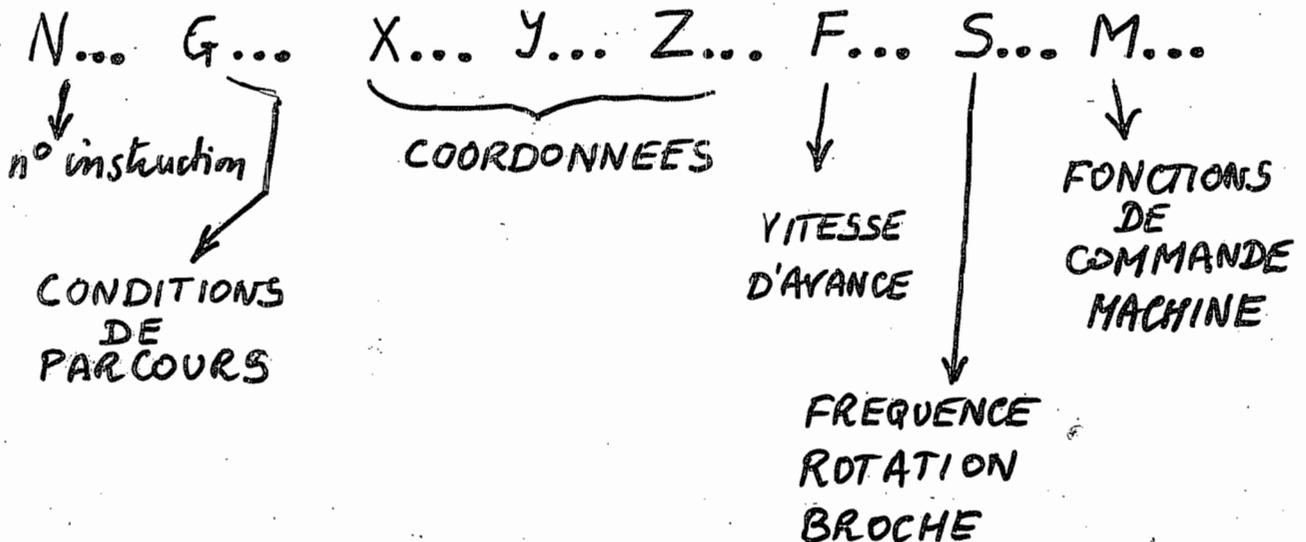
PROGRAMMATION

- trajectoires
- vitesse rotation broche
- vitesse d'avance
- commandes diverses { arrosage
... }

LANGAGE INTERPRÉTÉ

(ligne par ligne,
cf ASSEMBLEUR)

LIGNE TYPE



exemple

N0011 G01 X+30 Y-10 F100 S+500 M08
N0008 Z-500 F40

ORDRES

→ MODAUX: RESTENT VALABLES
TANT QU'ON NE LES
MODIFIE PAS EXPLICITEMENT
ex: S, fréq. rot. broche

→ SEQUENTIELS: NE VALENT
QUE DANS UNE INSTRUCTION
(LIGNE)

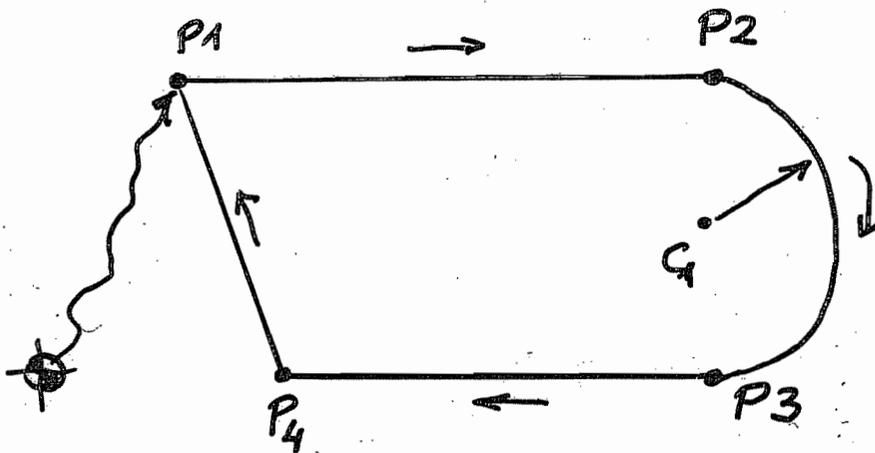
ex: coordonnées

ETAPES DE LA PROGRAMMATION

- 1) FIXER  ET AXES
- 2) DETERMINER COORDONNÉES
- 3) ETABLIR LA GAMME OPÉRATOIRE
 - DEPLACEMENTS
 - F, S
 - CHOIX OUTILS
 - ARROSAGE, etc...
- 4) TRADUIRE LA GAMME EN INSTRUCTIONS
— — — — —
- 5) INTRODUIRE LE PGM DANS
LA MACHINE
- 6) TESTER LE PGM
- 7) EXECUTION

LES DEPLACEMENTS [G]

- DROITES G01 (modal, option par défaut)
- CERCLES G02, G03 (séquentiel)
Q O
- POSITIONNEMENT RAPIDE ~~G00 (séquentiel)~~
G00 (séquentiel)
pas de F
S=0 possible
- TYPE DE COTATION
 - G90 ABSOLUE
 - G91 RELATIVE



- ISN1: AVANCE RAPIDE → P1
BROCHE EN ROTATION
- ISN2: ALLER EN P2
F DONNÉE
- ISN3: P2 → P3, CERCLE CENTRE C1
F DONNÉE
- ISN4: P3 → P4, F DONNÉE
- ISN5: P4 → P1, F DONNÉE

FREQUENCE ROTATION

BROCHE S

CONTINUE OU DISCRÈTE,
SELON LA MACHINE



tr/min

MODAL



A DROITE



A GAUCHE

VITESSE D'AVANCE F

mm/min

MODAL

(NE VAUT QUE SI $S \neq 0$)

CHANGEMENT D'OUTIL T

T + n° outil

→ ARRET MACHINE

DEMANDE CHGT OUTIL



EFFACE F ET S

FONCTIONS DE COMMANDE [M]

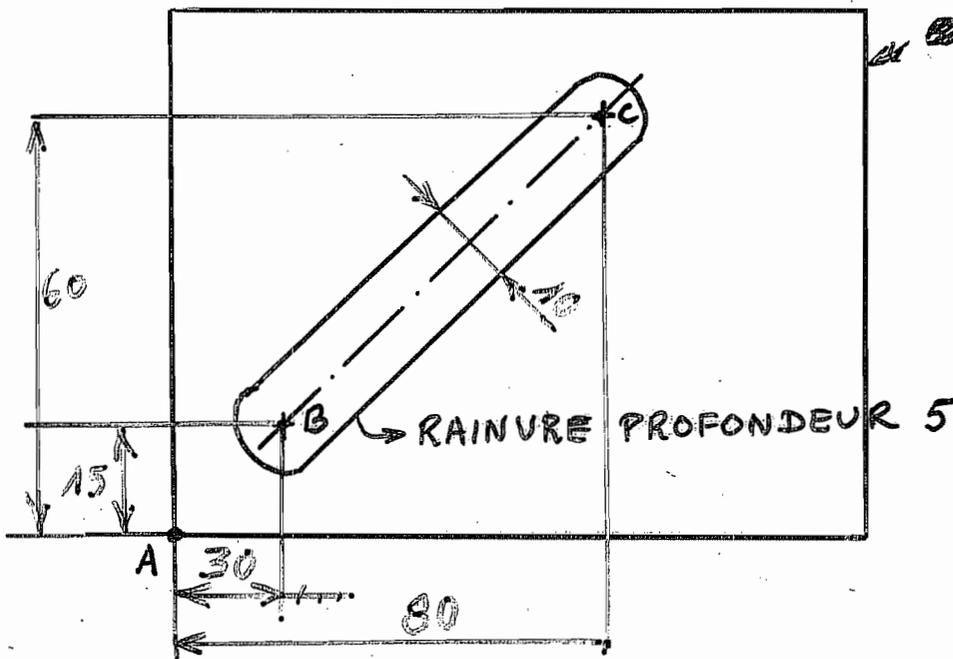
M08 : ARROSAGE modal

M09 : ARRÊT ARROSAGE modal

M02 : FIN PGM (arrête F et S)

M30 : idem + retour au début du pgm

EXEMPLE D'INTERPOLATION LINÉAIRE



- ORIGINE = A
- ALLER EN B
 - PLONGER
 - B → C
 - sorti

```

N0001  G00  X+30  Y+15  Z+2  S+500
           rapide
N0002  (G01)  Z-5  F100  → plongée
N0003  X+80  Y+60  F200  → rainure
N0004  G00  Z+100
N0005  M30
    
```

Le même en relatif, + arrosage :

```

N0001  G00  X+30  Y+15  Z+2  S+500
N0002  G91  Z-7  F100  (M08) arrosage
N0003  X+50  Y+45  F200
N0004  G90  → retour en absolu
N0005  G00  Z+100  (M09) fin arrosage
N0006  M30
    
```

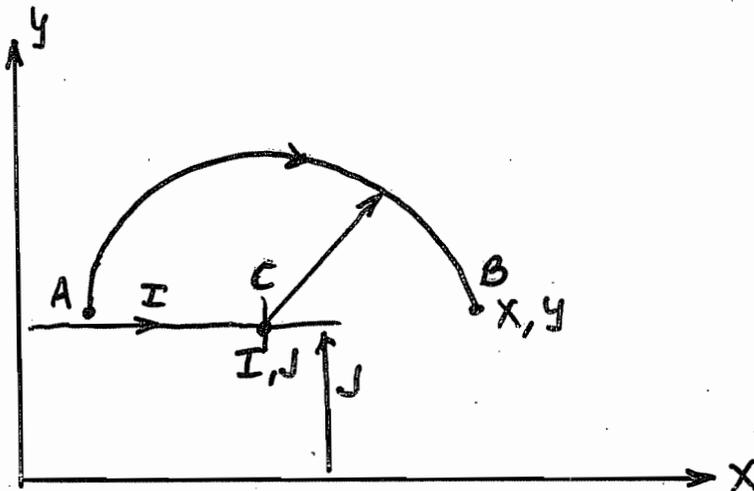
INTERPOLATION CIRCULAIRE


G02


G03

A. CENTRE ET POINT FINAL

CENTRE I, J, K



$A = (50; 100)$

$B = (150; 100)$

$C = (100; 100)$

G90 I+100 J+100 G02 X+150 Y+100 F150

SI PAS DE POINT FINAL, CERCLE COMPLET

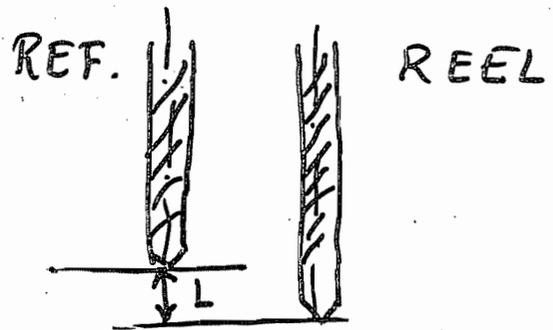
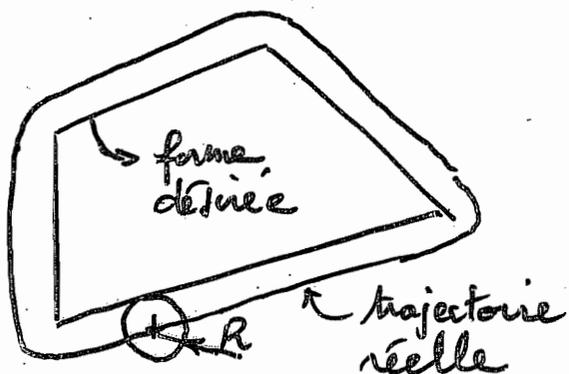
ou

G02 X+150 Y+100 G91 I+50 J+0 F150

B. POINT FINAL ET RAYON

G02 X+150 Y+100 R+50 F150

CORRECTION D'OUTIL

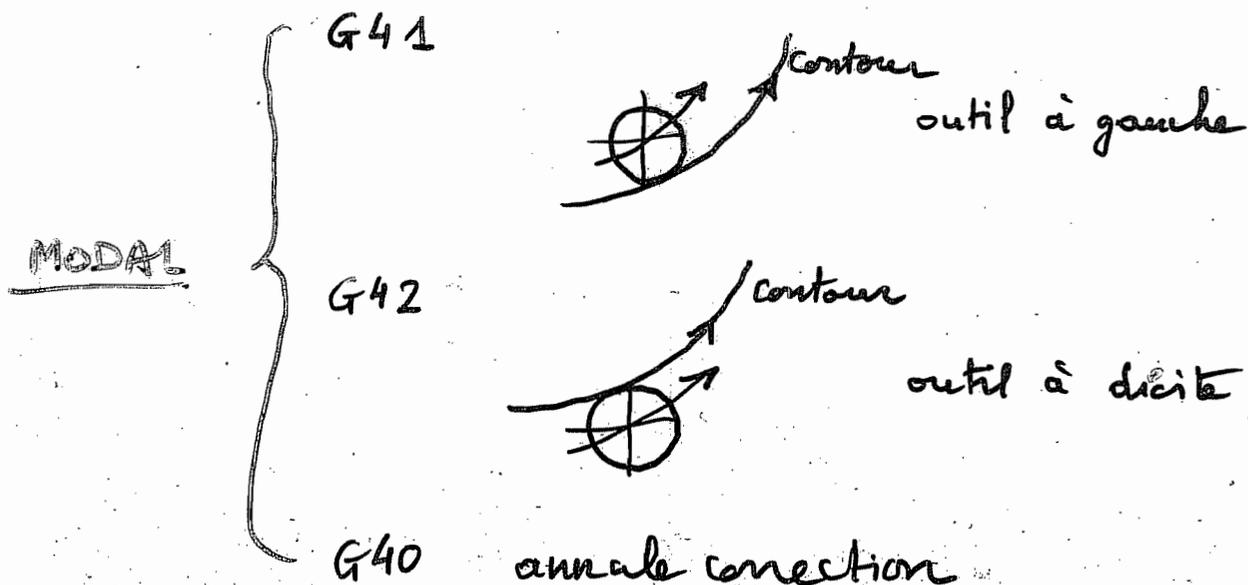


• DEFINITION OUTIL

G99 T1 L+10 R+20

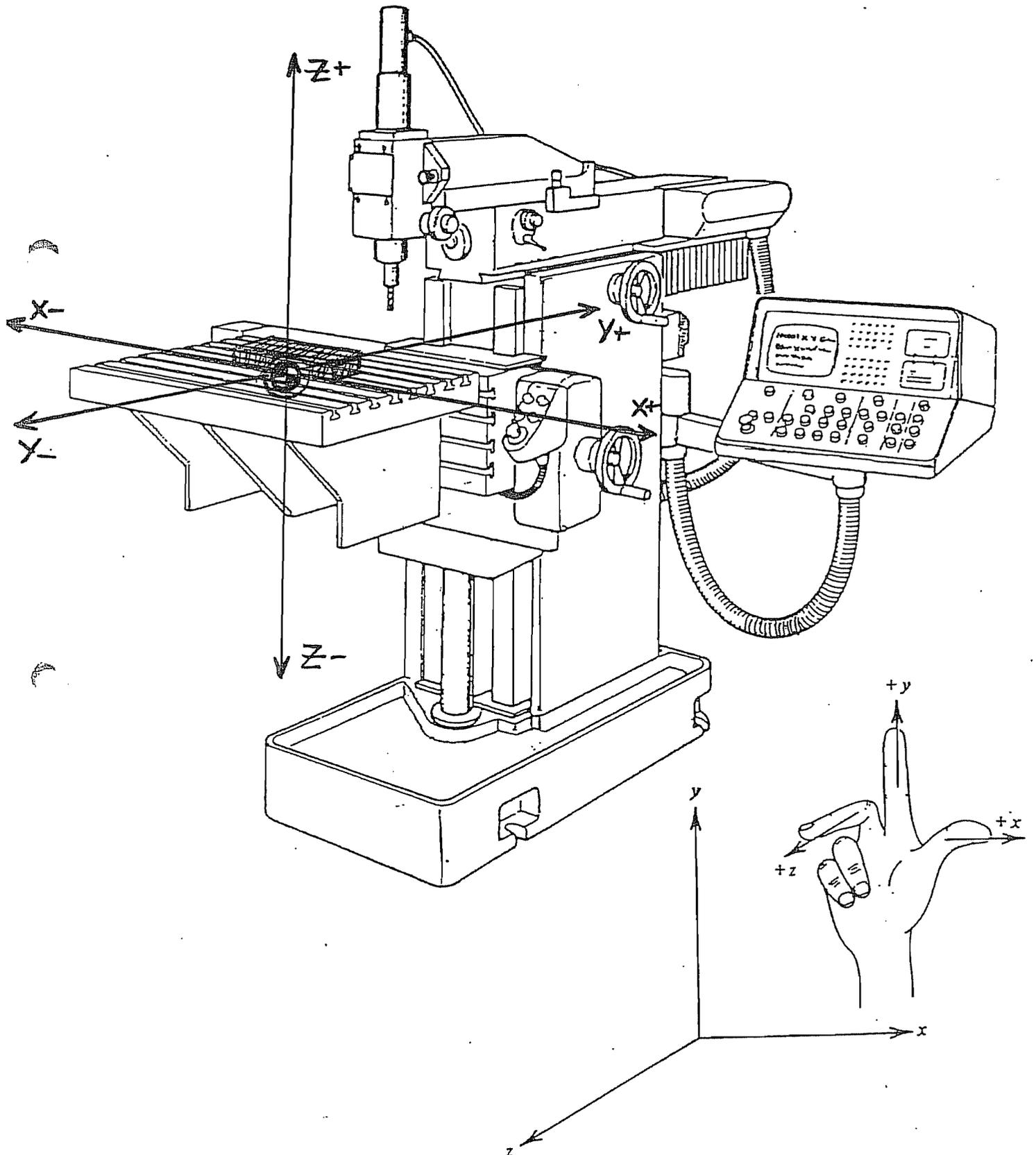
\swarrow \searrow
 A° OUTIL CORR. RAYON
 LONGUEUR

• CORRECTION DE TRAJECTOIRE



PROGRAMMATION CNC
SIMULATEUR DECKEL

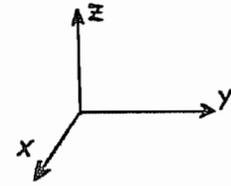
FRAISEUSE-ALESEUSE UNIVERSELLE



I. BASES GEOMETRIQUES

1) SYSTEME DE COORDONNEES

Si on applique à la pièce 3 axes : X, Y, Z



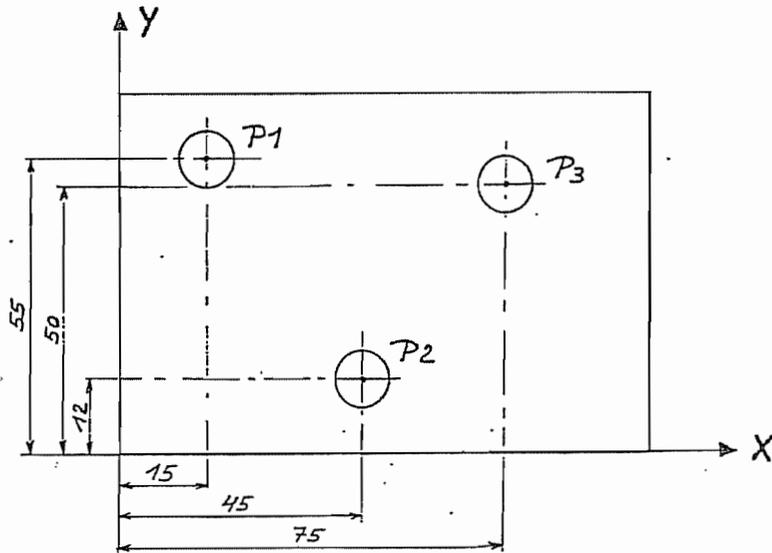
=> TOUT POINT DE LA PIECE PEUT ETRE DEFINI PAR SES COTES EN X, Y, Z (coordonnées)

Coord. X, Y --> points sur la surface de la pièce (contour)

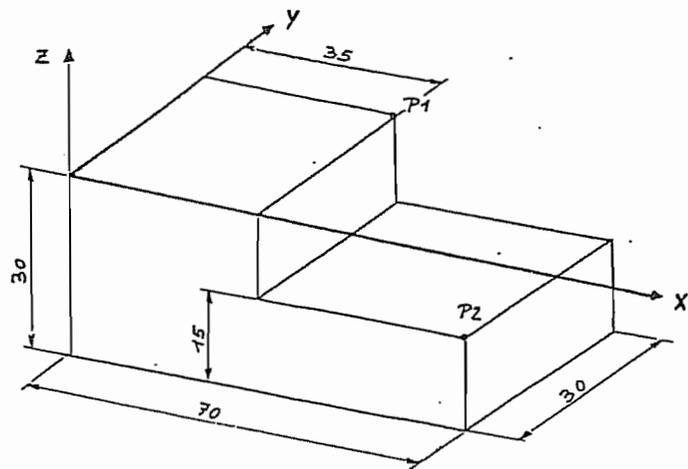
Coord. Z --> profondeur d'usinage

EXERCICES : quelles sont les coordonnées des points suivants ?

P1 : X Y
P2 : X Y
P3 : X Y



P1 : X Y Z
P2 : X Y Z



2) CHOIX DU ZERO (origine)

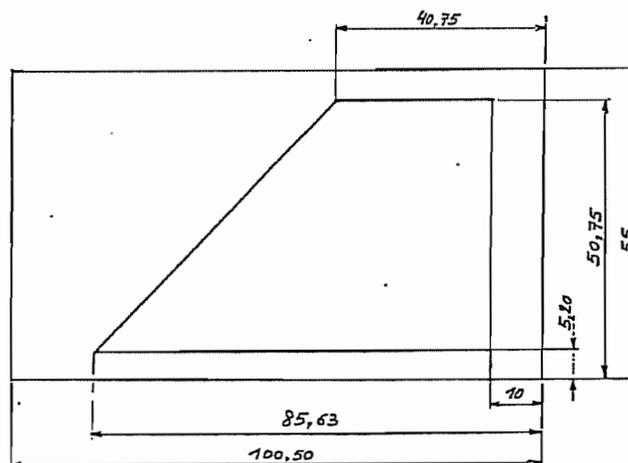
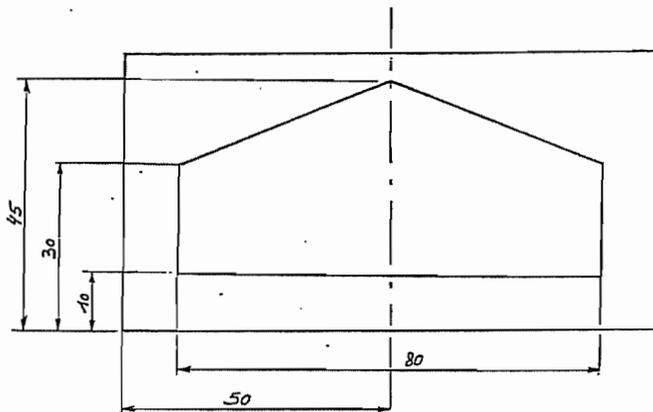
Choix de la position d'origine du système de coordonnées
par rapport à la pièce = ZERO PROGRAMME (ZP)



--> n'importe où sur la pièce ! (voir PLAN pièce)

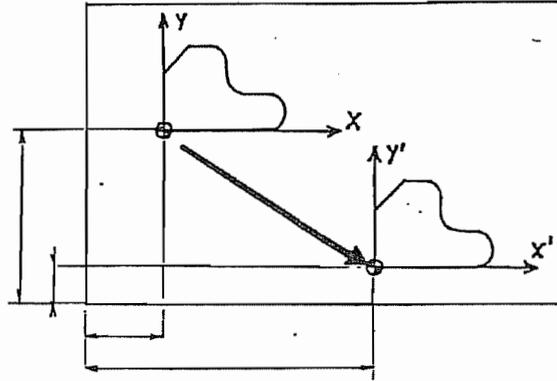
MAIS pour éviter les calculs superflus de cotes

--> le mettre sur l'origine la plus importante
de la cotation du plan.



3) DECALAGE D'ORIGINE

possibilité de déplacer l'origine au cours de l'usinage
--> facilite la programmation



4) COTATION

Cotation ABSOLUE : indique le déplacement de l'outil
par rapport au ZP

G90

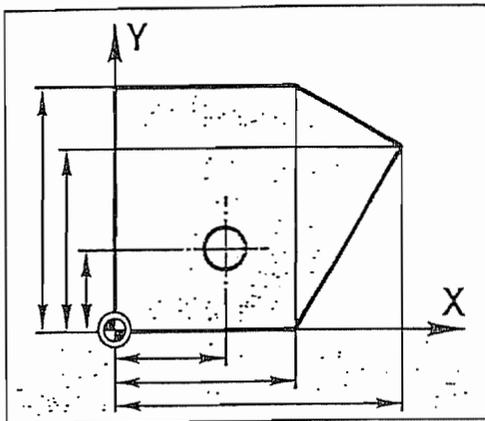
--> OU DOIT ALLER L'OUTIL

--> INDEPENDANT DE LA POSITION EFFECTIVE DE L'OUTIL

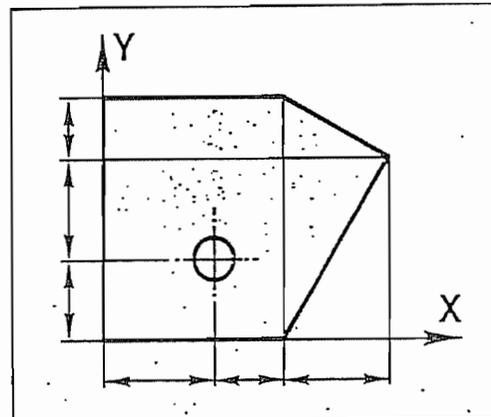
Cotation RELATIVE : indique DE QUELLE DISTANCE DOIT SE
ou INCREMENTALE DEPLACER L'OUTIL (distance + direction)

G91

--> DEPEND DE LA POSITION EFFECTIVE DE L'OUTIL



Cotation en absolu



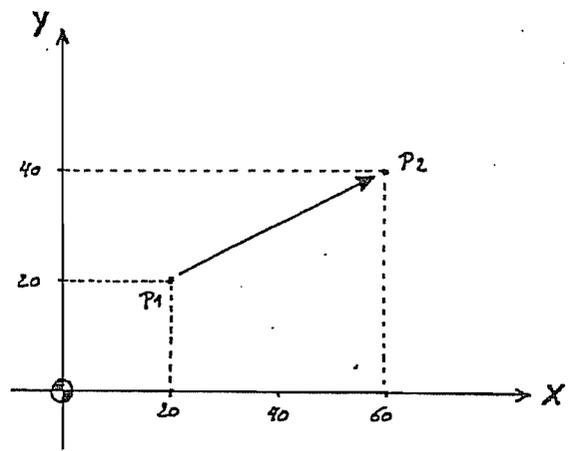
Cotation en relatif

EXEMPLE :

Déplacement de P1 à P2 ?

absolu : G90 X+60 Y+40

relatif : G91 X+40 Y+20



SIGNIFICATION DU SIGNE :

en absolu : --> indique de quel coté se trouve le point par rapport au ZP

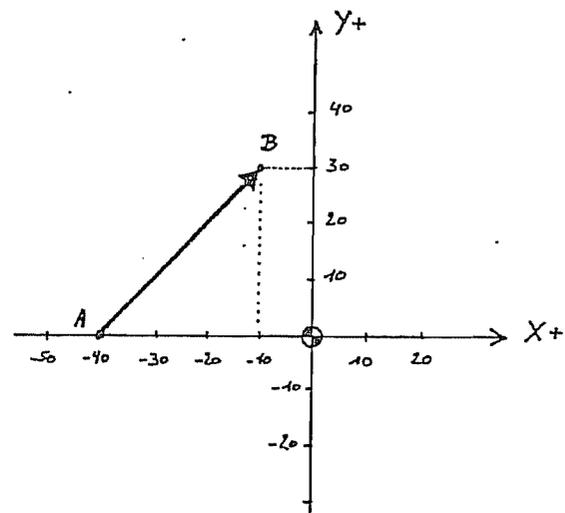
en relatif : --> indique le SENS du déplacement

EXEMPLE :

Déplacement de A à B ?

G90 X-10 Y+30

G91 X+30 Y+30



QUAND programmer en G90 ou G91 ?

--> suivant cotation plan

II. BASES DE LA PROGRAMMATION

DCN NECESSITE INSTRUCTIONS :

- OU se trouve le point d'arrivée ?
- COMMENT faut il arriver à ce point (droite, rayon) ?
- A QUELLE VITESSE doit se faire le mouvement ?
- ETC...

ORDRES donnés à la CNC sous forme d'un PROGRAMME

--> LANGAGE (CODE G) composé de MOTS

1 MOT = un ORDRE pour la CNC
= 1 LETTRE (ADRESSE) + CHIFFRES

L'adresse permet de distinguer les différents ordres :

X, Y, Z --> ordres de déplacement
G --> conditions de parcours
F, S --> vitesses avance et broche
M --> fonctions de commande (machine)

1 BLOC = la réunion de PLUSIEURS MOTS
= 1 INSTRUCTION pour la CNC

Les blocs d'un programme sont numérotés :

--> n° de bloc avec adresse N (N0000 --> N9999)

FORMAT DE BASE D'UN BLOC :

N.... G.. X..... Y..... Z..... F.... S.... M..
--

Ex : N0011 G01 X+30000 Y-10000 F100 S+500 M08

N0008 Z-5000 F40

Effets des ordres :

- ordres à effet MODAL : --> agissent jusqu'à ce qu'ils soient effacés ou remplacés par un autre sous la même adresse.
- ordres à effet SEQUENTIEL : --> n'agissent que dans le bloc où ils figurent.

Ex :

MODAL

SEQUENTIEL

N0010 F1000
N.... ...
.
.
N0060 F400
N.... ...
.
.



N0020 ... X50 Y10 ...
N0030 G00 X100 Y20 ...
N0040
.
.

Bloc principal : Ex: N0021 G00 X+10000 Y+000 S+500

Bloc secondaire : Ex: N0022 X+50000 F100

PROGRAMMATION

Fournir toutes instructions nécessaire au DCN avant de commencer le travail.

==> PLAN DE TRAVAIL :

- 1) FIXER REFERENCES : axes + ZP
- 2) DETERMINER COORDONNEES (G90, G91 ?)
- 3) PLAN TRAVAIL :
 - déplacements (gammes op.)
 - F, S
 - choix outils
 - arrosage, etc.
- 4) ETABLIR LE PROGRAMME : transcrire les op. dans le langage de la commande

-
- 5) INTRODUIRE LE PGM
 - 6) TESTER LE PGM
 - 7) EXECUTER LE PGM

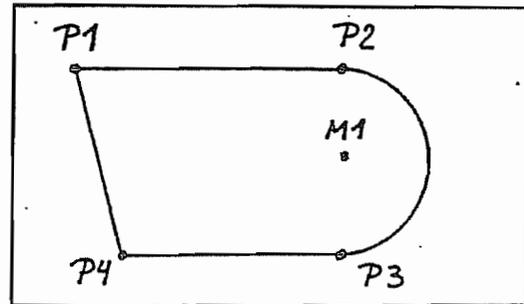
Décomposer le contour à programmer en droites et arcs de cercle

--> op. correspondantes sont programmées bloc par bloc

--> commande exécute le pgm bloc par bloc

Exemple :

P1-P2 : droite
P2-P3 : arc de cercle
P3-P4 : droite
P4-P1 : droite inclinée



Composition du pgm :

1^{er} bloc : - mettre outil par le chemin le plus court sur P1
- avance rapide
- broche marche
- coord. P1

2^{ème} bloc : - déplacer outil vers P2
- avance voulue
- coord. P2

3^{ème} bloc : - faire exécuter à l'outil un rayon autour de M1 pour l'amener à P3
- avance voulue
- coord. P3
- coord. M1

etc

.
. .
.

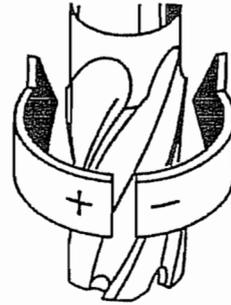
S VITESSE DE BROCHE

Vitesses disponibles : 0, 31, 40, 50, 63, 80, 100, 125, 160,
200, 250, 315, 400, 500, 630, 800, 1000,
1250, 1600, 2000, 2500, 3150 t/min

Signe : S+ rotation à droite
S- rotation à gauche

S0 : arrêt de broche

Effet modal



F AVANCE DE TRAVAIL

Vitesse de F4 --> F2000 (mm/min)

F3600 = positionnement rapide

Effet modal

⚠ Les avances de travail ne prennent effet que quand S≠0

T CHANGEMENT D'OUTIL

T + n° outil (2chiffres) Ex: T02

Quand le pgm rencontre ce bloc --> arrêt machine
--> demande chgt outil

⚠ T efface F et S

--> bloc suivant T doit redéfinir F et S

Fonctions de commande :

M08 marche arrosage (effet modal)

M09 arrêt arrosage

M02 fin de programme (arrêt F et S)

M30 idem + revient automatiquement au début pgm

Conditions de parcours :

G90 cotation absolue (effet modal) (par défaut)

G91 cotation relative (effet modal)

G00 avance rapide (effet séquentiel)

--> déplace les axes à vitesse maximum, pas suivant une droite (pour positionnement rapide, pas pour usinage)

⚠ avec G00 pas de F

⚠ possible avec S=0

G01 interpolation linéaire (effet modal)

validé dès mise sous tension

G02 interpolation circulaire sens anti-trigono (effet séq.)

G03 interpolation circulaire sens trigono

INTERPOLATION LINEAIRE G01

Si l'outil doit se déplacer entre 2 points d'un contour selon une droite inclinée --> la commande réalise une INTERPOLATION LINEAIRE pour calculer la trajectoire de l'outil.

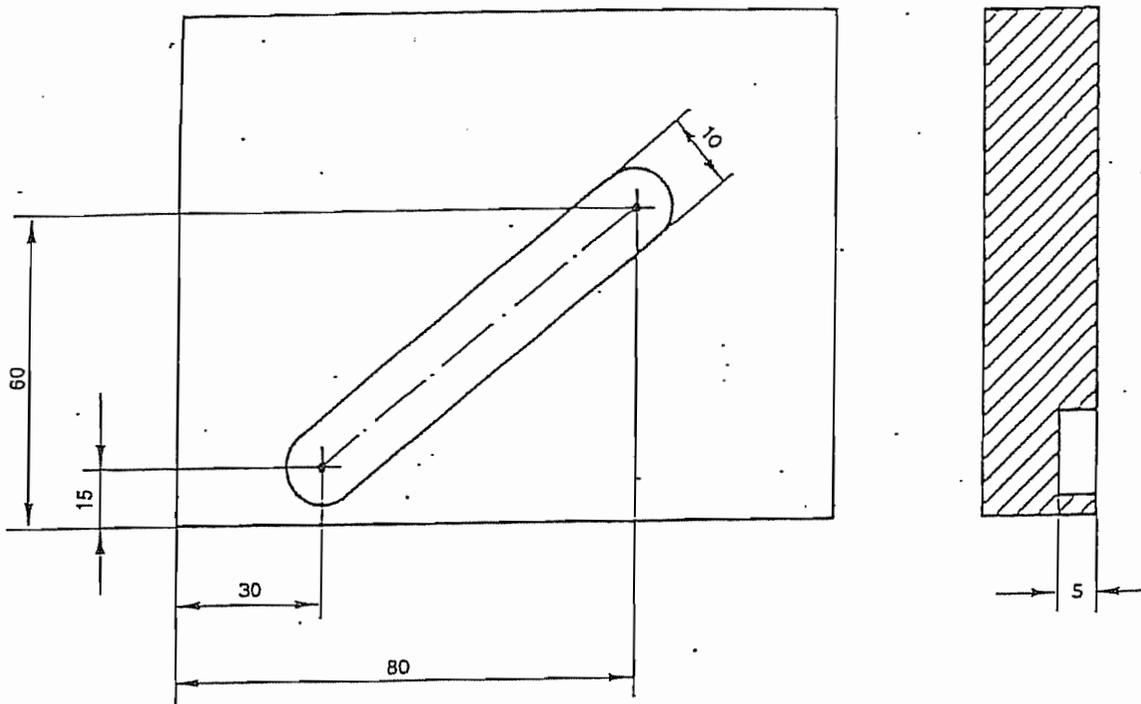
La commande combine les mouvements des axes pour que l'outil se déplace le long d'une droite avec F et S donné.

⚠ Interpolation linéaire dans les 3 axes
--> pas de corrections de trajectoires

G01 validé dès la mise sous tension de la commande
--> pas nécessaire d'introduire G01 (effet modal)

Exemple 1 :

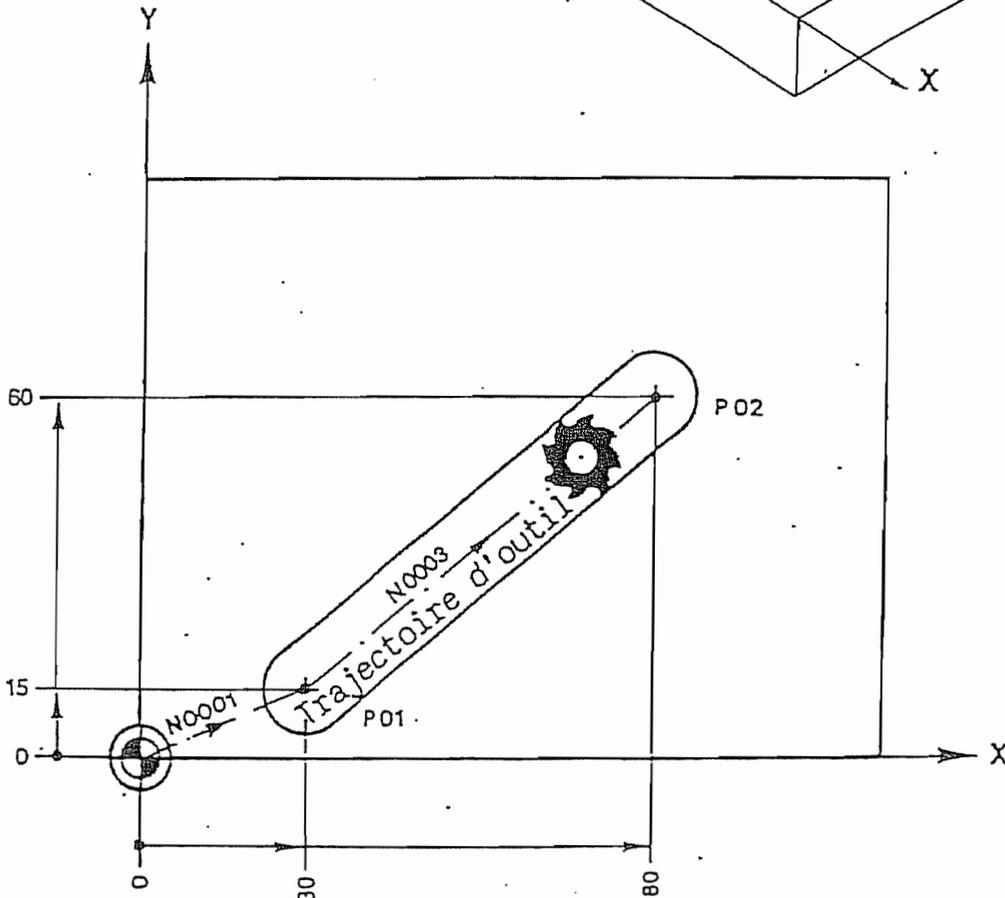
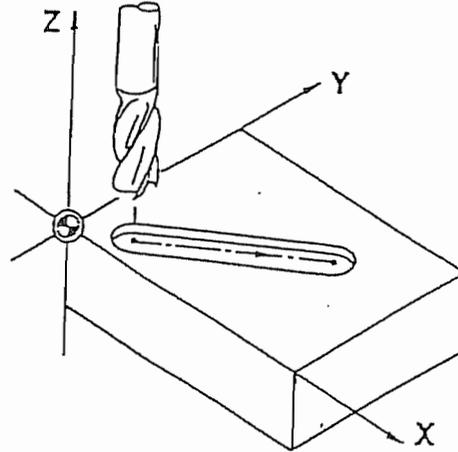
Soit à réaliser une rainure (droite) inclinée dans une pièce (largeur=diamètre outil)



Plan de travail :

- 1) fixer axes et ZP : choix coin inférieur gauche car cotes partent de ce point
- 2) coordonnées : P01 X+30 Y+15 Z-5 (en absolu vu plan)
P02 X+80 Y+60 Z-5
- 3) plan travail :
 - accoster le point P01 en rapide, en restant p.ex. à 2mm au dessus de la surface de la pièce
 - plonger avec outil en Z-5, avance calculée de 100 mm/min, S=500 t/min
 - fraiser la rainure (interp. lin.) jusque P02, avance de 200 mm/min
 - dégager l'outil en rapide à Z+100
 - arrêter broche, programme

4) établir le pgm



Programme :

```
N0001 G00 X+30000 Y+15000 Z+2000 S+500
N0002 (G01) Z-5000 F100
N0003 (G01) X+80000 Y+60000 F200
N0004 G00 Z+100000
N0005 M30
```

Commentaires :

```
N0001 outil va en rapide au point P01, broche en rotation
      à 500 t/min
N0002 plongée à Z-5 dans la matière, avance de 100 mm/min
N0003 outil se déplace suivant une droite de P01 à P02, avance
      de 200 mm/min
N0004 dégagement outil en rapide (à Z+100)
N0005 fin de programme
```

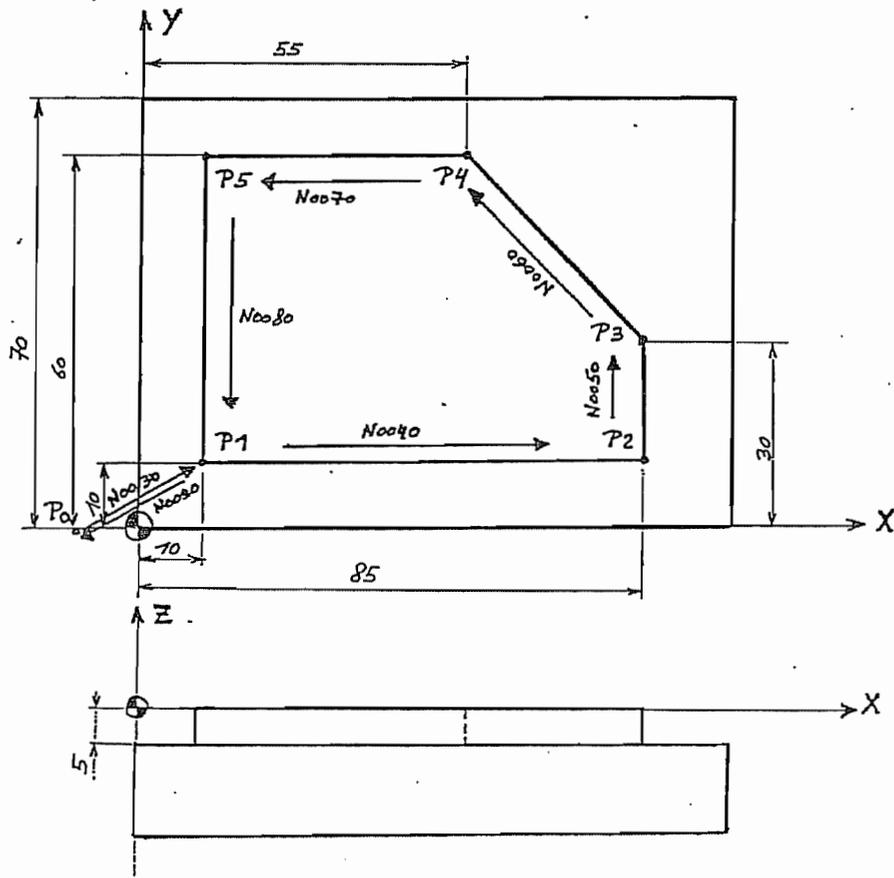
Remarques :

Si plongée et déplacement suivant droite en relatif + arrosage :

```
N0001 G00 X+30000 Y+15000 Z+2000 S+500
N0002 G91 Z-7000 F100 M08
N0003 X+50000 Y+45000 F200
N0004 G90
N0005 G00 Z+100000 M09
N0006 M30
```

Exemple 2 :

Soit à fraiser le contour suivant :



Plan de travail :

1) fixer axes et ZP : choix coin inférieur gauche car cotes partent de ce point

2) coordonnées : P1 X+10 Y+10 Z-5 (en absolu vu plan)

P2 X+85 Y+10 Z-5

P3 X+85 Y+30 Z-5

P4 X+55 Y+60 Z-5

P5 X+10 Y+60 Z-5

- 3) plan travail :
- accoster le point P0 en rapide
 - plonger avec outil en Z-5, avance rapide
 - si on est certain d'être à coté de la pièce, S=800 t/min
 - accoster le point P1 en avance de travail de 140 mm/min
 - réaliser le contour en déplaçant l'outil vers les points successifs :
 P1 -> P2 -> P3 -> P4 -> P5 -> P1
 - quand contour terminé, dégager l'outil en rapide dans une position donnée à Z+100
 - arrêter broche, programme

4) établir le pgm

Programme :

```
N0010 G00 X-10000 Y+0 Z+2000 S+800
N0020 G00 Z-5000 M08
N0030 X+10000 Y+10000 F140
N0040 X+85000
N0050 Y+30000
N0060 X+55000 Y+60000
N0070 X+10000
N0080 Y+0
N0090 G00 X-10000 Y+0 Z+100000 M09
N0100 M30
```

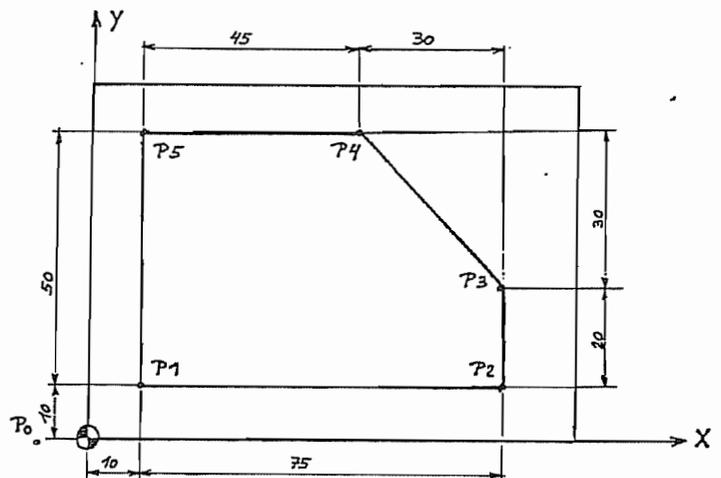
Commentaires :

N0010 outil va en rapide au point P0, broche en rotation à 800 t/min
N0020 plongée à Z-5 en rapide, a condition d'être hors de la matière + mise en marche arrosage
N0030 outil accoste le premier point du contour P1, avance de 140 mm/min
N0040 outil se déplace vers P2 (interp. lin.)
N0050 idem vers P3
N0060 idem vers P4
N0070 idem vers P5
N0080 idem vers P1, fin du contour
N0090 dégagement outil en rapide + arrêt arrosage
N0100 fin de programme

Remarques :

- Quand une coordonnée ne change pas il est inutile de la répéter (ex: de P1 à P2 le Y ne change pas) car X, Y, Z à effet modal
- On considère : Rayon outil = 0 car on n'a pas encore introduit le principe de correction de trajectoire
- Si plan donné en cotation relative :

N0035 G91
N0040 X+75000
N0050 Y+20000
N0060 X-30000 Y+30000
N0070 X-45000
N0080 Y-50000
N0085 G90



INTERPOLATION CIRCULAIRE G02 , G03

Si l'outil doit se déplacer suivant un arc de cercle, dans un plan, la commande calcule la trajectoire d'outil nécessaire

--> INTERPOLATION CIRCULAIRE (multitude de petits déplacements linéaires)

--> CNC a besoin : $\left\{ \begin{array}{l} - \text{ du point d'arrivée} \\ - \text{ du centre} \\ - \text{ du sens giratoire} \end{array} \right.$

G02 = interpolation circulaire en sens anti-trigono

G03 = interpolation circulaire en sens trigono

Le format d'un bloc pour une interp. circ. est :

dans le plan X,Y : N.... $\left\{ \begin{array}{l} G02 \\ G03 \end{array} \right\}$ F.... X.... Y.... I.... J....

dans le plan Y,Z : N.... $\left\{ \begin{array}{l} G02 \\ G03 \end{array} \right\}$ F.... Y.... Z.... J.... K....

dans le plan X,Z : N.... $\left\{ \begin{array}{l} G02 \\ G03 \end{array} \right\}$ F.... X.... Z.... I.... K....

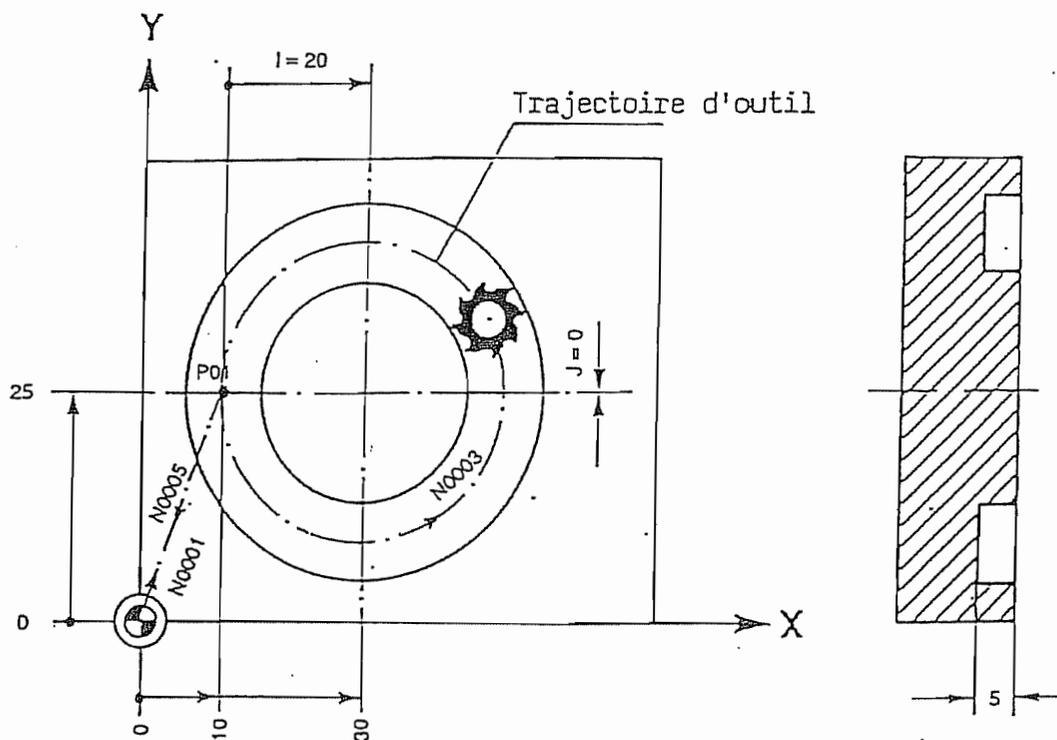
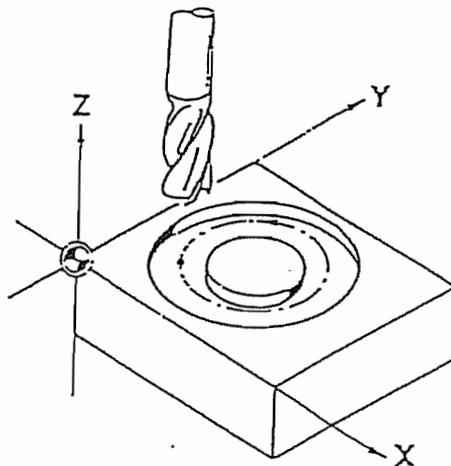
avec $\left\{ \begin{array}{l} F : \text{ avance (seulement si elle est modifiée)} \\ X, Y : \text{ coordonnées du point d'arrivée (dans plan X, Y)} \\ I, J : \text{ coordonnées du centre de l'arc (dans plan X, Y)} \end{array} \right.$
par rapport au point initial de l'arc

⚠ Les coord. de I, J sont donc données en cotation relative sans introduction de G91

⚠ Pour programmer un cercle entier
--> ne pas introduire les coord. du point d'arrivée

Exemple 3 :

Soit à programmer un cercle entier dans le plan X, Y.



Programme :

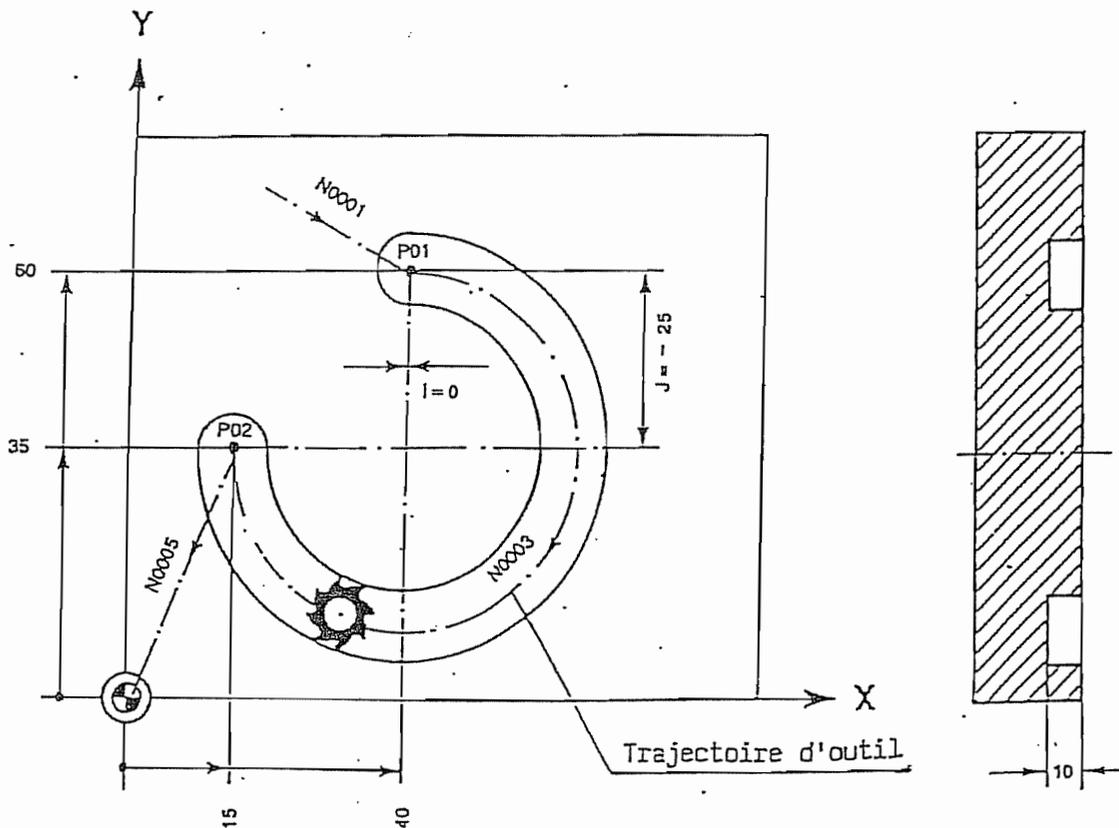
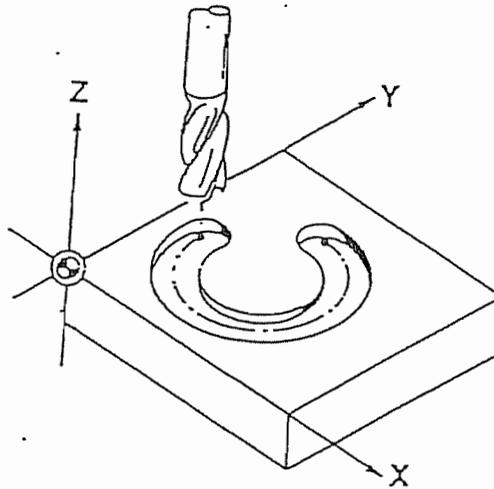
```
N0001 G00 X+10000 Y+25000 Z+2000 S+1250
N0002 Z-5000 F100
N0003 G03 F125 I+20000 J+0
N0004 G00 Z+100000
N0005 G00 X+0 Y+0
N0006 M30
```

Commentaires :

- N0001 outil va en rapide au point P01
- N0002 descente à Z-5
- N0003 outil exécute le cercle entier, sens trigono G03,
le centre se trouve à 20 mm dans sens de l'axe X du pt.
départ et à 0 mm dans sens de l'axe Y du pt. départ
- N0004 dégagement rapide suivant Z
- N0005 outil retourne en rapide au zéro programme
- N0006 fin du programme

Exemple 4 :

Soit à programmer un arc de cercle dans le plan X, Y.



Programme :

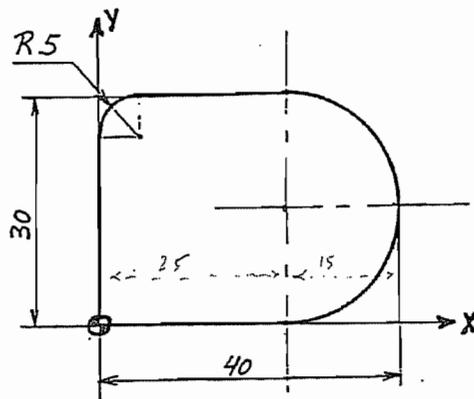
```
N0001 G00 X+40000 Y+60000 Z+2000 S+1250
N0002 Z-10000 F100
N0003 G02 X+15000 Y+35000 I+0 J-25000
N0004 G00 Z+100000
N0005 G00 X+0 Y+0
N0006 M30
```

Commentaires :

```
N0001 outil va en rapide au point P01
N0002 descente à Z-10
N0003 outil exécute l'arc de cercle, sens anti-trigono G02,
      jusqu'au point d'arrivée P02 : X+15 Y+35 (en absolu).
      Le centre se trouve à 0 mm dans sens de l'axe X , et à
      25 mm dans sens opossé de l'axe Y a partir du pt. de
      départ de l'arc P01. (en relatif)
N0004 dégagement rapide suivant Z
N0005 outil retourne en rapide au zéro programme
N0006 .fin du programme
```

Exercice :

Programmez le contour suivant :



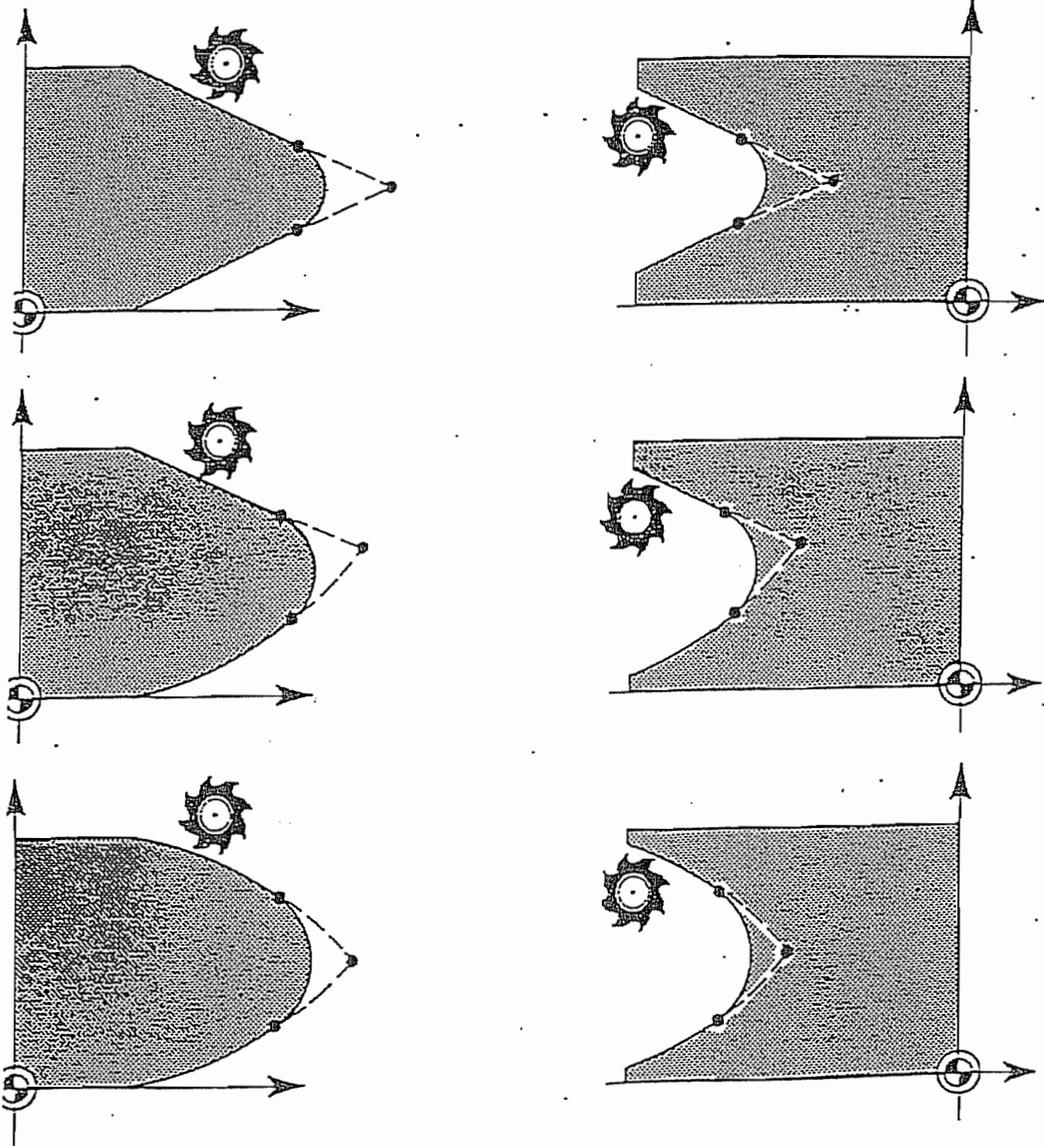
Solution :

```
N0001 G00 X-10000 Y-10000 Z+2000 S+500
N0002 G00 Z-5000
N0003 X+0 Y+0 F100
N0004 X+25000
N0005 G03 X+25000 Y+30000 I+0 J+15000
N0006 X+5000
N0007 G03 X+0 Y+25000 I+0 J-5000
N0008 Y+0
N0009 G00 Z+100000
N0010 M30
```

Pendant une correction de trajectoire, G07 permet d'ajouter un rayon de raccordement au point d'intersection de 2 droites, d'une droite et un arc de cercle ou de 2 arcs de cercle.

Il faut seulement programmer le point d'intersection, et dans le bloc suivant mettre G07 et le rayon voulu sous l'adresse R.

Ex : G07 R+10000



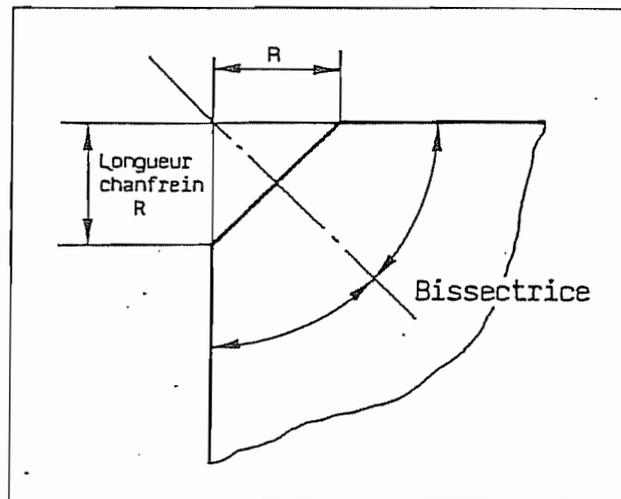
CHANFREINAGE G08 \neq Iso

Pendant une correction de trajectoire, G08 permet d'exécuter un chanfrein au point d'intersection de 2 droites (seulement sur les contours extérieurs).

Il faut seulement programmer le point d'intersection, et dans le bloc suivant mettre G08 et la longueur voulue du chanfrein sous l'adresse R.

Ex : G08 R+30000

⚠ réalise seulement un chanfrein symétrique à la bissectrice des 2 droites, peut importe l'angle entre ces 2 droites.



CHANGEMENT D'OUTIL T

Si au cours de l'usinage, il faut un autre outil

--> il faut interrompre l'usinage

--> programmer un changement d'outil à l'aide de l'adresse T

Ex : N0007 T01 (effet modal)

--> DCN reçoit l'ordre de changer l'outil, et de placer l'outil n° 1 dans la broche

--> après validation l'usinage reprend

CORRECTIONS D'OUTIL

--> tenir compte des dimensions de l'outil :

longueur L --> correction en longueur

rayon R --> correction de trajectoire

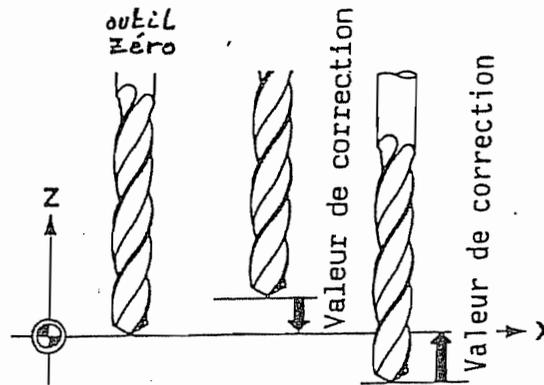
--> DCN compense la différence entre les cotes programmées et la trajectoire que l'outil doit faire pour réaliser ces cotes

CORRECTION EN LONGUEUR

Mise en mémoire comme valeur de correction, des différences de longueur des outils par rapport à l'outil zéro (de référence) (éviter les collisions)

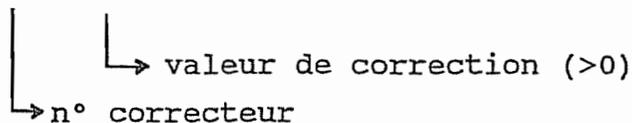
Si outil plus long que outil zéro --> correction >0

Si outil plus petit que outil zéro --> correction <0



La différence entre la longueur des outils et l'outil zéro est mise en mémoire, sous l'adresse D (mémoire de corrections) avec un numéro de correcteur (00 -> 99), en dehors du programme.

Ex: D+05 +15000



Dans le programme on écrit, p. ex. :

N0010 Z-10000 D+05 F100

de manière à ce que la commande tient compte de la correction de longueur lors de la pénétration en Z-10.

⚠ Ordre à effet séquentiel

CORRECTION DE TRAJECTOIRE G41, G42, G40

Si lors de la programmation on tenait déjà compte du R outil

--> il faudrait savoir avec quel outil (R) serait fait l'usinage

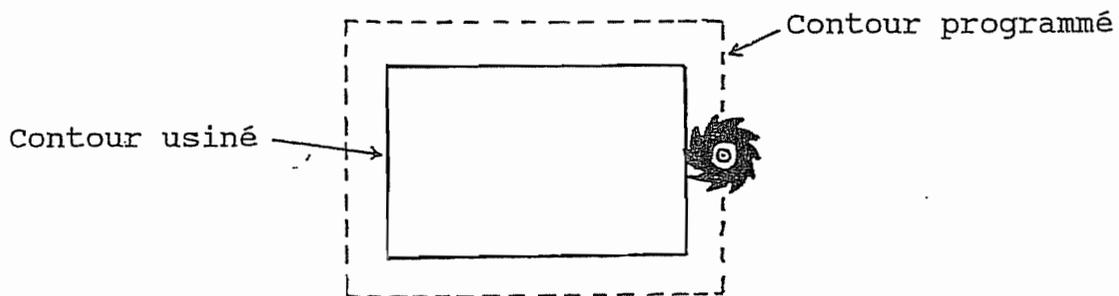
--> il faudrait écrire un nouveau pgm si on changeait le R outil

De plus, vu l'usure de l'outil lors de l'usinage (diminution de R), après quelques pièces il faudrait déjà changer le programme !

Sans correction de trajectoire :

--> le centre de l'outil suit le contour programmé

--> le contour réalisé \neq contour programmé



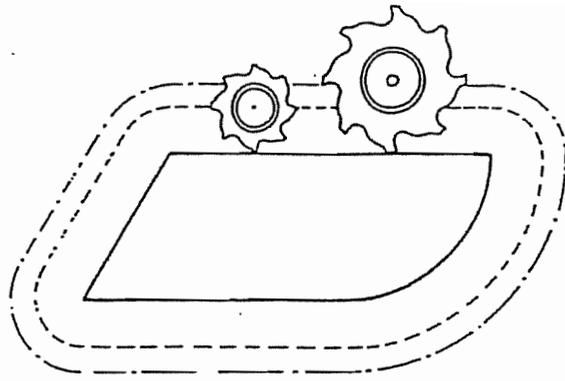
Pour tenir compte du R outil, le DCN a besoin :

- du n° correcteur d'outil + R outil
- de la position de l'outil par rapport au contour

--> DCN calcule la trajectoire corrigée du centre de l'outil en fonction du R outil, défini dans le correcteur, et du sens d'usinage.

Avantages :

--> on programme le contour uniquement par la trajectoire du centre de l'outil (comme si $R=0$), sans se soucier du R outil qui sera utilisé sur la machine



--> la correction de trajectoire est valable pour TOUT PARCOURS
(droite inclinée, arc de cercle, etc.)

--> le R outil est introduit dans la mémoire de correction sur la machine (par l'opérateur), juste avant de commencer l'usinage et il peut être aisément modifié sans toucher au programme

--> ceci permet de réaliser 1 passe d'ébauche suivie d'une passe de finition tout en gardant le même programme, mais en jouant sur le R outil, en effet :

--> si on définit un R outil plus grand de 0,5 mm que le R réel de l'outil

--> on va usiner un contour extérieur avec une surépaisseur de 0,5 mm (ébauche)

--> si après on répète le même contour (même pgm) mais avec R réel, on réalisera alors la finition

La correction de trajectoire est validée par l'ordre :

G41 : outil se déplace à gauche du contour

ou contour à droite de l'outil

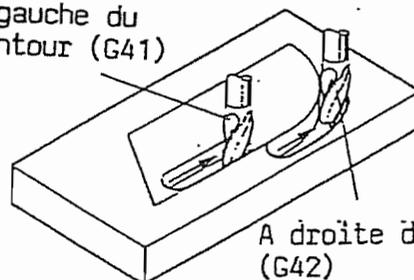
G42 : outil se déplace à droite du contour

ou contour à gauche de l'outil

G40 : annule la correction de trajectoire

⚠ ordres à effet modal

A gauche du contour (G41)



A droite du contour (G42)

Remarques importantes :

- Quand le DCN exécute un pgm, il lit toujours au moins 3 blocs à l'avance pour pouvoir faire les calculs de trajectoire nécessaires

- Pendant une correction de trajectoire on ne peut programmer que les coordonnées D'UN SEUL PLAN

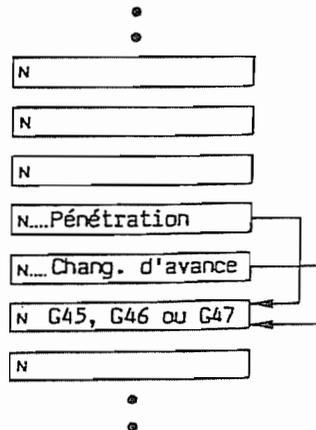
Si on travail dans le plan X, Y --> on ne peut pas déplacer l'outil suivant Z

Donc la pénétration axiale suivant Z :

--> doit être programmée avant l'ordre G41 ou G42

--> mais exécutée après lecture de l'ordre d'accostage

--> M70 = exécuter ce bloc seulement après lecture de l'ordre d'accostage suivant



ORDRES D'ACCOSTAGE G45, G46, G47

Ils déterminent la façon dont l'outil doit accoster le contour.

Si on veut éviter des marques de fraisage sur la pièce, il faut accoster le contour tangentiuellement.

Le DCN peut exécuter automatiquement les calculs nécessaires pour réaliser cette opération.

3 modes d'accostage :

G45 : accostage parrallèlement au contour

G46 : accostage en demi-cercle

G47 : accostage en quart de cercle

Format :

G41 D_G+.. G45 A... X.... Y.... G00 (G60) (M60)

G42 G46 G01 (G61) (M61)

 G47 (G64) (M62)

où G41,42 : correction de trajectoire

 D_G : n° de correcteur d'outil

 G45,46,47 : type d'accostage

 A : distance à l'accostage

 X, Y : coordonnées du 1^{er} point du contour

 G00,01 : conditions de parcours pour l'accostage

 G60,61,64 : conditions de déplacement (option)

 M60,61,62 : optimisation de l'avance (option)

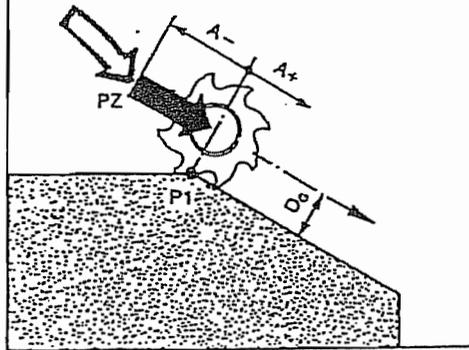
Remarque sur signification de A :

pour G45 : A = distance entre le 1^{er} point du contour P1 et le point d'approche P0

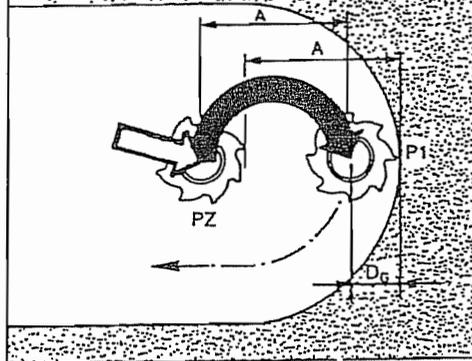
pour G46 : A = diamètre d'accostage

pour G47 : A = rayon d'accostage

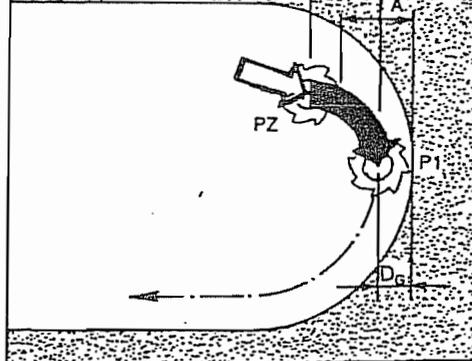
G45 Accostage parallèlement au contour au contour



G46 Accostage en demi-cercle



G47 Accostage en quart de cercle



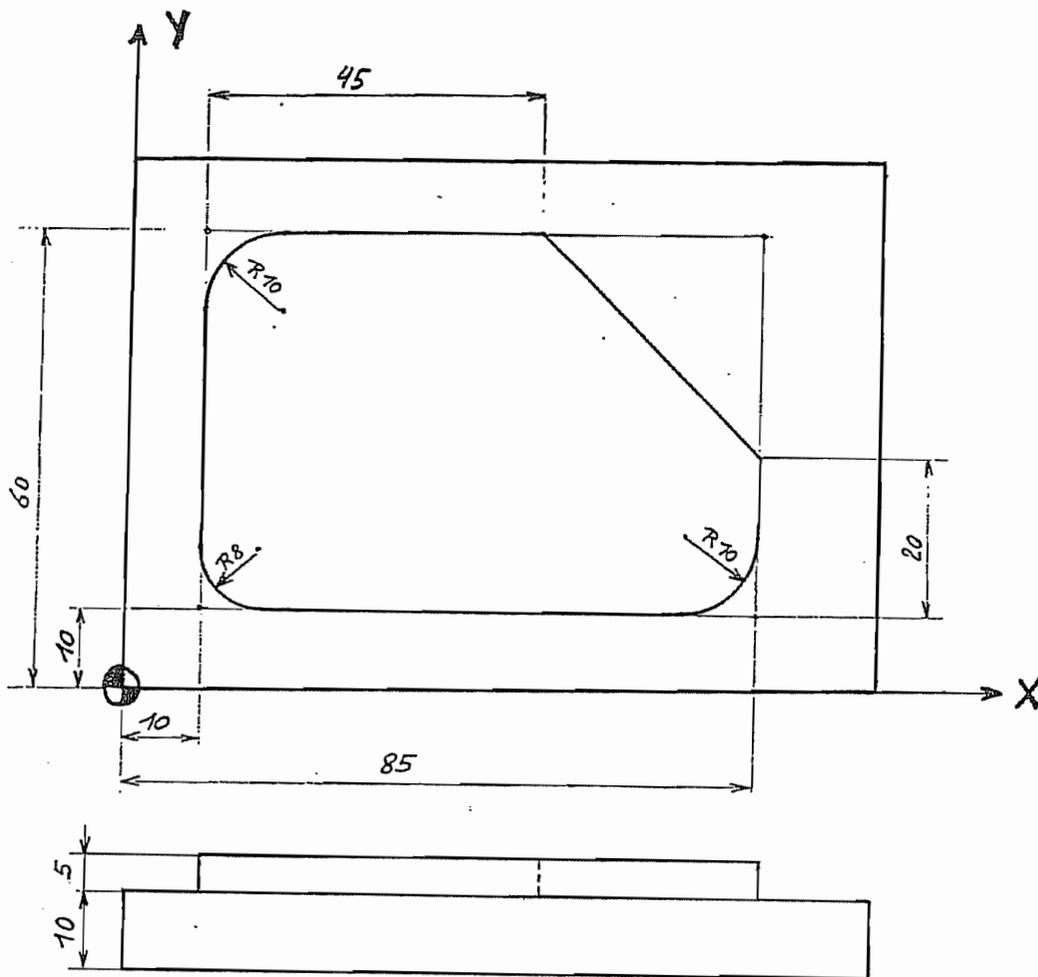
Avance rapide (ou de travail)



Avance de travail

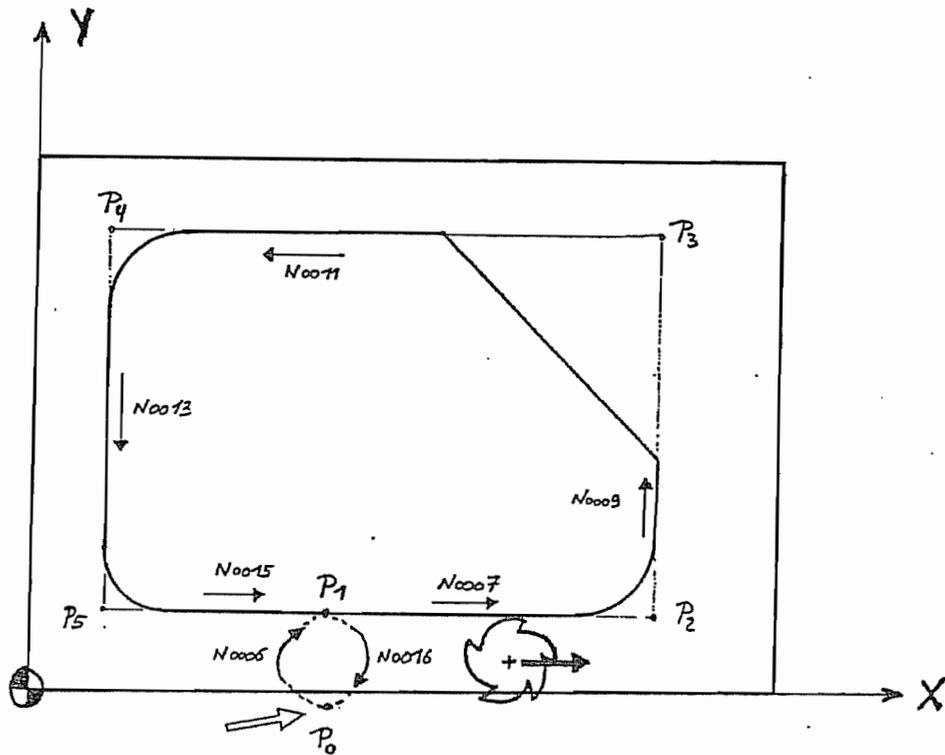
Exemple :

Réaliser le contour suivant avec correction de trajectoire et accostage.



On supposera que la longueur de l'outil 1 est mise en mémoire sous le correcteur n° 01 et le rayon sous le n° 51.

Remarque : En pratique on réserve les n° de correcteur de 00 à 49 pour y placer les longueurs d'outil, et les n° de 50 à 99 pour y placer les rayons d'outil correspondants.



Programme :

```

N0001 G00 X+0 Y+0 Z+200000
N0002 T01 outil n°1
N0003 G00 Z+2000 D+01 S+500
N0004 G01 Z-5000 D+01 F100 M70
N0005 F200 M70
N0006 G42 DG+51 G46 A+12000 X+40000 Y+10000 G00
N0007 X+85000
N0008 G07 R+10000
N0009 Y+60000
N0010 G08 R+30000
N0011 X+10000
N0012 G07 R+10000
N0013 Y+10000
N0014 G07 R+8000
N0015 X+40000
N0016 G40 G46 A+12000
N0017 G00 Z+100000
N0018 M30

```

Commentaires :

- N0001 : on met l'outil en rapide à 200 mm au dessus du ZP, afin de pouvoir effectuer le changement d'outil suivant
- N0002 : on place l'outil n° 1 dans la broche
- N0003 : on positionne l'outil en rapide à 2 mm au dessus du ZP en tenant compte de la correction en longueur D+01, vitesse de broche S+500 t/min
- N0004 : on programme la pénétration axiale, avance de 100 mm/min, en tenant compte de la correction en longueur , mais ce bloc doit être exécuté après l'ordre d'accostage prévu en N0006, d'où le M70
- N0005 : on programme l'avance pour le contournage (200 mm/min) qui sera validée seulement après l'accostage, d'où le M70
- N0006 : on place la correction de trajectoire G42 (càd qu'on déplace l'outil à droite du contour, vu choix du sens de parcours), en tenant compte du R outil (n° correcteur D_g+51).

L'accostage se fait en demi-cercle (choix) --> G46, à une distance d'approche du 1er point du contour de 12 mm (choix).

Ce 1^{er} point du contour (P1) à pour coordonnées X+40 et Y+10 mm.

L'outil se place donc en rapide (vu G00) sur le point d'approche (P0), qui sera calculé par le DCN en fonction de A, X, Y et le type d'accostage.

Ensuite la descente axiale (bloc N0004) est exécutée, l'avance de travail (bloc N0005) prend effet et alors seulement l'outil accoste parrallèlement au contour le 1^{er} point.

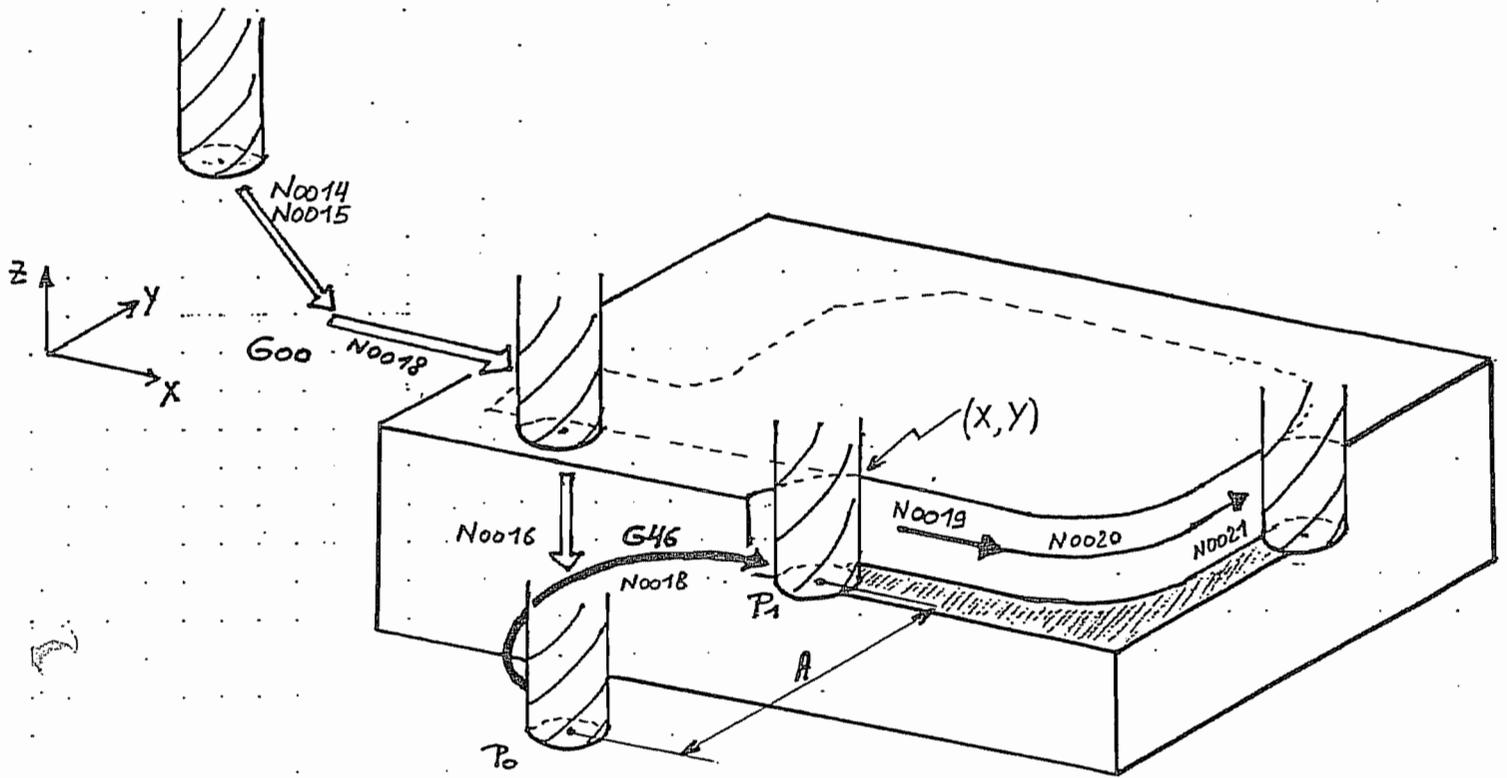
N0007 à N0015 : programmation du contour

N0008 et N0012 : programmation d'un arrondissement d'angle de rayon R+10 mm avec la fonction G07

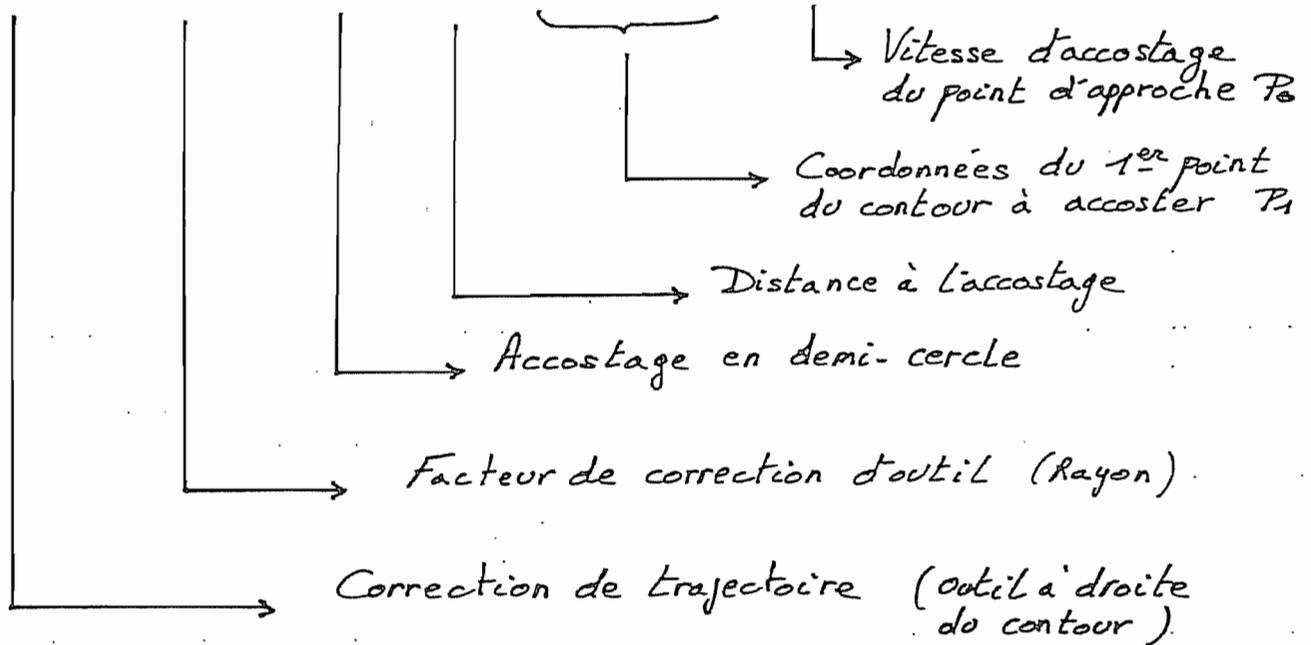
N0010 : programmation d'un chanfrein de longueur R+30 mm avec la fonction G08

N0014 : programmation d'un arrodissement d'angle de rayon R+8 mm

Accostage



N0006 G42 D₀+51 G46 A+12 X... Y... G00



N0016 : on termine la correction de trajectoire (G40) et on
indique comment l'outil doit quitter le contour
(dégagement de l'outil), par exemple en demi-cercle G46
(choix), à une distance vis à vis du dernier point du
contour A+12 mm (choix)
N0017 : on retire l'outil en rapide
N0018 : fin du programme

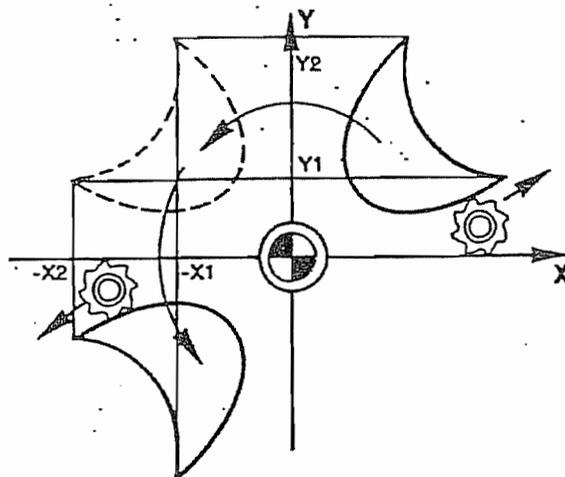
SYMETRIQUE AUTOUR D'UN OU DEUX AXES M81, M82, M84, M80

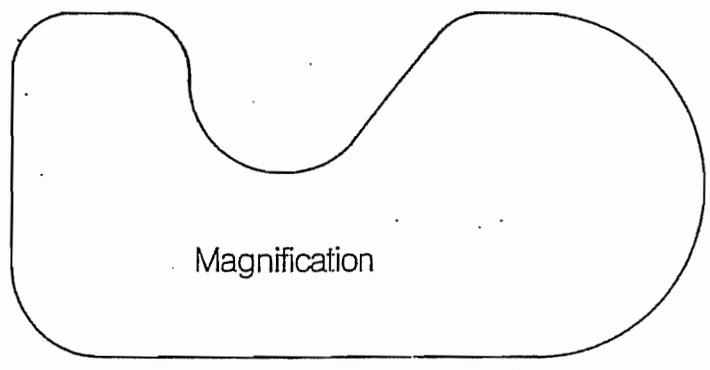
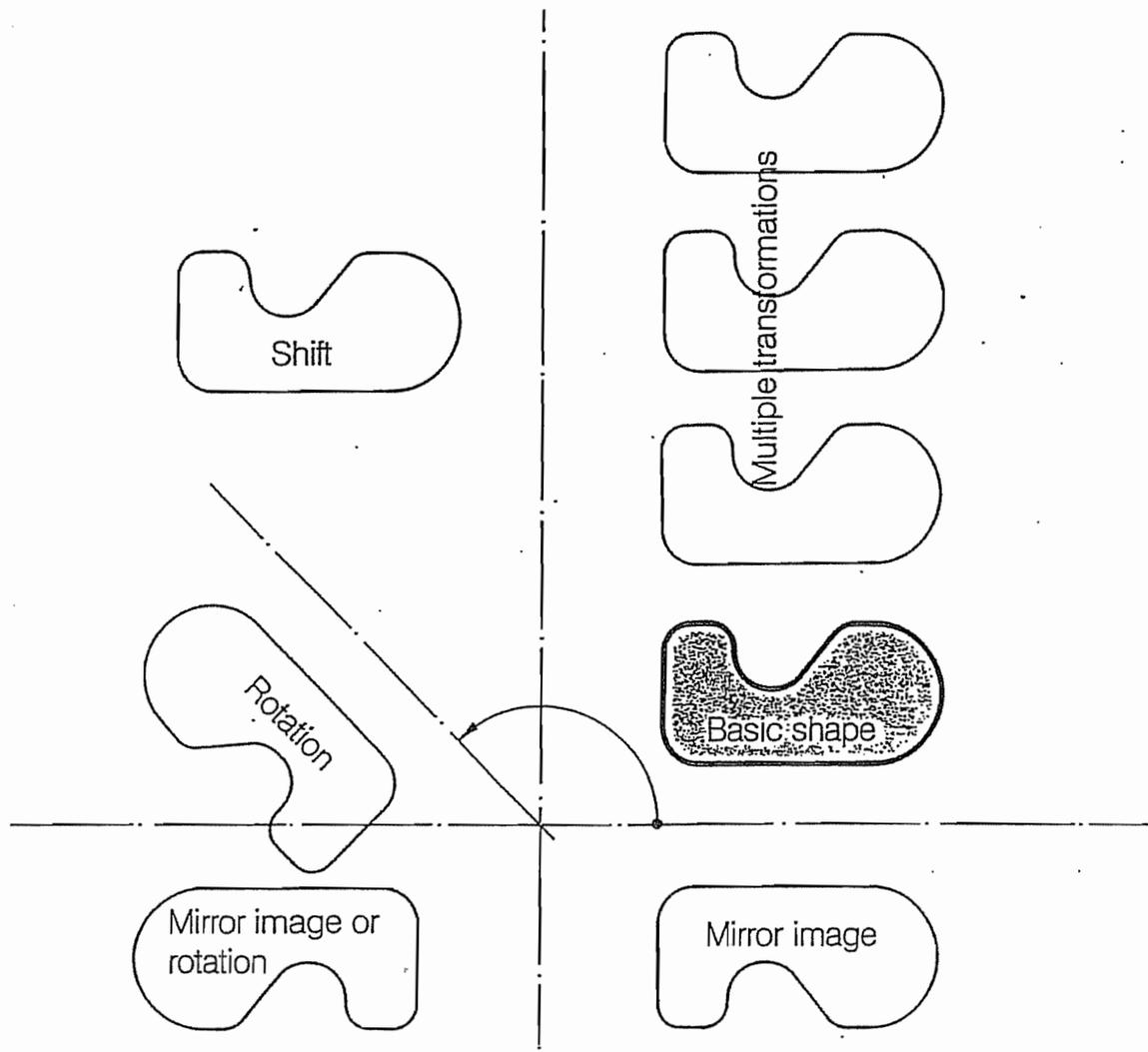
Ces fonctions permettent de réaliser la fonction miroir autour
d'un ou deux axes, en changeant le(s) signe(s) des coordonnées.

Dans le plan X, Y :

M81 : symétrie autour de l'axe Y
M82 : symétrie autour de l'axe X
M84 : symétrie autour de l'axe X et Y
M80 : efface l'ordre de symétrie

⚠ ordres à effet modal





REPETITIONS L

Si plusieurs opérations identiques doivent être effectuées, on peut faire répéter n'importe quelle partie du pgm autant de fois que l'on veut (99 fois max.).

L'adresse L donne l'ordre pour la répétition, suivie du nombre de répétition à effectuer (00 à 99) et enfin les n° de blocs à répéter.

Ex : N0240 L04 N0110 N0135

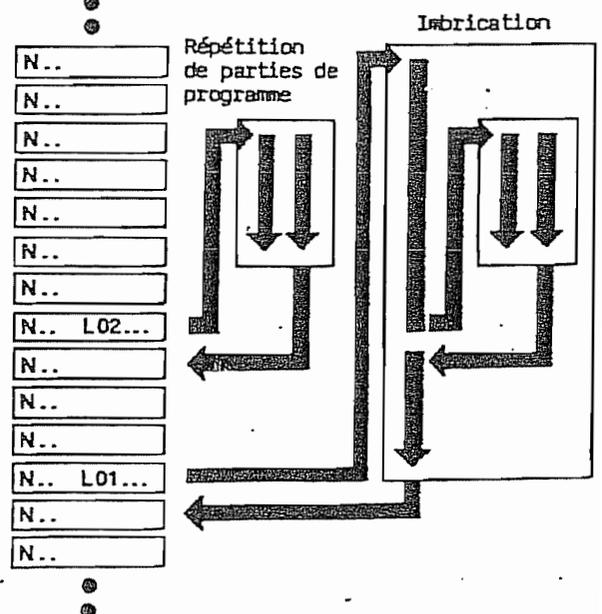
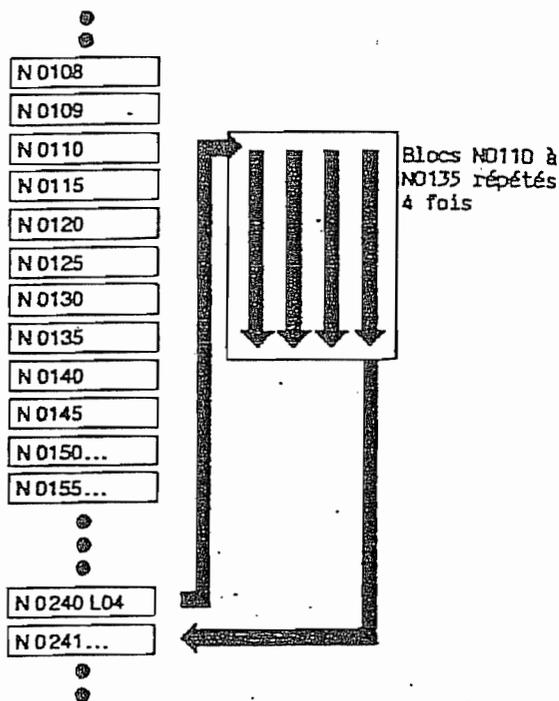
signifie répéter 4 fois les blocs N0110 à N0135, ensuite le programme continue au bloc suivant le bloc N0240.

⚠ Dans un bloc L, aucun autre mot ne peut être programmé, sauf les n° des blocs à répéter et les blocs U

Remarques :

- Il est possible d'imbriquer des répétitions (15 au max.)
- N0250 L01 N0050 N0050 signifie répéter une fois le bloc 50
- N0260 L00 N0200 signifie un saut direct au bloc 200 (=GOTO)

Répétition de
partie du programme



SOUS-PROGRAMME U

Il est possible de programmer des blocs en sous-programme (un seul bloc à la fois).

On introduit ces blocs sous l'adresse U (comme pour N dans le programme principal) à la fin du programme, et il n'ont aucune influence sur l'ordre des opérations.

Dans le programme principal, le sous-programme est appelé par l'adresse U.

Ex : N0030 U0001 G00 X+10000 dans le pgm principal
 .
 ...
 .
 N0099 M30

 U0001 G81 F200 S+500 Z-10000 à fin du programme
 U0002 ...

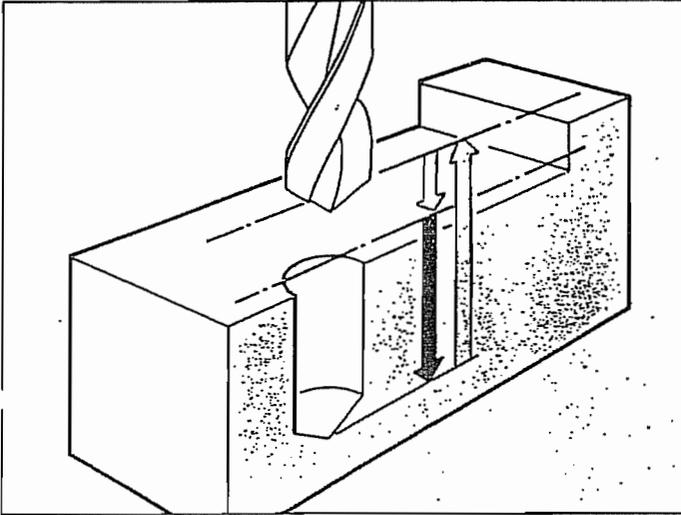
Ceci permet de simplifier la programmation des cycles d'usinage fixe et des ordres d'accostage

⚠ PAS de répétition de partie de pgm dans un s/pgm

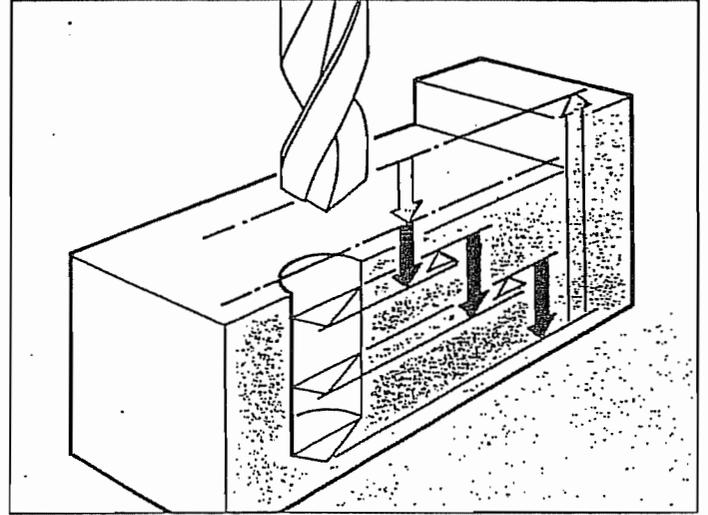
CYCLE D'USINAGE FIXE

La commande possède en mémoire une série de cycles pré-définis, comportant une suite d'ordres programmés et exécutés automatiquement.

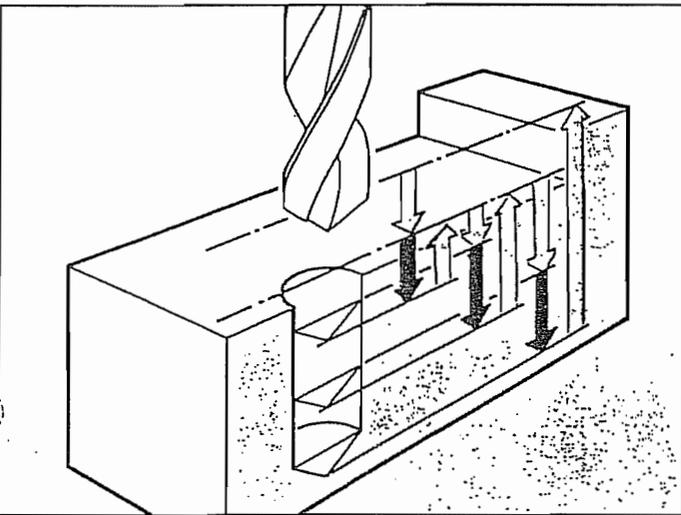
G81 : perçage (en 1 passe)
G82 : perçage avec bris des copeaux (plusieurs passes)
G83 : déburrage (perçage avec remontée de l'outil)
G84 : taraudage
G85 : calibrage (alésage avec un outil alésoir)
G86 : alésage (avec outil à aléser)



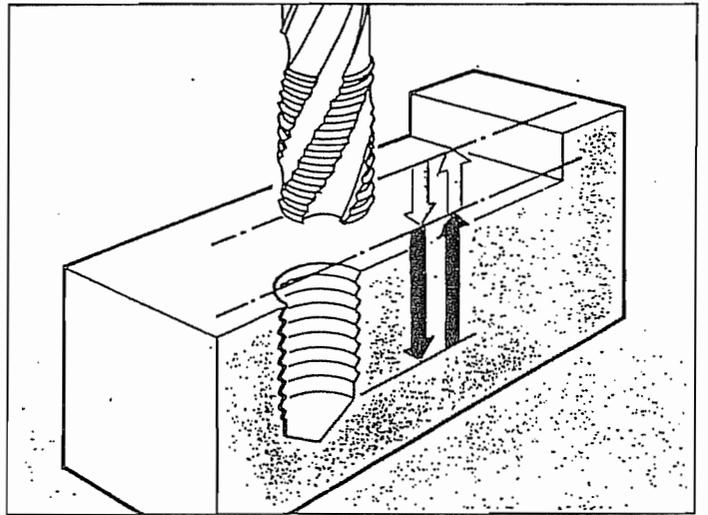
G81 – Perçage



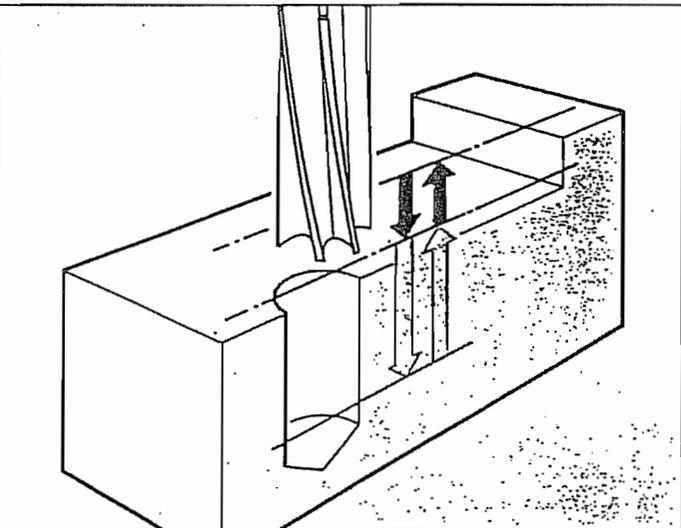
G82 – Perçage avec bris de copeaux



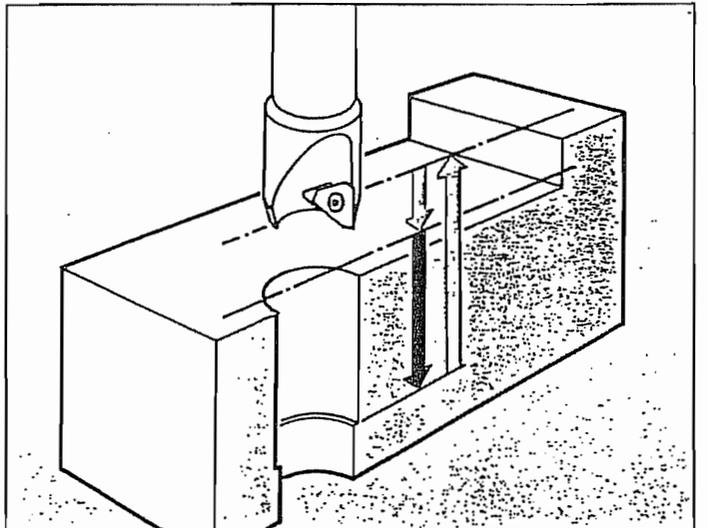
G83 – Déburrage



G84 – Taraudage



G85 – Calibrage



G86 – Alésage, avec retrait de la broche arrêtée

Cycle de perçage G81

C'est le cycle le plus couramment utilisé pour le perçage ou le centrage d'un trou, on étudiera donc ce cycle car pour les autres le principe reste le même.

L'outil perce le trou à S et F données jusqu'à la profondeur programmée, ensuite il retourne en rapide à sa position de départ.

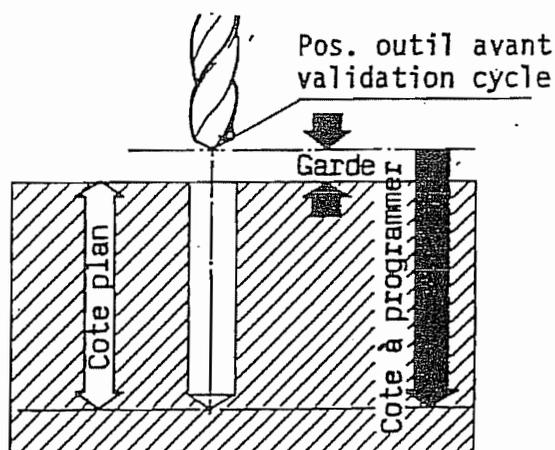
Ex: N0020 G81 F100 S+3500 Z-22000

Une notion importante est la garde de l'outil :

Avant de percer un trou, l'outil est généralement amené en mouvement rapide au dessus de la position de perçage en gardant une distance de 2 mm (p.ex.) par rapport à la surface de la pièce, cette distance de sécurité est appelée garde.

La profondeur d'usinage est alors donnée en relatif à partir de la position où se trouve la pointe de l'outil, avant le bloc où est programmé le cycle :

--> prof. perçage = prof. perçage + garde
à programmer sur plan



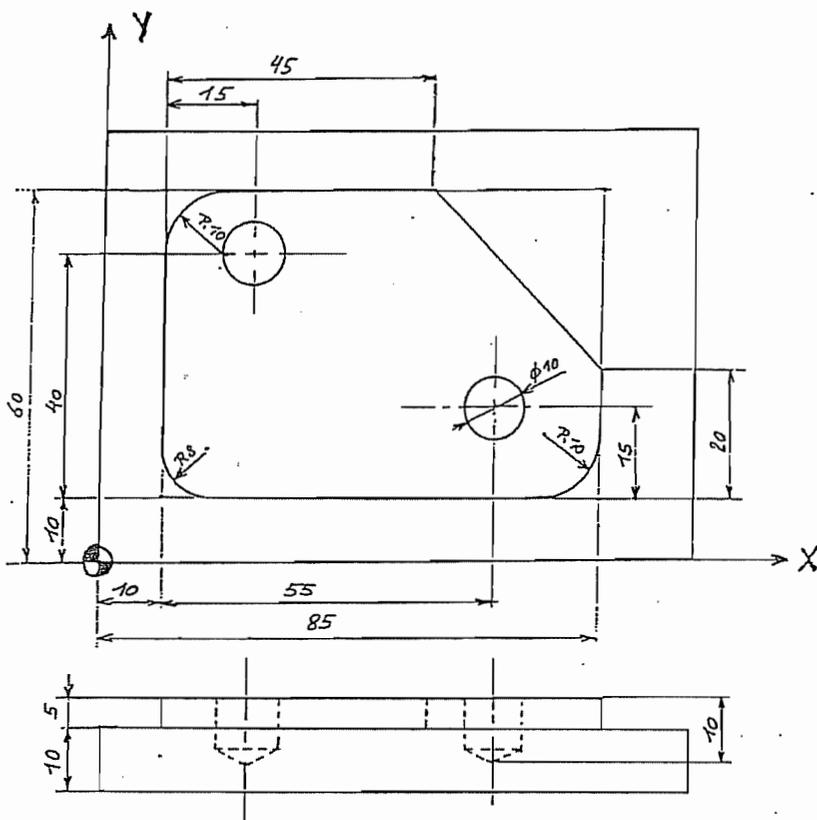
EXERCICE :

Reprendre l'exemple précédent et réaliser le contour avec une passe d'ébauche et de finition, et réaliser 2 perçages.

Remarque :

Si on définit un R outil dans le correcteur DG+51 de 0,5 mm plus grand que le R réel, le DCN va calculer la trajectoire du centre de l'outil qui sera décalée vers l'extérieur de 0,5 mm (surépaisseur).

Pour la finition, il suffit d'utiliser un autre correcteur, p.ex. DG+52 qui lui contient le R exacte de l'outil.



Programme :

N0001 G00 X+0 Y+0 Z+200000
N0002 T01
N0003 G00 Z+2000 D+01 S+500
N0004 G01 Z-5000 D+01 F100 M70
N0005 F200 M70
N0006 G42 DG+51 G46 A+12000 X+40000 Y+10000 G00
N0007 X+85000
N0008 G07 R+10000
N0009 Y+60000
N0010 G08 R+30000
N0011 X+10000
N0012 G07 R+10000
N0013 Y+10000
N0014 G07 R+8000
N0015 X+40000
N0016 G40 G46 A+12000
N0017 G00 X+0 Y+0 Z+2000 D+01
N0018 L01 N0004 N0005
N0019 G42 DG+52 G46 A+12000 X+40000 Y+10000 G00
N0020 L01 N0007 N0016
N0021 G00 X+0 Y+0 Z+200000
N0022 T02
N0023 G00 X+25000 Y+50000 Z+2000 D+02
N0024 G81 Z-5000 F180 S+3150 (centrage)
N0025 G00 X+65000 Y+25000
N0026 L01 N0024 N0024
N0027 G00 Z+200000
N0030 T03
N0031 G00 Z+2000 D+03
N0032 G81 Z-12000 F180 S+500 (perçage)
N0033 G00 X+25000 Y+50000
N0034 L01 N0032 N0032
N0035 G00 Z+200000
N0036 M30

TOLÉRANCES ET ÉTATS DE SURFACE

1. Etats de surface

D'après le mode de mise à forme, on peut obtenir des états de surface qui sont précisés dans le tableau de la figure 1. Ce tableau donne des valeurs de R_t . Comme les plans spécifient le plus souvent R_a et non R_t , il est utile de connaître les relations approximatives suivantes:

$$\text{- pour } R_a > 10 \text{ } \mu\text{m, } R_t \cong 5 R_a$$

$$\text{- pour } R_a < 10 \text{ } \mu\text{m, } R_t \cong 10 R_a$$

D'autre part, il est clair que lorsque le bureau d'études spécifie une tolérance donnée IT, il faut y associer une certaine valeur de l'état de surface admissible:

$$\text{- pour } IT > 10 \text{ } \mu\text{m, } R_t \cong IT/2$$

$$\text{- pour } IT < 10 \text{ } \mu\text{m, } R_t \cong IT/4$$

2. Tolérances et ajustements

2.1 - Rappels

Sans nous étendre sur la question, qui relève du cours d'éléments de machines, nous ferons ici quelques remarques.

Dans le domaine des tolérances, on distingue deux types de cotes, à savoir, les *cotes d'arbre* et les *cotes d'alésage*. Les premières ont un intervalle de tolérance noté à l'aide d'une lettre *minuscule* (k5), tandis que pour les secondes, on utilise une lettre *majuscule* (H8). En dehors des cas évidents de l'arbre ou de l'alésage proprement dit, il arrive que l'on se demande s'il s'agit de l'un ou de l'autre. La règle la plus simple à retenir est la suivante:

Une cote d'arbre est une cote dont l'augmentation correspond à un supplément de matière. Une cote d'alésage est une cote dont l'augmentation correspond à une diminution de la quantité de matière.

Ainsi, la largeur d'une rainure de clavette est une cote d'alésage et la largeur de la clavette, une cote d'arbre; la profondeur de la rainure est une cote d'alésage.

Rappelons encore (fig. 2) que la tolérance est donnée par l'écart inférieur EI ou ei et l'écart supérieur ES ou es. La différence ES-EI ou es-ei est appelée intervalle de tolérance IT. La *grandeur* de l'intervalle de tolérance dépend de la *qualité* (1,2, ..., 14) et de la cote nominale. La *position* de l'intervalle

définit le type (A...Z ou a...z) et ne dépend pas de la qualité.

L'alésage normal est celui pour lequel $EI = 0$. C'est le type H. L'arbre normal vérifie $es = 0$ (type h). Pour un alésage normal, les arbres des qualités a à h sont glissants; les arbres des qualités k à z sont serrés. L'arbre js donne un ajustement incertain. Le caractère glissant ou serré est d'autant plus marqué que la lettre définissant le type de la pièce non normale est plus éloignée de la lettre j ou J dans l'ordre alphabétique.

La figure 3 constitue un tableau des écarts et ajustements les plus courants.

Il subsiste néanmoins le problème des cotes non tolérancées sur le plan. Dans l'esprit du concepteur, ces cotes ne sont pas fonctionnelles et ne nécessitent donc pas de précision particulière. On peut les interpréter de deux manières:

- a) Tolérances JS14/js14
- b) Tolérances extraites du second tableau de la figure 3.

2.2 - Chaînes de cotes

Les chaînes de cotes constituent un outil pratique et efficace pour déterminer diverses conditions de maximum et de minimum.

Pour illustrer leur application, considérons l'assemblage boulonné de la figure 4. Il faut choisir la longueur l de la tige et la longueur filetée l_f de manière à satisfaire aux conditions suivantes:

a) La longueur y de tige sortie doit avoir une valeur comprise entre y_m (certitude de sortie de la tige) et y_M (éviter que la tige ne sorte trop). (l'indice m indique toujours un minimum, l'indice M, un maximum).

b) Il doit exister une réserve de serrage: $x \geq x_m$.

Ces conditions doivent être vérifiées quelles que soient les valeurs de a, b, l , l_f dans leur intervalle de tolérance.

Pour résoudre ce problème, on utilise un diagramme vectoriel où l'on commence par dessiner la cote-condition comme un vecteur double, puis on cherche un jeu de vecteurs composés de cotes indépendantes, de manière à obtenir la condition comme résultante.

Commençons par la condition y: on trouve (fig. 5)

$$y = l - a - b - h \quad (1)$$

Le maximum y_M s'obtient en maximisant toutes les cotes affectées du signe positif et en minimisant toutes les cotes affectées du signe négatif:

$$y_M = l_M - a_m - b_m - h_m \quad (2)$$

A l'inverse, le minimum y_m s'obtient en minimisant toutes les cotes affectées du signe positif et en maximisant les autres:

$$y_m = l_m - a_M - b_M - h_M \quad (3)$$

De ces deux équations, on déduit les valeurs cherchées de l_M et l_m :

$$l_M = y_M + a_m + b_m + h_m$$

$$l_m = y_m + a_M + b_M + h_M$$

Insistons sur le fait qu'il n'est pas équivalent de partir de la relation

$$l = y + a + b + h$$

car y n'est pas une cote indépendante. En particulier,

$$l_M \neq y_M + a_m + b_m + h_m \quad !!!$$

Le passage au maximum et au minimum terme par terme dans le second membre n'est correct que s'il s'agit de variables indépendantes.

Passons à la condition portant sur x . On a (fig. 6)

$$x = b + a - l + l_f$$

(Ne pas utiliser la cote y qui est dépendante), ce qui implique

$$x_m = b_m + a_m - l_M + l_{fM}$$

et

$$l_{fM} = x_m - b_m - a_m + l_M$$

La valeur de x_M ne nous intéresse pas dans ce cas-ci.

2.3 - Discussion

Revenons un instant sur le problème relatif à la cote y et notons que la soustraction des relations (2) et (3) ci-dessus donne

$$y_H - y_m = (\ell_H - \ell_m) + (a_H - a_m) + (b_H - b_m) + (h_H - h_m)$$

soit

$$IT(y) = IT(\ell) + IT(a) + IT(b) + IT(h) ,$$

c'est-à-dire que l'intervalle de tolérance de la condition est la somme des intervalles de tolérance des cotes composantes. Il en résulte

$$IT(\ell) = IT(y) - IT(a) - IT(b) - IT(h)$$

et on ne pourra trouver $\ell_H > \ell_m$ que si

$$IT(y) > IT(a) + IT(b) + IT(h).$$

C'est la condition de compatibilité du problème posé.

2.4 - Autre exemple

On désire fabriquer un suspensoir pour deux rouleaux de papier hygiénique, au moyen de deux barres circulaires de diamètre d_1 , dont les axes sont à une distance ℓ et situés sur une même verticale (fig. 7). Les rouleaux ont un diamètre intérieur d et un diamètre extérieur D . Chacune de ces cotes d_1 , d et D est affectée de tolérances. On demande quelle est la distance minimale des deux barres pour que les deux rouleaux ne se touchent jamais.

Remarquons que dans ce cas précis, nous prenons la distance des deux barres et non la distance de leurs axes comme cote, car nous envisageons le mode de fabrication suivant (fig. 8): après avoir monté la barre 1, on positionne la barre 2 à l'aide d'une entretoise de longueur ℓ . (Une telle entretoise peut d'ailleurs servir de moyen de contrôle.)

Le problème posé revient donc à exiger qu'il existe entre les deux rouleaux en place une distance x , avec $x_m > 0$. Etablissons donc la chaîne de cote de x , en distinguant soigneusement les cotes d , d_1 , D de la partie inférieure des cotes d^* , d_1^* , D^* de la partie supérieure. Elles sont en effet indépendantes, même si elles ont seules à deux la même valeur nominale. On déduit de la figure 9

$$x = -D/2 + d/2 + \ell + d_1^* - d^*/2 - D^*/2$$

d'où

$$x_m = -D_M/2 + d_m/2 + \ell_m + d_{1m}^* - d_M^*/2 - D_M^*/2$$

et

$$\ell_m = x_m + D_M/2 + D_M^*/2 - d_m/2 + d_M^*/2 - d_{1m}^*$$

Notant que

$$D_M^* = D_M \quad , \quad d_M^* = d_M \quad , \quad d_{1m}^* = d_{1m}$$

car les cotes sont identiques, on obtient

$$\ell_m = x_m + D_M + \frac{1}{2} IT(d) - d_{1m}$$

Si l'on avait négligé de distinguer d de d* dans les calculs, on aurait perdu le terme IT(d)/2 dans cette expression.

3. Tolérances géométriques

Les tolérances *géométriques* sont des tolérances portant sur la géométrie du corps indépendamment des tolérances dimensionnelles. Elles correspondent à des conditions de fonctionnement correct du produit. Nous nous bornons ici à un bref rappel, renvoyant au cours d'éléments de machines pour les détails. En particulier, nous n'envisagerons pas la toléranciation au maximum de matière.

3.1 - Tolérances de forme

a) *Rectitude* d'une ligne ou d'un axe (fig. 10).

La zone de tolérance est définie par l'écart de deux parallèles enveloppant la ligne considérée. Sur une longueur de 200 mm, ces droites extrêmes ne peuvent s'écarter de plus de 0,1 mm.

b) *Planéité* d'une surface (fig. 11)

La surface tolérancée doit être comprise entre deux plans distants de 0,05 mm au maximum. Ceci ne présume en rien de l'orientation des deux plans!

c) *Circularité* (fig. 12)

Le contour de chaque section droite doit être compris entre deux cercles distants au plus de 0,02 mm.

d) *Cylindricité* (fig. 13)

La surface considérée doit être comprise entre deux cylindres coaxiaux (quel que soit l'axe !) distants entre eux de 0,05 mm au plus.

3.2 - Tolérances d'orientation

Il s'agit toujours d'orientation par rapport à une référence. Celle-ci est marquée par le symbole



a) Parallélisme (fig. 14)

L'axe tolérancé doit être compris entre deux droites parallèles à la référence A et distantes de moins de 0,1 mm, dans le plan du dessin.

b) Perpendicularité (fig. 15)

L'axe du cylindre doit être compris entre deux droites parallèles, distantes de moins de 0,1 mm entre elles, perpendiculaires au plan de référence et contenues dans le plan du dessin.

c) Inclinaison (fig. 16)

Dans ce plan apparaît une cote encadrée: c'est une cote de référence, réalisable à l'aide d'un calibre très précis. Une cote encadrée n'est jamais tolérancée. Cela étant, l'axe du trou doit être compris entre deux droites à 60°, distantes de moins de 0,1 mm.

3.3 - Tolérances de position

a) Tolérances de position proprement dite (fig. 17)

Par rapport à la position de référence indiquée par les cotes encadrées, le trou peut se situer dans un cercle de diamètre $\varnothing = 0,05$ mm.

b) Tolérances de coaxialité (fig. 18)

L'axe du cylindre tolérancé doit être contenu dans une zone cylindrique de diamètre 0,03 mm concentrique à l'axe du cylindre de référence A.

c) Tolérances de symétrie (fig. 19)

Le plan méridien de la rainure doit être compris entre deux plans parallèles distants de 0,06 mm et symétriquement placés par rapport au plan méridien de référence A.

3.4 - Tolérances de battement

a) Battement simple axial (fig. 20)

En plaçant le corps sur deux paliers A et B, on mesure le déplacement radial d'un comparateur lors de la rotation. Ce déplacement, appelé battement radial, ne doit pas dépasser 0,02 mm.

b) Battement simple oblique (fig. 21)

On place ici le corps sur un palier long en A, et on mesure le battement perpendiculairement à la surface théorique.

c) Battement simple axial (fig. 22)

Idem, en plaçant le comparateur dans la direction de l'axe.

d) Battement total radial (fig. 23)

On peut schématiser cette tolérance en imaginant que l'on lie au comparateur une barre axiale. On mesure donc toute la longueur de la surface en une fois.

e) Battement total axial (fig. 24)

Schématisé par la figure.

Méthode d'usinage		Profondeur de rugosité Rt (µm)																					
Groupe	Désignation	0,1	0,18	0,25	0,4	0,6	1	1,8	2,5	4	6,3	10	18	25	40	63	100	180	250	400	630	1000	
Fonderie	Fonderie au sable																						
	Fonderie en coquille																						
	Fonderie fine																						
Forgeage	Forge libre																						
	Estampage																						
	Forge de précision																						
Laminage	Laminage à chaud																						
	Laminage à froid																						
Emboutissage	Compression																						
	Matriçage																						
Galetage	Galetage																						
	Roulage																						
Rabotage	Dégrossissage																						
	Ébauche																						
	Finition																						
Tournage (extérieur et intérieur)	Tournage dégrossissage																						
	Tournage d'ébauche																						
	Tournage de finition																						
	Tournage de précision avec carbure																						
	Tournage de haute précision avec diamant																						
Chambrage	Chambrage																						
Alésage par alésoir	Alésage normal																						
	Alésage de précision																						
	Alésage de haute précision																						
Fraisage	Fraisage d'ébauche																						
	Fraisage de finition																						
	Fraisage de précision																						
	Fraisage de haute précision																						
Brochage	Brochage normal																						
	Brochage de précision																						
Rectification	Rectification d'ébauche																						
	Rectification normale																						
	Rectification de précision																						
	Rectification de haute précision																						
Honing	Honing																						
	Honing de précision																						
	Honing de haute précision																						
Rodage	Rodage d'ébauche																						
	Rodage de finition																						
	Rodage de haute précision																						
	Rodage de très haute précision																						

d'après document : CETIM

FIG. 1

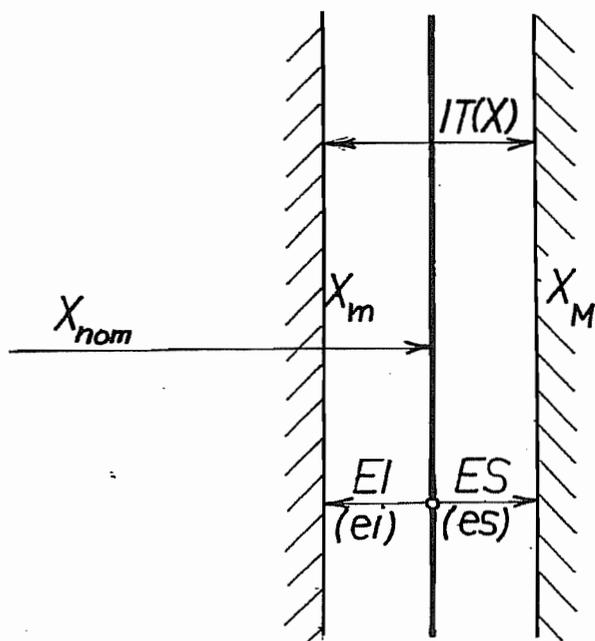


FIG. 2

ÉCARTS DES AJUSTEMENTS LES PLUS COURAMMENT UTILISÉS (NF R 91-011)

1

Alésages		H6			H7				H8					H9		H11						
Arbres		h5	js5	k5	g6	h6	m6	p6	e8	f7	h7	s7	u7	x7	e9	h8	d11					
Écarts en micromètres (1 μm = 0,001 mm)	≤ 3	+6 0	0 -4	+2 -2	+4 0	+10 0	-2 -8	0 +2	+8 +6	+12 +6	+14 0	-14 -28	-6 -16	0 -10	+24 +14	+28 +18	+30 +20	+25 0	-14 -39	0 -14	+60 0	-20 -80
	> 3 à 6	+8 0	0 -5	+2 -2,5	+6 +1	+12 0	-4 -12	0 -8	+12 +4	+20 +2	+18 0	-20 -38	-10 -22	0 -12	+31 +19	+35 +23	+40 +28	+30 0	-20 -5	0 -18	+75 0	-30 -105
	> 6 à 10	+9 0	0 -6	+3 -3	+7 +1	+15 0	-5 -14	0 -9	+15 +6	+24 +15	+22 0	-25 -47	-13 -28	0 -15	+38 +23	+43 +28	+49 +34	+36 0	-25 -61	0 -22	+90 0	-40 -130
	> 10 à 14	+11 0	0 -8	+4 -4	+9 +1	+18 0	-6 -17	0 -11	+18 +7	+29 +18	+27 0	-32 -59	-16 -34	0 -18	+46 +28	+51 +33	+58 +40	+43 0	-32 -75	0 -27	+110 0	-50 -160
	> 14 à 18	+11 0	0 -8	+4 -4	+9 +1	+18 0	-6 -17	0 -11	+18 +7	+29 +18	+27 0	-32 -59	-16 -34	0 -18	+46 +28	+51 +33	+63 +45	+43 0	-32 -75	0 -27	+110 0	-50 -160
	> 18 à 24	+13 0	0 -9	+4,5 -4,5	+11 +2	+21 0	-7 -20	0 -13	+21 +8	+35 +22	+33 0	-40 -73	-20 -41	0 -21	+56 +35	+62 +41	+75 +54	+52 0	-40 -92	0 -33	+130 0	-65 -195
	> 24 à 30	+13 0	0 -9	+4,5 -4,5	+11 +2	+21 0	-7 -20	0 -13	+21 +8	+35 +22	+33 0	-40 -73	-20 -41	0 -21	+56 +35	+69 +48	+85 +64	+52 0	-40 -92	0 -33	+130 0	-65 -195
	> 30 à 40	+16 0	0 -11	+5,5 -5,5	+13 +2	+25 0	-9 -25	0 -16	+25 +9	+42 +26	+39 0	-50 -89	-25 -50	0 -25	+68 +43	+85 +60	+105 +80	+62 0	-50 -112	0 -39	+160 0	-80 -240
	> 40 à 50	+16 0	0 -11	+5,5 -5,5	+13 +2	+25 0	-9 -25	0 -16	+25 +9	+42 +26	+39 0	-50 -89	-25 -50	0 -25	+68 +43	+95 +70	+122 +97	+62 0	-50 -112	0 -39	+160 0	-80 -240
	> 50 à 65	+19 0	0 -13	+6,5 -6,5	+15 +2	+30 0	-10 -29	0 -19	+30 +11	+51 +32	+46 0	-60 -106	-30 -60	0 -30	+83 +53	+117 +87	+152 +122	+74 0	-60 -134	0 -46	+190 0	-100 -290
	> 65 à 80	+19 0	0 -13	+6,5 -6,5	+15 +2	+30 0	-10 -29	0 -19	+30 +11	+51 +32	+46 0	-60 -106	-30 -60	0 -30	+89 +59	+132 +102	+176 +146	+74 0	-60 -134	0 -46	+190 0	-100 -290
	> 80 à 100	+22 0	0 -15	+7,5 -7,5	+18 +3	+35 0	-12 -34	0 -22	+35 +13	+59 +37	+54 0	-72 -126	-36 -71	0 -35	+106 +71	+159 +124	+213 +178	+87 0	-72 -159	0 -54	+220 0	-120 -340
	> 100 à 120	+22 0	0 -15	+7,5 -7,5	+18 +3	+35 0	-12 -34	0 -22	+35 +13	+59 +37	+54 0	-72 -126	-36 -71	0 -35	+114 +79	+179 +144	+245 +210	+87 0	-72 -159	0 -54	+220 0	-120 -340
	> 120 à 140	+25 0	0 -18	+9 -9	+21 +3	+40 0	-14 -39	0 -25	+40 +15	+68 +43	+63 0	-85 -148	-43 -83	0 -40	+132 +92	+210 +170	+288 +248	+100 0	-85 -185	0 -63	+250 0	-145 -395
	> 140 à 160	+25 0	0 -18	+9 -9	+21 +3	+40 0	-14 -39	0 -25	+40 +15	+68 +43	+63 0	-85 -148	-43 -83	0 -40	+140 +100	+230 +190	+320 +280	+100 0	-85 -185	0 -63	+250 0	-145 -395
	> 160 à 180	+25 0	0 -18	+9 -9	+21 +3	+40 0	-14 -39	0 -25	+40 +15	+68 +43	+63 0	-85 -148	-43 -83	0 -40	+148 +108	+250 +210	+350 +310	+100 0	-85 -185	0 -63	+250 0	-145 -395
	> 180 à 200	+29 0	0 -20	+10 -10	+24 +4	+46 0	-15 -44	0 -29	+46 +17	+79 +50	+72 0	-100 -172	-50 -96	0 -46	+168 +122	+282 +236	+396 +350	+115 0	-100 -215	0 -72	+290 0	-170 -460
	> 200 à 225	+29 0	0 -20	+10 -10	+24 +4	+46 0	-15 -44	0 -29	+46 +17	+79 +50	+72 0	-100 -172	-50 -96	0 -46	+176 +130	+304 +258	+431 +385	+115 0	-100 -215	0 -72	+290 0	-170 -460
> 225 à 250	+29 0	0 -20	+10 -10	+24 +4	+46 0	-15 -44	0 -29	+46 +17	+79 +50	+72 0	-100 -172	-50 -96	0 -46	+186 +140	+330 +284	+471 +425	+115 0	-100 -215	0 -72	+290 0	-170 -460	
> 250 à 280	+32 0	0 -23	+11,5 -11,5	+27 +4	+52 0	-17 -49	0 -32	+52 +20	+88 +56	+81 0	-110 -191	-56 -108	0 -52	+210 +158	+367 +315	+527 +475	+130 0	-110 -240	0 -81	+320 0	-190 -510	
> 280 à 315	+32 0	0 -23	+11,5 -11,5	+27 +4	+52 0	-17 -49	0 -32	+52 +20	+88 +56	+81 0	-110 -191	-56 -108	0 -52	+222 +170	+402 +350	+577 +525	+130 0	-110 -240	0 -81	+320 0	-190 -510	
> 315 à 355	+36 0	0 -25	+12,5 -12,5	+29 +4	+57 0	-18 -54	0 -36	+57 +21	+98 +62	+89 0	-125 -214	-62 -119	0 -57	+247 +190	+447 +390	+647 +590	+140 0	-125 -265	0 -89	+360 0	-210 -570	
> 355 à 400	+36 0	0 -25	+12,5 -12,5	+29 +4	+57 0	-18 -54	0 -36	+57 +21	+98 +62	+89 0	-125 -214	-62 -119	0 -57	+265 +208	+492 +435	+717 +660	+140 0	-125 -265	0 -89	+360 0	-210 -570	
> 400 à 450	+40 0	0 -27	+13,5 -13,5	+32 +5	+63 0	-20 -60	0 -40	+63 +23	+108 +68	+97 0	-135 -232	-68 -131	0 -63	+295 +232	+553 +490	+803 +740	+155 0	-135 -290	0 -97	+400 0	-230 -630	
> 450 à 500	+40 0	0 -27	+13,5 -13,5	+32 +5	+63 0	-20 -60	0 -40	+63 +23	+108 +68	+97 0	-135 -232	-68 -131	0 -63	+315 +252	+603 +540	+883 +820	+155 0	-135 -290	0 -97	+400 0	-230 -630	

1. COTES AVEC INDICATION DE TOLÉRANCE.

Le dessin comporte des cotes avec indication de tolérance : se reporter au tableau figure 1. Le tableau donne les écarts des ajustements les plus couramment utilisés.

2. COTES SANS INDICATION DE TOLÉRANCE.

La tolérance est reportée dans un nota général suivant les directives ci-après de NF E 02-350 :

1^{er} cas : tolérance JS/js

exemple : JS14/js14

2^e cas : tolérance extraite des tableaux de la norme (fig. 2).

DIMENSIONS LINÉAIRES (mm)									
Dimensions nominales		0,5 à 3	de 3 à 6	de 6 à 30	de 30 à 120	de 120 à 315	de 315 à 1000	1000 à 2000	2000 à 4000
Écarts (mm)	Série fine	± 0,05	± 0,05	± 0,1	± 0,15	± 0,2	-	-	-
	Série moy.	± 0,1	± 0,1	± 0,2	± 0,3	± 0,5	± 0,8	± 1,2	± 2
	Série grossière	-	± 0,2	± 0,5	± 0,8	± 1,2	± 2	± 3	± 4
DIMENSIONS ANGULAIRES									
Longueur du plus petit côté de l'angle (mm)		Jusqu'à 10		de 10 à 50	de 50 à 120	de 120 à 400			
Écarts	en degrés et minutes	± 1°		± 30'	± 20'	± 10'			
	en pourcentage	± 1,8		± 0,9	± 0,6	± 0,3			

FIG. 3

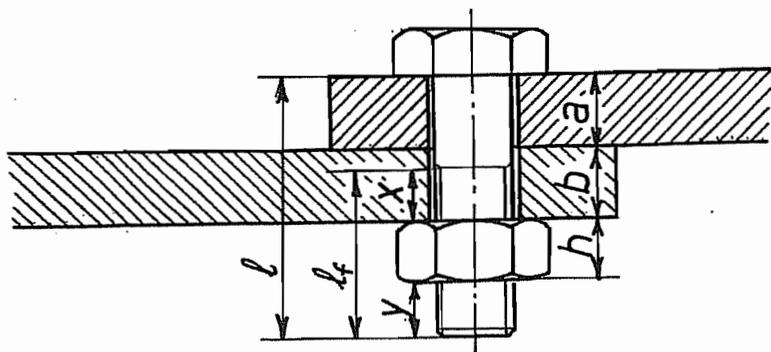


FIG. 4

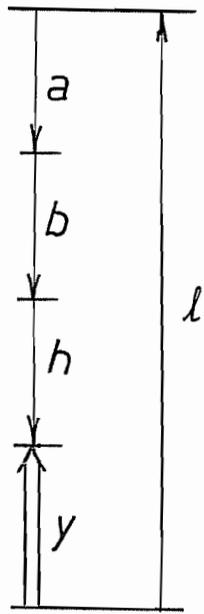


FIG. 5

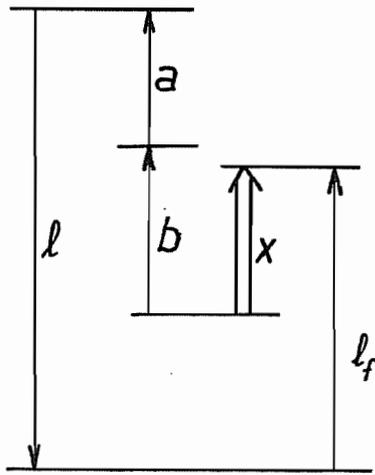


FIG. 6

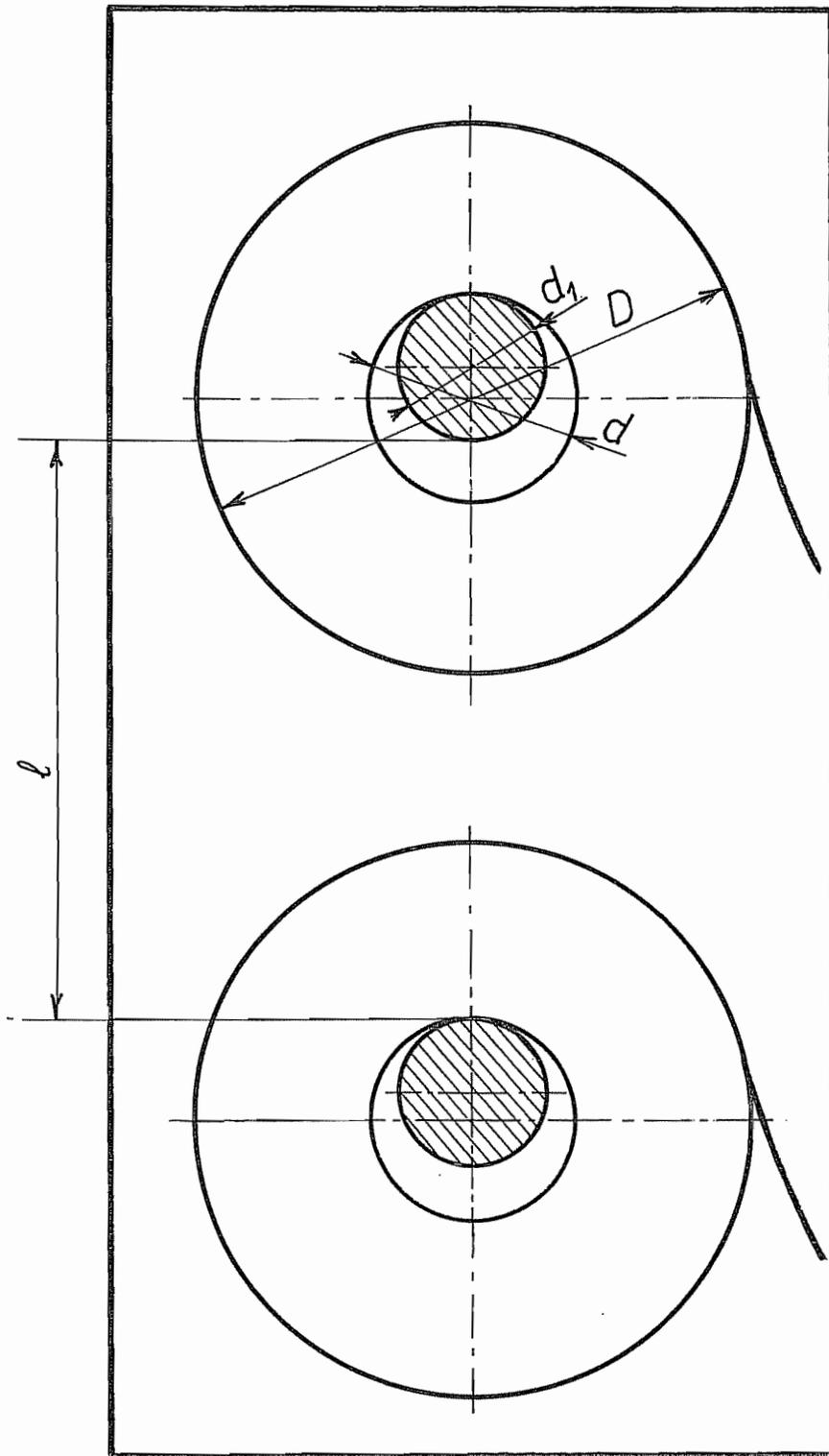


FIG. 7

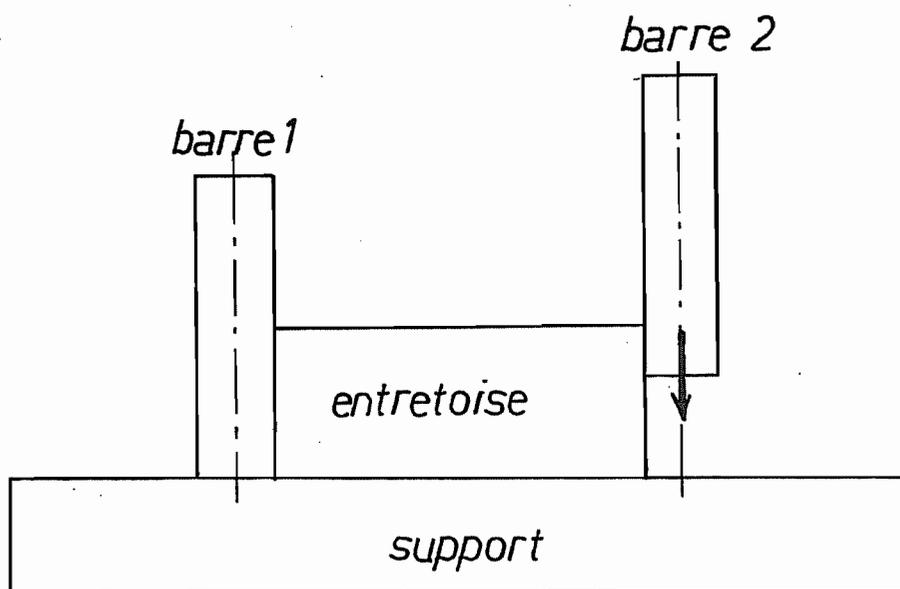


FIG. 8

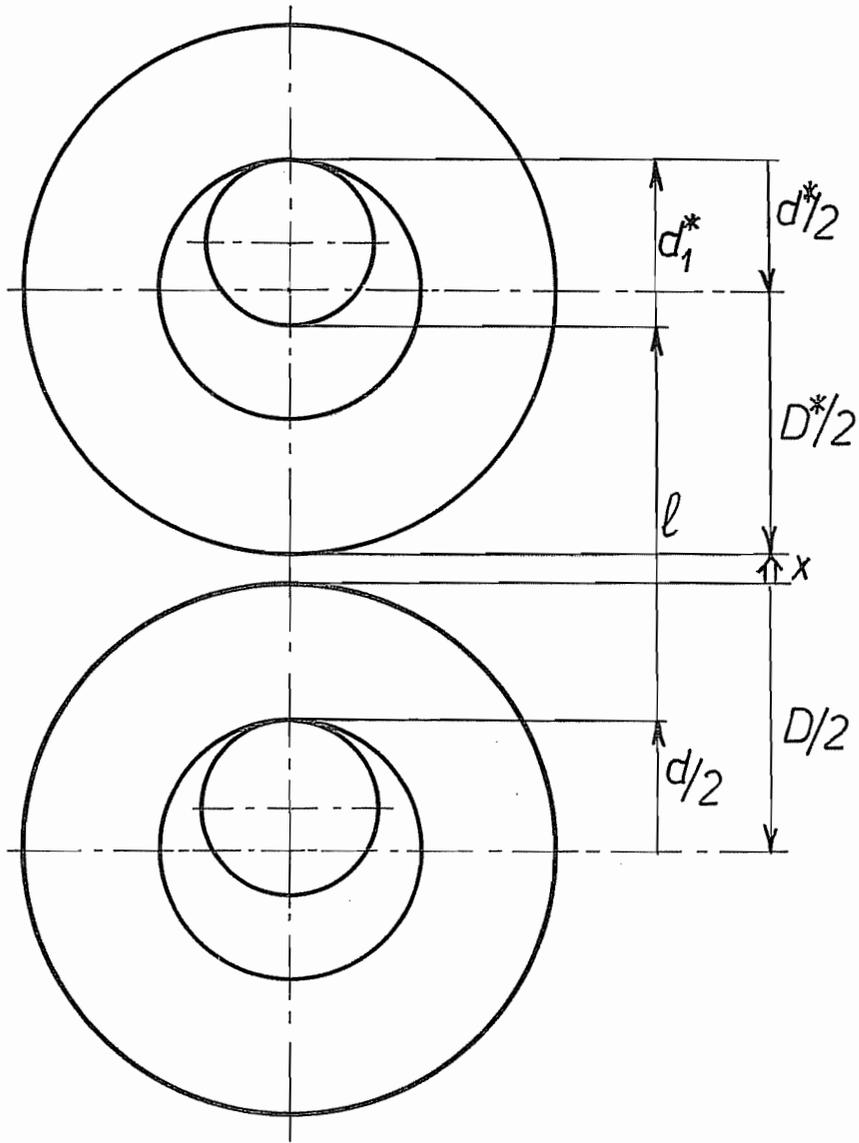


FIG. 9

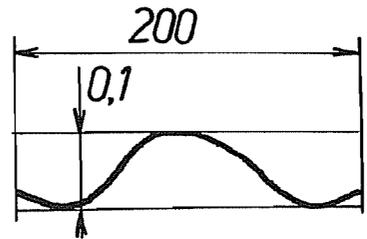
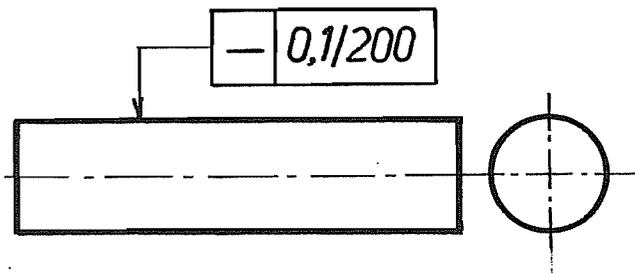


FIG. 10

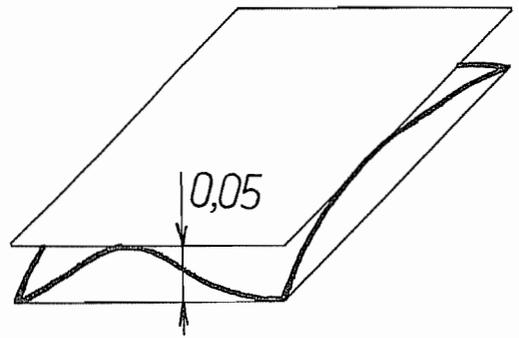
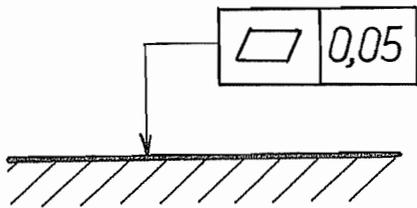


FIG. 11

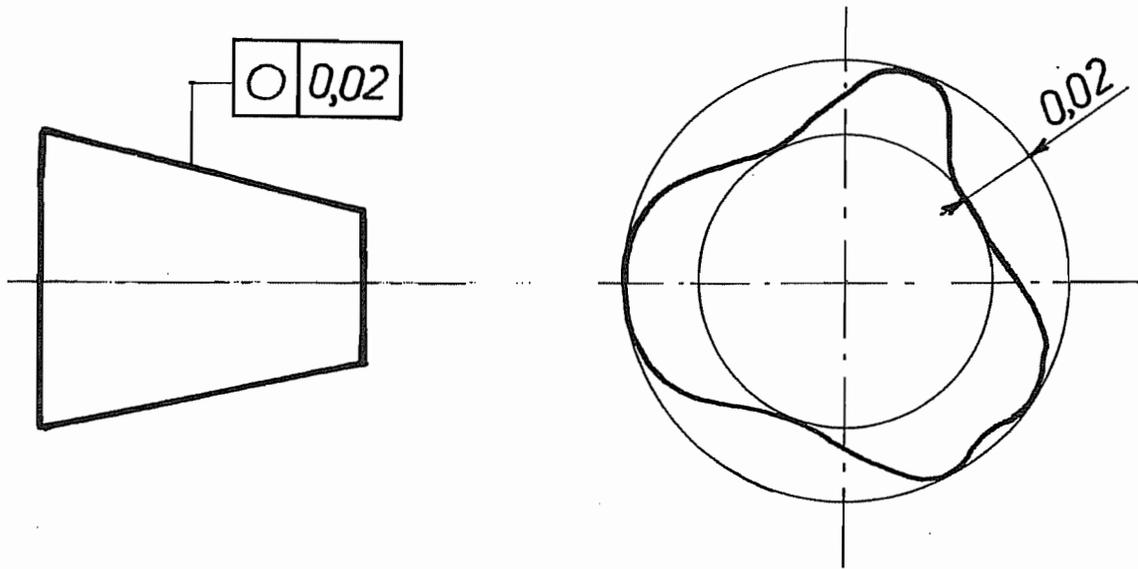


FIG. 12

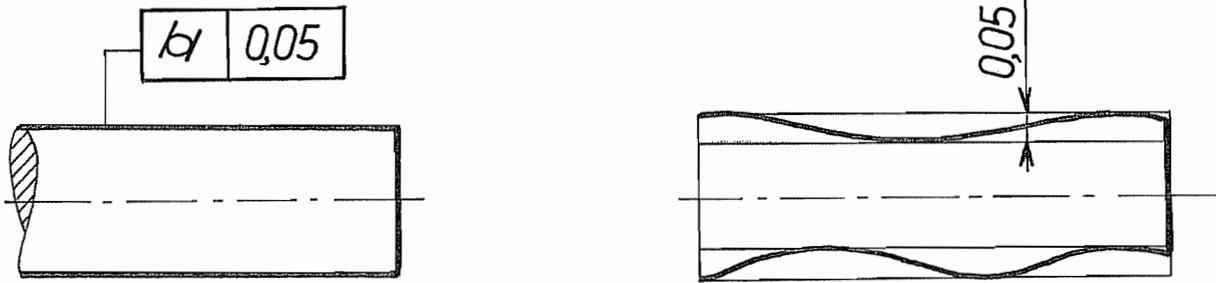


FIG. 13

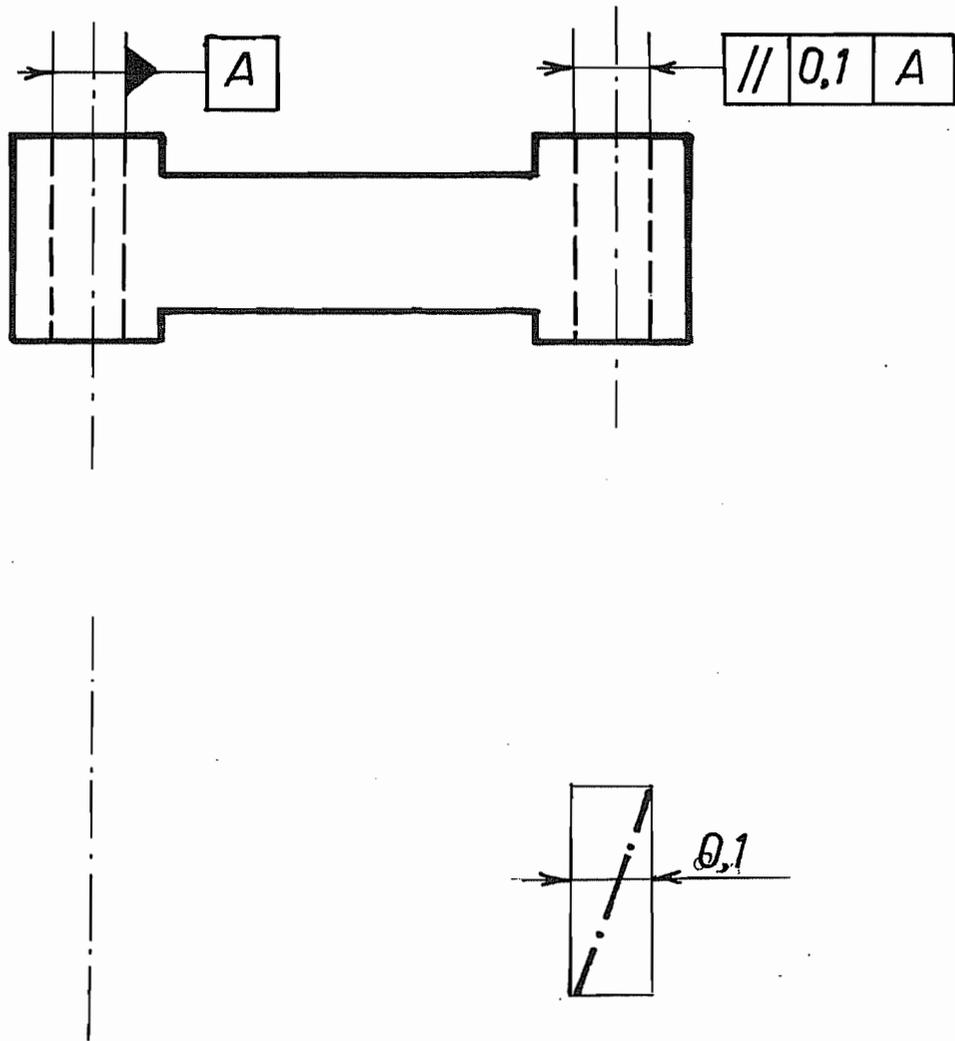


FIG. 14

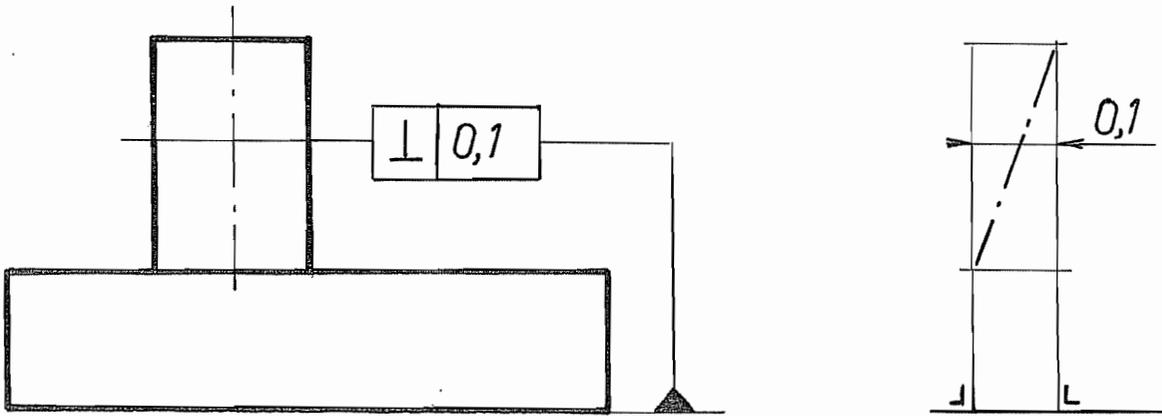


FIG. 15

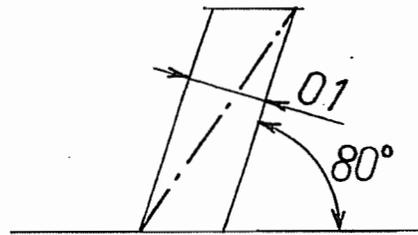
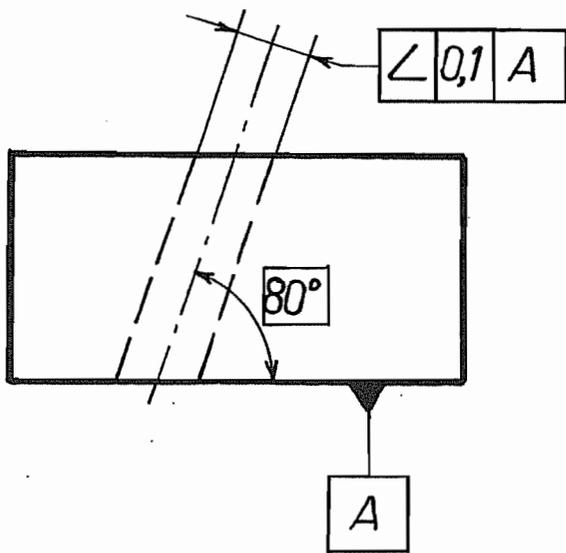


FIG. 16

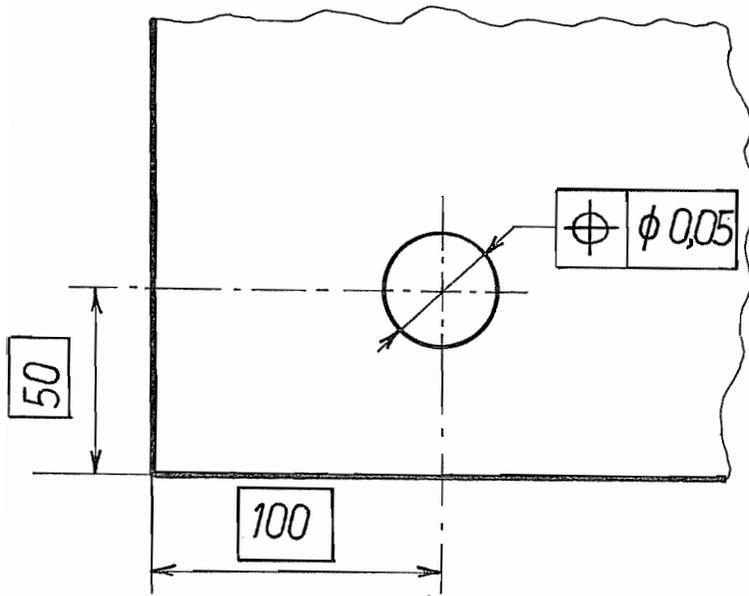


FIG. 17

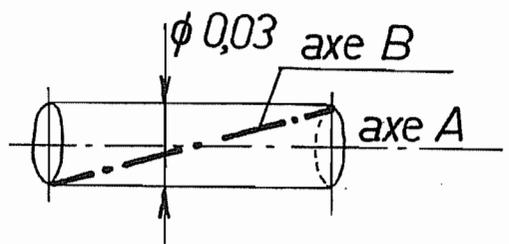
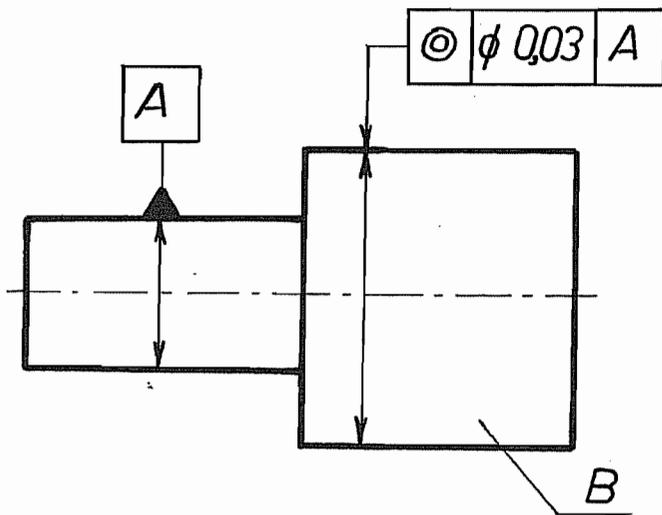


FIG. 18

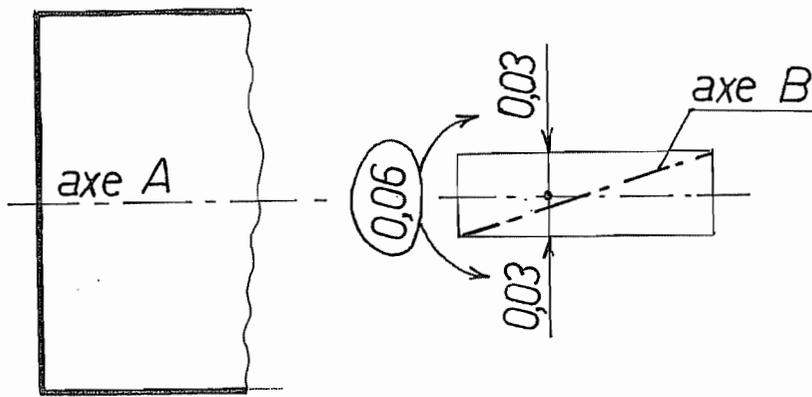
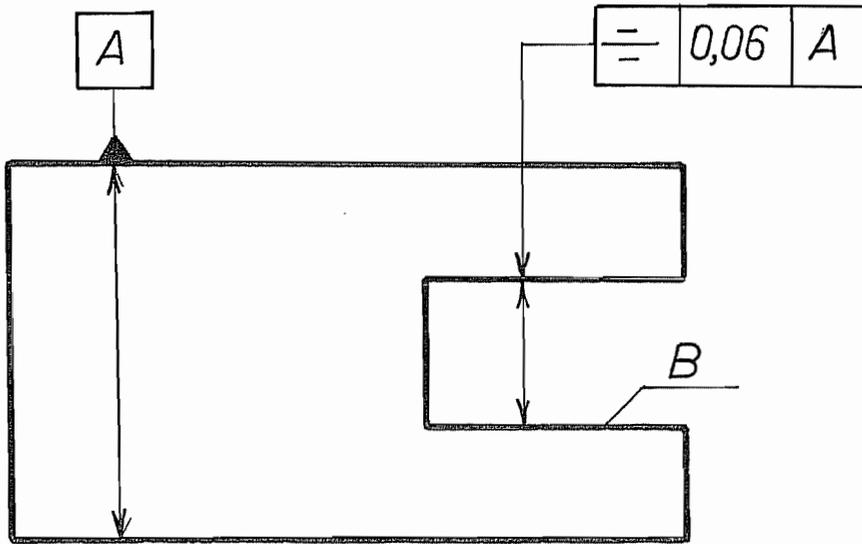


FIG. 19

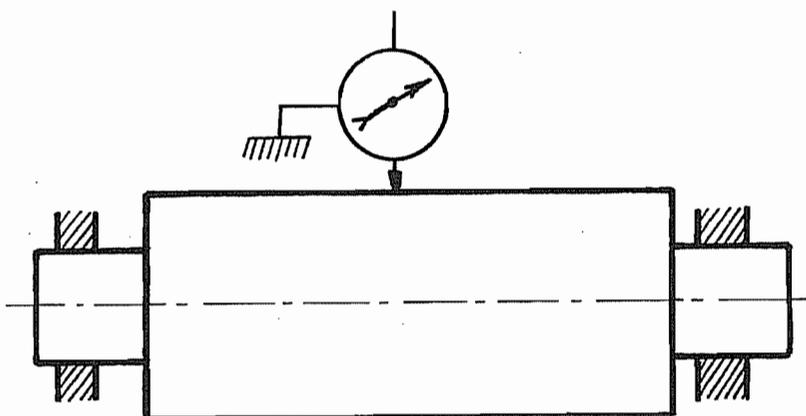
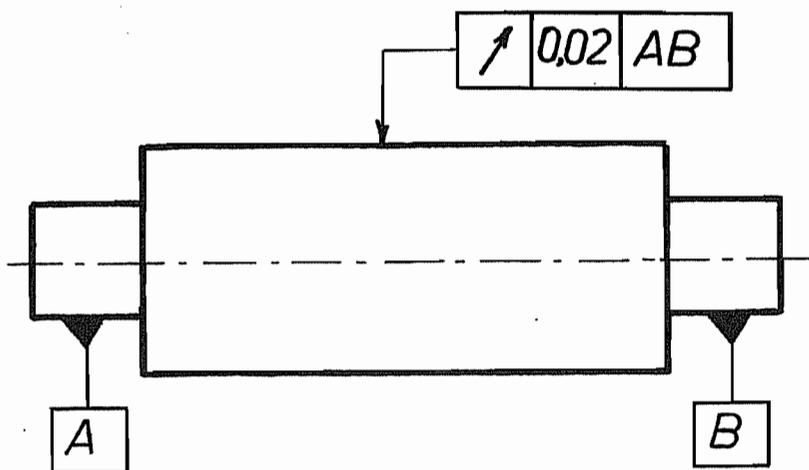


FIG. 20

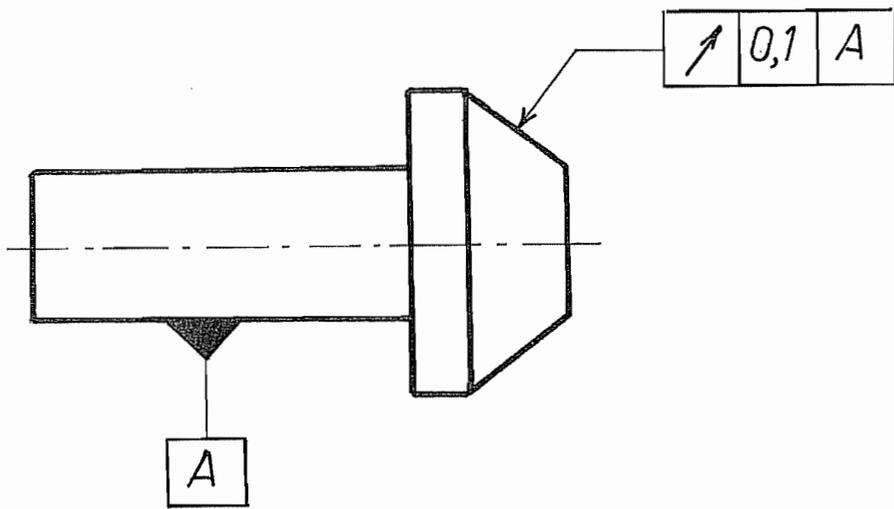


FIG. 21

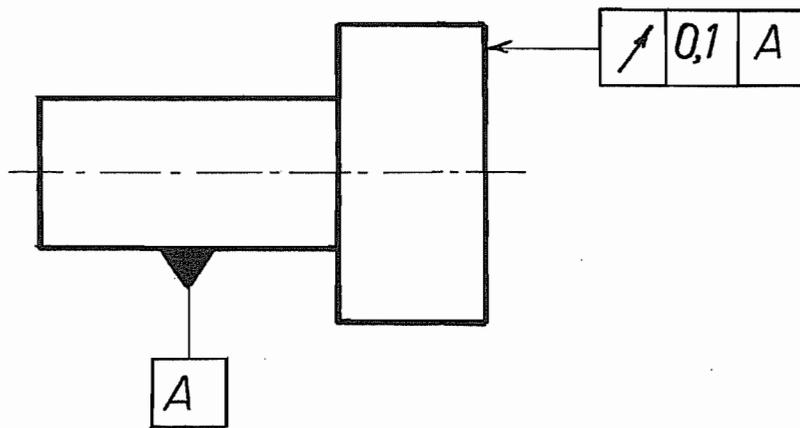


FIG. 22

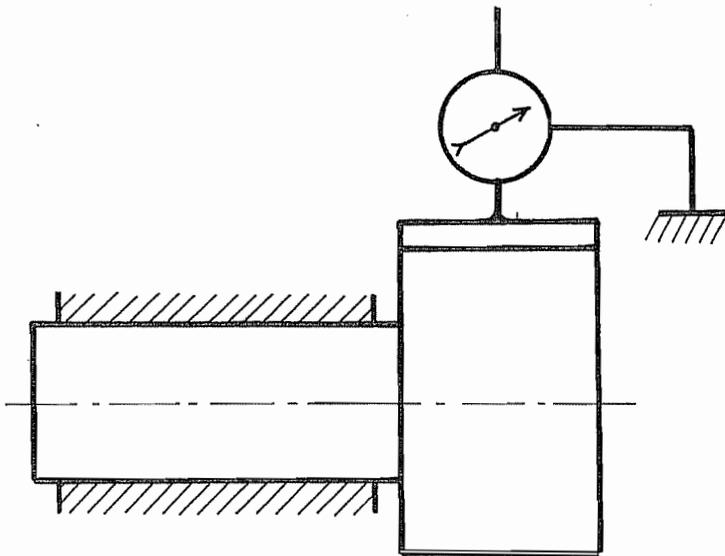
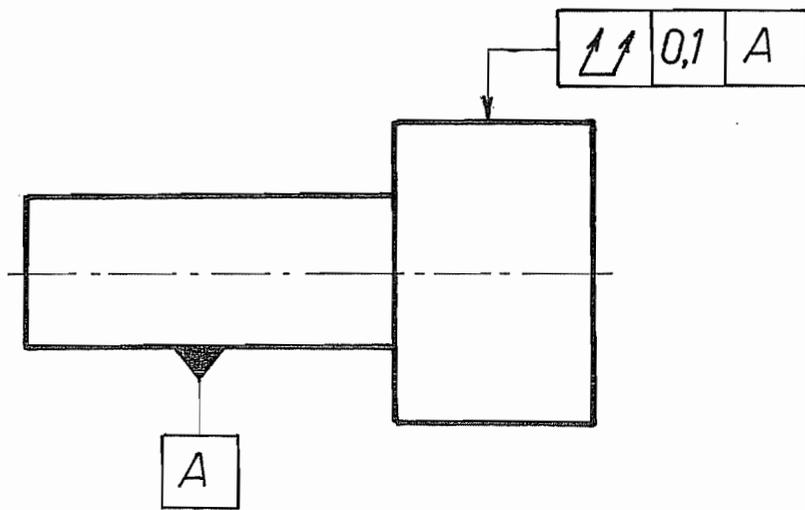


FIG. 23

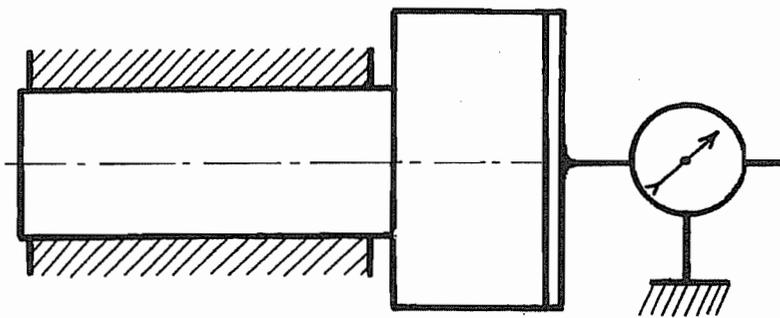
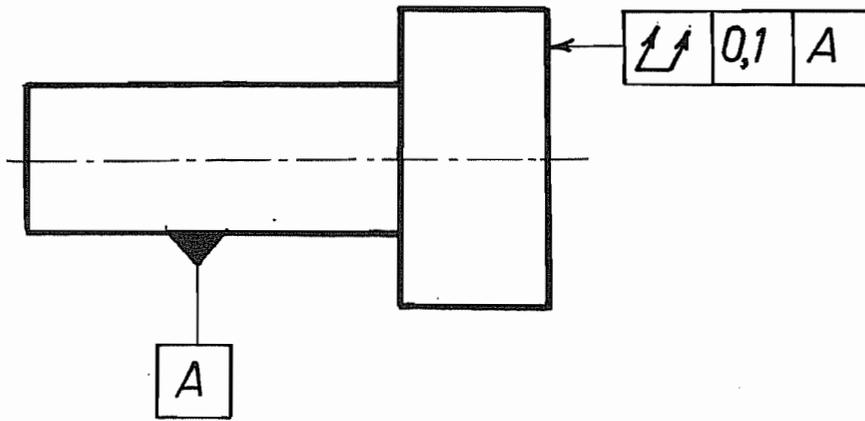


FIG. 24

$$ES(y) - EI(y) < ES(x) - EI(x) = IT(x) = 0,05$$

On choisira par exemple $IT(y) = 0,025$, en posant $y = 75_0^{+0,025}$

Alors,

$$EI(U) = ES(y) - ES(x) = + 0,025 - 0,05 = - 0,025$$

$$ES(U) = EI(y) - EI(x) = 0 - 0 = 0$$

ce qui donne $U = 19_{-0,025}^0$

(ii) Ramener la cote x à une cote d'outil en accouplant les deux fraises sur le même arbre, leur distance étant convenablement réglée par des entretoises (fig. 22)

(iii) Ramener la cote x à une cote d'appareillage, en prenant F_2 comme référence auxiliaire de réglage sur laquelle vient une butée lors de l'usinage de F_1 . (fig. 23).

Il va sans dire que le choix définitif de la solution doit se faire en fonction des impératifs économiques.

5. Réalisation des tolérances d'orientation

5.1 - Réalisation directe

La figure 24 illustre le fraisage associé de deux faces F_1 et F_2 à l'aide d'une fraise à deux tailles. Dans ce cas, la perpendicularité des deux faces est réalisée directement par l'outil: c'est une cote d'outil

$$U_0 = 0,05$$

5.2 - Transfert d'une tolérance de parallélisme

L'angle entre les faces F_1 et F_2 de la figure 25 résulte des angles α_1 et α_2 réalisés avec la référence. En fait, on procède en deux étapes:

- La première étape (fig. 26) consiste en la réalisation de la face F_1 . Il en résulte un angle α_1 avec la référence.

- La deuxième étape est la réalisation de la face F_2 qui fera un angle α_2 avec la référence.

Comme le montre la figure 28, l'angle α_{12} entre les deux faces est donné par

8. PROCÉDÉS SPÉCIAUX D'USINAGE

Procédés spéciaux d'usinage

Voici un tableau des performances de divers procédés. Nous étudierons la puissance spécifique brute P/Q , la puissance courante, le débit, la précision.

Procédé	P/Q (GPa)	Puissance courante (kW)	Débit correspondant (cm ³ /s)	Précision	
				la meilleure (μm)	à P _{max} (μm)
Tournage	2,5	25	10	2,5	125
Rectification	25	20	0,8	2,5	75
Plasma	50	150	3	250	2500
Electro-érosion	100	12,5	0,125	12,5	125
Electrochimique	400	150	0,375	12,5	125
Ultrasons	500	12,5	0,025	5	25
Electro Beam	25 000	7,5	0,0003	5	25
Laser	150 000	15	0,0001	12,5	125
Chimique	-	---	0,5	12,5	50

On constatera que sur le plan énergétique, la coupe est le procédé le plus économique. Les usinages spéciaux ne se justifient donc que dans la mesure où ils permettent des choses nouvelles.

Fig. 289

USINAGE AUX ULTRASONS

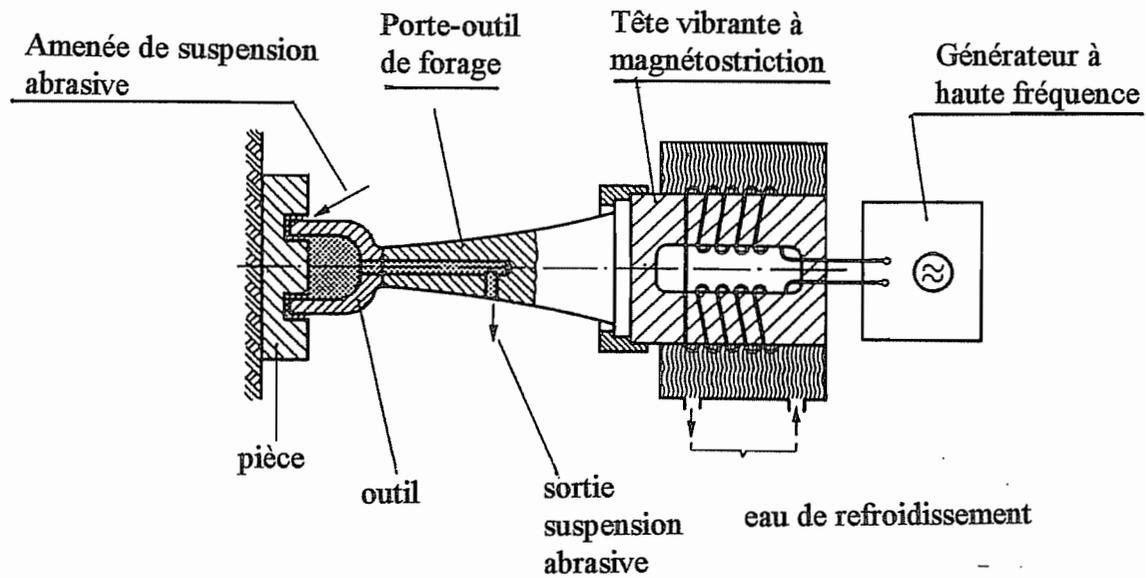


Fig. 290

PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

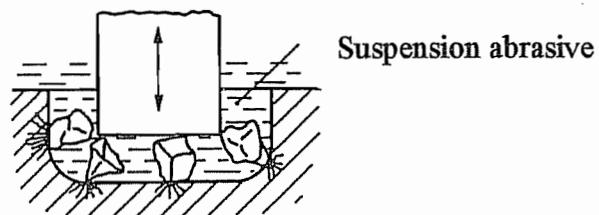


Fig. 291

Usinage aux ultrasons

1. L'usinage aux ultrasons consiste à *marteler* la pièce par des grains d'abrasif, sous l'action d'un outil en vibrations. L'impact d'un grain provoque le détachement *fragile* d'une écaille. Il va donc sans dire que ce procédé ne convient que pour le travail des matériaux *fragiles*. L'outil, quant à lui, doit être *ductile* (cuivre, par exemple).

Pratiquement, on amène les abrasifs sous forme d'une suspension dans un liquide. Les mouvements de l'outil doivent être très rapides si l'on veut une productivité suffisante. On l'excite donc à une fréquence très élevée, de l'ordre de 25 000 Hz. Il s'agit donc d'une fréquence ultrasonique, d'où le nom du procédé. Pour y arriver, on utilise une tête vibrante à magnétostriction, et le mouvement est amplifié par une *sonotrode*, dont le principe est le suivant : son premier mode de vibration libre-libre présente un maximum plus important à l'extrémité que du côté de l'excitation.

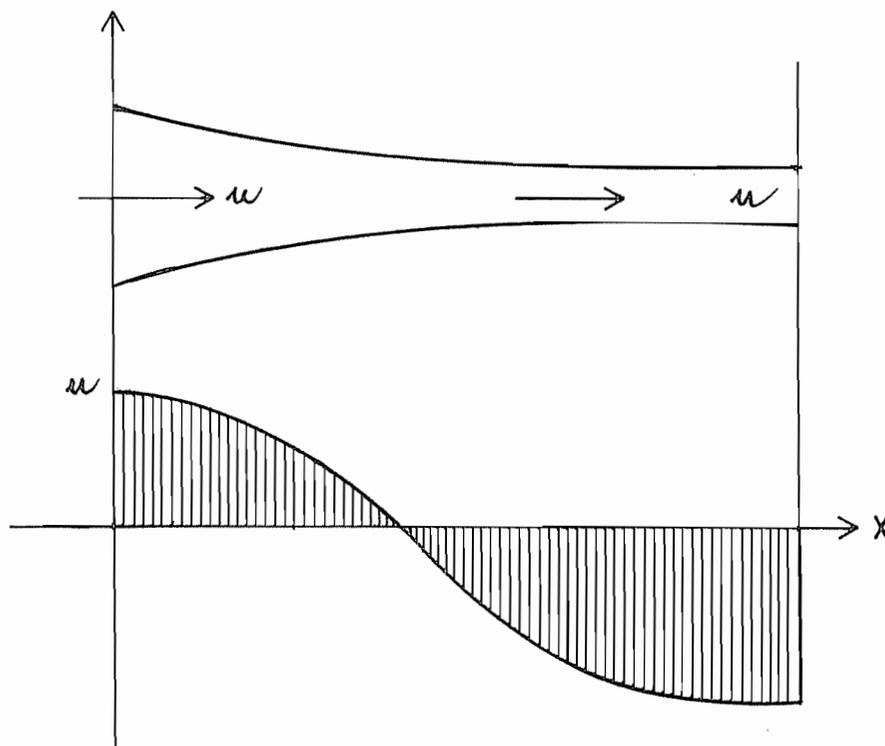


Fig. 292

2. Asservissement. Le système est asservi de manière à donner un effort moyen sur la pièce constant. La figure ci-contre représente un tel asservissement.

L'effort est mesuré. Après amplification, la mesure de cet effort, si elle est hors norme, provoque une alarme. On compare alors l'effort mesuré à la consigne, ce qui permet de déterminer une mesure à prendre quant à l'avance. Celle-ci, donnée par vis, est encore contrôlée.

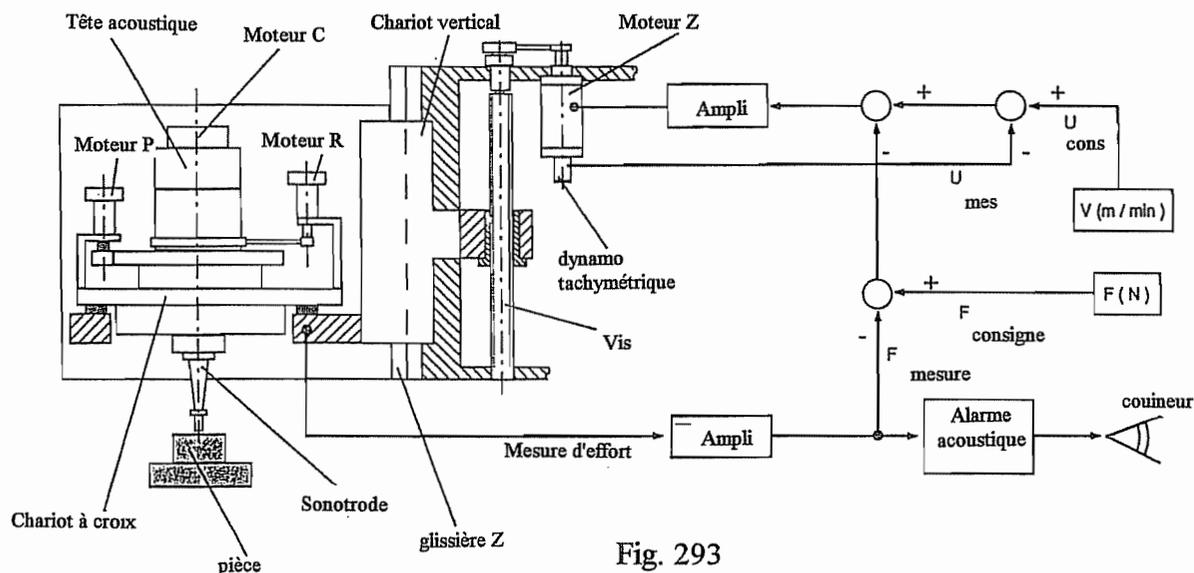


Fig. 293

PRINCIPE DE REGULATION DE L'AVANCE D'UNE INSTALLATION A ULTRASONS

3. Modélisation élémentaire

3.1. Coefficient de concentration des grains

La concentration maximale en grains s'obtient pour la géométrie suivante, où le carré de côté a contient $1 + \frac{4}{4} = 2$ grains, avec

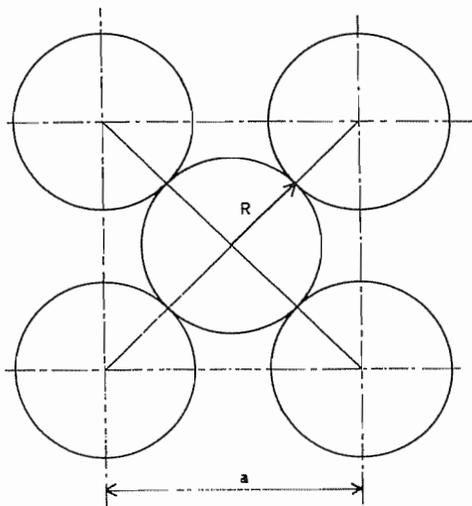


Fig. 294

$$a\sqrt{2} = 4R, \quad a = \frac{4R}{\sqrt{2}}$$

La surface de cette maille est

$$S = a^2 = \frac{16}{2} R^2 = 8R^2$$

R 289

On a donc, pour un nombre $n = 2$ de grains,

$$S = 4 n R^2.$$

On mesure la concentration par le nombre

$$\beta = \frac{4 n R^2}{S}$$

appelé *coefficient de concentration*.

3.2. Analyse dimensionnelle

Interviennent dans le problème :

1. La vitesse d'avance	v	L/T
2. L'amplitude du mvt	y_o	L
3. La pulsation	w	$1/T$
4. La contrainte statique sur l'outil	σ_s	F/L^2
5. La dureté de la pièce	HB	F/L^2
6. Le rayon moyen des grains	R	L
7. Le coefficient de conc.	η	1

soit 7 grandeurs, pour 3 unités. Il nous faut donc former 4 nombres sans dimension. Nous choisirons

- π_1 contenant v : $\frac{v}{w y_o}$
- π_2 contenant σ_s : $\frac{\sigma_s}{H}$
- $\pi_3 = \eta$
- Il reste π_4 contenant R : y_o/R .

Nous pouvons donc affirmer qu'il existe une relation

$$\frac{v}{w y_o} = f\left(\frac{y_o}{R}, \frac{\sigma_s}{HB}, \eta\right).$$

L'expérience montre que, pour des contraintes moyennes pas trop grandes, la vitesse d'avance est proportionnelle à σ_s . Nous écrivons donc

$$\frac{v}{w y_o} = \frac{\sigma_s}{HB} f'\left(\frac{y_o}{R}, \eta\right)$$

L'expérience montre que $v \neq \sigma_s$

$$\Rightarrow \frac{v}{y_o w} = \frac{\sigma_s}{HB} f' \left(\frac{y_o}{R}, \eta \right)$$

Analyse simplifiée

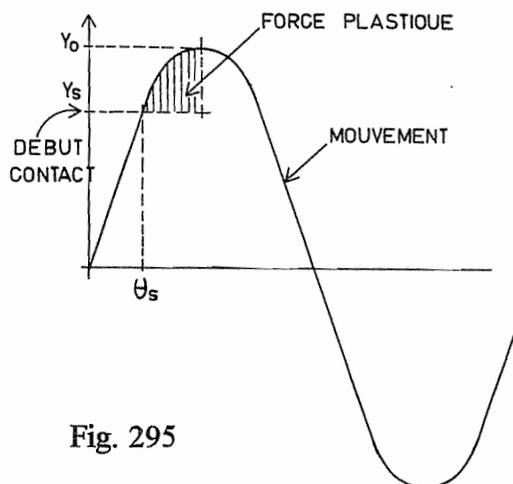


Fig. 295

Sur 1 grain,

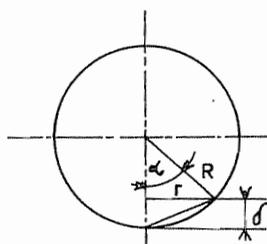
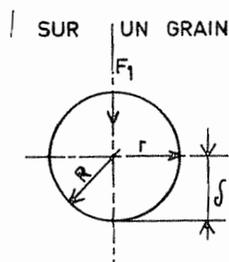


Fig. 296

On admet que $F_1 = HB \cdot \text{surface} = HB \cdot \pi r^2 = 2\pi \cdot HB \cdot R \cdot \delta = k\delta$

$$k = 2\pi \cdot HB \cdot R$$

$$F_1 = k(y - y_s) = k y_o (\sin \theta - \sin \theta_s)$$

$$\bar{F}_1 = \frac{1}{2\pi} \int_{\theta_s}^{\pi/2} k y_o (\sin \theta - \sin \theta_s) d\theta = \frac{1}{2\pi} k y_o \left[-\cos \theta - \theta \sin \theta_s \right]_{\theta_s}^{\pi/2} = \frac{1}{2\pi} k y_o \left[\cos \theta_s - \frac{\pi}{2} \sin \theta_s + \theta_s \sin \theta_s \right]$$

avec

$$y_o \sin \theta_s = y_s \quad y \cos \theta_s = \sqrt{1 - \frac{y_s^2}{y_o^2}}$$

$$\bar{F}_1 = \frac{k y_o}{2\pi} \left[\sqrt{1 - \frac{y_s^2}{y_o^2}} - \frac{\pi}{2} \frac{y_s}{y_o} + \frac{y_s}{y_o} \arcsin \frac{y_s}{y_o} \right] \quad y_s = y_o - \delta_o$$

$$= \frac{k y_o}{2\pi} \left[\sqrt{1 - \left(1 - \frac{\delta_o}{y_o}\right)^2} - \frac{\pi}{2} \left(1 - \frac{\delta_o}{y_o}\right) + \left(1 - \frac{\delta_o}{y_o}\right) \arcsin \left(1 - \frac{\delta_o}{y_o}\right) \right] = \frac{k y_o}{2\pi} F \left(\frac{\delta_o}{y_o} \right)$$

δ_o/y_o	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
$f\left(\frac{\delta_o}{y_o}\right)$	0	0,02997	0,08520	0,1574	0,2436	0,3424	0,4528	0,5741	0,7059	0,8479	1
$\log \delta_o/y_o$		-1	-0,6990	-0,5229	-0,3979	-0,3010	-0,2218	-0,1549	-0,09691	-0,04376	0
$\log F$		-1,523	-1,070	-0,8030	-0,6133	-0,4655	-0,3441	-0,2410	-0,1513	-0,07166	0
$\left(\frac{\delta_o}{y_o}\right)^{1,5}$	0	0,03162	0,08944	0,1643	0,2530	0,3536	0,4648	0,5857	0,7155	0,8538	1
$\left(\frac{\delta_o}{y_o}\right)^{1,530}$		0,02951	0,08523	0,1585	0,2461	0,3463	0,4577	0,5794	0,7108	0,8511	1

$$F \approx 1,013 \left(\frac{\delta_o}{y_o}\right)^{1,521} \approx \left(\frac{\delta_o}{y_o}\right)^{1,5} \approx \left(\frac{\delta_o}{y_o}\right)^{1,530}$$

Fig. 297

ajusté

Donc

$$\bar{F}_1 \approx \frac{ky_o}{2\pi} \cdot \left(\frac{\delta_o}{y_o}\right)^{1,5} = R.HB. \frac{\delta_o^{1,5}}{y_o^{0,5}}$$

Pour N grains, on a donc

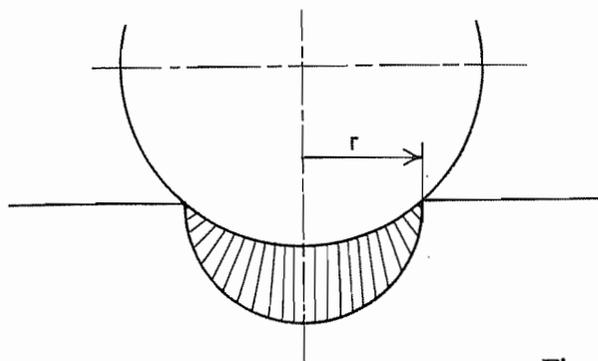
$$\bar{F} = N\bar{F}_1 = NR.HB. \frac{\delta_o^{0,5}}{y_o^{0,5}}$$

La contrainte moyenne est alors

$$\sigma_s = \frac{\bar{F}}{S} = \frac{N}{S} R.HB. \frac{\delta_o^{1,5}}{y_o^{0,5}}$$

$$\text{Or, } \eta = \frac{4NR^2}{S} \Rightarrow \frac{NR}{S} = \frac{\eta}{4R} \Rightarrow \sigma_s = \frac{\eta}{4R} HB \frac{\delta_o^{1,5}}{y_o^{0,5}} \quad (1)$$

* Le volume enlevé par grain sera évalué comme la demi-sphère de rayon r, soit



$$V_1 = \frac{2}{3} \pi r^3 = \frac{2}{3} \pi \cdot (2R\delta_o)^{3/2}$$

Pour les N grains, il vient

$$V = NV_1 = \frac{2}{3} \pi N (2R\delta_o)^{3/2}$$

et, comme

Fig. 298

$$N = \frac{\eta S}{4R^2},$$

on obtient

$$V = \frac{2}{3} \pi \frac{\eta S}{4R^2} (2R\delta_o)^{3/2}$$

Ce volume est enlevé au cours d'un cycle, de temps $\frac{2\pi}{\omega}$. Donc

$$\dot{V} = \frac{\omega}{2\pi} \cdot \frac{2}{3} \pi \frac{\eta S}{4R^2} (2R\delta_o)^{3/2} = \frac{\omega \eta S}{12R^2} (2R\delta_o)^{3/2}$$

La vitesse d'avancement est alors

$$v = \frac{\dot{V}}{S} = \frac{\omega \eta}{12R^2} (2R\delta_o)^{3/2} \quad (2)$$

On peut écrire (1) sous la forme

$$\frac{\sigma_s}{HB} = \frac{\eta}{4} \cdot \left(\frac{\delta_o}{R}\right)^{1,5} \cdot \left(\frac{R}{y_o}\right)^{0,5} \quad (1')$$

et (2) équivaut à

$$\frac{v}{\omega y_o} = \frac{\eta}{12} \cdot 2^{3/2} \frac{\delta_o^{1,5}}{R^{0,5} y_o} = \frac{\eta}{12} \cdot 2^{3/2} \left(\frac{\delta_o}{R}\right)^{1,5} \cdot \left(\frac{R}{y_o}\right) \quad (2')$$

Divisant ces deux relations, on obtient

$$\frac{v}{\frac{\omega y_o}{HB}} = \frac{1}{3} \cdot 2^{3/2} \cdot \left(\frac{R}{y_o}\right)^{1/2},$$

soit

$$\frac{v}{\omega y_o} = 0,9428 \cdot \frac{\sigma_s}{HB} \cdot \left(\frac{R}{y_o}\right)^{1/2}$$

ou encore

$$v = 0,9428 \omega_o \cdot \frac{\sigma_s}{HB} \cdot \sqrt{R y_o}$$

En fait, l'efficacité est bien moindre, car les grains sont de grandeur variable, et les petits grains pénètrent élastiquement. Il est bon de poser

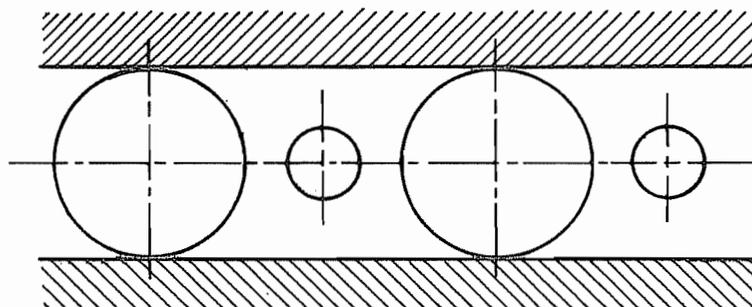


Fig. 299

$$v \approx 0,1 \omega_o \frac{\sigma_s}{HB} \sqrt{Ry_o}$$

On remarquera que η n'intervient pas dans cette relation simplifiée.

4. Applications

- travail du verre
- découpage des semi-conducteurs
- finition de matrices de matériaux très durs
- finition des poinçons de frappe
- rodage de filières en WC
- découpage de plaques de saphir ou de Ge
- fabrications d'électrodes de graphite de haute qualité pour électroérosion.

MAIS lent !

Sonotrode

Elle est excitée à la fréquence propre de son premier mode d'extension libre-libre. On utilise par exemple une sonotrode exponentielle, dont la section est

$$S(x) = S_0 e^{-2\beta x} \quad (d(x) = d_0 e^{-\beta x}).$$

On a donc

$$V = \frac{1}{2} \int_0^l ES \left(\frac{du}{dx} \right)^2 dx = \frac{1}{2} ES_0 \int_0^l e^{-2\beta x} \left(\frac{du}{dx} \right)^2 dx$$

$$T = \frac{1}{2} \varpi^2 \int_0^l \rho S \mu^2 dx = \frac{1}{2} \varpi^2 \rho S_0 \int_0^l e^{-2\beta x} \mu^2 dx$$

Les modes propres d'extension ont pour équation

$$-ES_0 \frac{d}{dx} \left(e^{-2\beta x} \frac{du}{dx} \right) + \varpi^2 \rho S_0 e^{-2\beta x} \mu = 0$$

soit

$$\frac{d}{dx} \left(e^{-2\beta x} \frac{du}{dx} \right) + \frac{\varpi^2 \rho}{E} e^{-2\beta x} \mu = 0$$

ou encore, en notant

$$\lambda^2 = \frac{\varpi^2 \rho}{E},$$

$$e^{-2\beta x} \frac{d^2 u}{dx^2} - 2\beta e^{-2\beta x} \frac{du}{dx} + \lambda^2 e^{-2\beta x} u = 0.$$

Simplifiant par $e^{-2\beta x}$, on obtient l'équation linéaire à coefficients constants

$$\frac{d^2 u}{dx^2} - 2\beta \frac{du}{dx} + \lambda^2 u = 0,$$

cherchant une solution de la forme

$$\mu = A e^{zx},$$

on obtient l'équation caractéristique

$$z^2 - 2\beta z + \lambda^2 = 0.$$

dont les solutions sont

$$z = \beta \pm i \sqrt{\lambda^2 - \beta^2}$$

La solution générale est donc

$$\mu = A e^{\beta x} \cos(\gamma x + \varphi), \quad \gamma = \sqrt{\lambda^2 - \beta^2}$$

Les modes cherchés correspondent à $\mu'(0) = \mu'(l) = 0$, soit

$$\begin{aligned} A e^{\beta x} (\beta \cos \varphi - \gamma \sin \varphi) &= 0 \\ A e^{\beta x} [\beta \cos (\gamma l + \varphi) - \gamma \sin (\gamma l + \varphi)] &= 0 \end{aligned}$$

Il faudra donc que

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\beta}{\gamma}$$

$$\operatorname{tg} (\gamma l + \varphi) = \frac{\beta}{\gamma}$$

La première valeur non nulle de γl qui vérifie la seconde condition est

$$\gamma l = \pi,$$

ce qui donne

$$\gamma = \frac{\pi}{l}$$

et

$$\frac{\omega^2 \rho}{E} = \lambda^2 = \gamma^2 + \beta^2 = \frac{\pi^2}{l^2} + \beta^2 = \frac{\pi^2}{l^2} \left(1 + \frac{\beta^2 l^2}{\pi^2} \right)$$

Donc

$$\omega = \frac{\pi}{l} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \cdot \sqrt{1 + \frac{\beta^2 l^2}{\pi^2}}$$

ω_0 , pulsation pour $\beta = 0$

Le coefficient d'amplification est

$$\left| \frac{\mu(l)}{\mu(o)} \right| = \left| \frac{A e^{\beta l} \cos(\gamma l + \varphi)}{A \cos \varphi} \right| = e^{\beta l} = \frac{d(o)}{d(l)}$$

Exemple
(MAFELL)

$$d(o) = 54 \text{ mm}$$

$$d(l) = 18 \text{ mm}$$

$$l = 125 \text{ mm}$$

$$e^{\beta l} = \frac{54}{18} = 3$$

$$\beta l = 1,099$$

$$\beta = \frac{1,099}{0,125} = 8,792 \text{ m}^{-1}$$

$$\text{Acier} \rightarrow \omega_o = \frac{\pi}{0,125} \sqrt{\frac{2,1 \cdot 10^{11}}{7800}} = 130400 \text{ s}^{-1}$$

$$= 130700 \sqrt{1 + \left(\frac{1,099}{\pi}\right)^2} = 138200 \text{ s}^{-1}$$

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = 21990 \text{ Hz}$$

$$\text{tg } \varphi = \frac{\beta}{\gamma} = \frac{\beta l}{\pi} = 0,3498 \quad \varphi = 19,28^\circ \rightarrow \text{noeud env.} \quad \gamma x = \frac{\pi}{180} (90 - 19,28) = 1,234$$

$$x = \frac{1,234 \cdot l}{\pi} = 49,11 \text{ mm}$$

Soit le mode avec $u = q$ à gauche, $u = -kQ$ à droite. Pour ce mode,

$$V = \frac{1}{2}kq^2, \quad T = \frac{1}{2}mw^2q^2$$

et on a, pour une excitation (f_1 à gauche, f_2 à droite),

$$\begin{array}{cc} f_1 & f_2 \\ \rightarrow & \rightarrow \end{array}$$

$$(k - \omega^2 m)q = f_1 K f_2$$

Le système se comporte donc comme un levier.

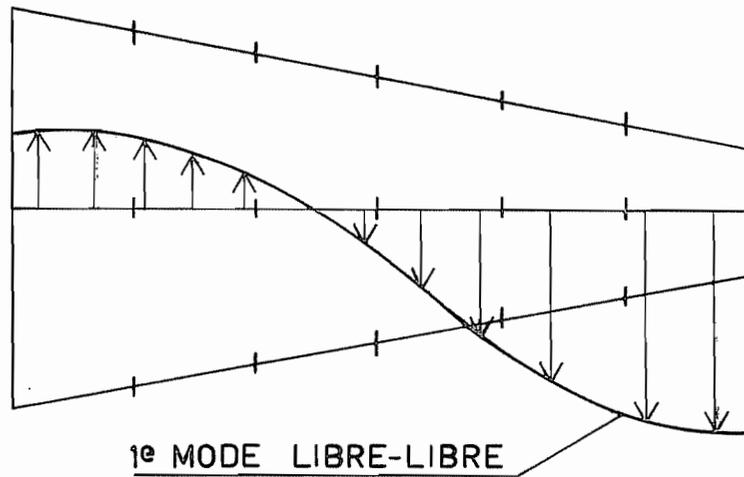
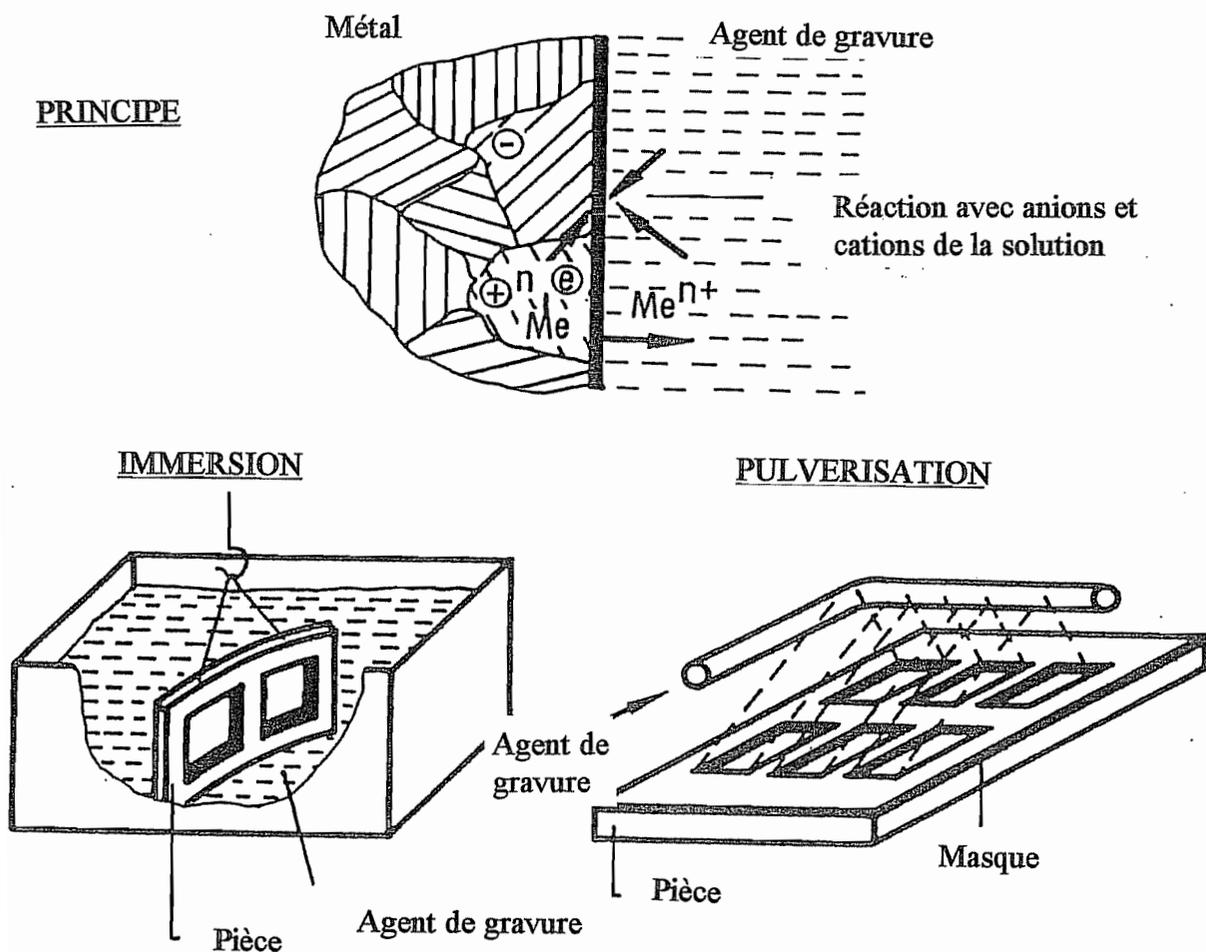


Fig. 300

GRAVURE CHIMIQUE



MILIEU DE TRAVAIL : Solutions aqueuses de HCl, HNO₃, H₂SO₄, NaOH, ...

VITESSE D'EROSION : 0,01 à 0,08 mm/min.

ETAT DE SURFACE : R_r = 1 à 15 μm.

GENERATION DE LA FORME : à l'aide d'un masque. Périodiquement, remuer la pièce ou la sortir de la solution.

Fig. 301

USINAGE ELECTROCHIMIQUE

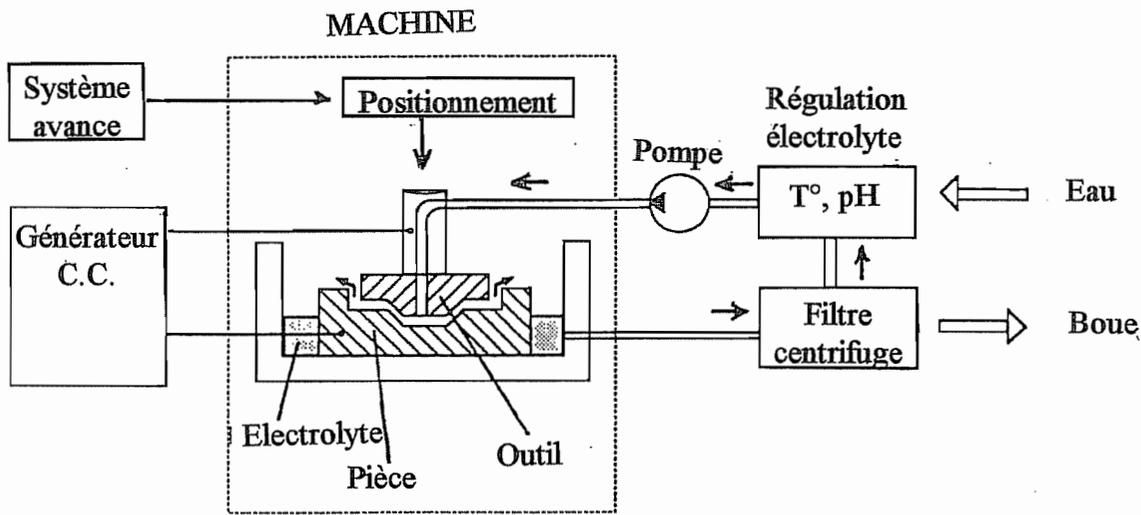
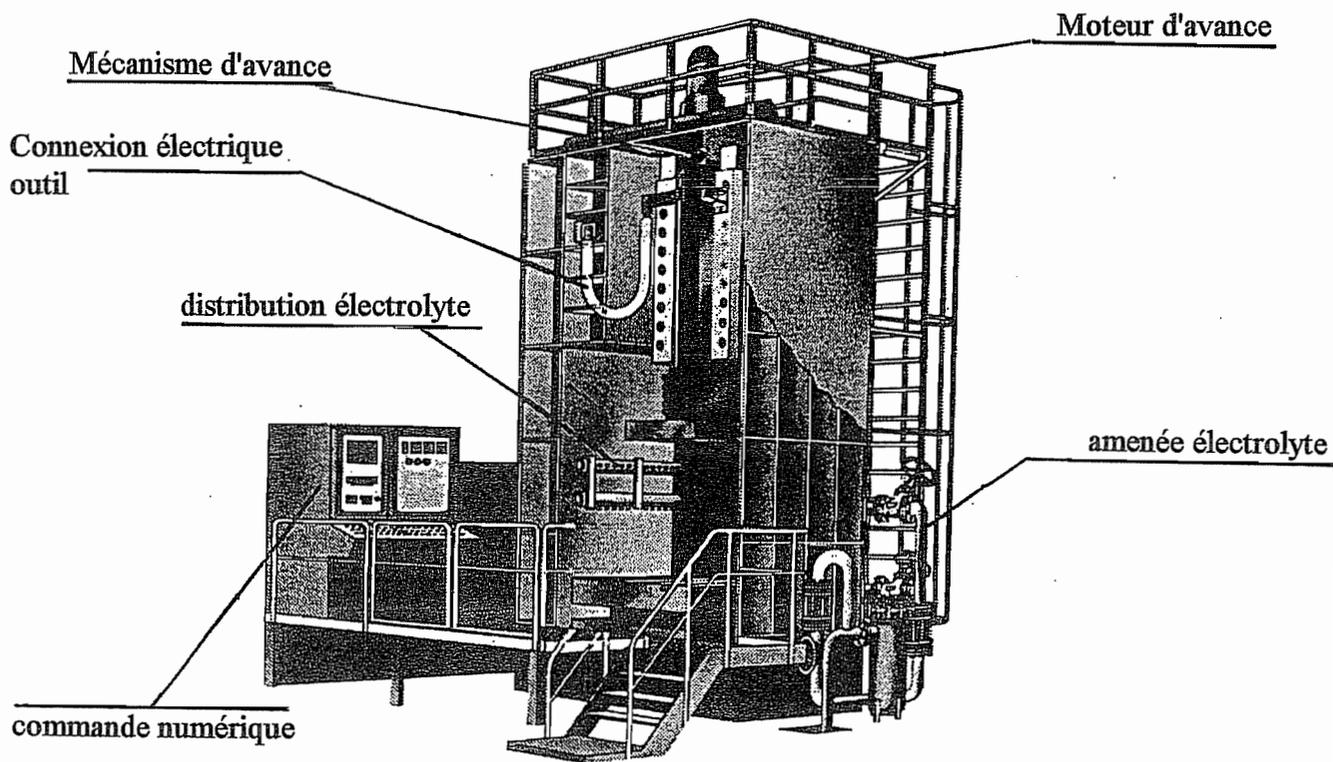


Fig. 302

Usinage électrochimique

1. Développé vers 1958-1960 aux Etats-Unis, ce procédé a pour utilisateurs principaux les industries de l'aéronautique et de l'automobile.

2. Imaginons une pièce en fer et un outi neutre en cuivre, avec une solution saline (NaCl, NaNO₃). On aura les réactions suivantes :

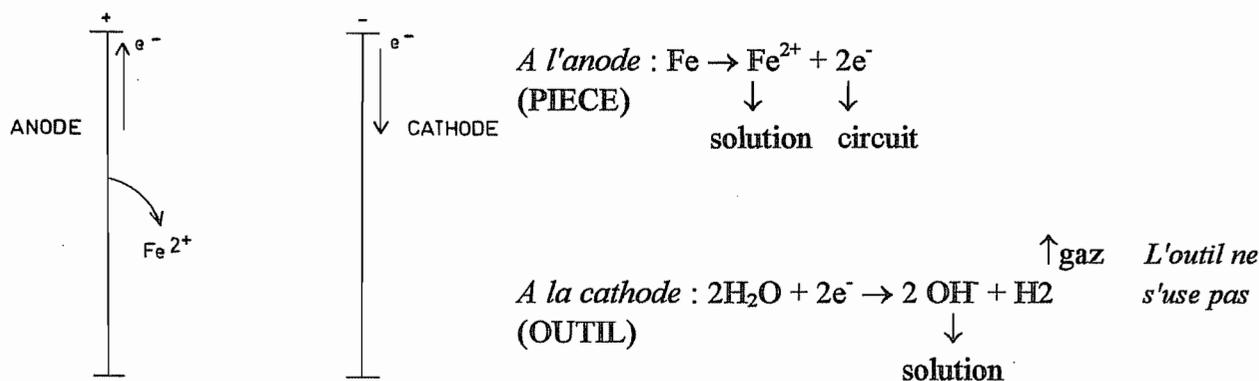
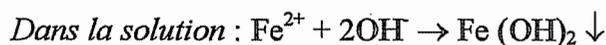


Fig. 303



3. Loi de Faraday : il faut un Faraday, soit

$$\mathcal{F} = 96 \cdot 500 \cdot 000 \text{ Cb}$$

pour former l'équivalent kg d'ions, soit $\frac{M}{z}$ kg d'ions, où M est la masse atomique et z, la valence. Donc, la masse enlevée après un temps t, est

$$m = \frac{M}{z} \cdot \frac{It}{F}$$

En pratique, la réaction est accompagnée de réactions secondaires, et on ne peut compter que sur une portion η du courant pour la réaction principales :

$$m = \eta \frac{M}{z} \frac{It}{F}$$

Le débit volumique est donc

$$\dot{V} = \frac{m}{\rho t} = \eta \frac{M}{\rho z F} I$$

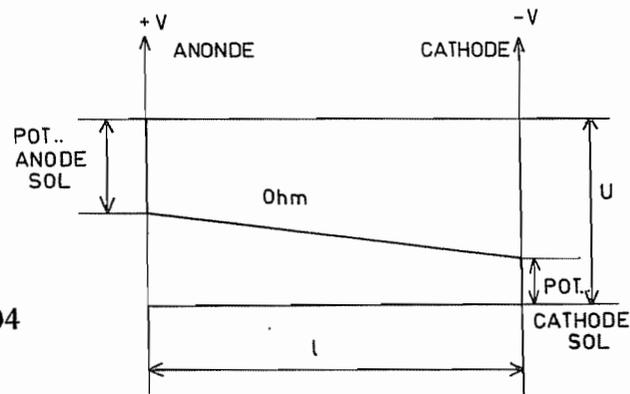
4. Comportement électrique

On a $U = \Delta U_{\text{an}} + \Delta U_{\text{cath}} + RI$
 ΔU : saut de potentiel

5. Energie spécifique brute

$$\frac{P}{\dot{V}} = \frac{UI}{\dot{V}} = \frac{U\rho zF}{M}$$

Fig. 304



Elle dépend essentiellement de U , donc de ΔU . Plus celui-ci est grand, plus il faut de l'énergie.

6. *Isolation de l'outil* : nécessaire pour forer un trou cylindrique.

7. Dispositions pratiques

Le diélectrique doit évacuer la production de chaleur donnée par

$$P_{\text{chal}} = RI^2 = (U - \Delta U) I$$

Cette chaleur est emmagasinée par l'électrolyte :

$$P_{\text{chal}} = G c_p \Delta T \quad G = \text{débit massique.}$$

En limitant ΔT à une faible valeur (15°C par ex.) pour éviter l'ébullition, on obtient

$$G = \frac{(U - \Delta U) I}{C_p \Delta T}$$

Ce débit est en général important et, vu la petitesse du gap, il en résultera une forte perte de charge et, donc, une forte pression d'alimentation. On travaille avec

$$p = 5 \dots 50 \text{ bar,}$$

ce qui suppose des machines importantes pour reprendre l'effort normal qui en résulte.

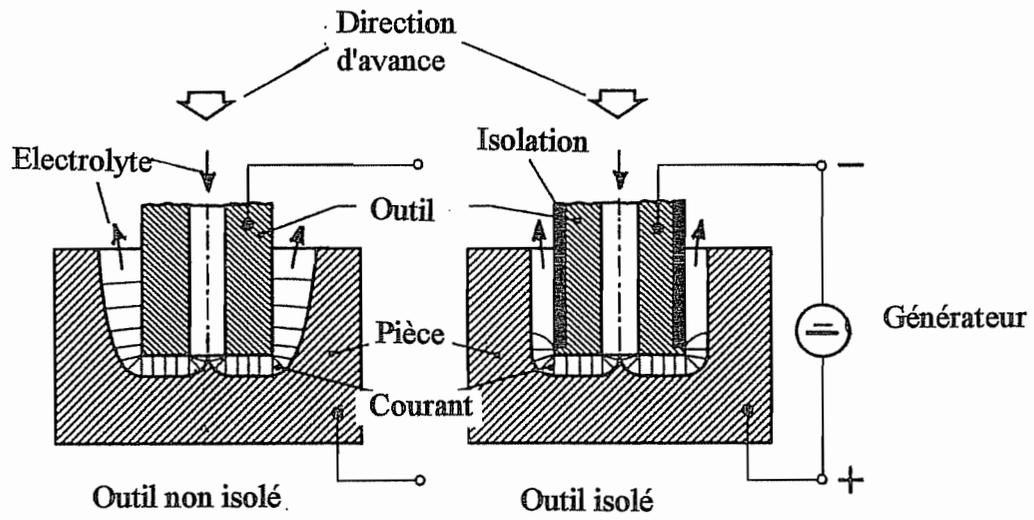


Fig. 305

ELECTRO-EROSION

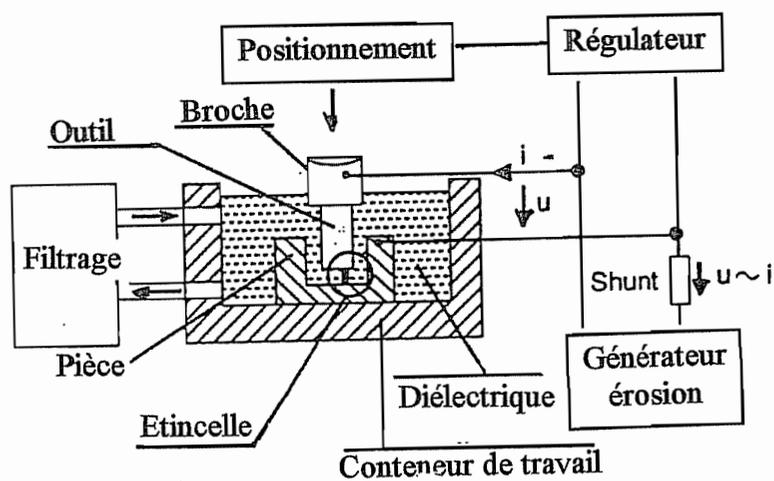
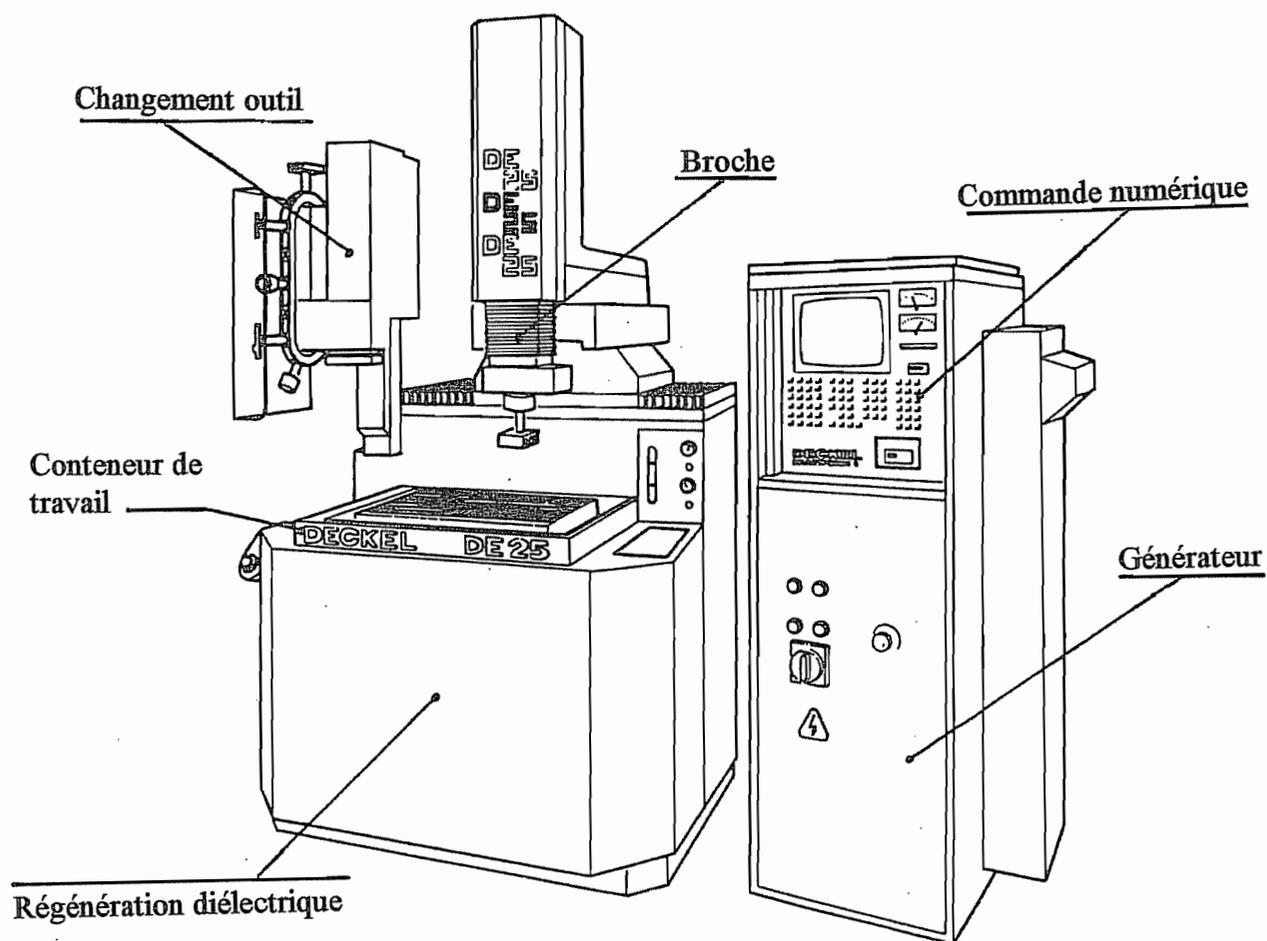


Fig. 306

Electro-érosion

1. L'électro-érosion est, au départ, le fruit des recherches des époux LAZARENKO (URSS, 1944). Le point de départ est le fait qu'en faisant naître une étincelle entre deux électrodes, on provoque leur érosion. Ce phénomène est bien connu dans le cas des interrupteurs. C'est ce phénomène qui rend nécessaire le remplacement périodique des vis platinées d'une voiture.

Si les deux électrodes sont de même métal, l'étincelle attaque plus la borne \oplus que la borne $-$, du moins pour les étincelles rapides (bombardement électronique). A la différence de l'usinage électrochimique, *l'outil s'use*.

2. Mise en oeuvre. La pièce et l'outil reproduisant en négatif la forme à obtenir sont placés dans un bain d'électrolyte. Un générateur d'impulsions produit un courant pulsé à une fréquence donnée ($f = 20 \dots 300$ kHz). Sous l'effet de champ, il naît en un point une *étincelle*, qui a lieu de préférence entre les points les plus rapprochés. Cette étincelle produit un petit cratère. Le processus continuant, on finit par arracher, petit cratère par petit cratère, une épaisseur appréciable de la pièce. Il faut donc que l'outil avance. La *régulation de l'avance* est le problème le plus *délicat* à résoudre.

2bis. Applicabilité : Il suffit que le matériau soit conducteur, indépendamment de sa dureté. *L'inconvénient* essentiel est la *faible productivité*. Mais on peut couper du nitrure de bore cubique !

3. Fonctionnement de l'étincelle

Entre deux points rapprochés des électrodes, le champ est plus important. Il y a accrochement d'électrons à la cathode. Ceux-ci, heurtant les molécules, provoquent une ionisation intense avec formation de photons. Il naît un canal de plasma conducteur. Le choc des particules \oplus et \ominus sur les électrodes provoque leur échauffement. Elles sont liquéfiées et vaporisées localement. Il y a formation d'une bulle de gaz à très haute pression (10^3 bar). Lorsque le courant est coupé, la pression tombe dans la bulle, ce qui provoque la vaporisation explosive du métal fondu qui est éjecté dans le liquide pour former des particules sphériques.

Au point de vue électrique, la tension est constante entre le moment de la mise sous tension et l'apparition de l'étincelle. A ce moment, la tension diminue.

PARAMETRES DE L'ELECTRO-EROSION

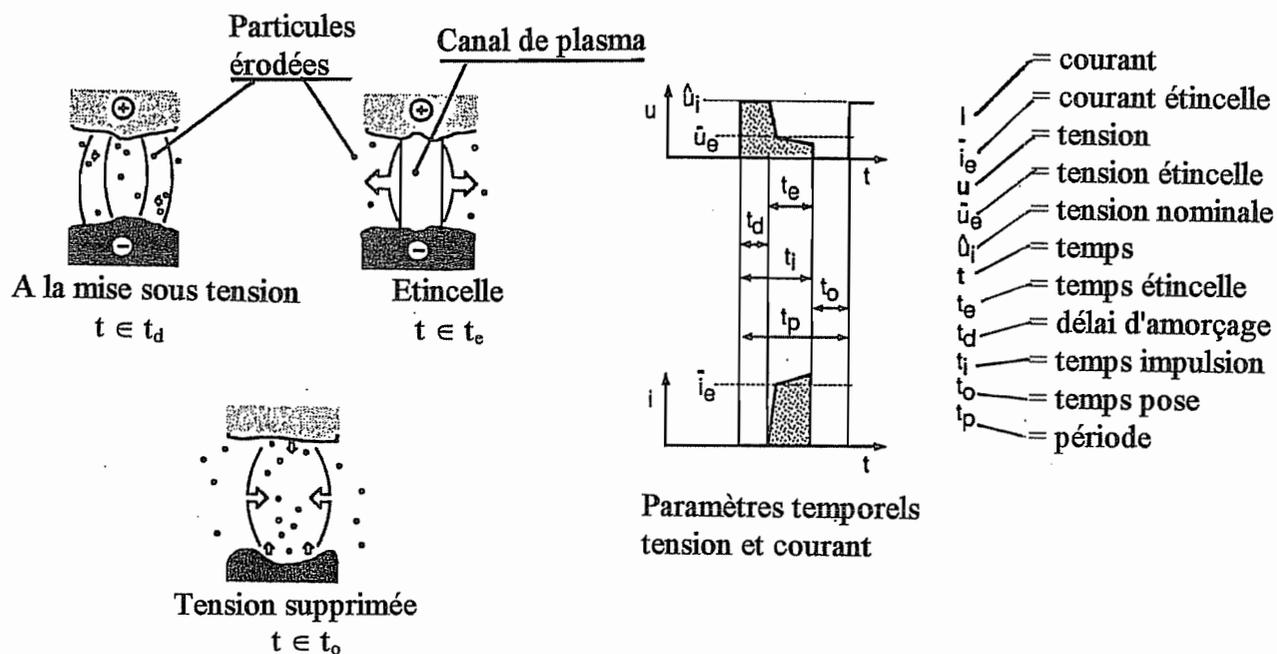


Fig. 307

Asservissement du "gap"

$$u = \frac{1}{T} \int u(t) dt \approx u_i \frac{t_i}{t_p}$$

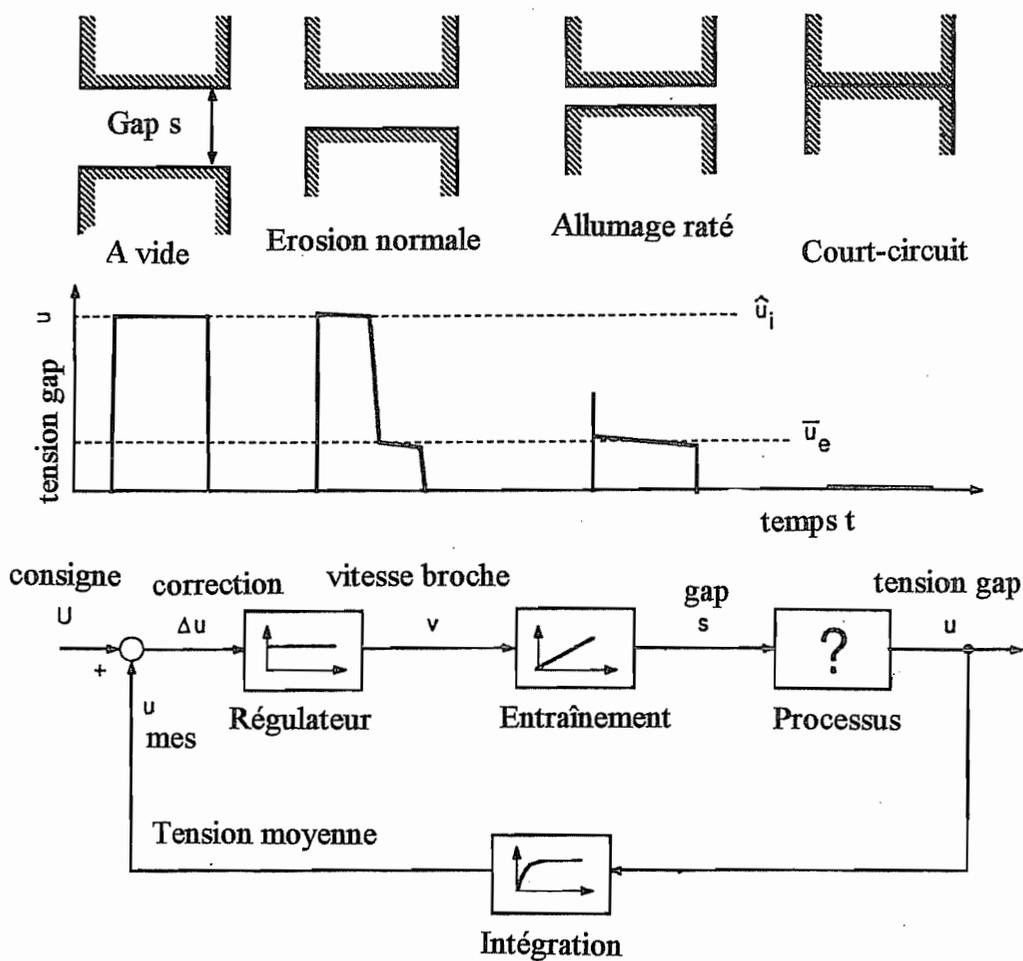


Fig. 308

4. Asservissement du gap

Appelant μ_i la tension nominale et μ_e la tension d'étincelle, voyons comment varie la tension moyenne

$$u = \frac{1}{T} \int_{\text{période}} u(t) dt$$

A vide, il n'y a pas d'étincelle et

$$u = u_i \frac{t_i}{t_p} \quad (\text{gap trop grand})$$

Pour un gap nul,

$$u = 0$$

Pour un gap trop faible,

$$u \approx u_e \frac{t_i}{t_p}$$

Pour une érosion normale,

$$u \approx \frac{u_i t_d + u_e t_e}{t_p}$$

On constate donc que la tension moyenne permet de mesurer l'efficacité du processus. Ceci permet de concevoir un système d'asservissement où, à partir de la tension moyenne, on peut établir une correction du gap.

5. Electro-érosion planétaire

On peut donner à l'outil un mouvement planétaire, ce qui permet par exemple de faire une saignée ou de faire la finition d'un trou en travaillant sur la *surface latérale*. On notera que le contour obtenu est alors arrondi.

ELECTRO-EROSION PLANETAIRE

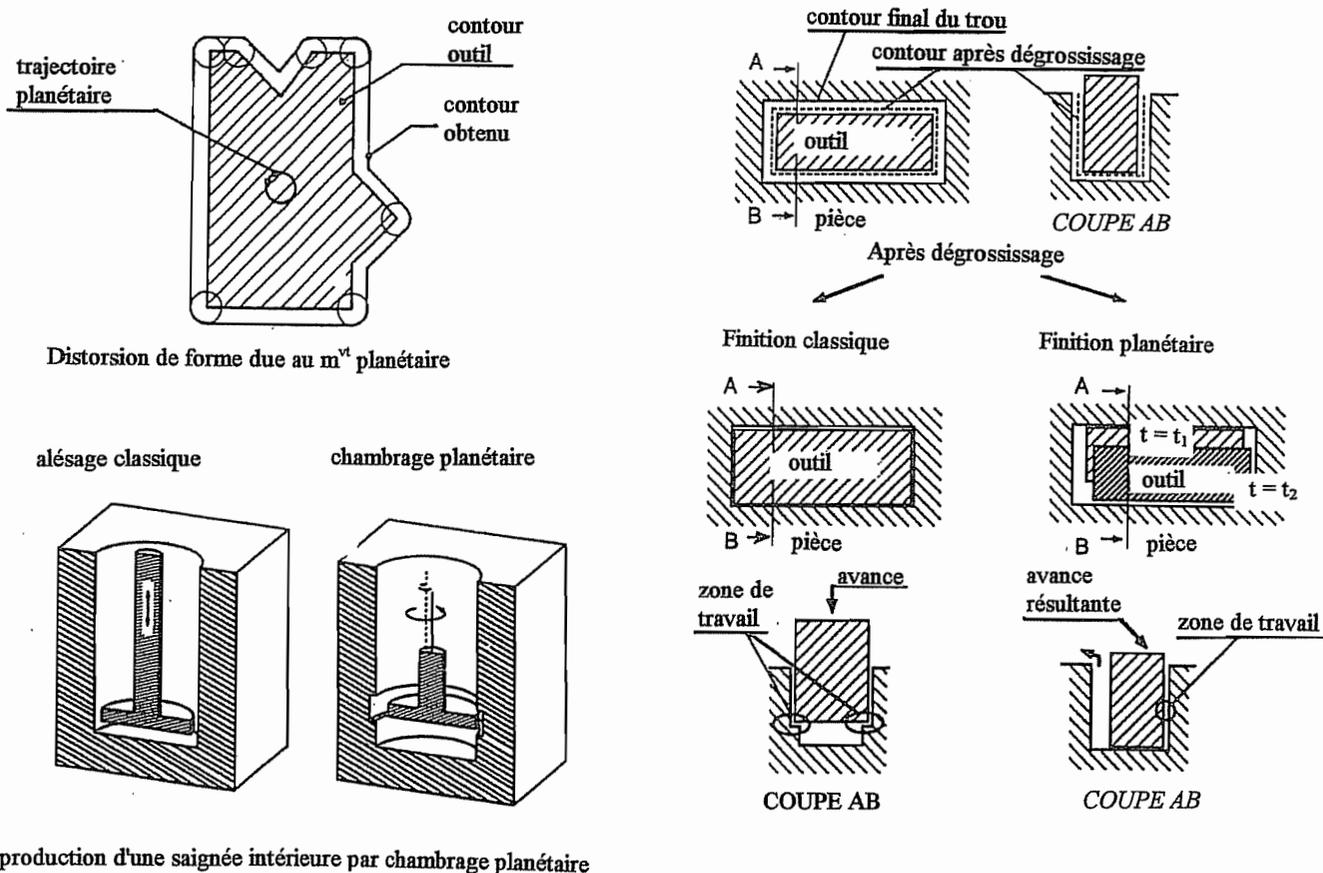
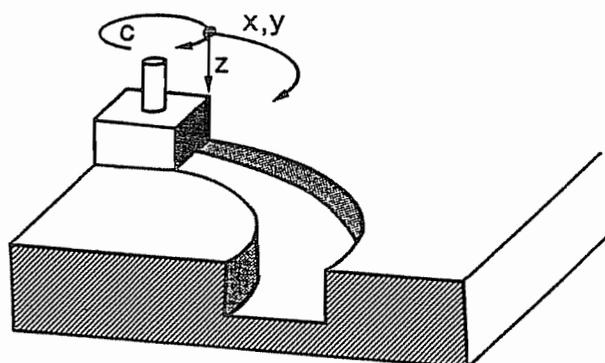


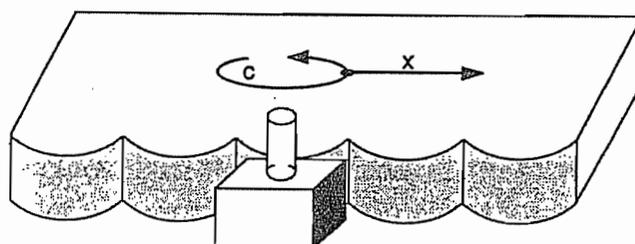
Fig. 309

6. En combinant un mouvement de contournage avec une rotation de l'outil (4 axes), on peut obtenir des formes complexes.



Electro-érosion: contournage combiné avec rotation c

Fig. 310



Erosion selon x combinée avec rotation C

Fig. 311



Exemple d'application du contournage
par électro-érosion

Fig. 312

7. Electro-érosion à fil

Un outil trop mince s'userait trop vite. On corrige ce défaut en faisant défiler un fil. Ci-contre une machine à 5 axes.

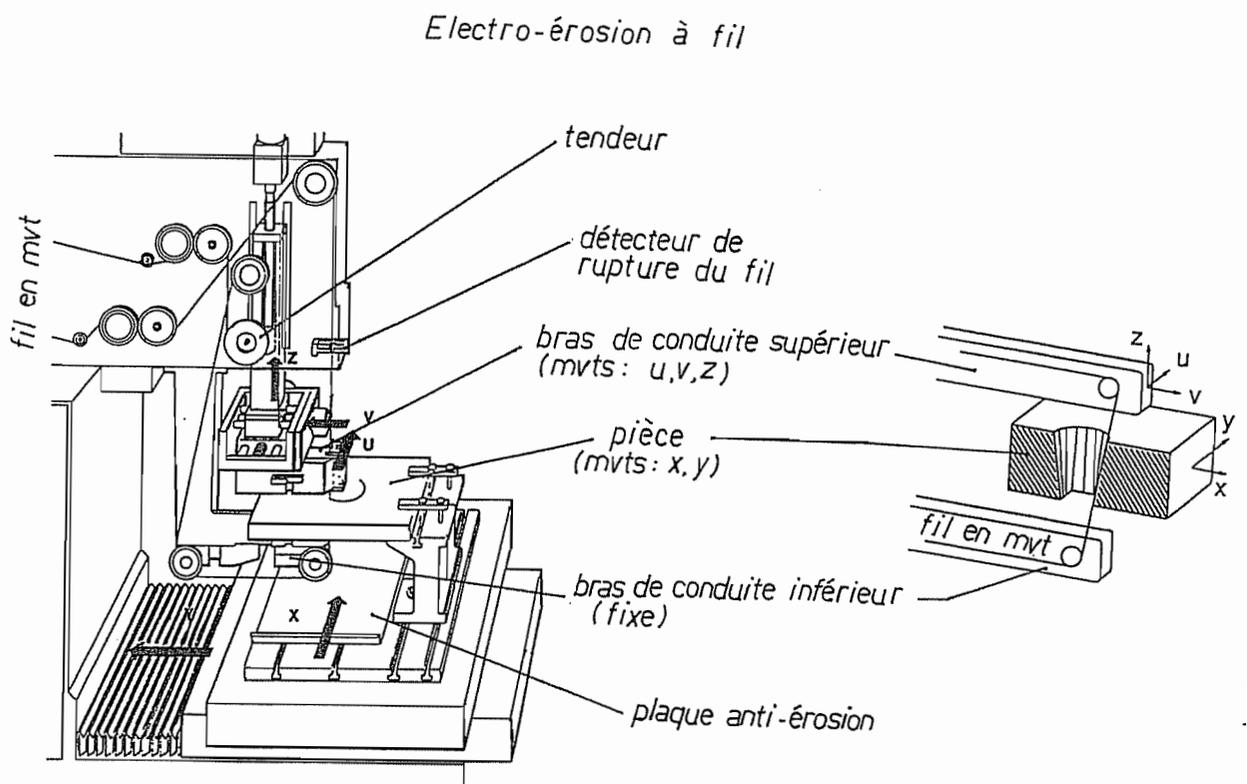
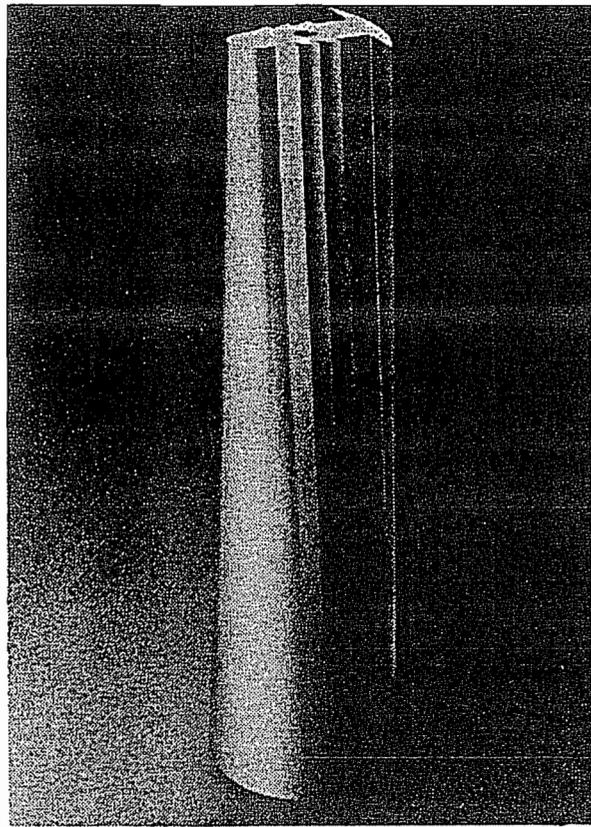


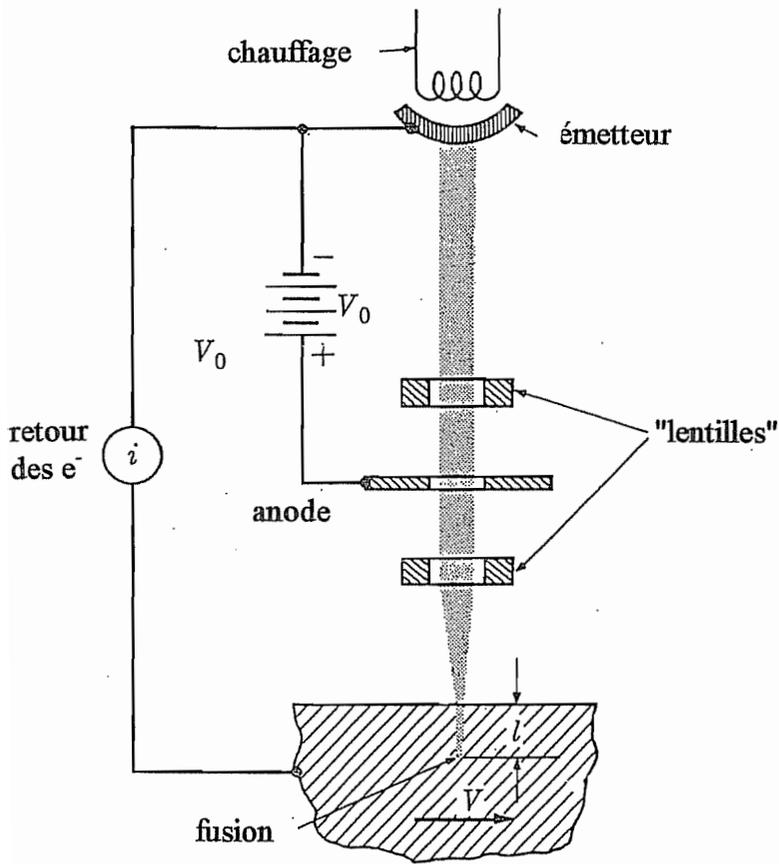
Fig. 313



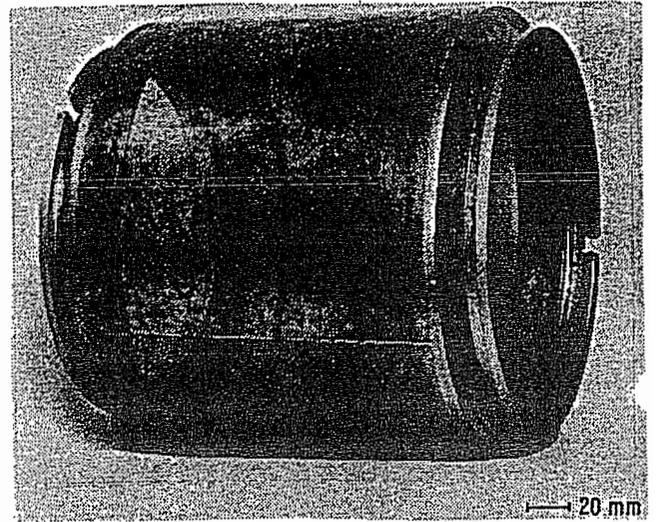
Noyau d'outil d'extrusion réalisé par électro-érosion à fil.
Hauteur : 250 mm.

L'outil complet a été réalisé en 19 h.

USINAGE PAR FAISCEAU D'ELECTRONS

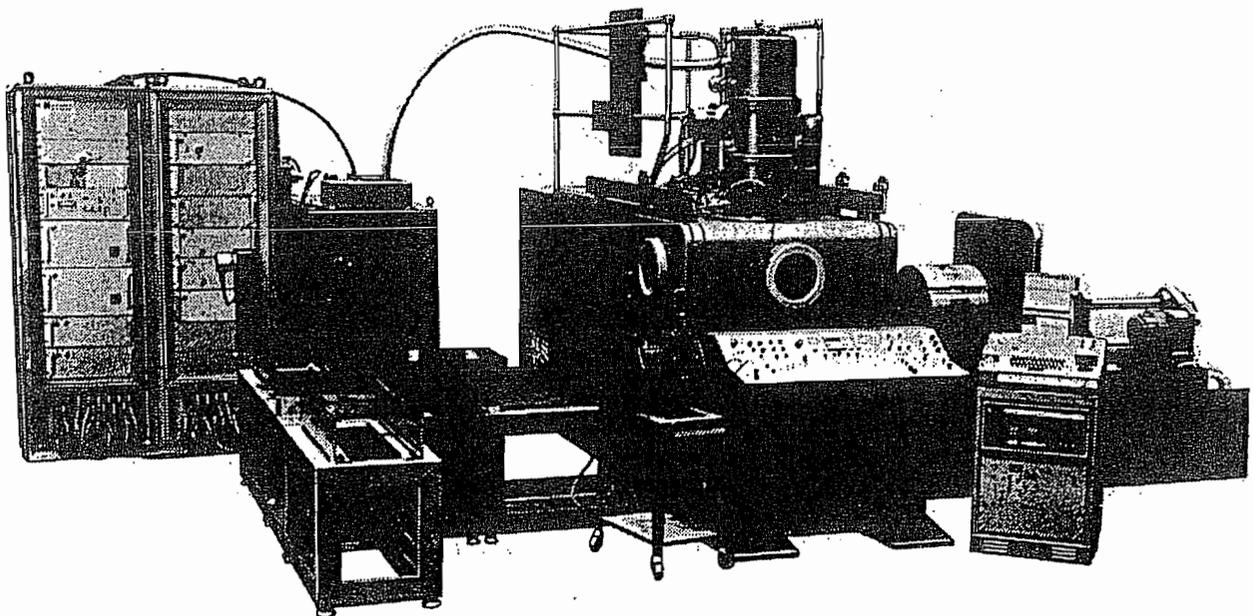


principe
Fig. 315



Filtre cylindrique perforé par faisceau d'électrons

Fig. 316



Installation de perforation par faisceau d'électrons

Fig. 317

Usinage par faisceau d'électrons (Electron-Beam Machining)

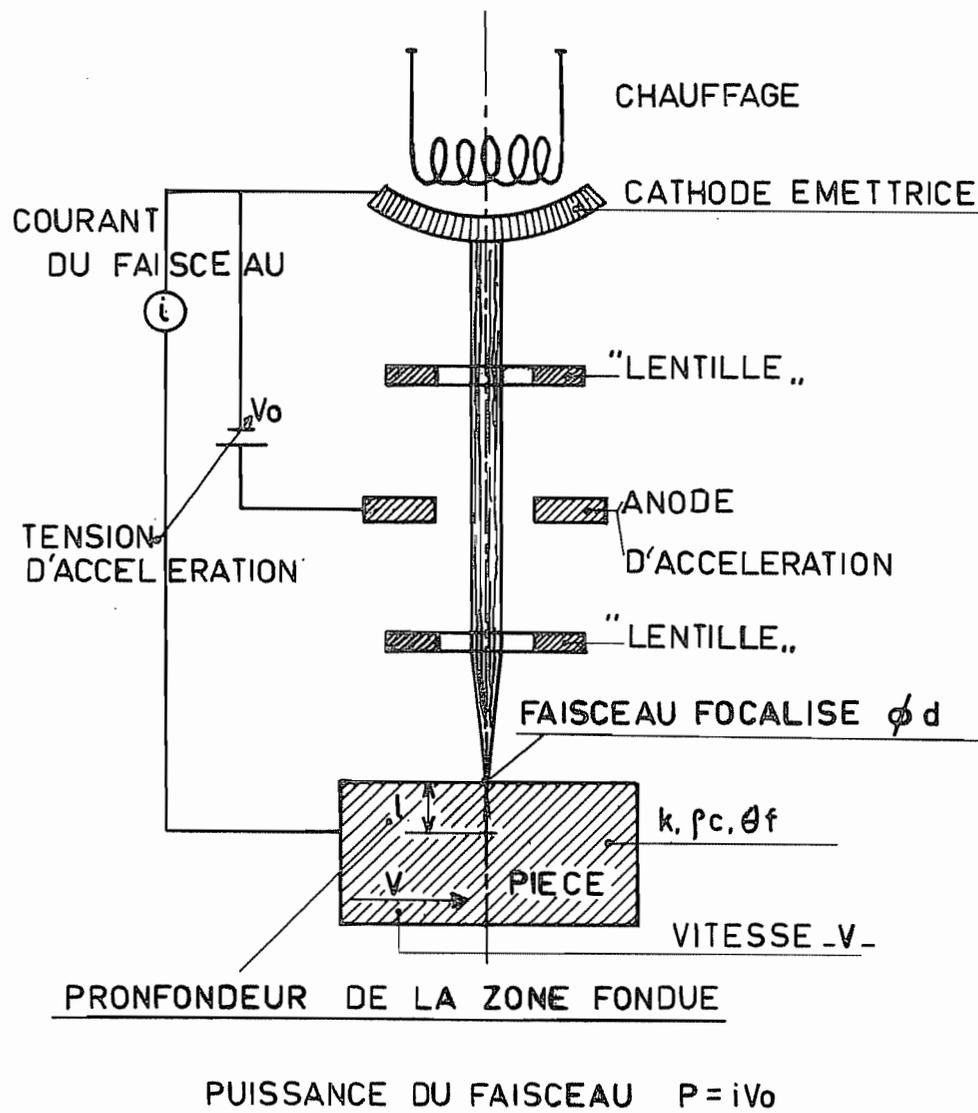


Fig. 318

Dans le vide !

Le faisceau apporte un échauffement local → fusion

Puissance du faisceau : $P = i V_0$

Grandeurs qui interviennent

1. Profondeur de pénétr.	l	L		
2. Puissance	P	W/T		
3. Vitesse d'avance	V	L/T		
4. Diamètre faisceau	d	L		
5. Conductivité	k	$\frac{W}{LT H}$	$\dot{Q} = k S \frac{d\theta}{dx}$	$\frac{W}{T} = [k] H L$
6. Chaleur volumique	ρc	W/L ³ H		
7. Température de fusion	θ_f	H		

7 grandeurs, 4 unités fond → 3 nb sans dim. Nous choisissons comme variables indépendantes l, d, θ_f .

$$\pi_1 = l P^{x_1} V^{x_2} k^{x_3} \rho c^{x_4}$$

$$[\pi_1] = L \frac{W^{x_1}}{T^{x_1}} \frac{L^{x_2}}{T^{x_2}} \cdot \frac{W^{x_3}}{L^{x_3} T^{x_3} H^{x_3}} \cdot \frac{W^{x_4}}{L^{3x_4} H^{x_4}}$$

$$W \rightarrow x_1 + x_3 + x_4 = 0 \quad x_4 = -x_3 \quad x_4 = 1$$

$$L \rightarrow 1 + x_2 - x_3 - 3x_4 = 0 \quad x_1 = 0$$

$$T \rightarrow -x_1 - x_2 - x_3 = 0 \quad x_2 = -x_3 \quad x_2 = 1$$

$$H \rightarrow x_3 + x_4 = 0 \quad 1 - x_3 - x_3 + 3x_3 = 0 \quad x_3 = -1$$

$$\pi_1 = \frac{V l \rho c}{k}$$

$$\pi_2 = d P^{x_1} V^{x_2} k^{x_3} (\rho c)^{x_4} : \text{même analyse } \pi_2 = \frac{V d \rho c}{k}$$

$$\pi_3 = \theta_f P^{x_1} V^{x_2} k^{x_3} (\rho c)^{x_4}$$

$$L \rightarrow x_2 - x_3 - 3x_4 = 0$$

$$T \rightarrow -x_1 - x_2 - x_3 = 0$$

$$W \rightarrow x_1 + x_3 + x_4 = 0$$

$$H \rightarrow 1 - x_3 - x_4 = 0 \quad x_1 = -1; x_4 = 1 - x_3$$

$$x_3 = 2 \quad x_2 = 1 - x_3 = -1 \quad x_4 = -1 \quad x_1 = -1$$

$$\pi_3 = \frac{\theta_f k^2}{P V \rho c}$$

On a donc

$$\frac{Vl\rho c}{k} = f\left(\frac{Vd\rho c}{k}, \frac{\theta_f k^2}{PV\rho c}\right)$$

L'expérience montre que si P varie seul, l est proportionnel à P. Donc

$$\frac{Vl\rho c}{k} = \frac{PV\rho c}{\theta_f k^2} \cdot f'\left(\frac{Vd\rho c}{k}\right).$$

On a donc,

$$\frac{\theta_f lk}{P} = f'\left(\frac{Vd\rho c}{k}\right)$$

Expérimentalement,

$$\frac{\theta_f lk}{P} = 0,1 \left(\frac{Vd\rho c}{k}\right)^{-1/2} \dots\dots\dots \frac{P}{\theta_f lk} = 10 \sqrt{\frac{Vd\rho c}{k}}$$

$$P = 10\theta_f l \sqrt{Vdk\rho c}$$

↓

Pour une puissance donnée, l ↓ si s ↑, d ↑.

Applications : fabrication semi-conducteurs
micro-usinage

DECOUPAGE AU LASER

Laser : principe semblable, mais faisceau laser.

Pas besoin de travailler dans le vide.

Applications : découpage, perçage, traitement thermique.

↓
mat. difficiles à usiner : W, Ti, Al, diamant...

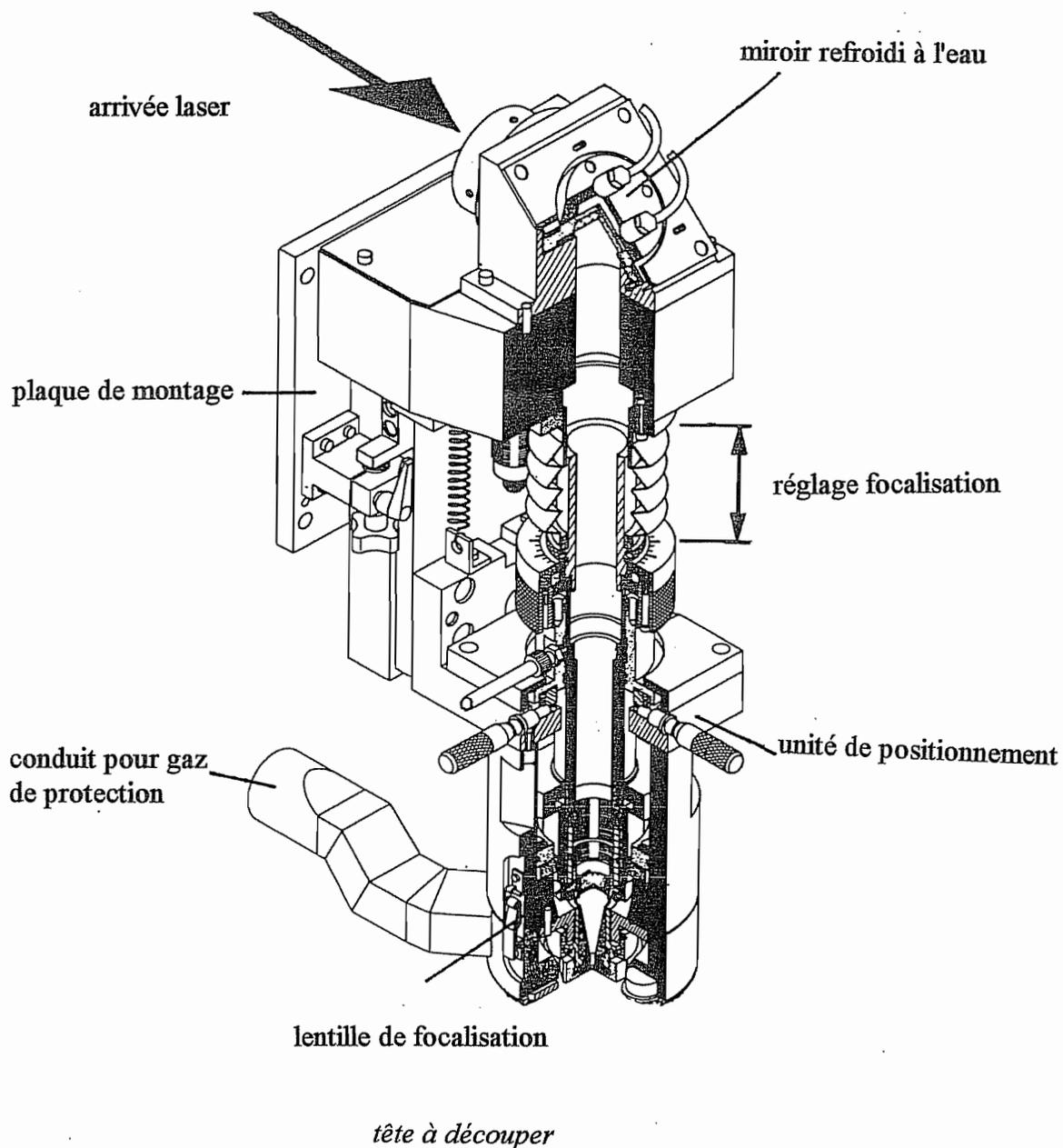


Fig. 319

DECOUPAGE AU LASER

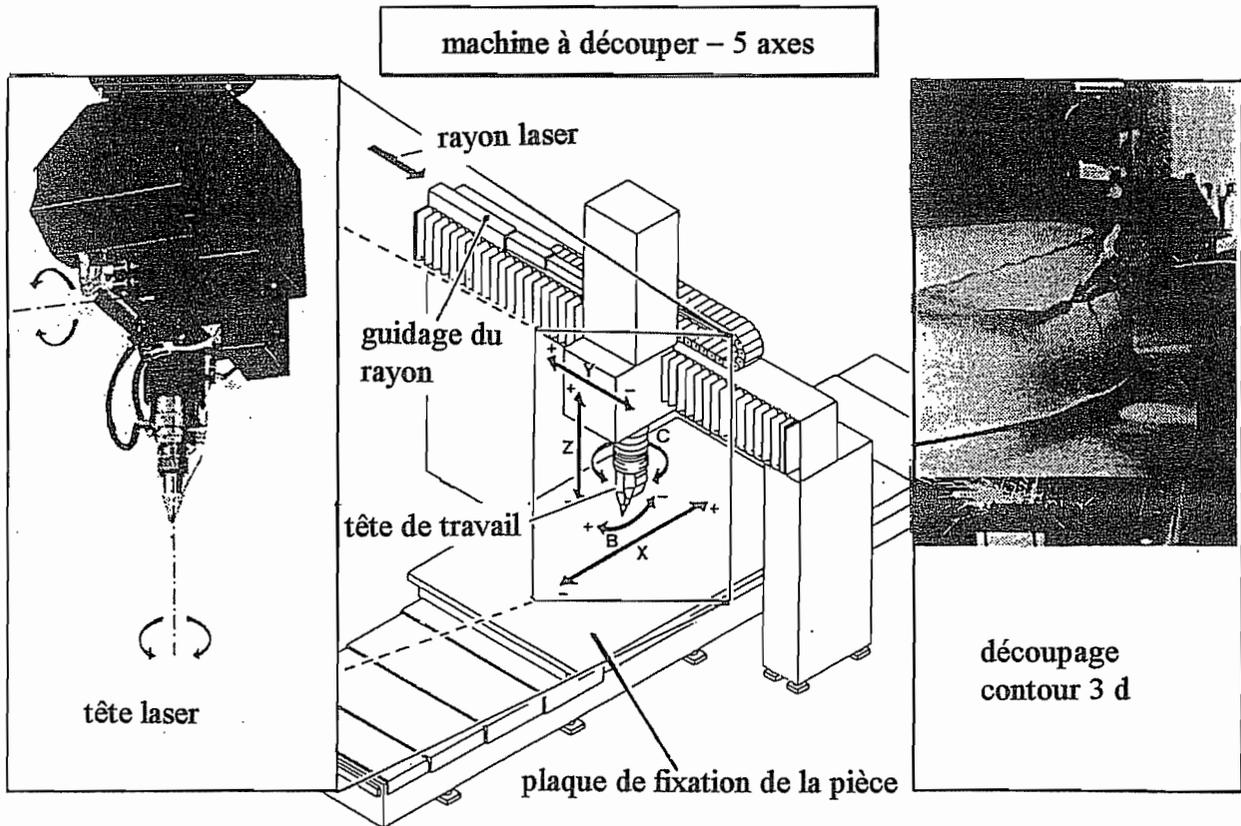
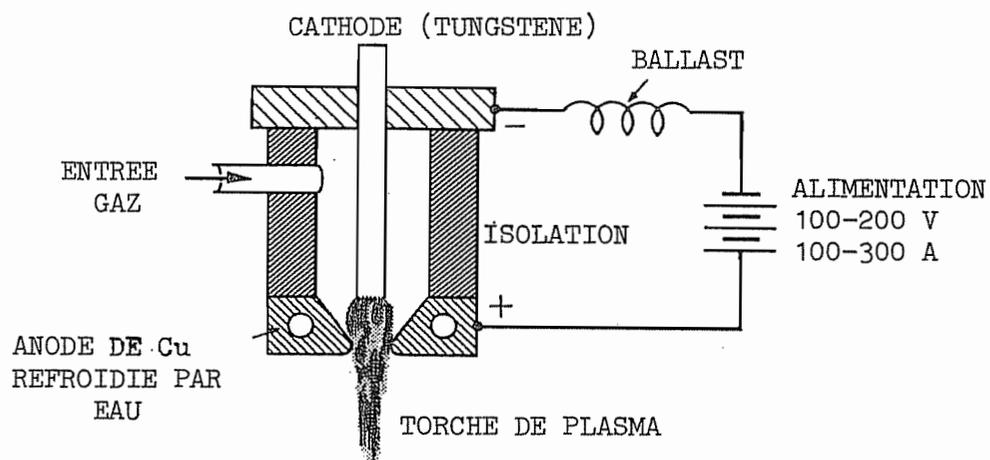


Fig. 320

DECOUPAGE AU PLASMA



Applications : découpage tôles de grande épaisseur

Fig. 321

DECOUPAGE AU JET D'EAU

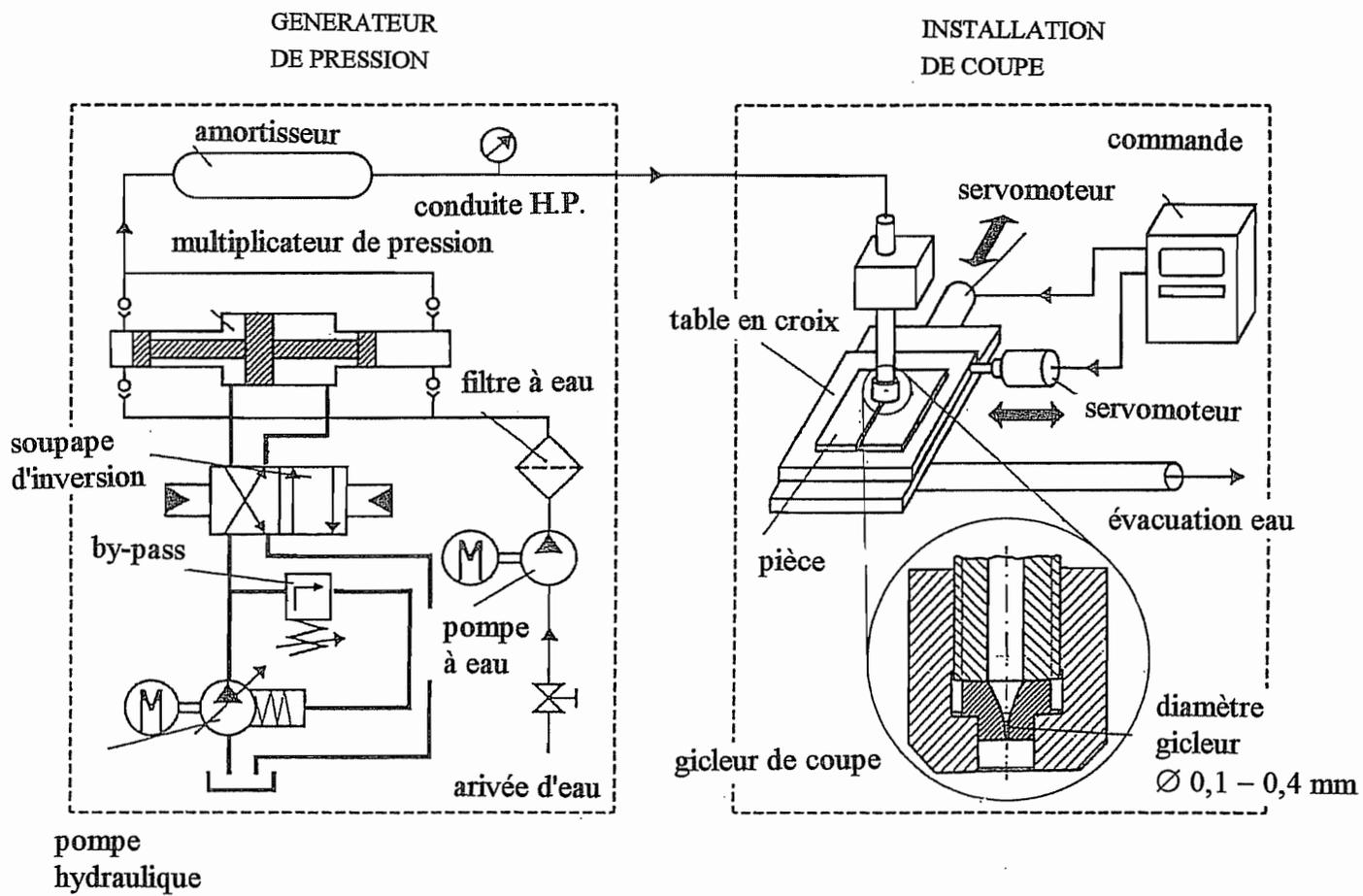


Fig. 322

Découpage au jet d'eau

1. Le principe est de produire un jet d'eau à très grande vitesse. On arrive actuellement à produire une pression de 400 MPa. Il y correspond une vitesse théorique donnée par

$$\frac{p}{\rho} = \frac{v^2}{2},$$

soit

$$v = \sqrt{\frac{2p}{\rho}} = \sqrt{\frac{2.400.10^6}{1000}} = 894,4 \text{ m/s}.$$

L'énergie de ce jet permet la coupe de divers matériaux relativement tendres. Le découpage des tissus et des mousses, notamment, se fait bien par ce procédé alors qu'en coupe mécanique, ces matériaux sont répartis aux outils.

2. Production de la pression. Pour obtenir une telle pression, on travaille en deux étages. On produit d'abord de l'huile sous une pression moindre; puis, à l'aide d'un système à tiroirs, on conduit cette huile dans un dispositif multiplicateur de pression, qui est une pompe à double effet où l'huile travaille sur une plus grande surface que l'eau. La fluctuation de pression est amortie dans un réservoir accumulateur.

3. Installation de coupe. La pièce, placée sur une table à mouvements croisés, peut se présenter en chacun de ses points devant le gicleur. On peut ainsi obtenir toute espèce de forme de découpe.

4. Etude théorique élémentaire

Le jet d'eau apporte une énergie cinétique spécifique $\frac{v_1^2}{2}$, à laquelle correspond la puissance

$$G_{eau} \frac{v_1^2}{2},$$

où G_{eau} est le débit massique de l'eau. A la sortie de la pièce, il sort de l'eau et des copeaux à la vitesse v_2 , ce qui équivaut à une puissance

$$(G_{eau} + G_{cop}) \frac{v_2^2}{2}$$

La différence entre ces deux puissances est la puissance de coupe :

$$G_{eau} \frac{v_1^2}{2} = (G_{eau} + G_{cop}) \frac{v_2^2}{2} + P_{coupe}$$

Généralement, on s'arrange pour que la vitesse de sortie soit petite devant la vitesse d'entrée. Comme le débit de copeaux est toujours d'un ordre de grandeur inférieur au débit d'eau, on peut négliger le premier terme du second membre et écrire

$$G_{eau} \frac{v_1^2}{2} \approx P_{coupe}$$

Mais le paramètre directement mesurable n'est pas v_1 mais la pression avant le gicleur. En l'absence de pertes, on aurait

$$v_1 = \sqrt{\frac{2p}{\rho}},$$

en négligeant l'effet de compressibilité de l'eau. Nous écrivons comme les hydrauliciens

$$v_1 = \varphi \sqrt{\frac{2p}{\rho}}, \quad \varphi < 1,$$

de manière à tenir compte de la perte de charge. Le débit massique est alors

$$G_{eau} = \rho S v_1 = \rho S \varphi \left(\frac{2p}{\rho} \right)^{1/2},$$

ce qui permet d'écrire le bilan énergétique sous la forme

$$\frac{1}{2} \rho S \varphi^3 \left(\frac{2p}{\rho} \right)^{3/2} \approx P_{coupe}$$

soit

$$p = \frac{\rho}{2} \cdot \left(\frac{2 P_{coupe}}{\rho S \varphi^3} \right)^{2/3}$$

Explicitons à présent P_{coupe} . Nous écrivons

$$P_{coupe} = Q_{copeaux} \cdot k_s$$

en faisant apparaître l'énergie spécifique de coupe k_s . Quant au débit, si d_j est le diamètre du jet, t l'épaisseur de la pièce, et v_f la vitesse d'avance, il est donné par

$$Q_{copeaux} = d_j t v_f.$$

Enfin, comme

$$S = \frac{\pi d^2}{4},$$

avec

$$d = \text{diamètre gicleur} = \beta d_j, \beta < 1,$$

on obtient

$$p = \frac{\rho}{2} \left(\frac{2 d_j t v_f}{\rho \varphi^3 \frac{\pi d^2}{4}} \right)^{2/3} k_s^{2/3} = \frac{\rho}{2} \left(\frac{8 d t v_f}{\rho \varphi^3 \beta \pi d^2} \right)^{2/3} k_s^{2/3}$$

soit

$$p = 2 \rho^{1/3} \left(\frac{1}{\pi \varphi^3 \beta} \right)^{2/3} \left(v_f \frac{t}{d} \right)^{2/3} k_s^{2/3}.$$

En admettant que k_s ne dépend pas de t , d , v_f , on constate que la pression doit être proportionnelle à la puissance 2/3 du groupement

$$v_f \frac{t}{d}$$

Ceci correspond assez bien aux données expérimentales de König quant à la dépendance de p par rapport à t , pour les *caoutchoucs*, les *polycarbonates*, le *bois*, le *fibro-ciment*, le *polyester expansé*, le *plomb*. Pour les autres métaux, ses expériences donnent

$$p \# t^x \quad x = 0,3 \dots 0,5$$

ce qui semble indiquer que

$$(k_s t)^{2/3} \# t^x$$

soit

$$k_s \# t^{\frac{3}{2}x-1} \quad \frac{3}{2}x - 1 = (-0,55) \dots (-0,25)$$

Mais on est limité à environ 2 mm d'épaisseur pour les tôles d'acier ou d'Al. On peut également découper les roches au jet d'eau.

Bibliographie - Procédés non traditionnels

1. N.H. COOK : *Manufacturing Analysis*. Addison - Wesley, Reading, Massachusetts, 1966.
2. A.E. DE BARR, D.A. OLIVIER : *L'usinage électrochimique*. Eyrolles, Paris, 1971.
3. W. KOENIG : *Fertigungsverfahren - Band 3 : Abtragen*. VDI, Düsseldorf, 1979.
4. K.P. RAJURKAR, G. SATHYANARAYANAN R. KOMANDURI : *Advances in Non-Traditional Machining*. Ped-Vol. 22, A.S.M.E., New York, 1986.
5. R.A. TIKHOMIROV *et al.* : *High Pressure Jetcutting*. A.S.M.E. Press, New York, 1992.
6. *Guide des usinages par électro-érosion*. CETIM et ENIMS, 1980.
7. *L'électro-érosion aujourd'hui*. SOFETEC, Boulogne Billancourt.

COTATION DE FABRICATION

1. Dispersions dimensionnelles

1.1 - Généralités

Les machines et appareillages utilisés pour usiner une pièce ont une précision limitée. Il en résulte que deux pièces en principe identiques présenteront, après fabrication, de petites différences de dimensions: c'est la *dispersion*.

1.2 - Causes de la dispersion

Imaginons une production en série. Sur chaque pièce fabriquée, on mesure une certaine cote x . On établit un graphe de cette cote en fonction du numéro de la pièce (fig. 1). On constate deux phénomènes:

- Il y a une dispersion *systématique* croissante Δs due essentiellement à l'*usure de l'outil*. C'est ce qu'il est convenu d'appeler la *dérive de la cote*.

- Il existe en outre une dispersion aléatoire Δa qui dépend des incertitudes de mise en position de la pièce et de l'outil, des déformations (efforts de coupe, variations thermiques, déformations des butées, ...).

La dispersion totale est

$$\delta_t = \delta_a + \delta_s$$

A cela s'ajoutent encore les *erreurs géométriques* δ_g des déplacements relatifs des éléments de la machine. Enfin, la cote dépendra également de l'*incertitude de réglage* de la cote δ_r .

1.3 - Intérêt de la connaissance des dispersions

La connaissance des dispersions et l'évaluation de leur ordre de grandeur permettent:

- De *choisir* un moyen de production capable de réaliser un IT donné.

- De déterminer la *cote de réglage* sur cette machine

- De prévoir une *méthode de contrôle*.

1.4 - Exemple d'analyse de dispersion

La figure 2 schématise les causes de dispersion lors du dressage d'une face au tour. Pour évaluer ces différents termes, on peut s'inspirer des données suivantes:

VALEURS COURANTES DES DISPERSIONS

$$- \Delta_1 \leq \delta_1 \leq \Delta_1$$

1) δ_1 - *Forme de l'appui (plan, sphérique, strié), usure, rigidité, précision, effort de maintien.....* $\Delta_1 \leq 0,05$ mm

Cette erreur se manifeste à chaque prise de pièce.

2) δ_2 - *Etat macro- et microgéométrique de la surface (planéité, dépouille, bavures), effort de maintien:*

Moulage sable..... $\Delta_2 \approx 0,3$ mm

Moulage coquille..... $\Delta_2 \approx 0,2$ mm

Moulage sous pression..... $\Delta_2 \approx 0,05$ mm

Estampage sans redressage..... $\Delta_2 \approx 0,2$ mm

Estampage avec redressage..... $\Delta_2 \approx 0,1$ mm

Surface usinée..... $0,005$ mm $\leq \Delta_2 \leq 0,1$ mm

Cette erreur se manifeste à chaque prise de pièce.

3) δ_3 - *Variation de cote de l'outil*

..... $0,005$ mm $\leq \Delta_3 \leq 0,1$ mm

Erreurs hors dérive qui ne se manifestent que dans certains cas particuliers où le réglage est fondé sur une cote présumée de l'outil.

4) δ_4 - *Erreurs liées au porte-outil, sa mise en position, sa liaison à la machine, sa déformation*

..... $0,005$ mm $\leq \Delta_4 \leq 0,05$ mm

Interviennent à chaque changement d'outil.

5) δ_5 - *Erreurs liées aux guidages, leur précision, les efforts qu'ils subissent.....* (Voir chapitres suivants)

Interviennent à chaque pièce pour tout travail non unitaire.

6) δ_6 - *Erreurs liées à la précision et à la fidélité des butées*

..... (Voir chapitres suivants)

Interviennent à chaque pièce pour tout travail non unitaire en butée.

7) *Efforts de coupe, dilatations thermiques, vibrations.....*

..... (Voir chapitres suivants)

Interviennent à chaque pièce pour tout travail non unitaire.

Partant de la relation évidente

$$\delta_a = \delta_1 + \dots + \delta_7$$

et sachant que chacune de ces dispersions aléatoires vérifie une relation de la forme

$$-\Delta_i \leq \delta_i \leq \Delta_i$$

on obtient

$$\delta_{aM} \stackrel{\Delta}{=} \Delta_a = \Delta_1 + \Delta_2 + \dots + \Delta_7$$

et

$$\delta_{am} = -\Delta_a$$

2. Classification des cotes de fabrication

2.1 - Généralités

L'établissement d'un processus d'usinage impose la détermination de *toutes les cotes effectivement réalisées* sur la pièce, même s'il ne s'agit que d'étapes provisoires. Ce sont les *cotes de fabrication*. Elles sont *toujours tolérancées*.

Pour une prise de pièce donnée, *il y a toujours au moins une cote de fabrication qui a pour origine la surface de la pièce en contact avec le référentiel de mise en position*. Cette remarque est importante, car l'examen des sources d'erreur montre que la dispersion δ_2 liée à la mise en position est souvent très grande.

On note en général une cote de fabrication par la lettre U.

2.2 - Les trois types de cotes de fabrication

a) Cotes de machine ou cotes primaires U_p

Ce sont les cotes pour lesquelles l'outil est réglé par rapport aux éléments de mise en position (fig. 3). La dispersion comporte alors tous les termes envisagés ci-dessus:

$$\Delta_a = \Delta_1 + \dots + \Delta_7$$

b) Cotes d'appareillage U_A

Ce sont les cotes définies par l'appareillage de la machine, indépendamment de la mise en position. Ici, la dispersion ne

comporte plus ni δ_1 ni δ_2 . Ainsi, sur la figure 5, la cote U_{A1} ne représente qu'un déplacement de l'outil par rapport à la cote U_{P2} réalisée au préalable.

c) Cotes d'outil U_0

Il s'agit de cotes réalisées par des outils réglés entre eux (fig. 6) ou encore, de cotes réalisées par la distance des arêtes d'un seul outil, comme dans le cas du mortaisage, où la largeur de la rainure de clavette ne dépend que de l'outil. Une cote d'outil n'est affectée que par les variations de cotes de l'outil lui-même (δ_3) et éventuellement, les incertitudes liées aux déformations des outils et de leurs supports.

2.3 - Premier exemple: perçage avec masque (fig. 7)

La cote U_{p1} est définie entre la référence d'appui et l'axe du premier trou. C'est donc une *cote de machine*. La distance U_{A1} entre les axes des deux trous ne dépend que de l'appareillage, en l'occurrence, le masque: c'est une *cote d'appareillage*. Enfin, les cotes U_{01} et U_{02} sont définies par les diamètres effectifs des forets: ce sont des *cotes d'outil*.

2.4 - Deuxième exemple: introduction de la notion de référentiel auxiliaire.

L'ébauche de pignon arbré représentée à la figure 8 doit être tournée, du côté de l'arbre, par *copiage*. Le principe de ce procédé, illustré par la figure 9, est le suivant: on taille un gabarit plan au profil méridien de la pièce à réaliser. Lors du tournage, un palpeur lié au chariot transversal suit le gabarit et oblige le chariot transversal à se placer convenablement. L'application de ce principe simple nécessite cependant un appareillage perfectionné pour bien suivre le gabarit. Les tours ainsi équipés sont appelés *tours à copier*.

Etant donné que le procédé de copiage nécessite la fabrication du gabarit, il ne s'applique économiquement qu'à des séries suffisant à récupérer ces frais préalables.

Il va de soi que dans ce procédé, toutes les cotes sont définies par le gabarit dès lors que l'on a réglé la position initiale de l'outil par rapport à la référence de la pièce. Cette position initiale, ici, la portée de roulement du côté de la tête et la face d'appui arrière du pignon, ser en fait de *référence auxiliaire* pour tout l'arbre.

2.5 - Troisième exemple

Considérons le cas d'une rainure réalisée à l'aide d'une fraise à trois tailles (fig. 10). La largeur de la rainure dépend uniquement des cotes effectives de la fraise: c'est donc une *cote d'outil*. Par contre, la profondeur de la rainure et la symétrie de sa position sur la pièce se règlent en fonction de la référence de la machine. Ce sont donc des *cotes de machine*.

3. Réglage des cotes

3.1 - Position du problème

Etant donné une cote de fabrication, par exemple, $100 \pm 0,5$ mm, à quelle cote faut-il régler la machine? Est-ce 100 ? 100,5 ? 100,25 ? Autre chose ? Cette question est souvent assez mal comprise, car la réponse correcte est paradoxale. Il faut, pour la traiter valablement, faire abstraction de toute idée préconçue et s'astreindre à un raisonnement formel rigoureux.

3.2 - Considérations théoriques

La cote de fabrication *obtenue* U^* résulte (fig. 11) de la composition de la *cote de réglage nominale* R et des erreurs suivantes:

- δ_r : précision du réglage
- δ_g : erreurs géométriques de la machine
- δ_a : erreurs aléatoires
- δ_s : dérive de l'outil

On a donc

$$U^* = R + \delta_r + \delta_g + \delta_a + \delta_s$$

Les trois premières erreurs sont bilatérales:

$$- \Delta_r \leq \delta_r \leq \Delta_r$$

$$- \Delta_g \leq \delta_g \leq \Delta_g$$

$$- \Delta_a \leq \delta_a \leq \Delta_a$$

Par contre, la dérive de l'outil est *progressive* et *va toujours dans le sens d'un supplément de matière*. En d'autres termes,

- pour une cote d'arbre, δ_s varie de 0 à $+\Delta_s$
- pour une cote d'alésage, δ_s varie de 0 à $-\Delta_s$

Pour respecter les tolérances sur U tout au long du processus

d'usinage, il faudra assurer les relations

$$U_m \leq U_m^* \quad \text{et} \quad U_H \geq U_H^*$$

a) Pour une cote d'arbre, on doit donc avoir

$$U_m^* = R - \Delta_r - \Delta_g - \Delta_a + 0 \geq U_m \quad (1)$$

$$U_H = R + \Delta_r + \Delta_g + \Delta_a + \Delta_s \leq U_H \quad (2)$$

De la relation (2), on déduit

$$\Delta_s \leq U_H - R - (\Delta_r + \Delta_g + \Delta_a)$$

ce qui signifie que la dérive pourra être d'autant plus grande, autrement dit, que l'outil pourra être utilisé d'autant plus longtemps que R sera plus petit. Il est donc avantageux de donner à R la plus petite valeur compatible avec l'inégalité (1), a savoir

$$R = U_m + (\Delta_r + \Delta_g + \Delta_a) \quad (\text{arbre})$$

Par ailleurs, le réglage ne sera possible que si $\Delta_s > 0$. Or, la soustraction de la condition (1) à la condition (2) donne

$$\Delta_s + 2(\Delta_a + \Delta_g + \Delta_r) \leq IT(U)$$

soit la condition de compatibilité

$$IT(U) - 2(\Delta_a + \Delta_g + \Delta_r) \geq \Delta_s > 0$$

Si cette condition n'est pas remplie, il faut déduire que les moyens d'usinage envisagés ne permettent pas d'obtenir la précision requise.

b) Pour une cote d'alésage, les conditions sont

$$U_m^* = R - \Delta_r - \Delta_g - \Delta_a - \Delta_s \geq U_m \quad (3)$$

$$U_H^* = R + \Delta_r + \Delta_g + \Delta_a + \Delta_s \leq U_H \quad (4)$$

On déduit de la condition (3)

$$\Delta_s \leq R - (\Delta_r + \Delta_g + \Delta_a) - U_m$$

La plus grande dérive admissible correspond ici à la plus grande cote de réglage. Il convient donc de donner à R la plus grande

valeur compatible avec l'inégalité (4), soit

$$R = U_H - (\Delta_r + \Delta_g + \Delta_a) \quad (\text{alésage})$$

On retrouve d'autre part la condition

$$IT(U) - 2(\Delta_r + \Delta_g + \Delta_a) \geq \Delta_s > 0$$

c) Les résultats obtenus peuvent se synthétiser comme suit:

- Premier principe: La cote de réglage rationnelle est située au MINIMUM de matière augmenté en matière des erreurs ($\Delta_a + \Delta_g + \Delta_r$).

- Deuxième principe: La dérive admissible est inférieure ou égale à l'intervalle de tolérance diminué de deux fois la somme des erreurs ($\Delta_a + \Delta_g + \Delta_r$). Elle est égale à cette valeur si et seulement si le premier principe est respecté.

3.3 - Remarques

a) On entend parfois dire qu'il vaut mieux régler l'outil au maximum de matière, "car il est toujours possible d'enlever la matière excédentaire si besoin est". Cette conception est erronée, car

- La dérive provoquera très rapidement la mise hors cote de la pièce

- Le supplément de matière indésirable sera souvent trop petit pour être repris à l'outil (*copeau minimal*) et ne pourra être enlevé que par une passe de rectification lente, coûteuse et difficile à réaliser dans le cas des alésages.

b) On constate que si l'intervalle de tolérance IT(U) est trop faible, la fabrication sera impossible avec les moyens envisagés. On ne peut trop rappeler que le bureau d'études doit prendre pour devise *tout juste assez fin pour le fonctionnement correct, jamais plus!*

3.4 - Techniques de réglage

3.4.1 - Réglage statique

C'est un réglage effectué sans actions de coupe à l'aide de cales de réglage, d'appareils de mesure, de verniers, ou de pièces types pour certaines fabrications de série. Une pièce-type est une pièce réalisée aux cotes de réglage avec une grande précision (IT dix fois plus faible que sur la pièce réelle).

Le réglage statique est réalisé lorsqu'on prévoit une faible déviation de l'outil sous l'effet de l'effort de coupe, ou lorsque

l'IT à réaliser est large.

3.4.2 - Réglage dynamique

Lorsque l'on craint de fortes déformations de l'outil (ou de la pièce) risquant de fausser la cote de manière abusive, on peut songer au réglage dynamique qui s'obtient par corrections successives après usinage de pièces particulières, en faisant des passes réalistes.

3.5 - Exemple de détermination d'une cote de réglage

Il s'agit de déterminer (fig. 12) la cote de réglage R correspondant à la cote de fabrication $15 \pm 0,8$. La pièce est en fonte Ft20, moulée en sable

a) Il s'agit d'une cote primaire, donc

$$\Delta_a = \Delta_1 + \dots + \Delta_7 .$$

On peut évaluer ces diverses erreurs comme suit:

$$\Delta_1 = 0,02 \text{ mm (défaut de contact)}$$

$$\Delta_2 = 0,3 \text{ mm (moulage en sable)}$$

$$\Delta_3 = 0$$

$$\Delta_4 = 0 \text{ (Pas de changement d'outil)}$$

$$\Delta_5 = 0,01 \text{ mm (maximum)}$$

$$\Delta_6 = 0 \text{ (position longitudinale fixe)}$$

$$\Delta_7 = 0,01 \text{ mm}$$

$$\Delta_a = 0,34 \text{ mm}$$

b) Δ_g est négligeable sur une variation de rayon de 20 mm

c) Δ_r peut être estimée à 0,02 pour un réglage statique.

d) On a donc

$$\Delta_a + \Delta_g + \Delta_r = 0,34 + 0 + 0,02 = 0,36 \text{ mm}$$

e) Condition de réalisabilité:

$$IT - 2 (\Delta_a + \Delta_g + \Delta_r) = 1,6 - 2 \cdot 0,36 = 0,88 \text{ mm} \geq \Delta_s$$

ce qui est bien suffisant.

f) Cote de réglage:

$$R = U_m + (\Delta_a + \Delta_g + \Delta_r) = (15 - 0,8) + 0,36 = 14,56 \text{ mm}$$

4. Cotes de fabrication

4.1 - Quelques remarques préliminaires

Lors de l'établissement de cotes de fabrication, il est bon de se rappeler les principes suivants:

- Le coût de l'usinage croît avec sa précision (fig. 13)

- Il existe, pour chaque usinage, un *copeau minimal* en-deçà duquel l'usinage ne peut se faire convenablement. La négligence de cette condition est une cause fréquente de *broutage*¹.

- Les cotes définies par le bureau d'études, même si elles sont fonctionnelles, ne sont pas nécessairement les cotes de fabrication. Ainsi, dans le cas de la figure 14, il peut arriver que la cote $Z^{\pm z}$ du B.E. soit la résultante des deux cotes de fabrication $X^{\pm x}$ et $Y^{\pm y}$. On dit, dans ce cas, qu'il y a *transfert de cotes*. La question qui se pose alors est l'établissement des tolérances de fabrication x et y permettant de respecter la tolérance z du B.E..

- Enfin, il existe des cotes non définies par le bureau d'études qui sont imposées par des impératifs de fabrication. La figure 15 montre deux exemples de telles *cotes des méthodes*.

4.2 - Transfert de cotes

Imaginons (fig. 16) une pièce pour laquelle le plan du bureau d'études fixe les cotes U_1 , C, U_3 , avec tolérances. Supposons en outre que le processus de fabrication utilise en fait les cotes de fabrication U_1 , U_2 et U_3 . La question consiste à déterminer la valeur de U_2 et ses tolérances de manière à satisfaire aux exigences du B.E. quant à la cote C. C'est ce que l'on appelle un *transfert de cotes*.

Pour résoudre ce problème, on établit la chaîne de cotes de la condition C. On trouve (fig. 17)

1

On donne le nom de *broutage* (en Anglais, *stick-slip*) au phénomène dans lequel apparaît une vitesse saccadée. Le caractère intermittent du mouvement provoque la naissance d'un *SON* (grincement). Ainsi, les charnières mal huilées grincement à cause du phénomène de broutage. Dans notre cas, le broutage de l'outil conduit à un état de surface déficient.

$$C = -U_1 + U_2 - U_3$$

ce qui implique

$$C_H = -U_{1H} + U_{2H} - U_{3H}$$

$$C_m = -U_{1M} + U_{2M} - U_{3M}$$

et

$$IT(C) = IT(U_1) + IT(U_2) + IT(U_3)$$

On en déduit

$$U_{2H} = C_H + U_{1H} + U_{2H}$$

$$U_{1M} = C_m + U_{1M} + U_{2M}$$

et

$$IT(U_2) = IT(C) - IT(U_1) - IT(U_2)$$

Il va de soi que *cette solution n'est admissible que si $IT(U_2)$ est positif et suffisamment grand pour être réalisable*. Or, cet intervalle de tolérance est toujours inférieur à celui de C. Le transfert de cotes n'est donc pas toujours réalisable.

Si l'on obtient une valeur aberrante de $IT(U_2)$

- On peut essayer de resserrer les tolérances de U_1 et U_2 , ce qui rend le transfert possible au prix d'un coût plus élevé.

- On peut essayer de modifier le processus d'usinage pour obtenir la cote C comme cote directe, ce qui nécessite en général un appareillage spécial.

- En désespoir de cause, on peut examiner avec le bureau d'études la possibilité de délargir les tolérances sur C. Il arrive en effet que le bureau d'études spécifie des tolérances exagérément fines "pour se couvrir". Ce genre de problèmes illustre bien le fait qu'une bonne conception ne peut négliger les contraintes de fabrication et qu'un cloisonnement trop rigide entre le bureau d'études et le bureau des méthodes (hyper-taylorisme) peut mener à une baisse de qualité (tolérances non respectées) ou à une production peu économique (tolérances obtenues à tout prix).

4.3 - Exemples

1) On veut fraiser les faces F1 et F2 de la pièce représentée

en figure 17 avec la mise en position indiquée. Les cotes de fabrication à déterminer sont U_1 et U_2 .

a) Cote U_2

Chaîne de cotes: fig. 19

$$x = y - U_1$$

$$x_M = y_M - U_{1m}$$

$$x_m = y_m - U_{1M}$$

soit

$$ES(x) = ES(y) - EI(U_1) ; EI(U_1) = ES(y) - ES(x) = 0,1 - 0 = 0,1$$

$$EI(x) = EI(y) - ES(U_1) ; ES(U_1) = EI(y) - EI(x) = -0,1 + 0,3 = 0,2$$

$$EI(U_1) = 0,1$$

Cet intervalle de tolérances est admissible. On a donc

$$U_1 = 60_{+0,1}^{+0,2}$$

b) cote U_2

Chaîne de cotes: fig. 20

$$x = y - U_2$$

$$x_M = y_M - U_{2m} \text{ soit } ES(x) = ES(y) - EI(U_2)$$

$$x_m = y_m - U_{2M} \text{ soit } EI(x) = EI(y) - ES(U_2)$$

Il vient donc

$$EI(U_2) = ES(y) - ES(x) = 0,2 - 0,1 = + 0,1$$

$$ES(U_2) = EI(y) - EI(x) = -0,2 - 0 = - 0,2$$

$$IT(U_2) = - 0,3$$

Le transfert est donc *impossible*. Pour le rendre possible, il faut resserrer les tolérances de y . A tout le moins, on devra obtenir

$$EI(U_2) < ES(U_2)$$

soit

$$ES(y) - ES(x) < EI(y) - EI(x)$$

c'est-à-dire

$$ES(y) - EI(y) < ES(x) - EI(x) = 0,1$$

En choisissant $IT(y) = 0,05$ (pour autant que cette valeur soit réalisable), par exemple,

$$ES(y) = 0,05 \quad ; \quad EI(y) = 0$$

on trouvera

$$EI(U_2) = ES(y) - ES(x) = 0,05 - 0,1 = - 0,05$$

$$ES(U_2) = EI(y) - EI(x) = 0 - 0 = 0$$

ce qui fournit la solution

$$y = 60_{0}^{0,05} \quad ; \quad U_2 = 40_{-0,05}^0$$

2) On veut fraiser la face F_1 de la pièce de la figure 21 sur une fraiseuse verticale, avec la mise en position représentée. La cote de fabrication à déterminer es U .

La chaîne de cotes indique la relation

$$x = y - U$$

qui implique

$$x_M = y_M - U_m \quad \text{soit} \quad ES(x) = ES(y) - EI(U_m)$$

$$x_m = y_m - U_M \quad \text{soit} \quad EI(x) = EI(y) - ES(U_m)$$

On a donc

$$EI(U) = ES(y) - ES(x) = + 0,25 - 0,05 = + 0,20$$

$$ES(U) = EI(y) - EI(x) = - 0,25 - 0 = - 0,25$$

$$IT(U) = - 0,45$$

Ce transfert est *impossible*. On peut imaginer trois solutions

(i) - Resserer la cote y - Il faut que

$$ES(U) > EI(U)$$

soit

$$EI(y) - EI(x) > ES(y) - ES(x)$$

ou encore

$$ES(y) - EI(y) < ES(x) - EI(x) = IT(x) = 0,05$$

On choisira par exemple $IT(y) = 0,025$, en posant $y = 75_0^{+0,025}$

Alors,

$$EI(U) = ES(y) - ES(x) = + 0,025 - 0,05 = - 0,025$$

$$ES(U) = EI(y) - EI(x) = 0 - 0 = 0$$

ce qui donne $U = 19_{-0,025}^0$

(ii) Ramener la cote x à une cote d'outil en accouplant les deux fraises sur le même arbre, leur distance étant convenablement réglée par des entretoises (fig. 22)

(iii) Ramener la cote x à une cote d'appareillage, en prenant F_2 comme référence auxiliaire de réglage sur laquelle vient une butée lors de l'usinage de F_1 . (fig. 23).

Il va sans dire que le choix définitif de la solution doit se faire en fonction des impératifs économiques.

5. Réalisation des tolérances d'orientation

5.1 - Réalisation directe

La figure 24 illustre le fraisage associé de deux faces F_1 et F_2 à l'aide d'une fraise à deux tailles. Dans ce cas, la perpendicularité des deux faces est réalisée directement par l'outil: c'est une cote d'outil

$$U_0 = 0,05$$

5.2 - Transfert d'une tolérance de parallélisme

L'angle entre les faces F_1 et F_2 de la figure 25 résulte des angles α_1 et α_2 réalisés avec la référence. En fait, on procède en deux étapes:

- La première étape (fig. 26) consiste en la réalisation de la face F_1 . Il en résulte un angle α_1 avec la référence.

- La deuxième étape est la réalisation de la face F_2 qui fera un angle α_2 avec la référence.

Comme le montre la figure 28, l'angle α_{12} entre les deux faces est donné par

$$\alpha_{12} = \alpha_1 - \alpha_2$$

ce qui implique

$$IT(\alpha_{12}) = IT(\alpha_1) + IT(\alpha_2)$$

Or, en assimilant les tangentes aux angles,

$$IT(\alpha_{12}) = \frac{0,06 \text{ mm}}{30 \text{ mm}} = 0,002$$

$$IT(\alpha_1) = \frac{U_1}{80 \text{ mm}}$$

$$IT(\alpha_2) = \frac{U_2}{30 \text{ mm}}$$

Comme les deux faces sont d'une difficulté de réalisation comparable, on peut poser

$$IT(\alpha_1) = IT(\alpha_2) = IT^*$$

ce qui mène à la condition

$$IT^* = \frac{1}{2} IT(\alpha_{12}) = \frac{1}{2} \cdot 0,002 = 0,001.$$

Finalement,

$$U_1 = IT^* \cdot 80 \text{ mm} = 0,08 \text{ mm}$$

$$U_2 = IT^* \cdot 30 \text{ mm} = 0,03 \text{ mm}$$

5.3 - Transfert d'une tolérance de perpendicularité

Continuant la fabrication de la pièce précédente, il faut à présent faire un trou, avec une condition de perpendicularité avec F_2 (fig. 29). Cette condition sera à nouveau transférée en une tolérance de perpendicularité U_3 avec la référence (fig. 30). La figure 31 montre que si α_3 est l'angle entre la face de référence et l'axe du trou et α_{23} l'angle entre la face 2 et l'axe du trou, on a

$$\alpha_{23} = \alpha_3 - \alpha_2$$

Par conséquent,

$$IT(\alpha_{23}) = IT(\alpha_2) + IT(\alpha_3)$$

et

$$IT(\alpha_3) = IT(\alpha_{23}) - IT(\alpha_2)$$

soit

$$\frac{U_2}{20 \text{ mm}} = \frac{0,1}{20} - \frac{U_1}{30 \text{ mm}} = \frac{0,1}{20} - \frac{0,03}{30} = 0,005 - 0,001 = 0,004$$

Il en découle

$$U_3 = 0,004 \cdot 20 \text{ mm} = 0,08 \text{ mm}$$

Si le transfert avait été impossible (U_3 trop petit ou même négatif), il aurait fallu resserrer U_2 ou revoir les spécifications avec le B.E..

6. Réalisation de tolérances de localisation

La figure 31 représente un corps de palier. Les quatre trous sont destinés à faire passer les vis de fixation d'un flasque portant un joint à lèvres. Ce flasque doit donc être centré sur l'arbre, ce qui justifie les tolérances.

En pratique, ces trous seront repérés à partir des deux références F_1 et F_2 , dans un système d'axes cartésiens. Il faut donc effectuer un transfert de cotes. La zone de tolérances sera ramenée à un rectangle choisi de manière à toujours satisfaire les conditions ci-dessus (fig. 32).

Examinons le problème en détail à l'aide de la figure 33. Par rapport à sa position théorique, le trou aura un déport (x_1, x_2) . Nous admettrons un déport tel que

$$|x_1| \leq C_1 \quad \text{et} \quad |x_2| \leq C_2$$

avec

$$C_1^2 + C_2^2 = (0,5)^2$$

ce qui nous place avec certitude dans le cercle prescrit (fig. 34). Les chaînes de cotes de x_1 et x_2 (fig. 35 et 36) donnent

$$x_1 = 15,91 - a_1 + U_1$$

$$x_2 = 15,91 - a_2 + U_2$$

On en déduit

$$x_{1M} = 15,91 - a_{1m} + U_{1M}$$

$$x_{1m} = 15,91 - a_{1M} + U_{1m}$$

$$2 C_1 = IT(a_1) + IT(U_1)$$

et

$$x_{2M} = 15,91 - a_{2m} + U_{2M}$$

$$x_{2m} = 15,91 - a_{2M} + U_{2m}$$

$$2 C_2 = IT(a_2) + IT(U_2)$$

A ce stade, on remarquera que la réalisation des cotes U_1 et U_2 est de la même difficulté. Il est donc raisonnable de poser

$$IT(U_1) = IT(U_2) = IT$$

ce qui donne

$$C_1 = \frac{1}{2} [IT + IT(a_1)] = \frac{1}{2} (IT + 0,4)$$

$$C_2 = \frac{1}{2} [IT + IT(a_2)] = \frac{1}{2} (IT + 0,1)$$

Il faut alors résoudre l'équation

$$(0,5)^2 = C_1^2 + C_2^2 = \frac{1}{4} [(IT + 0,4)^2 + (IT + 0,1)^2]$$

soit

$$2 IT^2 + 2 IT (0,4 + 0,1) + (0,4)^2 + (0,1)^2 = 1$$

ou encore,

$$2 IT^2 + IT - 0,83 = 0$$

ce qui donne

$$IT = \frac{-1 + \sqrt{1 + 4 \cdot 2 \cdot 0,83}}{4} = 0,44$$

On en déduit

$$C_1 = \frac{1}{2} (IT + 0,4) = 0,42$$

$$C_2 = \frac{1}{2} (IT + 0,1) = 0,27$$

et

$$U_{1M} = x_{1M} - 15,91 + a_{1M} = 0,42 - 15,91 + 34,8 = 19,31$$

$$U_{1m} = x_{1m} - 15,91 + a_{1m} = -0,42 - 15,91 + 35,2 = 18,87,$$

soit

$$U_1 = 19^{+0,31}_{-0,13}$$

De la même façon,

$$U_{2M} = x_{2M} - 15,91 + a_{2M} = 0,27 - 15,91 + 26,95 = 11,31$$

$$U_{2m} = x_{2m} - 15,91 + a_{2M} = -0,27 - 15,91 + 27,05 = 10,87$$

soit

$$U_2 = 11^{+0,31}_{-0,13}$$

Bien souvent, on suggère de choisir

$$C_1 = C_2 = \frac{0,5}{\sqrt{2}} = 0,35$$

Il en découlerait ici

$$IT(U_1) = 2 C_1 - IT(a_1) = 2 \cdot 0,35 - 0,4 = 0,3$$

$$IT(U_2) = 2 C_2 - IT(a_2) = 2 \cdot 0,35 - 0,1 = 0,6$$

c'est-à-dire que les deux tolérances sont différentes. Avec ce choix, si $IT(a_1)$ est trop grand, on peut arriver à un $IT(U_1)$ irréalisable.

7. Réalisation des tolérances de symétrie

7.1 - Première possibilité

La pièce représentée en figure 37 peut être réalisée de plusieurs façons. Examinons d'abord le processus décrit à la figure 38. Il nécessite le transfert de la cote $70^{+0,3}_0$ en U_1 et U_3 . La chaîne de cotes correspondante est donnée en figure 39. Elle conduit à l'équation

$$70^{+0,3}_0 = U_2 - U_3$$

soit

$$\begin{cases} 0,3 = ES(U_2) - EI(U_3) \\ 0 = EI(U_2) - ES(U_3) \end{cases}$$

Il est logique de donner à des éléments symétriques des intervalles de tolérances respectant cette symétrie. C'est pourquoi on posera naturellement

$$\begin{cases} ES(U_2) = -EI(U_3) \\ EI(U_2) = -ES(U_3) \end{cases}$$

ce qui implique

$$\begin{cases} ES(U_2) = 0,15 & ; & EI(U_3) = -0,15 \\ EI(U_2) = 0 & ; & ES(U_3) = 0 \end{cases}$$

soit

$$U_2 = 95_{0}^{0,15} \quad U_3 = 25_{-0,15}^0$$

Examinons à présent la condition de symétrie. Comme le montre la chaîne de cotes de la figure 40, on a

$$x = -0,5 U_1 + U_3 + 0,5(U_2 - U_3) = -0,5 U_1 + 0,5(U_2 + U_3)$$

Dès lors,

$$\begin{aligned} ES(x) &= -0,5 EI(U_1) + 0,5 ES(U_2) + 0,5 ES(U_3) = \\ &= 0,05 + 0,075 + 0 = 0,125 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} EI(x) &= -0,5 ES(U_1) + 0,5 EI(U_2) + 0,5 EI(U_3) = \\ &= -0,05 + 0 - 0,075 = -0,125 \end{aligned}$$

et

$$IT(x) = 0,25$$

ce qui est plus que suffisant.

7.2 - Deuxième possibilité

La méthode précédente a exigé des tolérances assez fines sur U_2 et U_3 du fait du transfert de cotes. Il en résulte que la condition de symétrie a été obtenue avec une précision superflue. Or, on peut éviter ce transfert en réalisant la cote $70_{0}^{+0,3}$ comme cote d'outil. On y arrive en associant deux fraises comme l'indique la figure 41. La cote $70_{0}^{+0,3}$, cote de fabrication dans le plan de travail de la figure 42, se règle alors à l'aide

d'entretoises appropriées entre les deux fraises. La cotation de fabrication. La chaîne de cotes est donnée en figure 43 et fournit la relation

$$x = -0,5 U_1 + U_3 + 0,5 U_2$$

ce qui donne

$$\begin{cases} ES(x) = -0,5 EI(U_1) + ES(U_3) + 0,5 ES(U_2) \\ EI(x) = -0,5 ES(U_1) + EI(U_3) + 0,5 EI(U_2) \end{cases}$$

d'où

$$\begin{aligned} ES(U_3) &= ES(x) + 0,5 EI(U_1) - 0,5 ES(U_2) = \\ &= 0,3 - 0,05 - 0,15 = 0,1 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} EI(U_3) &= EI(x) + 0,5 ES(U_1) - 0,5 EI(U_2) = \\ &= -0,3 + 0,05 - 0 = -0,25 \end{aligned}$$

et

$$U_3 = 25^{+0,1}_{-0,25}$$

c'est-à-dire que l'on peut se contenter d'une tolérance beaucoup moins fine sur U_3 .

8. Cumul de chaînes de cotes

8.1 - Chaînes cumulées

Le plus souvent, les différentes conditions de réalisation sont interdépendantes, et il faut combiner plusieurs chaînes de cotes pour obtenir toutes les cotes de fabrication.

8.2 - Copeau minimal

Les chaînes de cotes que nous avons rencontrées jusqu'ici ne concernent que des cotes de finition. Les conditions à réaliser sont alors les cotes du dessin. Mais lorsqu'on s'intéresse à la succession des différentes passes, il faut s'assurer que chacune d'entre elles respectera la condition de *copeau minimal* (Cp_m). C'est l'épaisseur minimale de matière à enlever pour garantir

- *La qualité de la surface usinée.* En particulier, si l'on part d'une surface brute, il faut être sûr de mettre à nu le métal sain.

- *La coupe dans de bonnes conditions* lorsque l'on part de surfaces déjà usinées. Avec une avance environ dix fois plus faible que l'engagement, il faut éviter le broutage.

Pour déterminer la valeur du copeau minimal, on pourra s'inspirer du tableau suivant:

VALEURS INDICATIVES DU COPEAU MINIMAL

a) Par rapport à une surface brute

- pièces en acier moulé $L \leq 250$ mm $C_{p_m} = 4$ à 6 mm
- pièces en acier moulé $250\text{mm} < L \leq 1000\text{mm}$ $C_{p_m} = 6$ à 10 mm
- pièces en fonte moulée $L \leq 250\text{mm}$ $C_{p_m} = 2,5$ à 5 mm
- pièces en fonte moulée $250\text{mm} < L \leq 1000\text{mm}$ $C_{p_m} = 4$ à 8 mm
- pièces en alliage d'Al moulé en sable
(selon dimensions et difficulté)..... $C_{p_m} = 2$ à 6 mm
- pièces en alliage d'Al moulé en coquille
par gravité..... $C_{p_m} = 1$ à 3 mm
- pièces en alliage d'Al moulé en coquille
sous pression..... $C_{p_m} = 0,5$ à 1,5 mm
- pièces soudées ou découpées..... $C_{p_m} = 1$ à 2 mm

b) par rapport à une surface usinée

- Seconde ébauche (ou demi-finition)
à l'outil coupant..... $C_{p_m} = 0,3$ à 0,5 mm
- Finition à l'outil coupant..... $C_{p_m} = 0,1$ à 0,2 mm
- Rectification..... $C_{p_m} = 0,05$ à 0,1 mm

8.3 - Tolérances des cotes de fabrication

- Les tolérances prises à partir d'une surface brute doivent être suffisamment larges, pour tenir compte de l'imperfection du positionnement.

- Les tolérances de cotes ayant pour référence une surface usinée peuvent être plus fines.

- Les tolérances de finition doivent respecter les indications du dessin.

Voici quelques indications à ce sujet:

IT SUR LES COTES DE FABRICATION

a) Cote dont la référence est une surface brute:

Tolérance $\pm 0,1$ à ± 1 selon la qualité et la correction géométrique de la surface brute.

b) Cotes entre surfaces usinées

Procédé d'usinage	IT (mm)		
	Ebauche	semi-finition	finition
Fraisage	0,3...0,5	0,1...0,2	
Tournage	0,3...0,5	0,1...0,2	Doit
Perçage	0,2...0,5	0,15...0,2	respecter
Alésage grain	0,2...0,4	0,1...0,2	IT fixé
Alésage alésoir	0,15...0,2	0,05...0,15	par le
Rectification	0,1...0,3	0,05...0,1	dessin
Brochage	0,05...0,15	0,02...0,4	

8.4 - Exemple- Soit à réaliser la cote $30_{-0,1}^0$ entre les deux faces d'une pièce, en réalisant successivement l'ébauche et la finition de chacune d'elles (fig. 44). Les hypothèses du B.M. sont

$$Cp_m = \begin{cases} 2,5 & (\text{ébauche}) \\ 0,5 & (\text{finition}) \end{cases}$$

$$IT = \begin{cases} 0,8 & (\text{cote/brut}) \\ 0,2 & (\text{cote/surface usinée}) \end{cases}$$

On établit successivement et dans l'ordre les chaînes de cotes des différentes opérations (fig. 44).

- Ebauche face 2

$$Cp = B - U_1 \quad \begin{cases} Cp_m = B_m - U_{1M} = 2,5 \\ U_{1M} - U_{1m} = 0,8 \end{cases}$$

- Ebauche face 1

$$Cp = U_1 - U_2 \quad \begin{cases} Cp_m = U_{1m} - U_{2M} = 2,5 \\ U_{2M} - U_{2m} = 0,2 \end{cases}$$

- Finition face 2

$$Cp = U_2 - U_3 \quad \begin{cases} Cp_m = U_{2m} - U_{3M} = 0,5 \\ U_{3M} - U_{3m} = 0,2 \end{cases}$$

- Finition face 1

$$Cp = U_3 - U_4 \quad \left\{ \begin{array}{l} Cp_m = U_{3m} - U_{4M} = 0,5 \\ U_{4M} - U_{4m} = 0,1 \end{array} \right.$$

Comme on connaît $U_4 = 30_{-0,1}^0$, On obtient successivement, en remontant,

$$\begin{array}{l} U_{3m} = U_{4M} + 0,5 = 30 + 0,5 = 30,5 \\ U_{3M} = U_{3m} + 0,2 = 30,5 + 0,2 = 30,7 \end{array} \quad \left. \vphantom{\begin{array}{l} U_{3m} \\ U_{3M} \end{array}} \right\} U_3 = 30,5_{0}^{+0,2}$$

$$\begin{array}{l} U_{2m} = U_{3M} + 0,5 = 30,7 + 0,5 = 31,2 \\ U_{2M} = U_{2m} + 0,2 = 31,2 + 0,2 = 31,4 \end{array} \quad \left. \vphantom{\begin{array}{l} U_{2m} \\ U_{2M} \end{array}} \right\} U_2 = 31,2_{0}^{+0,2}$$

$$\begin{array}{l} U_{1m} = U_{2M} + 2,5 = 31,4 + 2,5 = 33,9 \\ U_{1M} = U_{1m} + 0,8 = 33,9 + 0,8 = 34,7 \end{array} \quad \left. \vphantom{\begin{array}{l} U_{1m} \\ U_{1M} \end{array}} \right\} U_1 = 33,9_{0}^{+0,8}$$

$$B_m = U_{1M} + 2,5 = 34,7 + 2,5 = 37,2 \quad \dots \quad B = 37,2 \text{ min}$$

Comme on peut le voir, ce genre d'analyse permet de *déterminer les cotes minimales du brut*. Les cotes maximales dépendent alors de la précision que l'on peut attendre du brut en fonction de son mode d'élaboration (voir chapitre 3). Ainsi, si $IT(B) = 2\text{mm}$, on aura

$$B = 37,2_{0}^{+2}$$

9. Simulation d'usinage

9.1 - Généralités

La *simulation d'usinage* est l'étude consistant à tracer les chaînes de cotes cumulées de toutes les opérations d'usinage d'une pièce. Elle permet

- De *déterminer toutes les cotes de fabrication*, notamment les cotes d'ébauche.

- De déterminer les *exigences dimensionnelles et géométriques sur le brut*.

- De *vérifier la validité du processus d'usinage envisagé*.

Nous présenterons cette méthode à l'aide d'un exemple. Mais il est peut-être utile de préciser que dans le cas de fabrications différentes mais analogues, la simulation d'usinage peut être informatisée (F.A.O).

9.2 - Problème

Flasque en fonte FT20 (fig. 45). Il s'agit d'usiner les surfaces F1, F2, F3, F4 et les cylindres ou alésages D1, D2, D3, D4. Les surfaces B1, B2, B3 seront laissées à l'état brut. On tiendra compte des tolérances géométriques indiquées dans le tableau de la figure.

9.3 - Processus d'usinage

L'analyse des tolérances de position montre qu'il faudra usiner D1 en prenant B1 comme référence. On usinera alors D2 sans démonter la pièce, pour réaliser la concentricité avec D1. On usinera également l'alésage D4 dans cette sous-phase.

Pour réaliser D3, il faudra retourner la pièce, qui devra prendre appui sur D1 et F2 pour réaliser la tolérance de concentricité.

On adoptera en conséquence le processus suivant:

* Phase 10 - TOURNAGE

- { Appui plan (3 points) sur B3
- { Centrage court sur B1

10.1 - Dressage des ébauches $F1^2$ et $F2^1$

10.2 - Chariotage D2 ($\phi 120^{+0,4}_0$) (La tolérance est large)

10.3 - Chariotage d'ébauche de D1

10.4 - Alésage d'ébauche de D4

10.5 - Dressage de finition de $F1^2$ et F2 (Cote de liaison au brut à déterminer et condition $4 \pm 0,1$)

10.6 - Chariotage de finition de D1 ($\phi 64^{0}_{-0,03}$)

10.7 - Alésage de finition de D4.

* Phase 20 - TOURNAGE

- { Appui plan (3 points) sur F2
- { Centrage court sur D1

20.1 - Dressage d'ébauche de F3

20.2 - Dressage d'ébauche de F4

20.3 - Dressage de finition de F3 ($10^{+0,1}_0$)

20.4 - Dressage de finition de F4 ($50^{+0,2}_0$)

20.5 - Chariotage de finition de D3 ($\phi 80^{0}_{-0,5}$)

concentricité seront avantageusement usinées sans démontage intermédiaire. On dit que de telles surfaces sont associées. C'est en vertu de ce principe d'association que nous avons été conduits à aléser D4 dans le même montage que D1, D2, F2: les tolérances de positions correspondantes sont en effet très serrées.

Signalons enfin que par axe B1, il faut entendre l'axe du brut sur toute sa longueur. La condition de centrage de D1 sur B1 peut s'obtenir ainsi: ayant monté la pièce dans le mandrin, on la serre légèrement. On place alors un comparateur sur la surface cylindrique d'extrémité, et on fait tourner le mandrin à la main. La variation de mesure du comparateur vaut deux fois l'excentrement suivant cet axe, soit $2 e_1$ (fig. 49). On peut corriger ce défaut en donnant des coups de marteau doux sur la pièce. On procède de même après un quart de tour, ce qui permet d'obtenir $2e_2$. Le montage est correct lorsque

$$e_1^2 + e_2^2 \leq (0,5 + 1,5)^2 .$$

9.5 - Cotes radiales

Voir figure 50

9.6 - Brut minimal

Le brut minimal est représenté en figure 51. Les tolérances de moulage sont des zones à dessiner juste à l'extérieur de ce brut minimal, en fonction des indications du chapitre 3.

9.4 - Cotes axiales

Les chaînes de cotes et équations correspondantes sont indiquées en figure 46.

On peut en déduire les valeurs suivantes

$$U_8 = 50_0^{+0,2}$$

$$U_7 = 10_0^{+0,1}$$

$$U_6 = 50,7_0^{+0,2}$$

$$U_5 = 10,6_0^{+0,2}$$

$$U_4 = 4 \pm 0,1$$

$$U_3 = 0,5_0^{+0,2}$$

$$U_2 = 4,1_0^{+0,2}$$

$$(c) \rightarrow U_{1m} = 2 + U_{3M} + U_{5M} = 2 + 0,7 + 10,8 = 13,5$$
$$U_1 = 13,5_0^{+0,8}$$

$$(d) \rightarrow B_{3m} = 2 - U_{1m} + U_{3M} + U_{6M} = 2 - 13,5 + 0,7 + 50,9 = 40,1$$
$$B_3 = 40,1 \text{ min}$$

$$(b) \rightarrow B_{2m} = 2 + U_{1M} + U_{2M} = 2 + 14,3 + 4,3 = 20,6$$
$$B_2 = 20,6 \text{ min}$$

$$(a) \rightarrow B_{1m} = 2 + U_{1M} = 2 + 14,9 = 16,3$$
$$B_1 = 16,3 \text{ min.}$$

9.5 - Cotes radiales

Les tolérances de position nécessitent quelques commentaires. Pour un montage donné, toutes les surfaces cylindriques ont le même axe, à savoir, l'axe du tour. Par contre, cet axe peut ne pas coïncider avec un axe prédéfini sur la pièce (fig. 47). Il en découle prendra d'un côté de la pièce un copeau ($R_p - R - e$) et de l'autre, un copeau ($R_p - R + e$). Pour obtenir un copeau minimal Cp_m , il faudra donc que

$$R_p - R - e \geq Cp_m$$

Par ailleurs, les surfaces qui doivent avoir une bonne

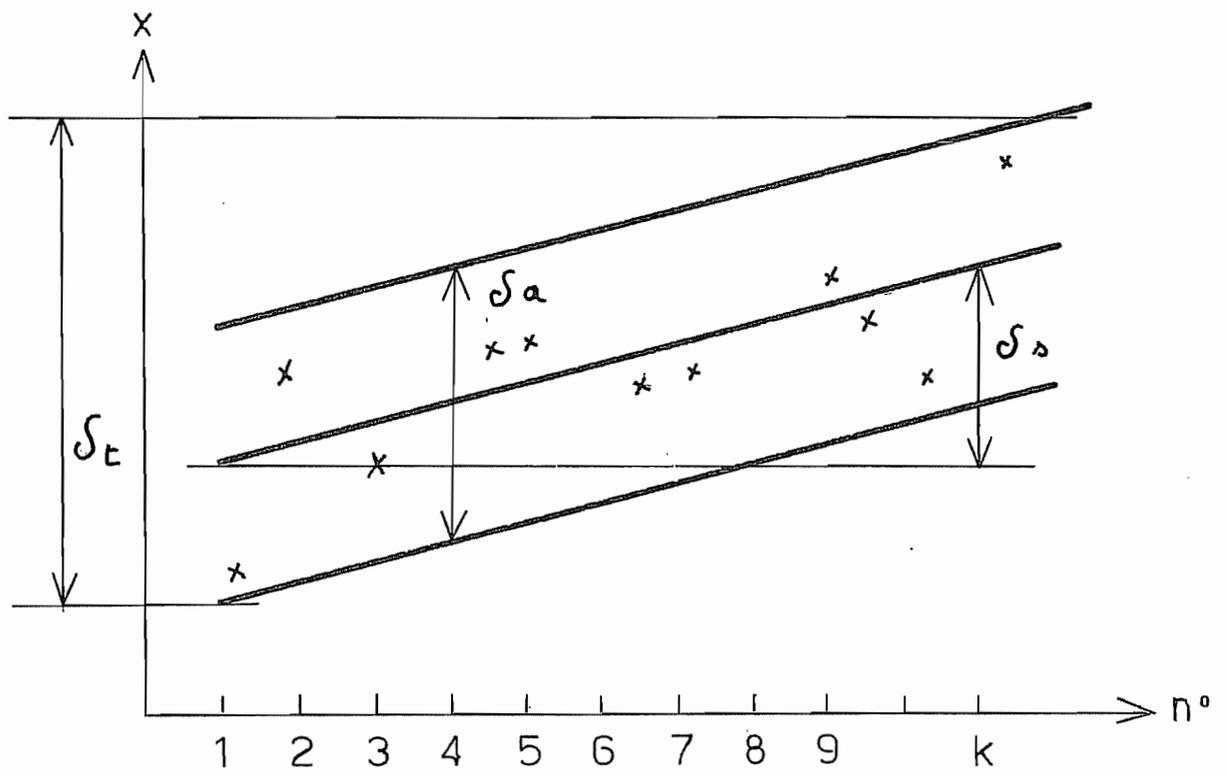


Fig 1

Dispersions en tournage (dressage de face)

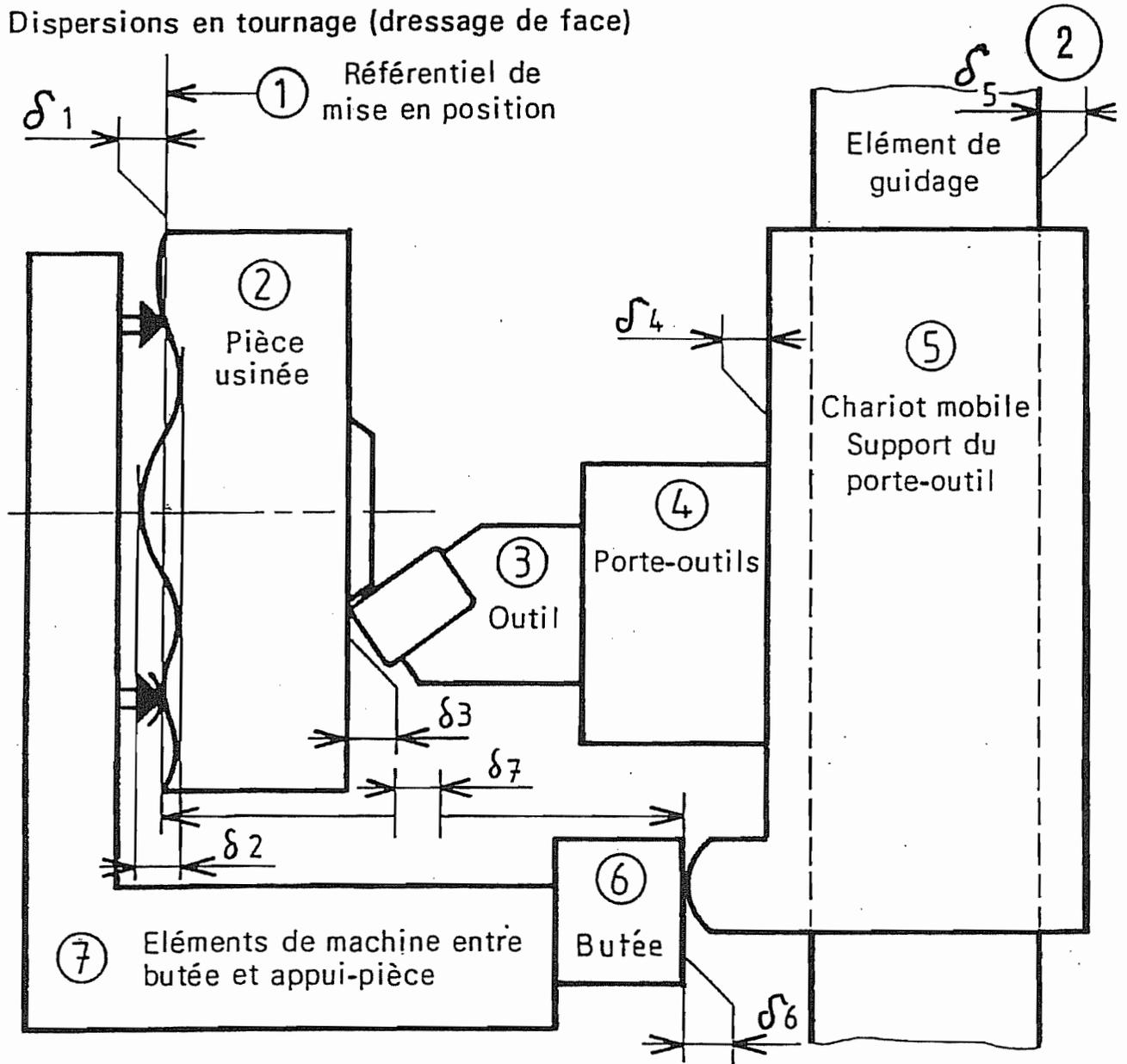


Fig 2

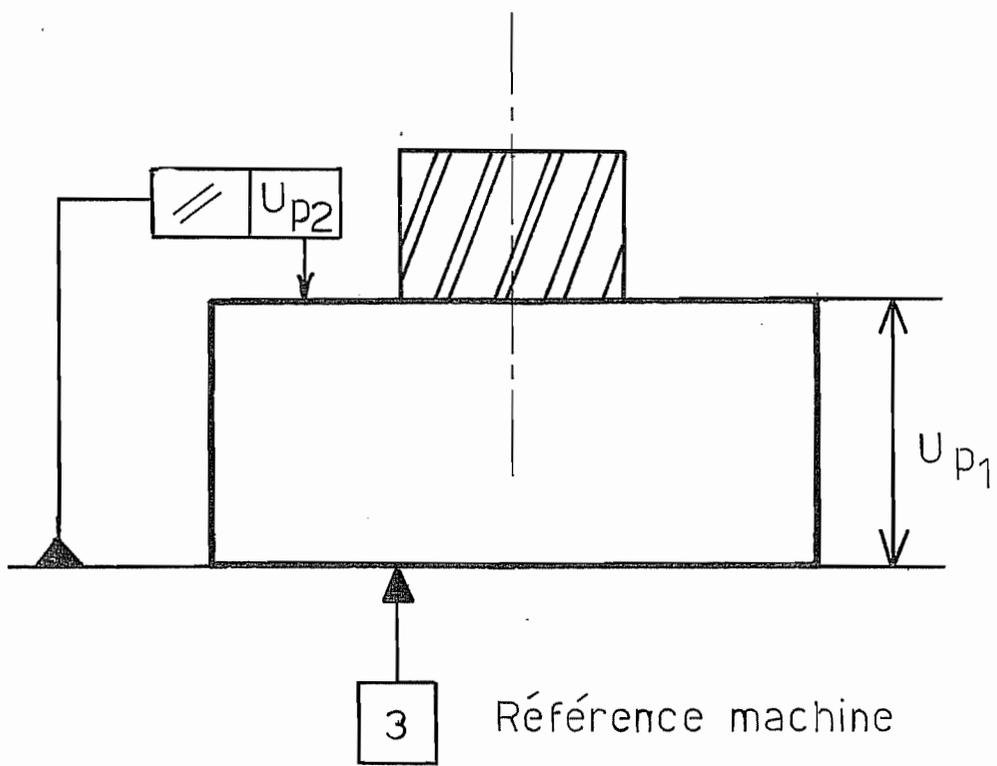
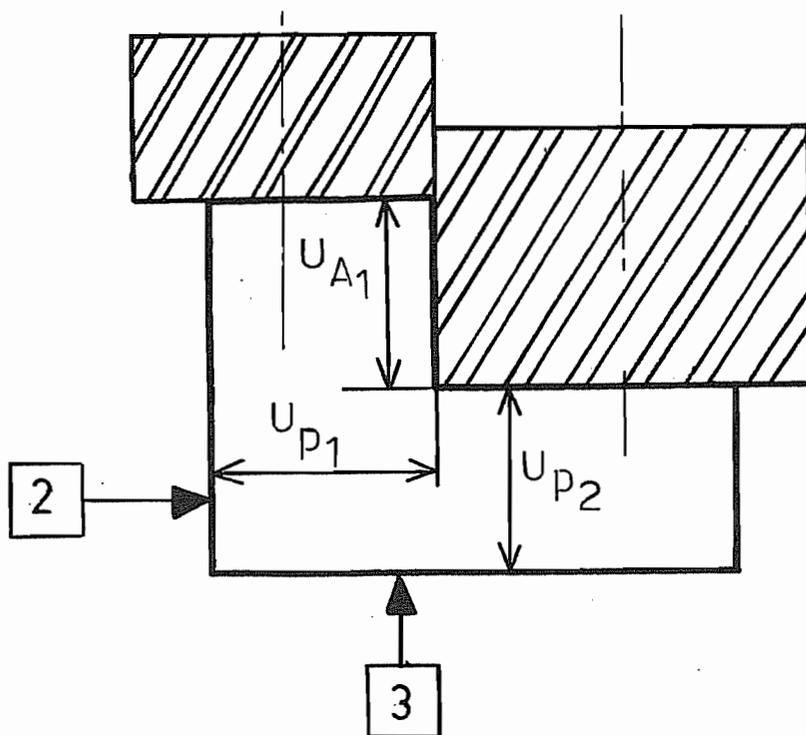


Fig 4

Position 2 de l'outil



Position 1 de l'outil

Fig 5

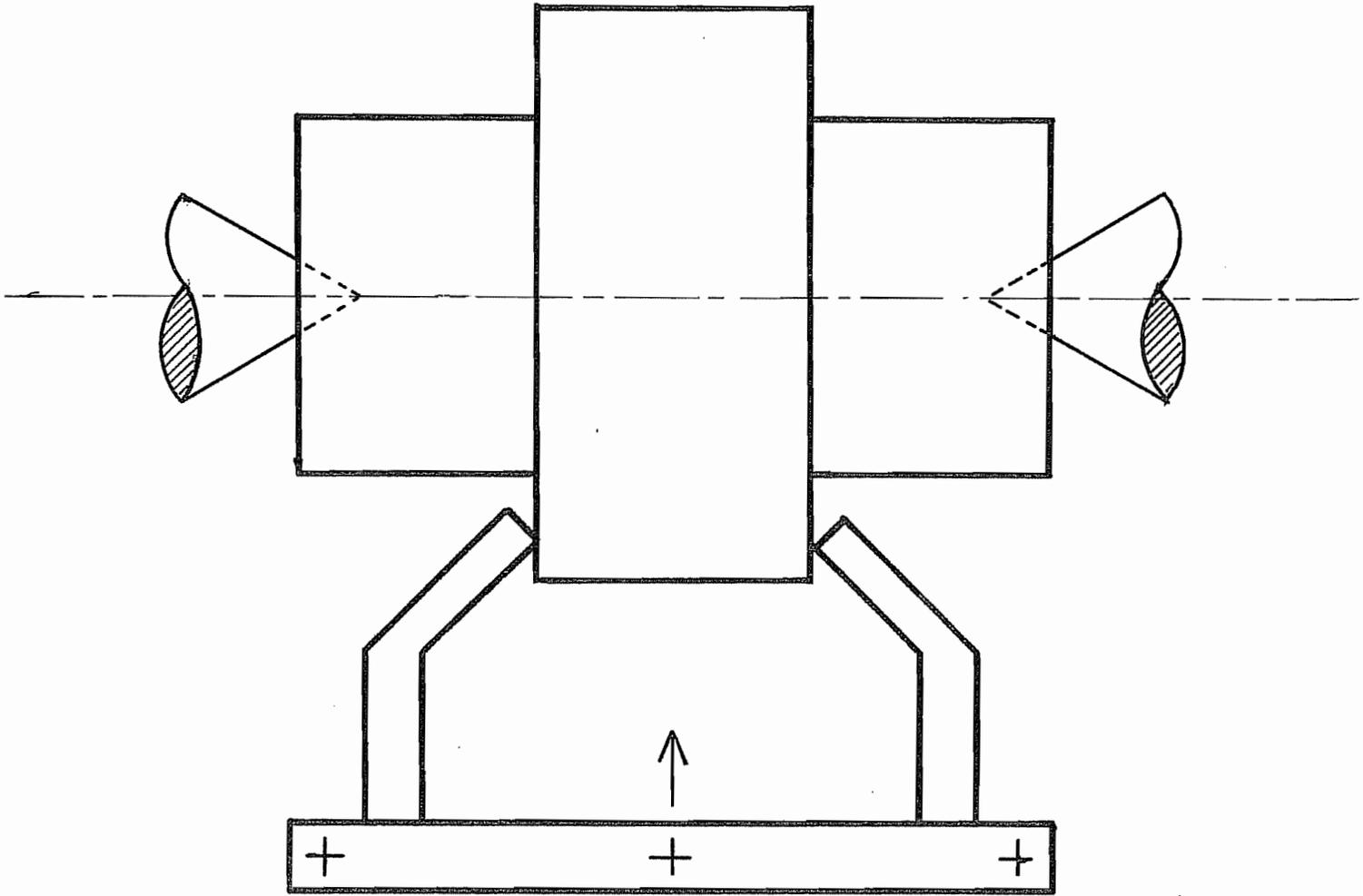


Fig 6

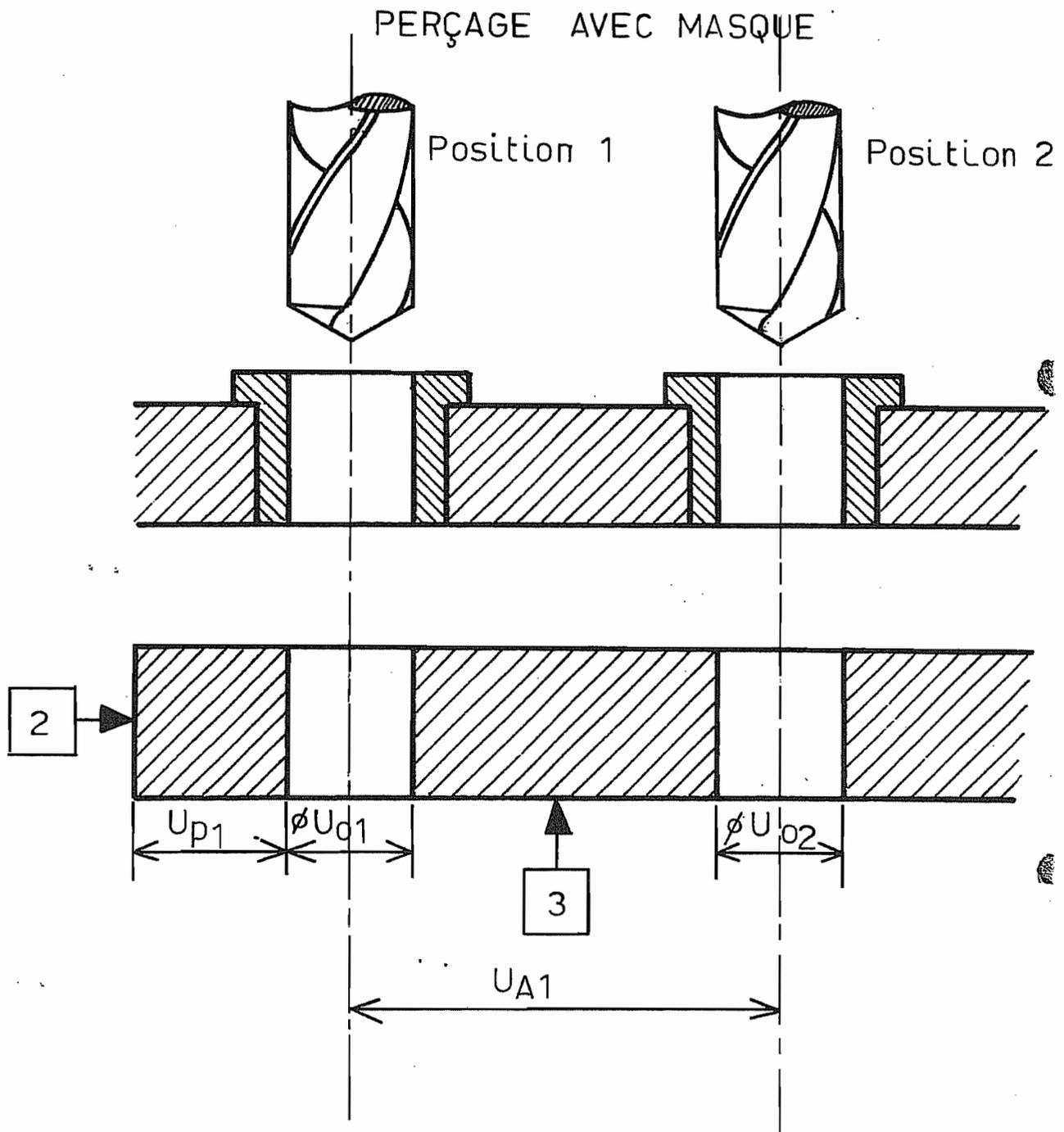


Fig 7

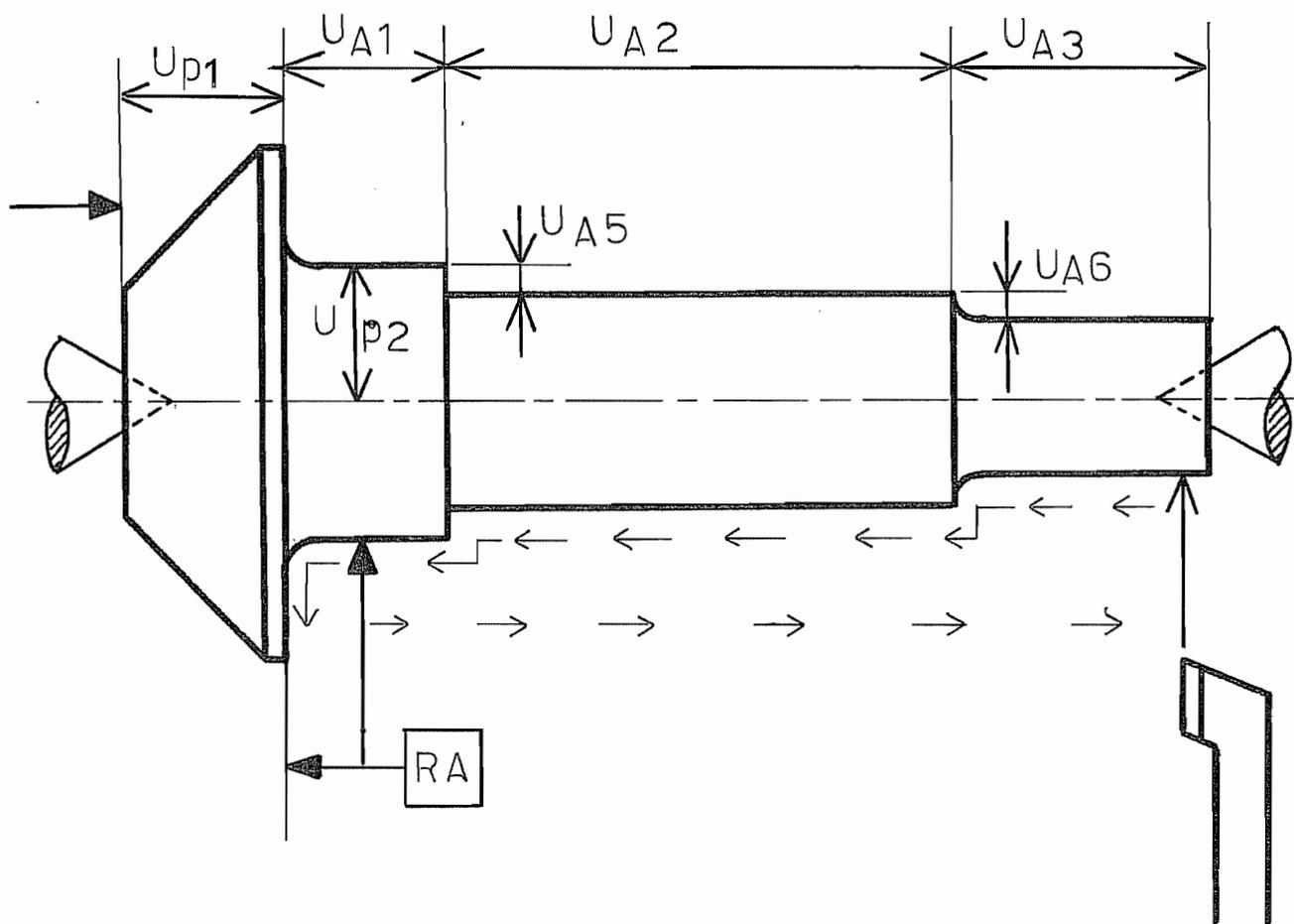


Fig 8

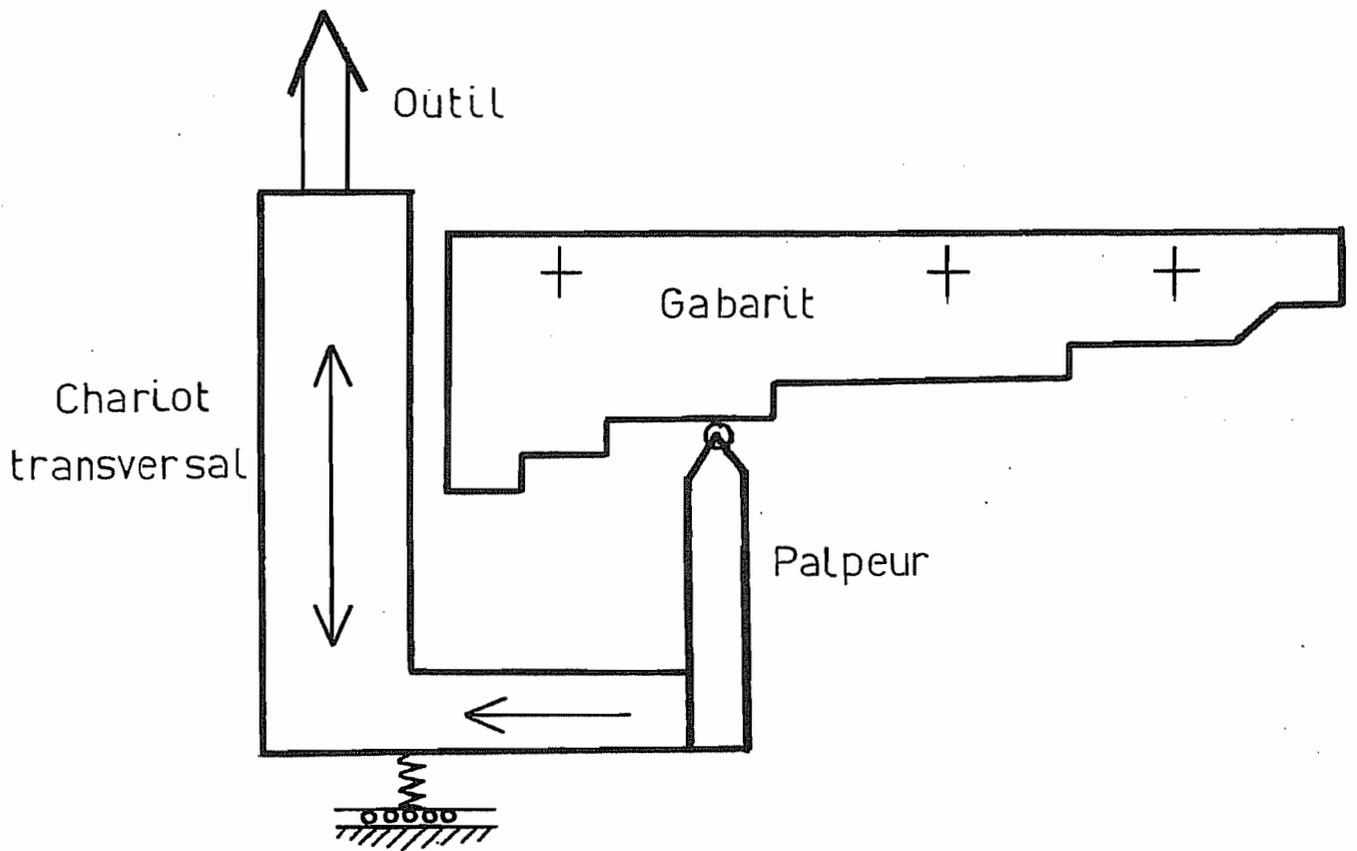


Fig 9

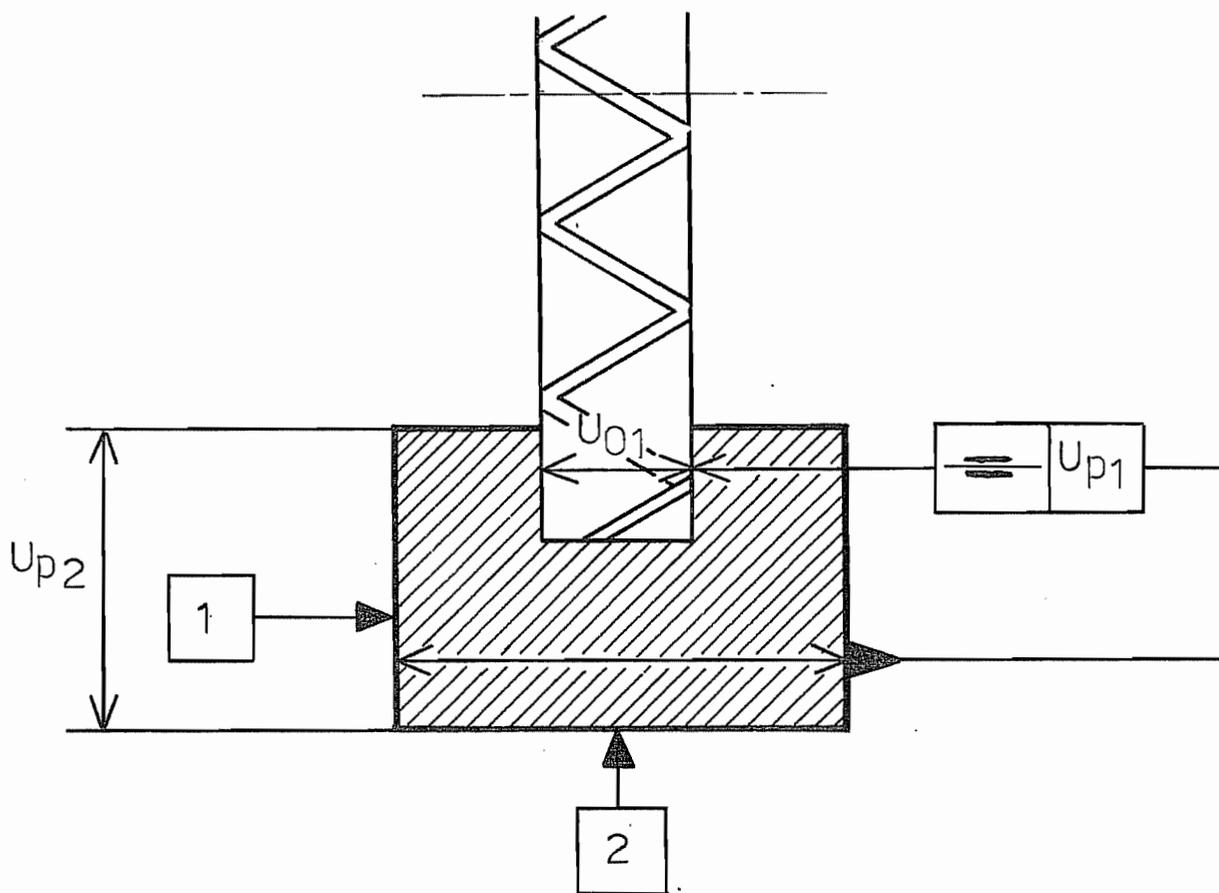


Fig 10

Référentiel

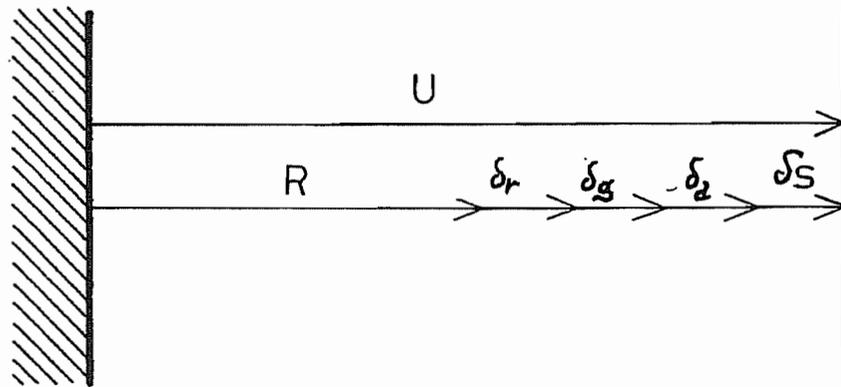


Fig 11

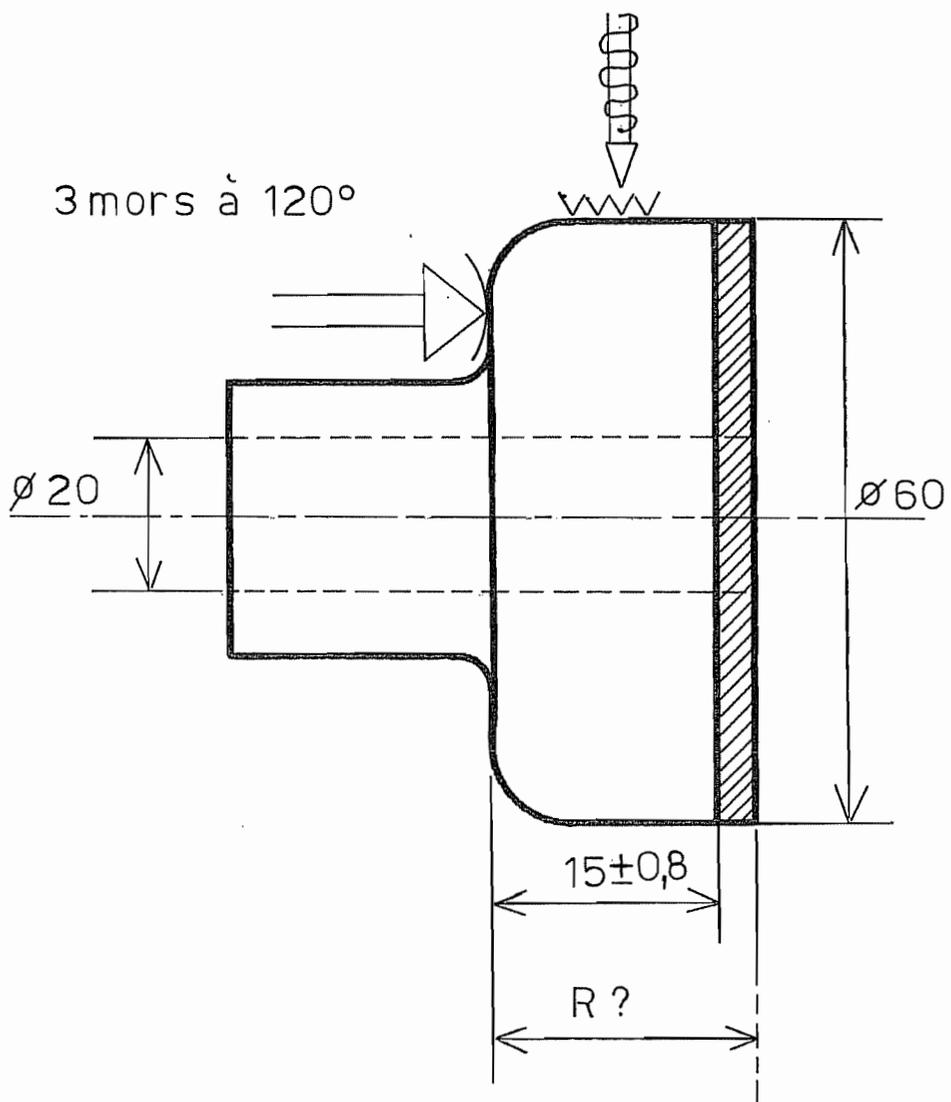


Fig 12

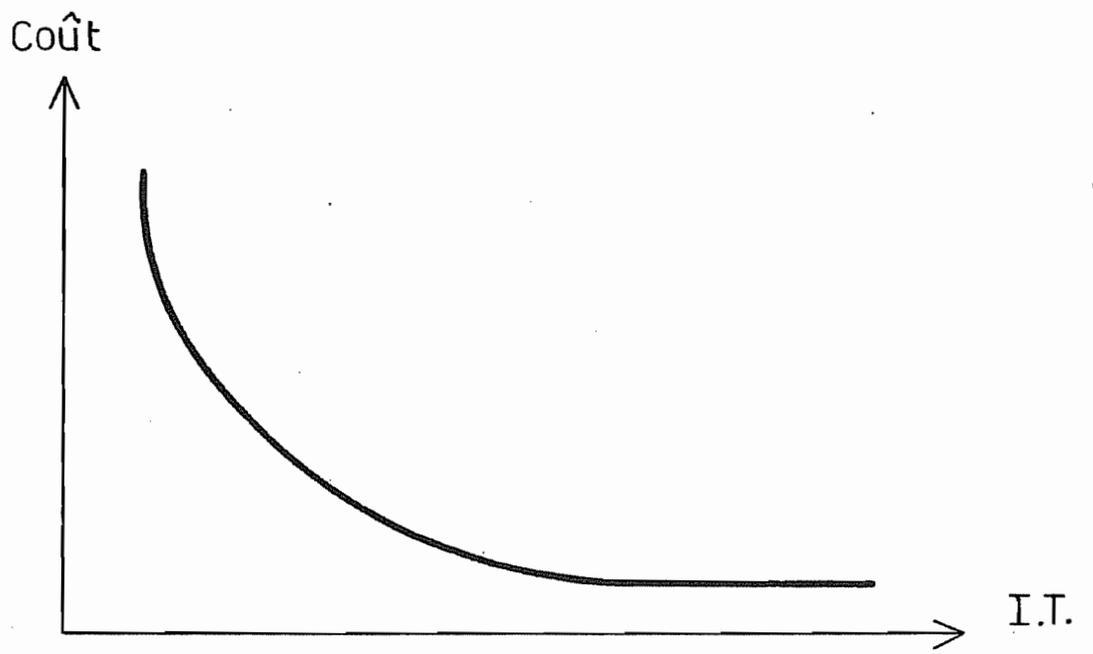


Fig 13

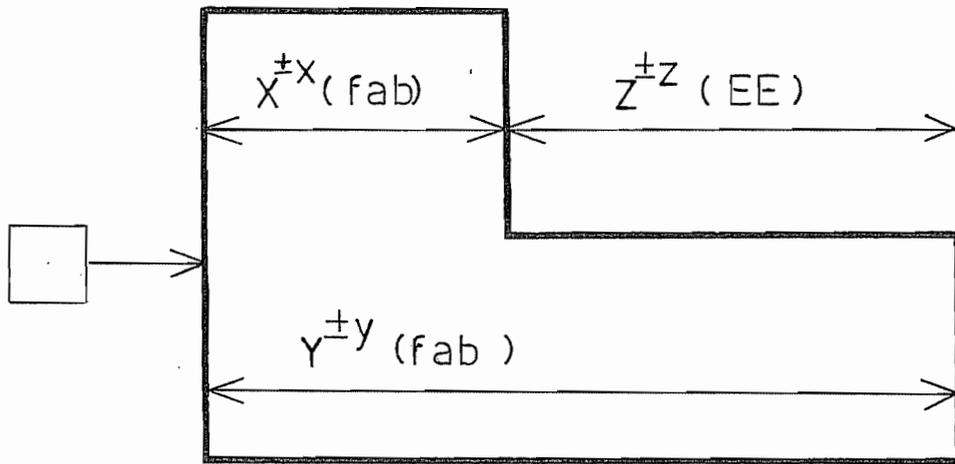
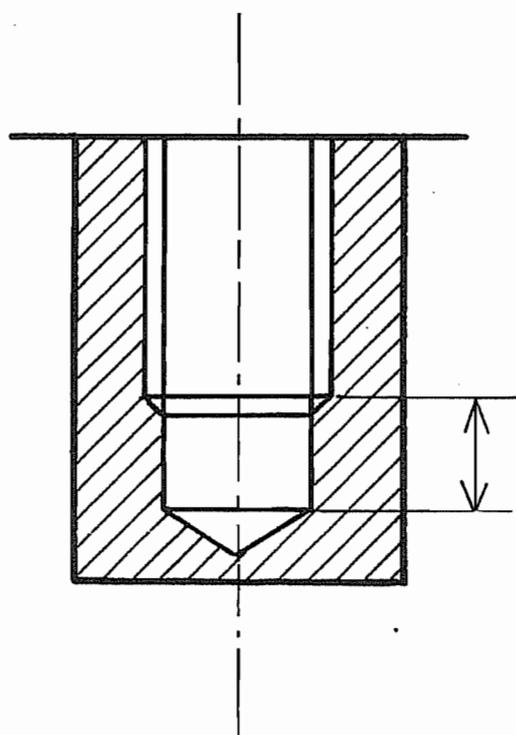
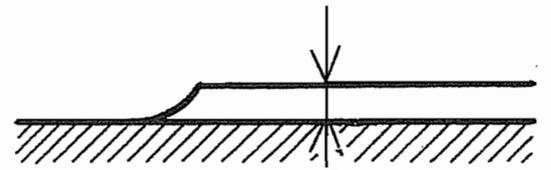


Fig 14



Cote des méthodes



Cote des méthodes

Fig 15

Transfert de cote

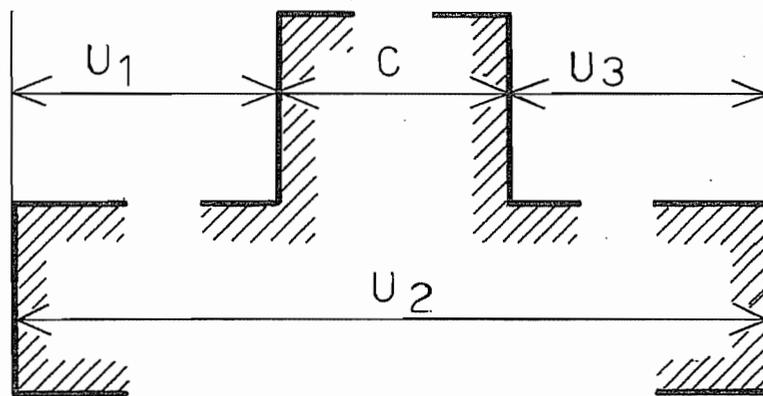
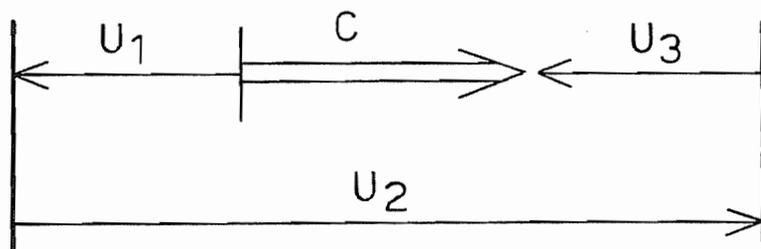


Fig 16



$$C = -U_1 + U_2 - U_3$$

Fig 17

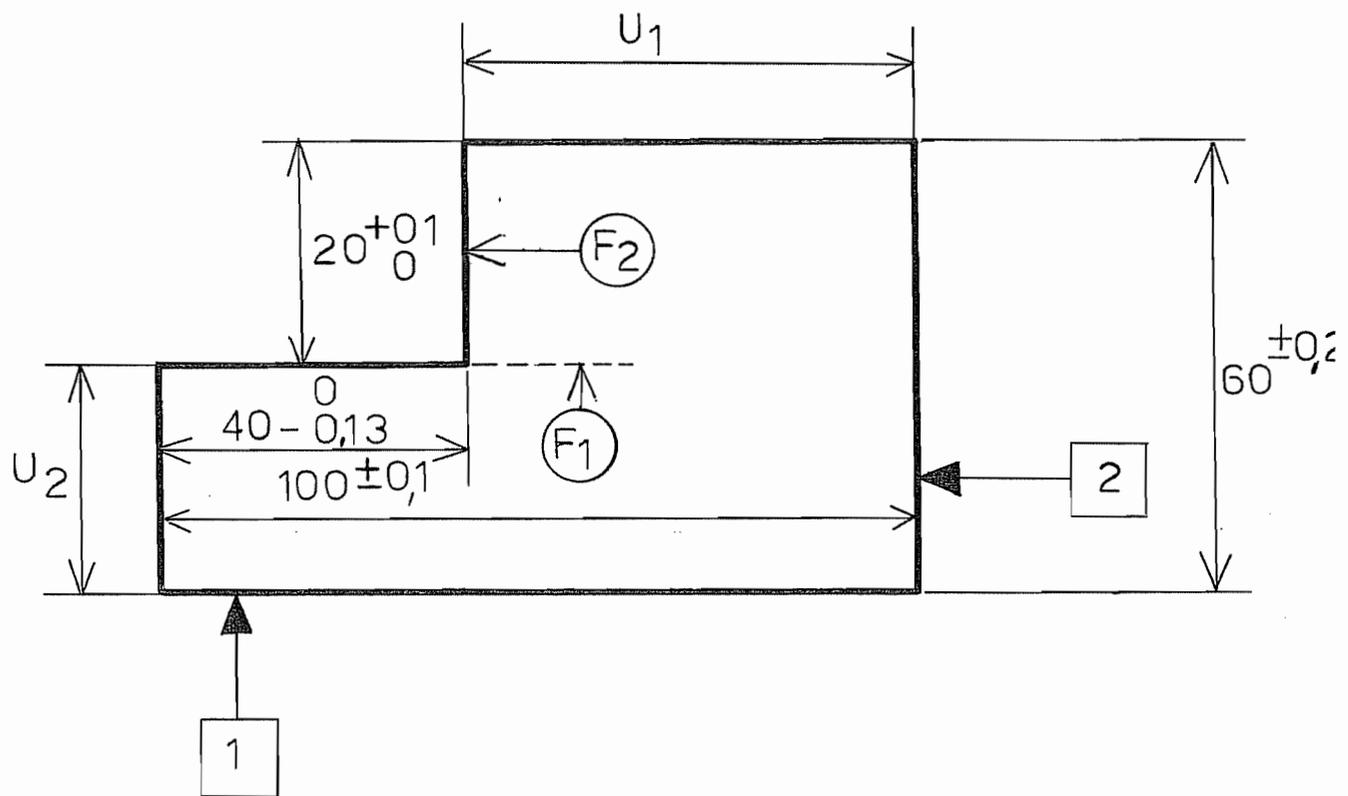


Fig 18

a) Cote U_1

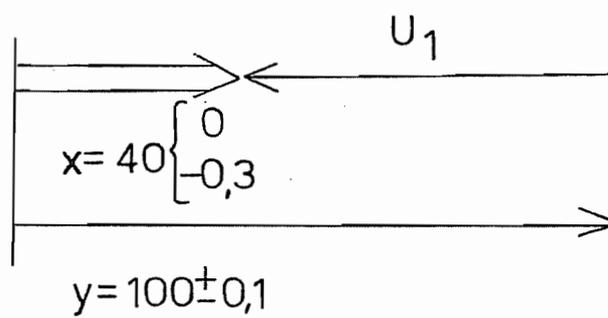


Fig 19

b) Cote U_2

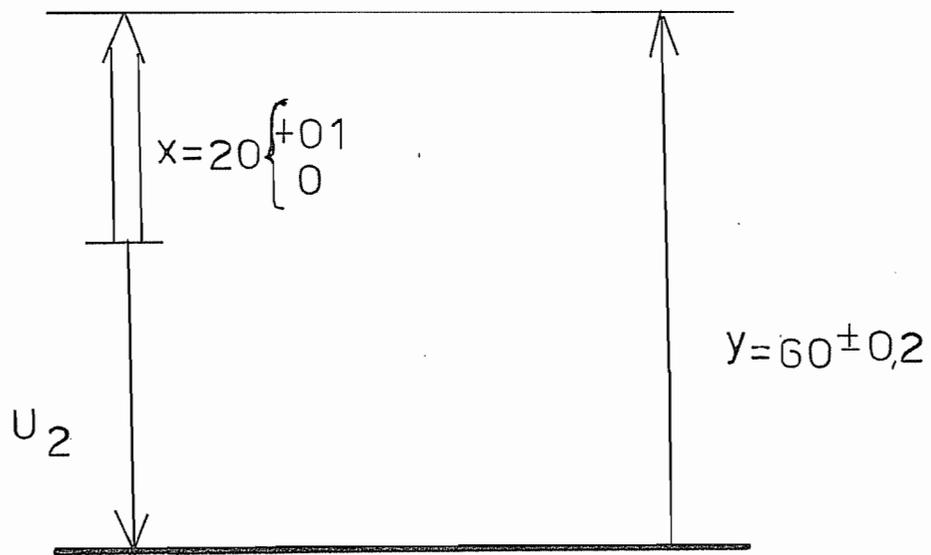


Fig 20

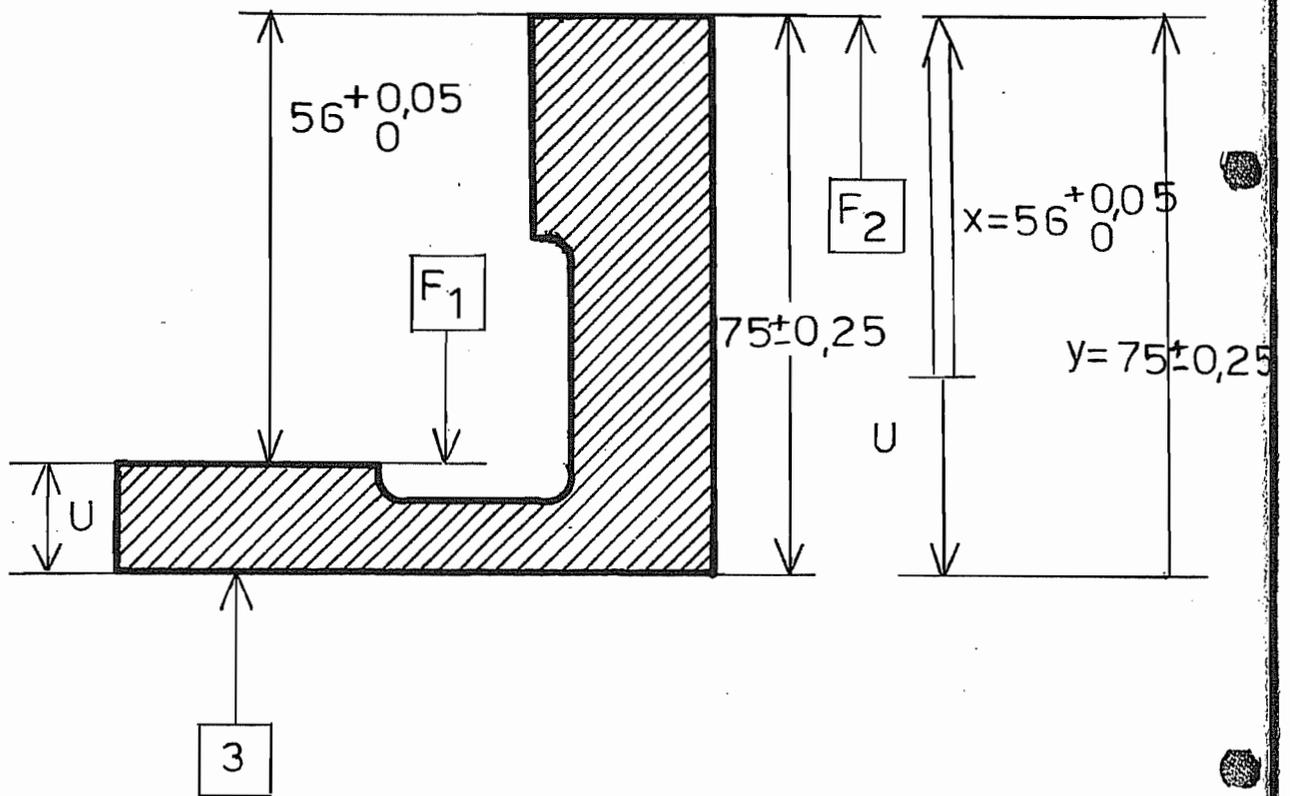


Fig 21

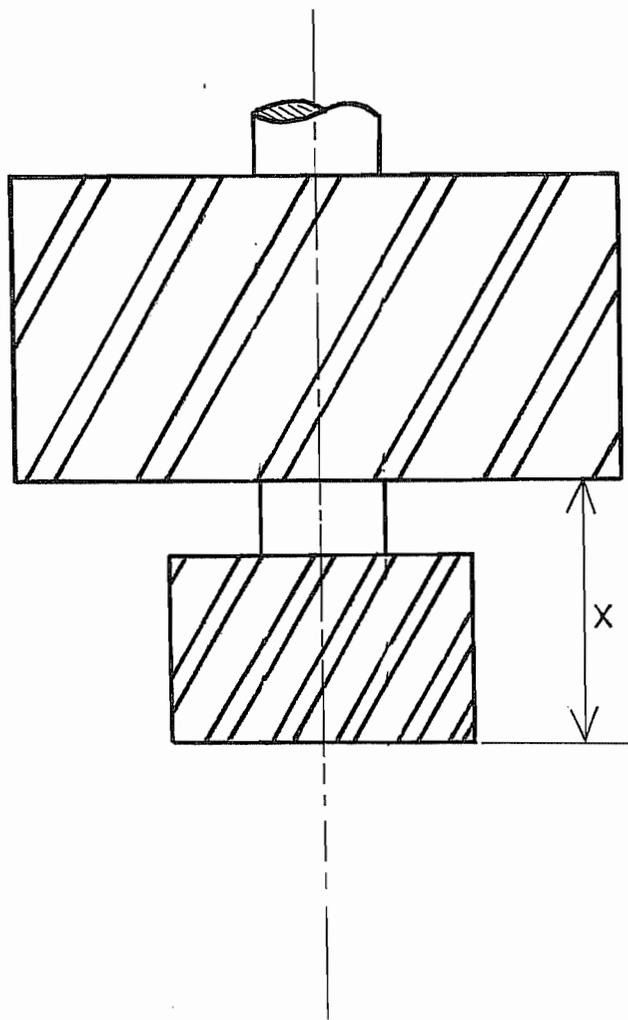


Fig 22

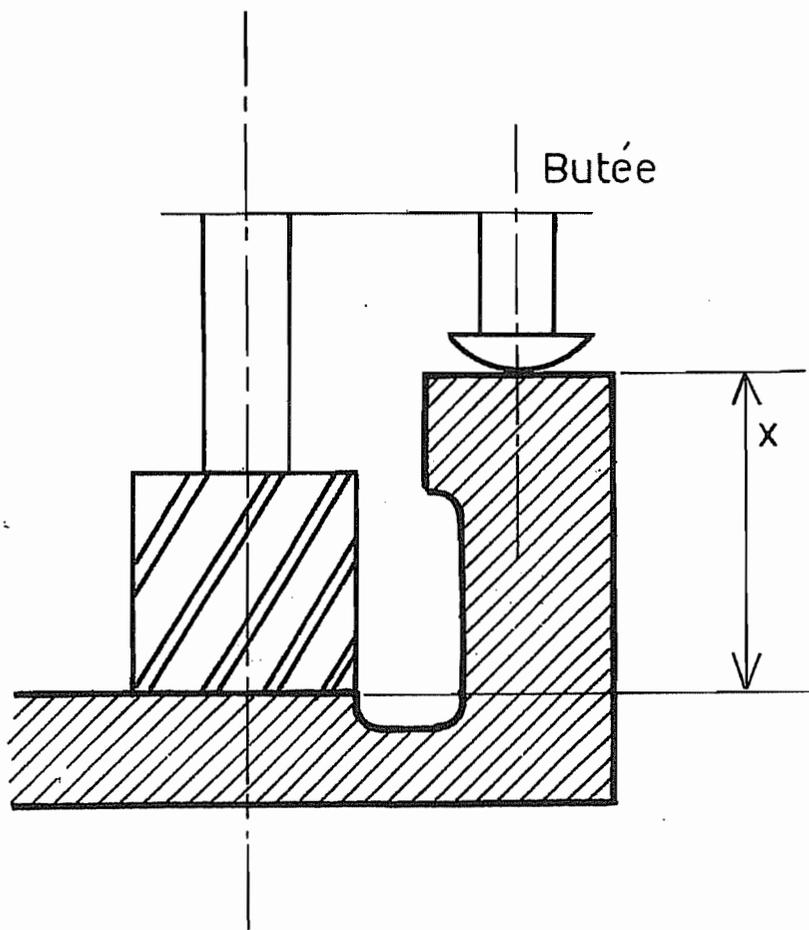


Fig 23

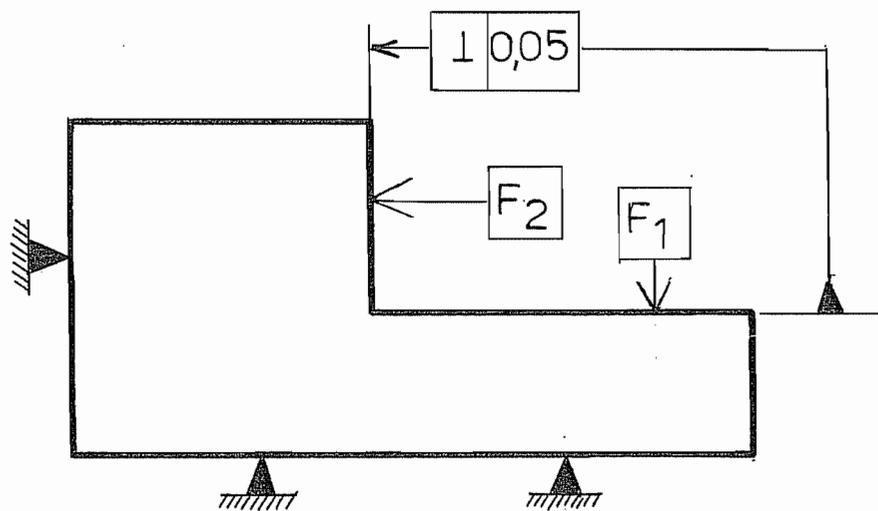


Fig 24

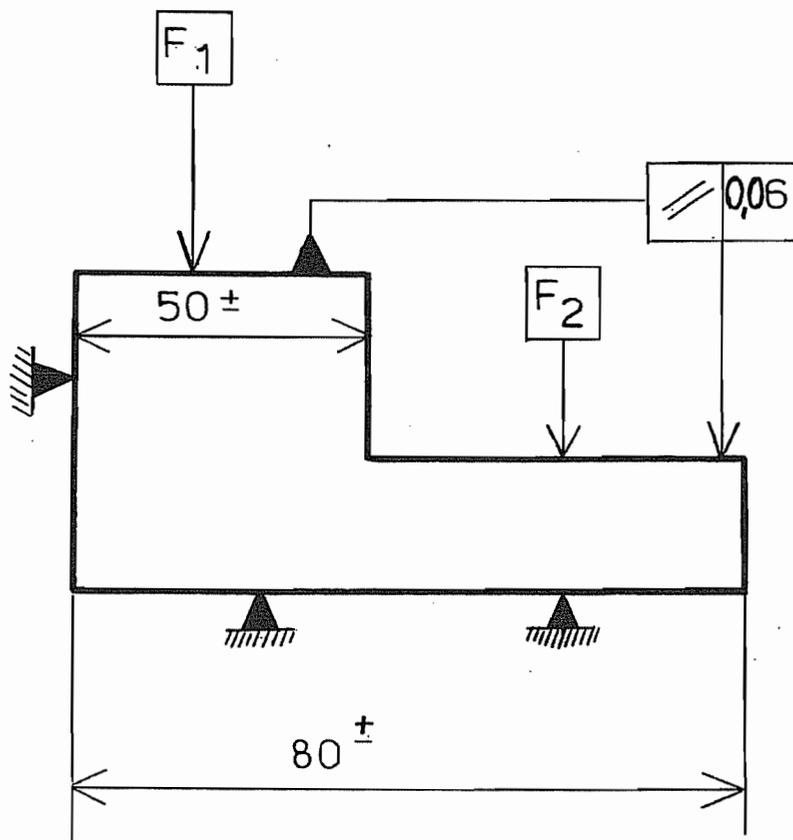


Fig 25

1^{er} étape \rightarrow angle α_1

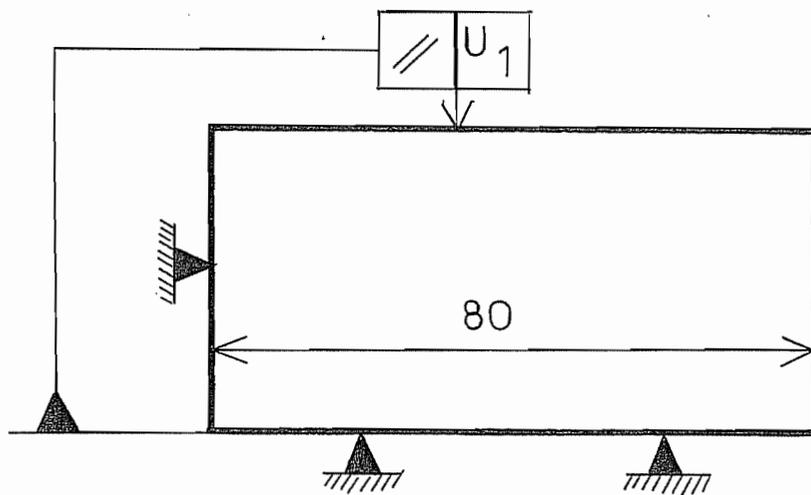


Fig 26

2^e étape → angle α_2

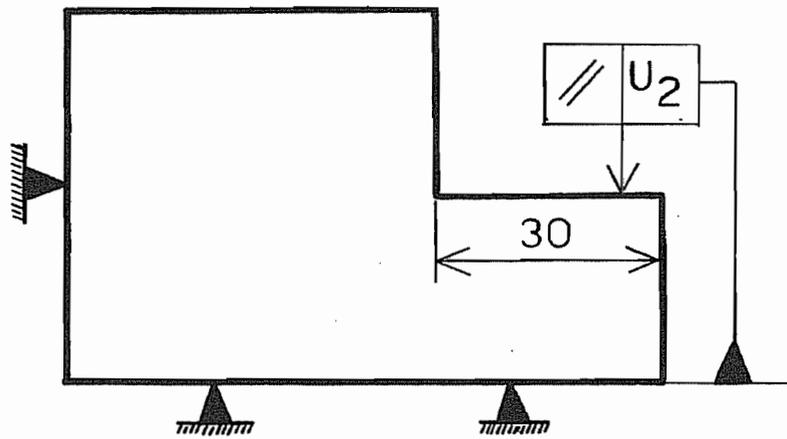


Fig 27

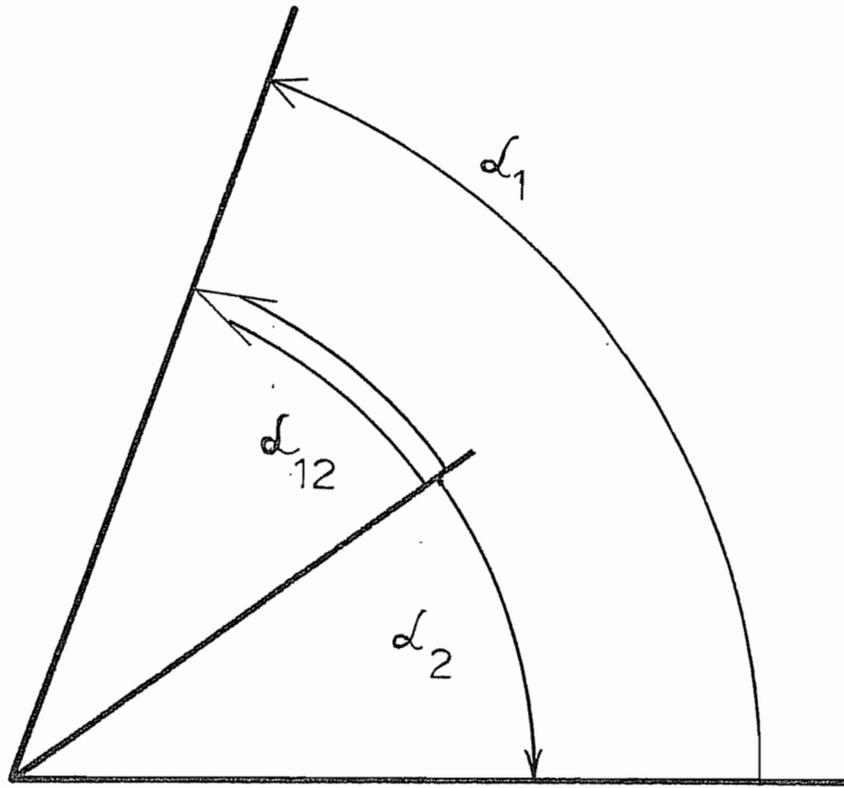


Fig 28

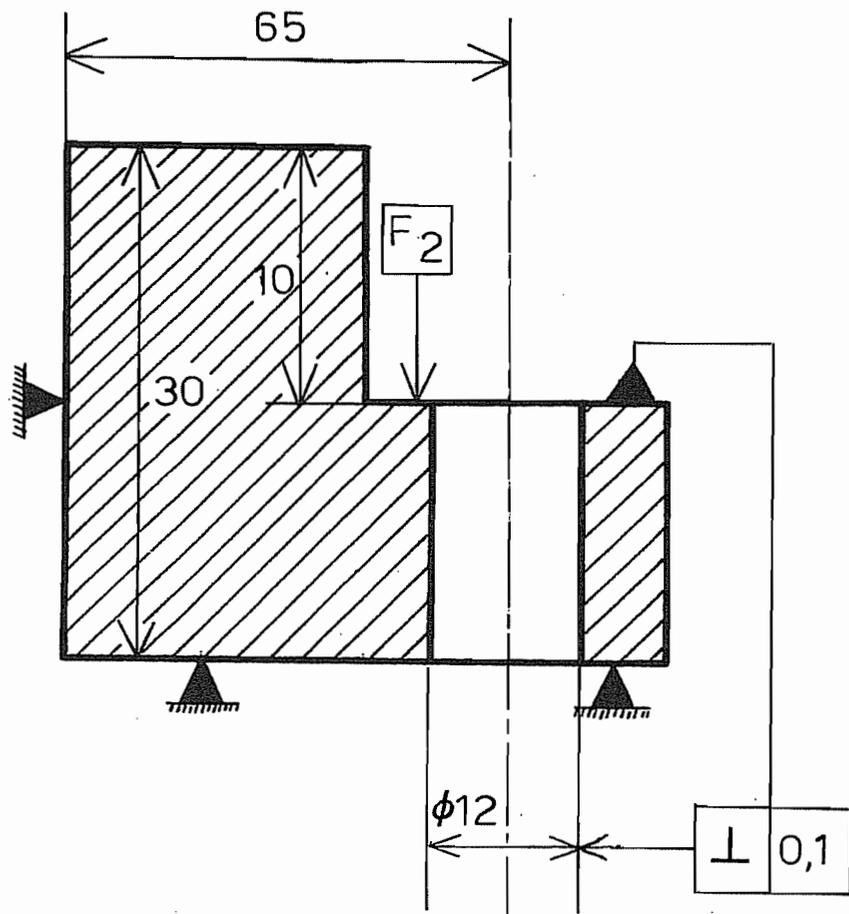


Fig 29

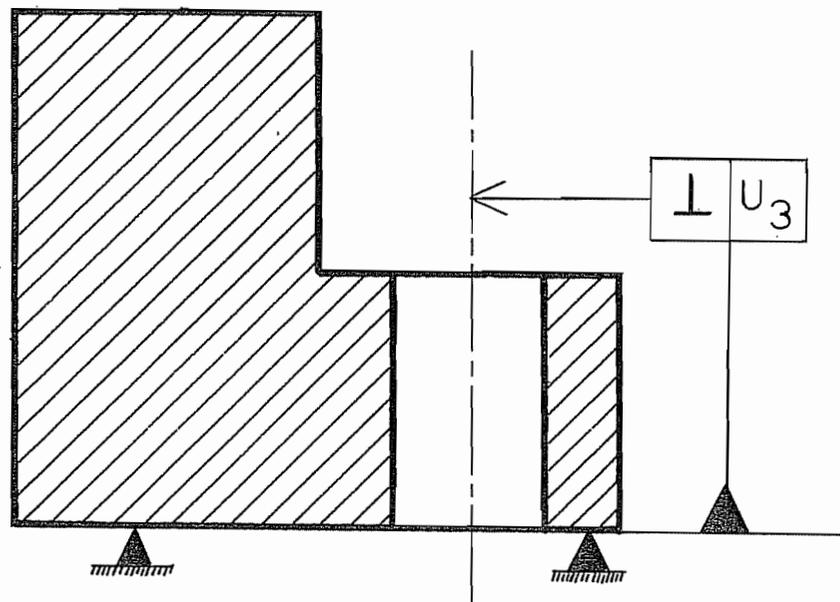


Fig 30

Axe du trou

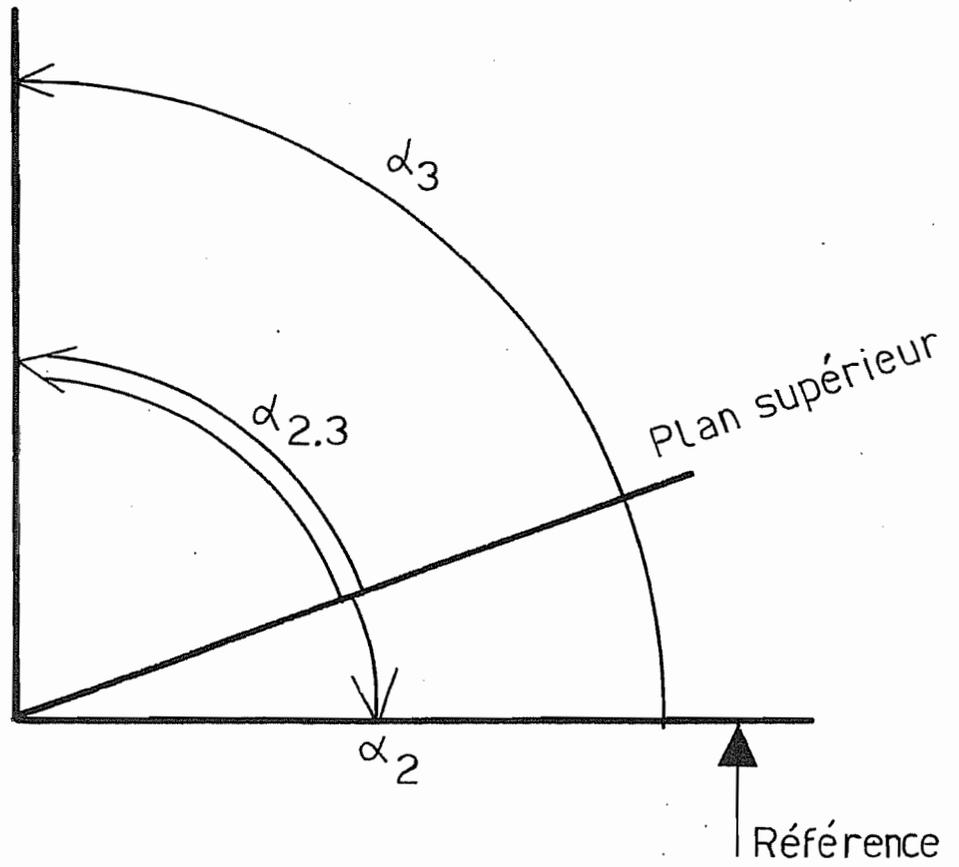


Fig 30 bis

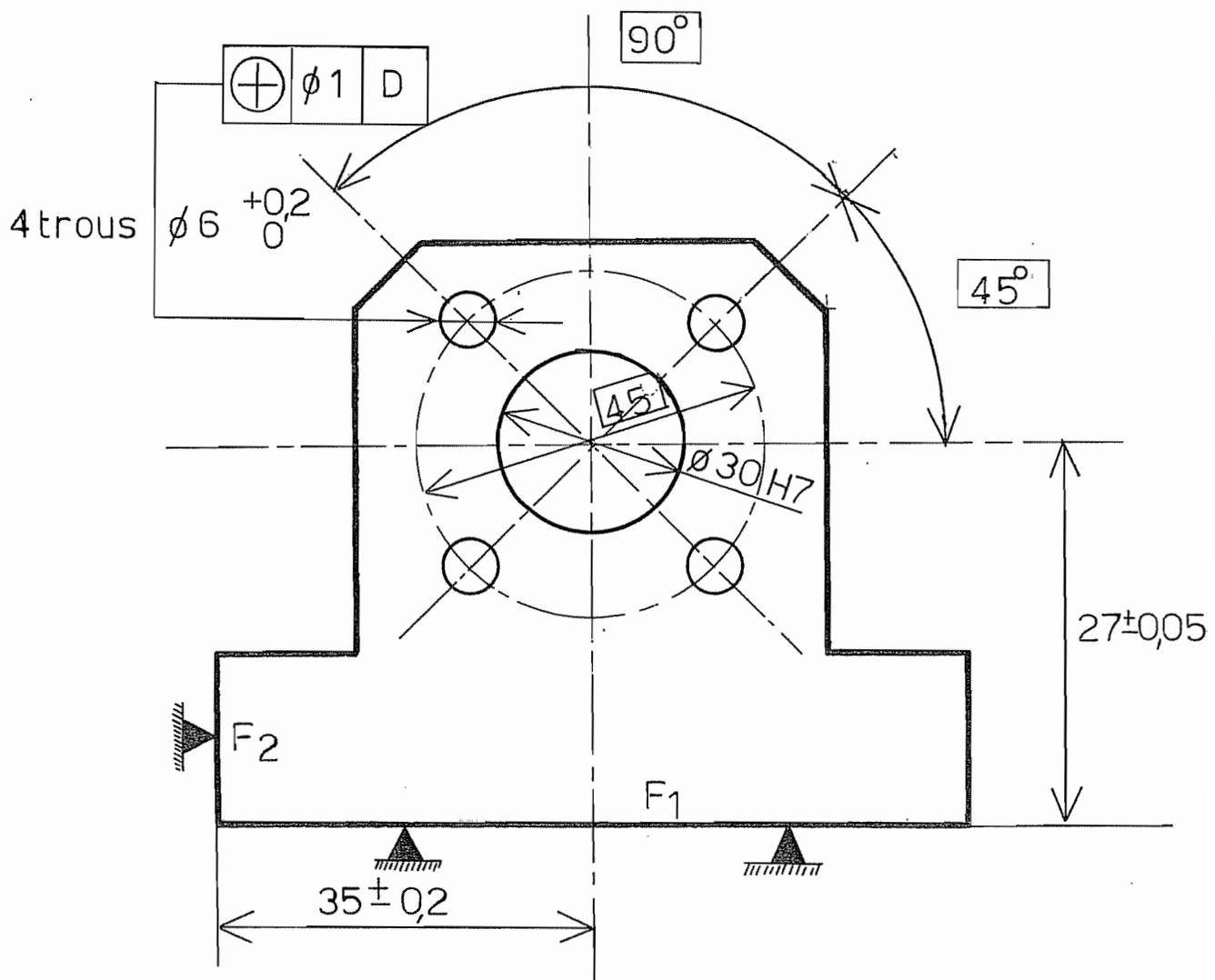


Fig 31

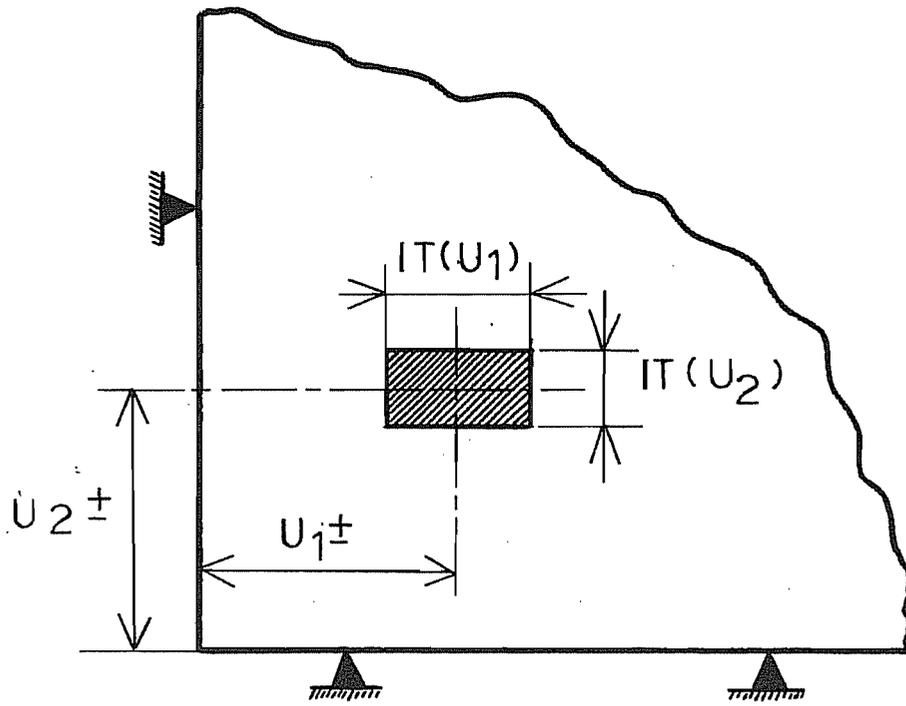


Fig 32

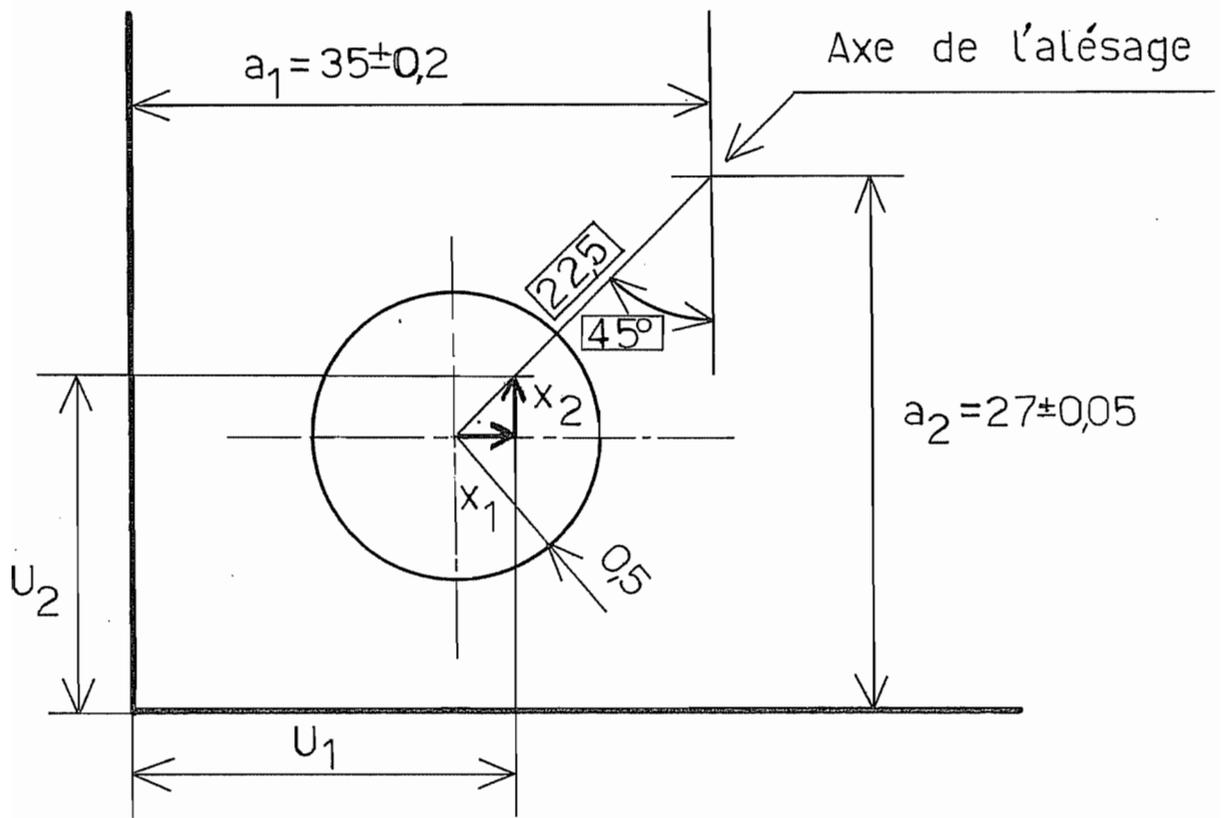


Fig 33

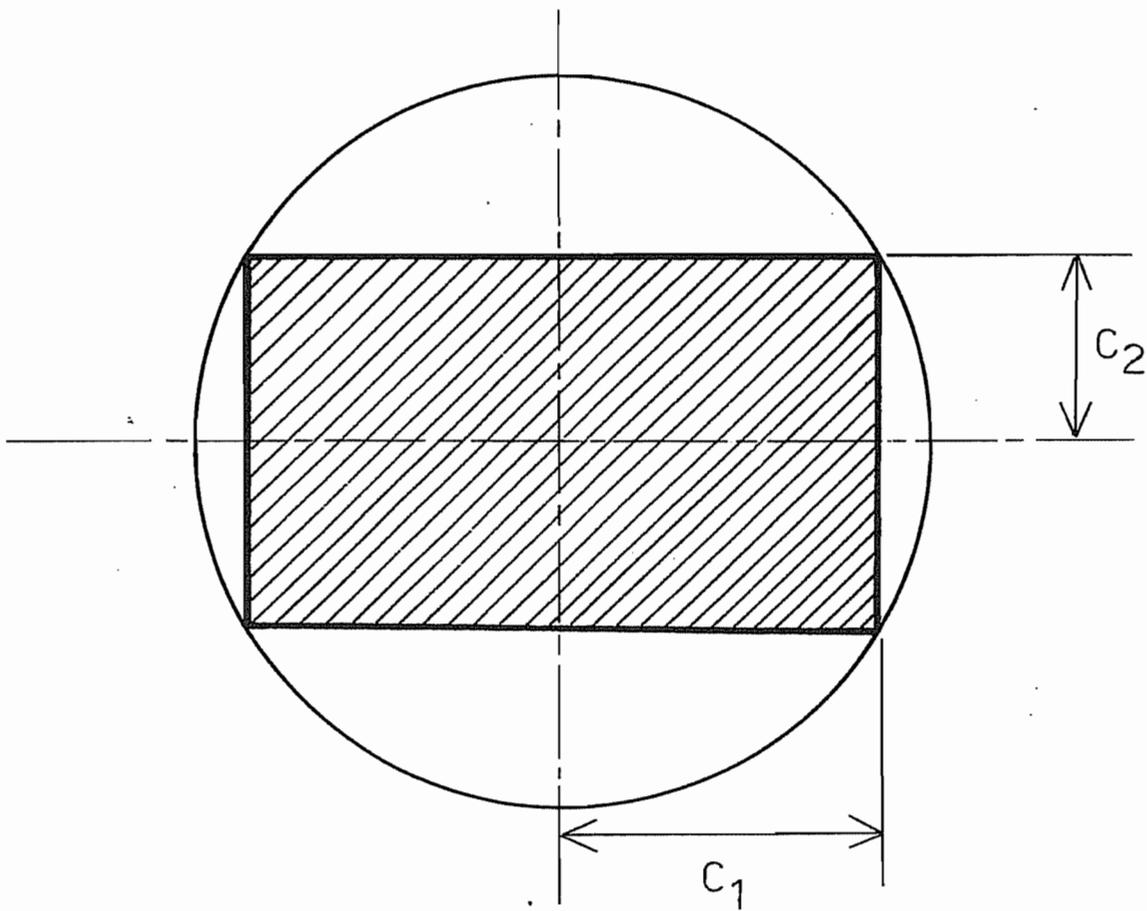


Fig 34

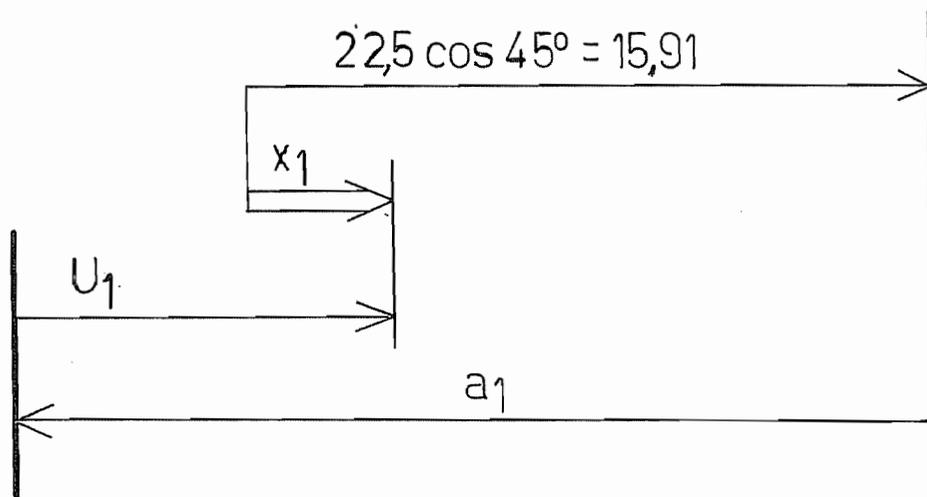


Fig 35

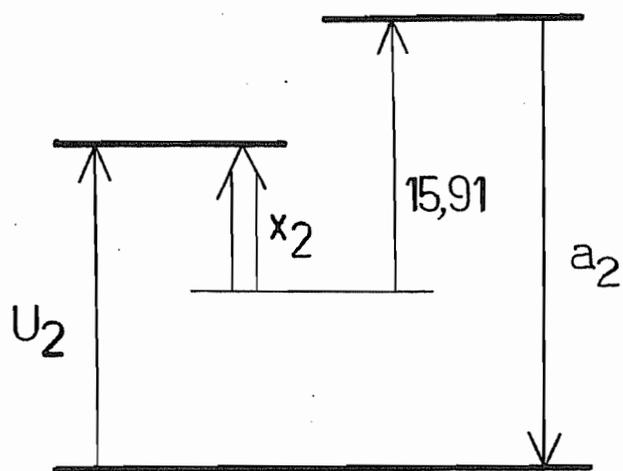


Fig 36

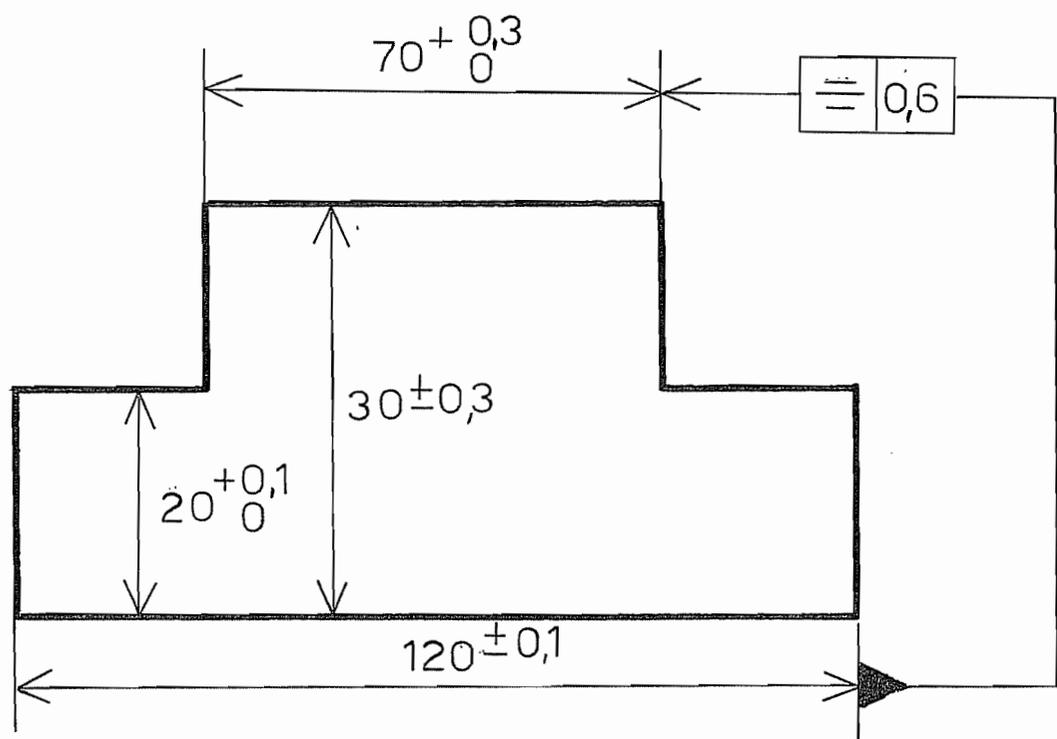


Fig 37

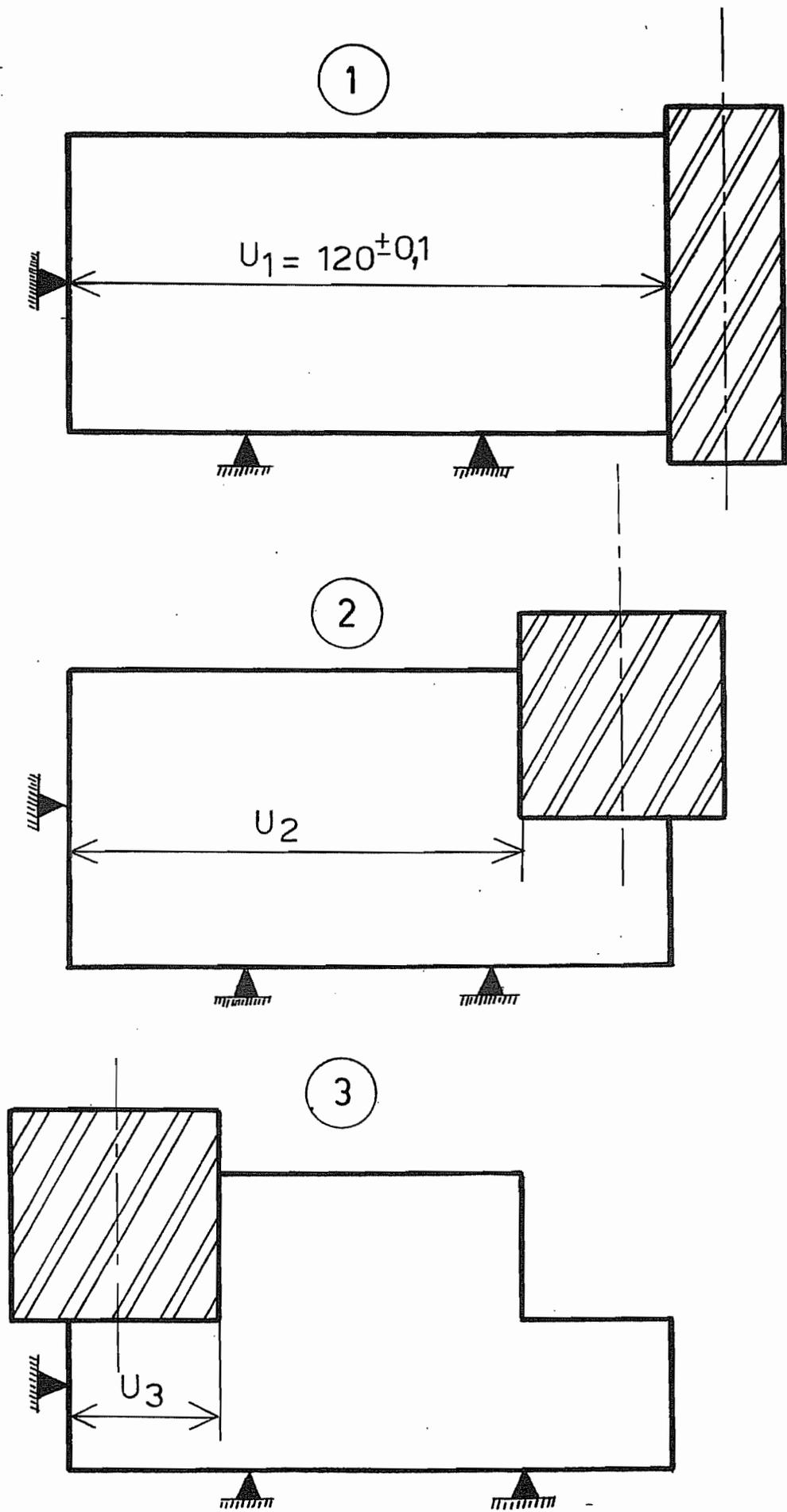


Fig 38

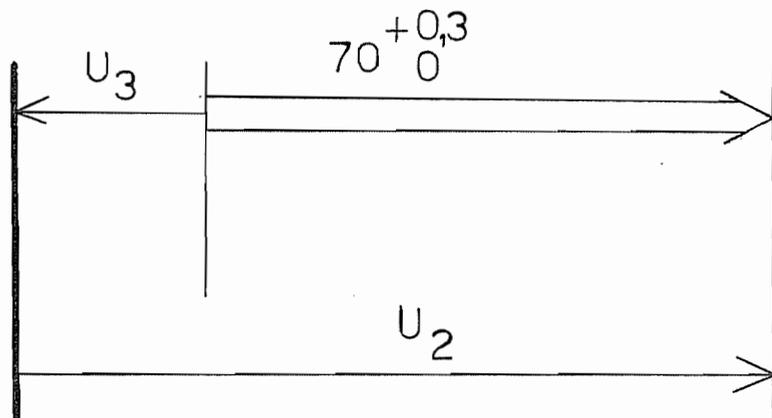


Fig 39

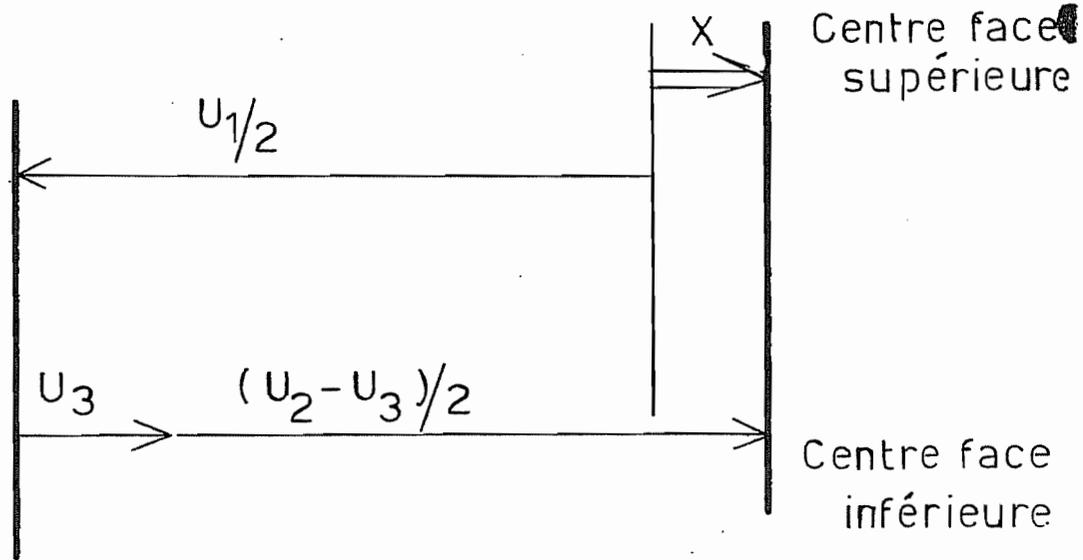


Fig 40

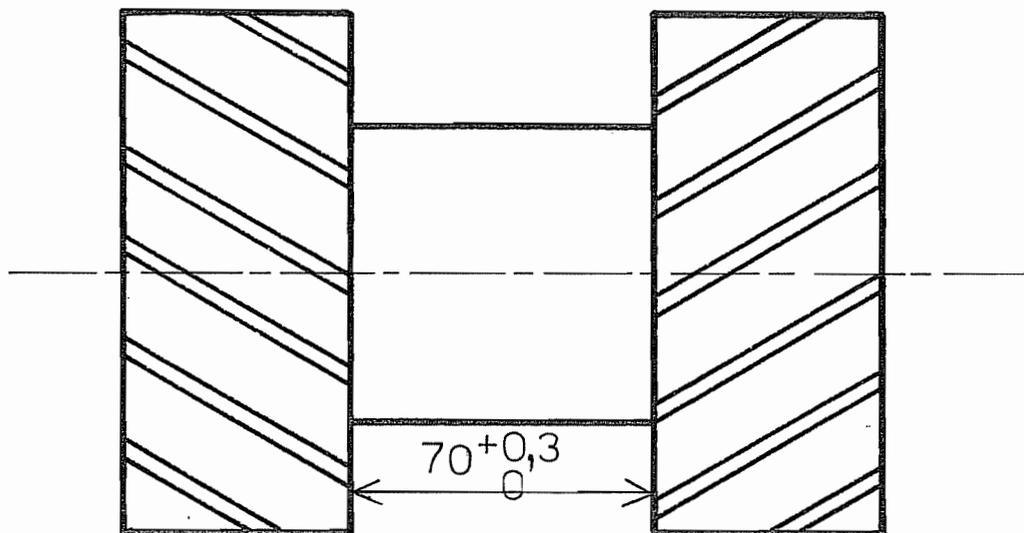


Fig 41

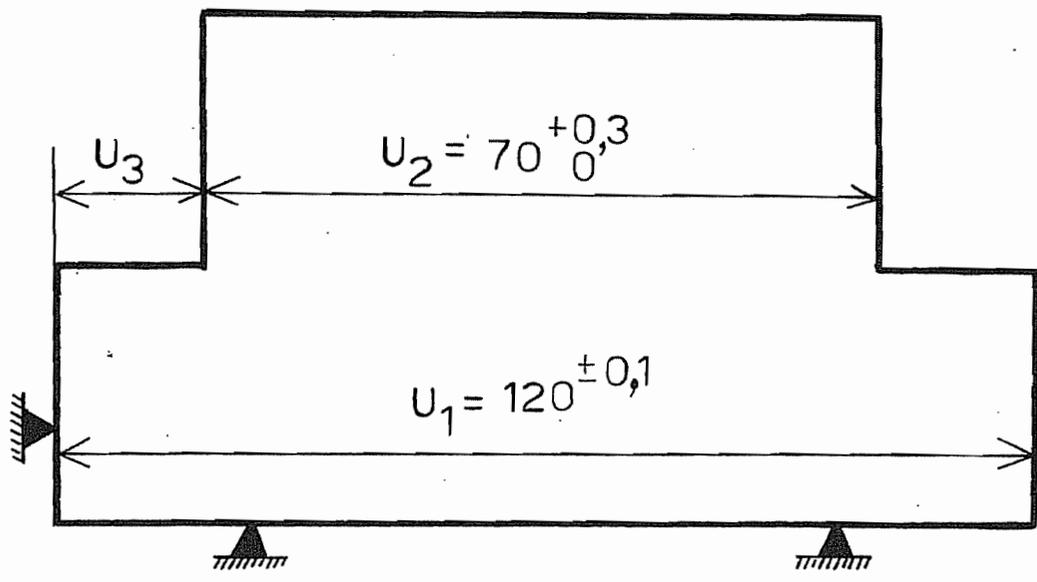


Fig 42

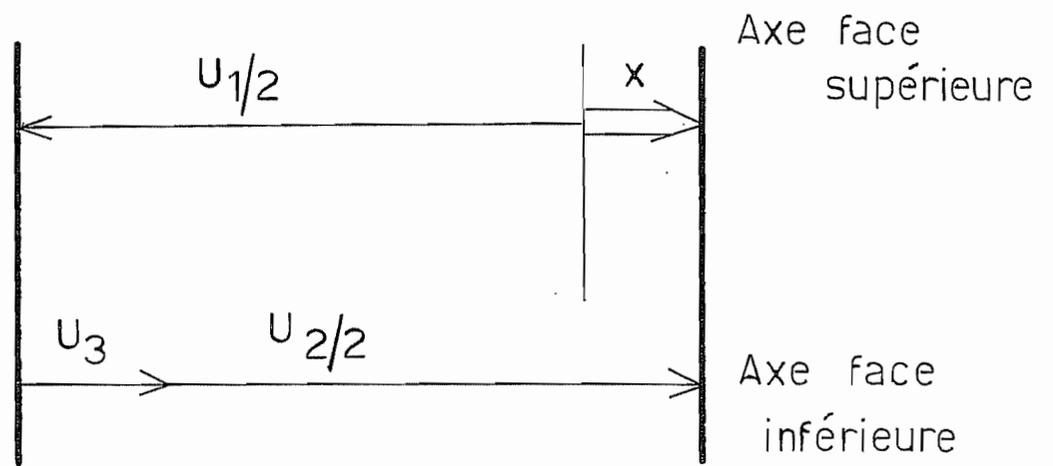


Fig 43

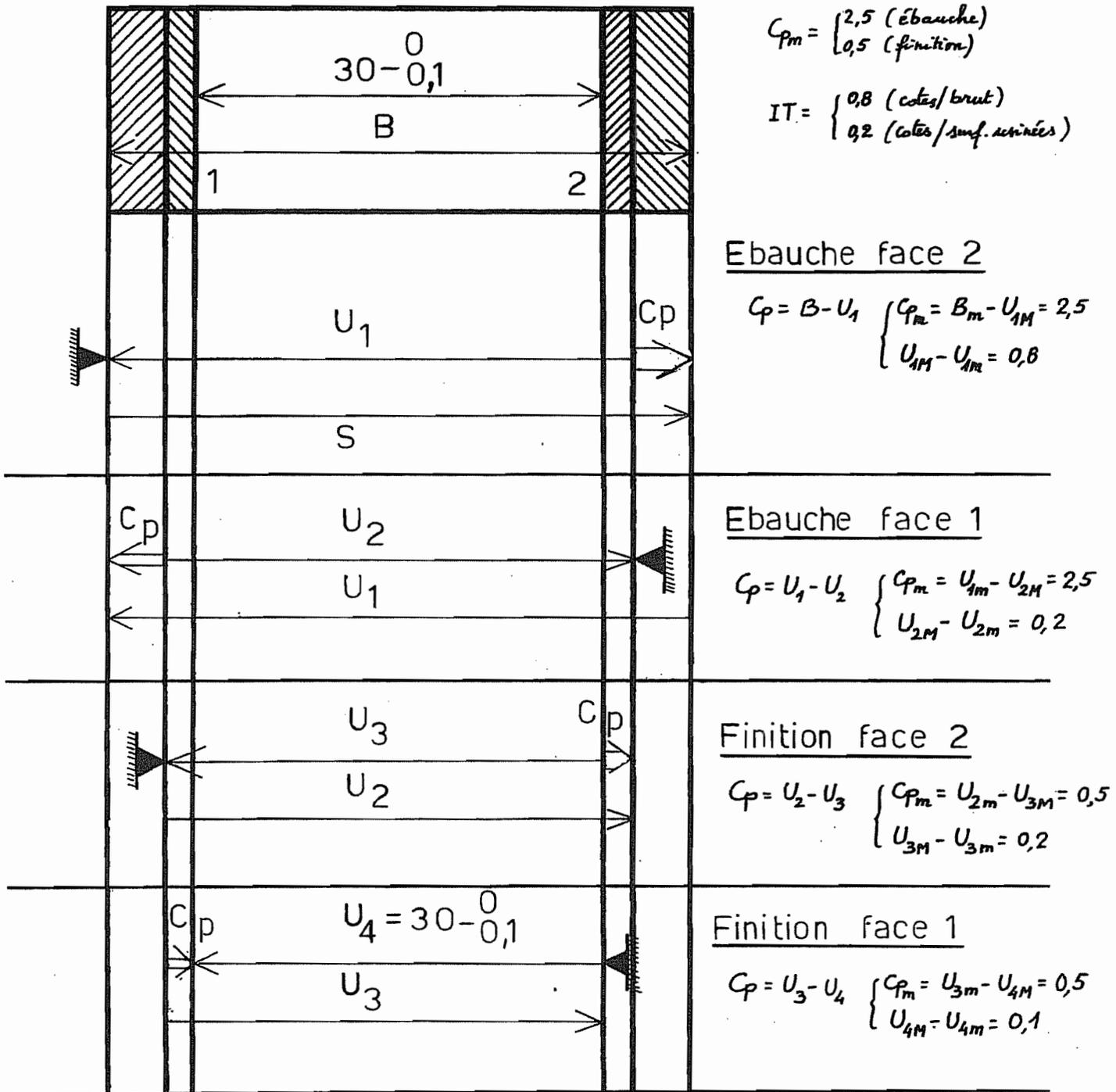


Fig 44

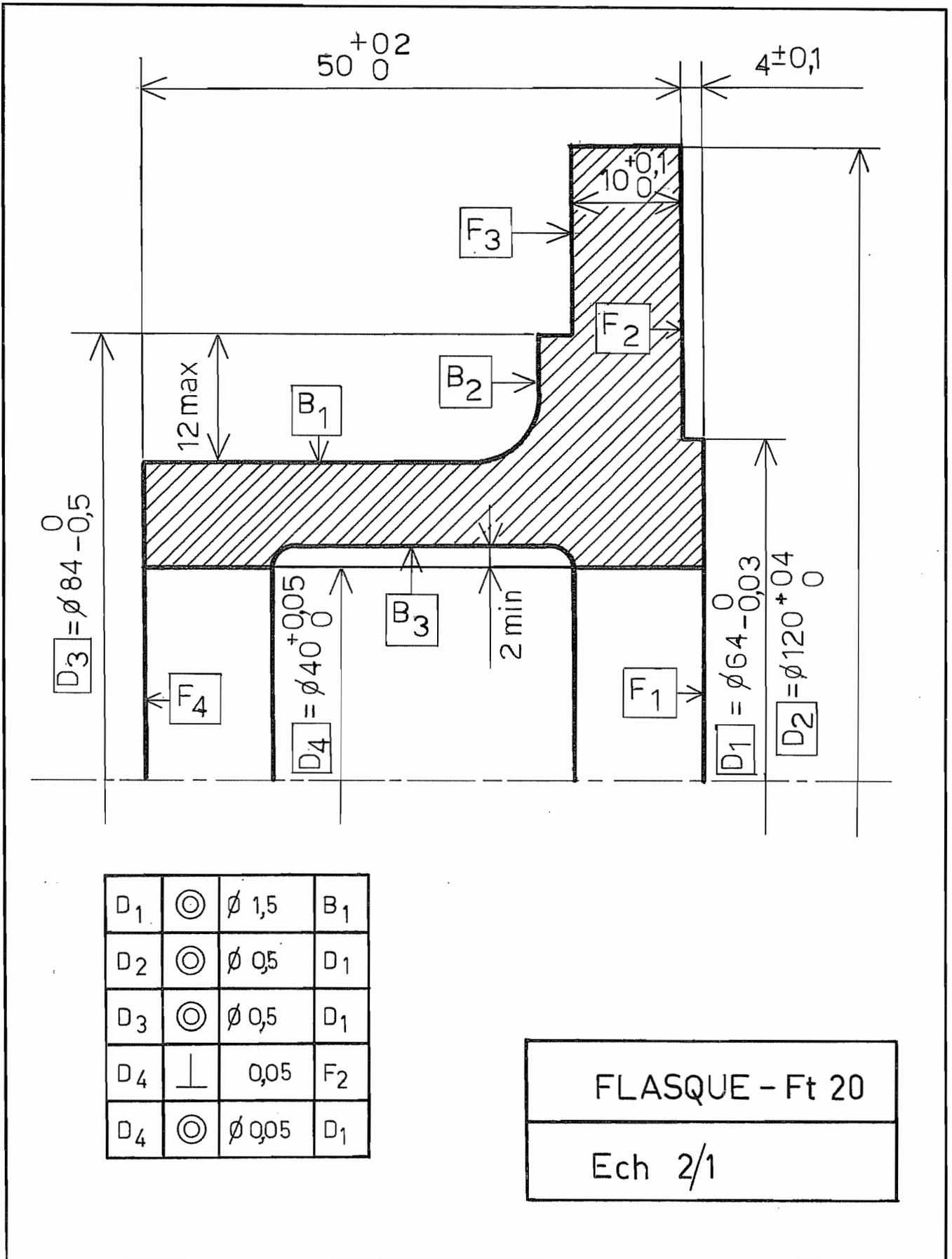
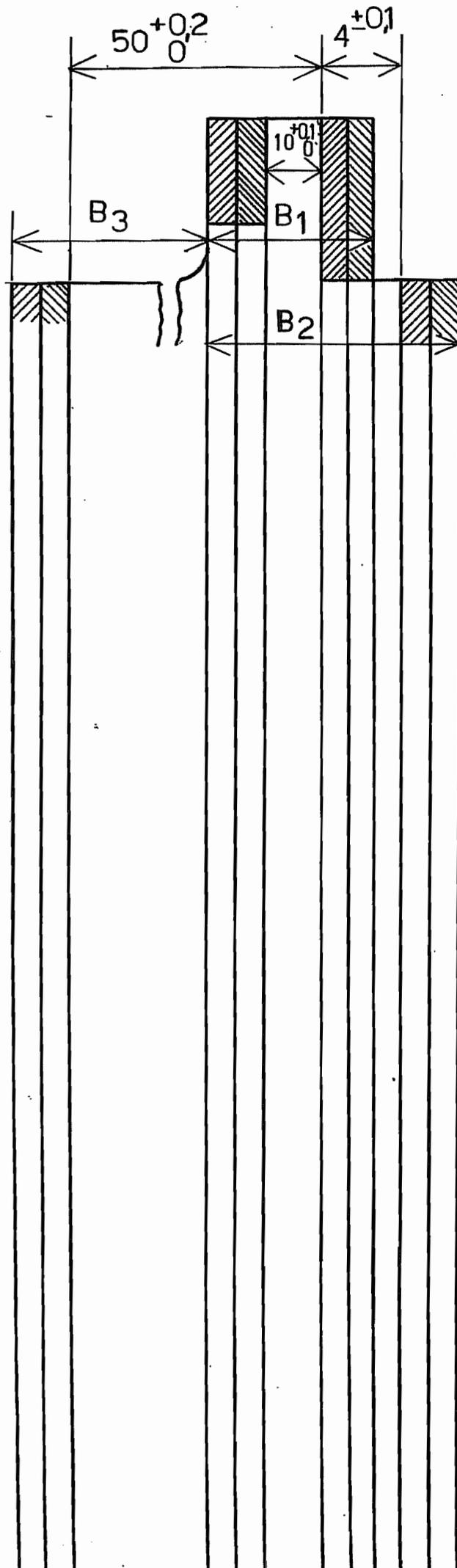


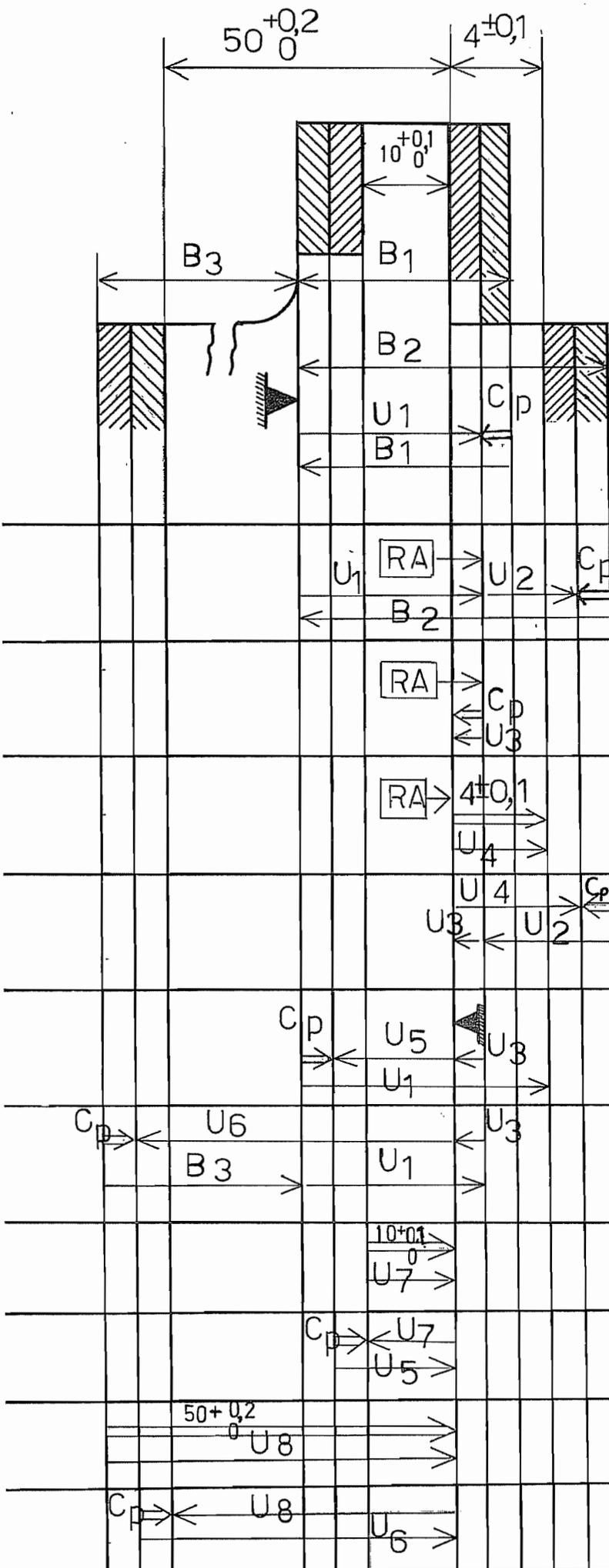
Fig 45

COTES AXIALES



Cpm = $\begin{cases} 0,5 \text{ finition} \\ 2 \text{ dégrossiss} \end{cases}$
IT = $\begin{cases} 0,8 \text{ dégrossiss} \\ 0,2 \text{ finition} \end{cases}$

COTES AXIALES



$C_{pm} = \begin{cases} 0,5 \text{ finition} \\ 2 \text{ dégrossissage} \end{cases}$
 $IT = \begin{cases} 0,8 \text{ (dégr)} \rightarrow \text{si réf} = \text{surf brute} \\ 0,2 \text{ (finition)} \end{cases}$

Phase 10

$C_{pm} = B_{1m} - U_{1M} = 2 \quad (a)$

$IT(U_1) = 0,8$

Réf. aux. = F2 dégrossie

$C_{pm} = B_{2m} - U_{1M} - U_{2M} = 2 \quad (b)$
 $IT(U_2) = 0,2$

Idem $\Rightarrow U_3$ cote directe

$C_{pm} = U_{3m} = 0,5$
 $IT(U_3) = 0,2$

$U_3 = 0,5^{+0,2}_0$

Réf. aux. = F2 finie
 $\Rightarrow U_4$ cote directe

$U_4 = 4 \pm 0,1$

$C_{pm} = U_{2m} + U_{3m} - U_{4M} = 0,5$
 $U_{2m} = 0,5 - 0,5 + 4,1 = 4,1$

$U_2 = 4,1^{+0,2}_0$

Phase 20

$C_{pm} = U_{1m} - U_{3M} - U_{5M} = 2 \quad (c)$
 $IT(U_5) = 0,2$

$C_{pm} = B_{3m} + U_{1m} - U_{3M} - U_{6M} = 2 \quad (d)$
 $IT(U_6) = 0,2$

$U_7 = 10^{+0,1}_0$

Cote directe

$C_{pm} = U_{5m} - U_{7M} = 0,5 \quad U_{5m} = 0,5 + 10,1 = 10,6$
 $U_5 = 10,6^{+0,2}_0$

$U_8 = 50^{+0,2}_0$

$C_{pm} = U_{6m} - U_{8M} = 0,5 \quad U_{6m} = 0,5 + 50,2 = 50,7$
 $U_6 = 50,7^{+0,2}_0$

Fig 46

D ₁	⊙	∅ 1,5	B ₁
D ₂	⊙	∅ 0,5	D ₁
D ₃	⊙	∅ 0,5	D ₁
D ₄	⊥	0,05	F ₂
D ₄	⊙	∅ 0,05	D ₁

Fig 46 bis

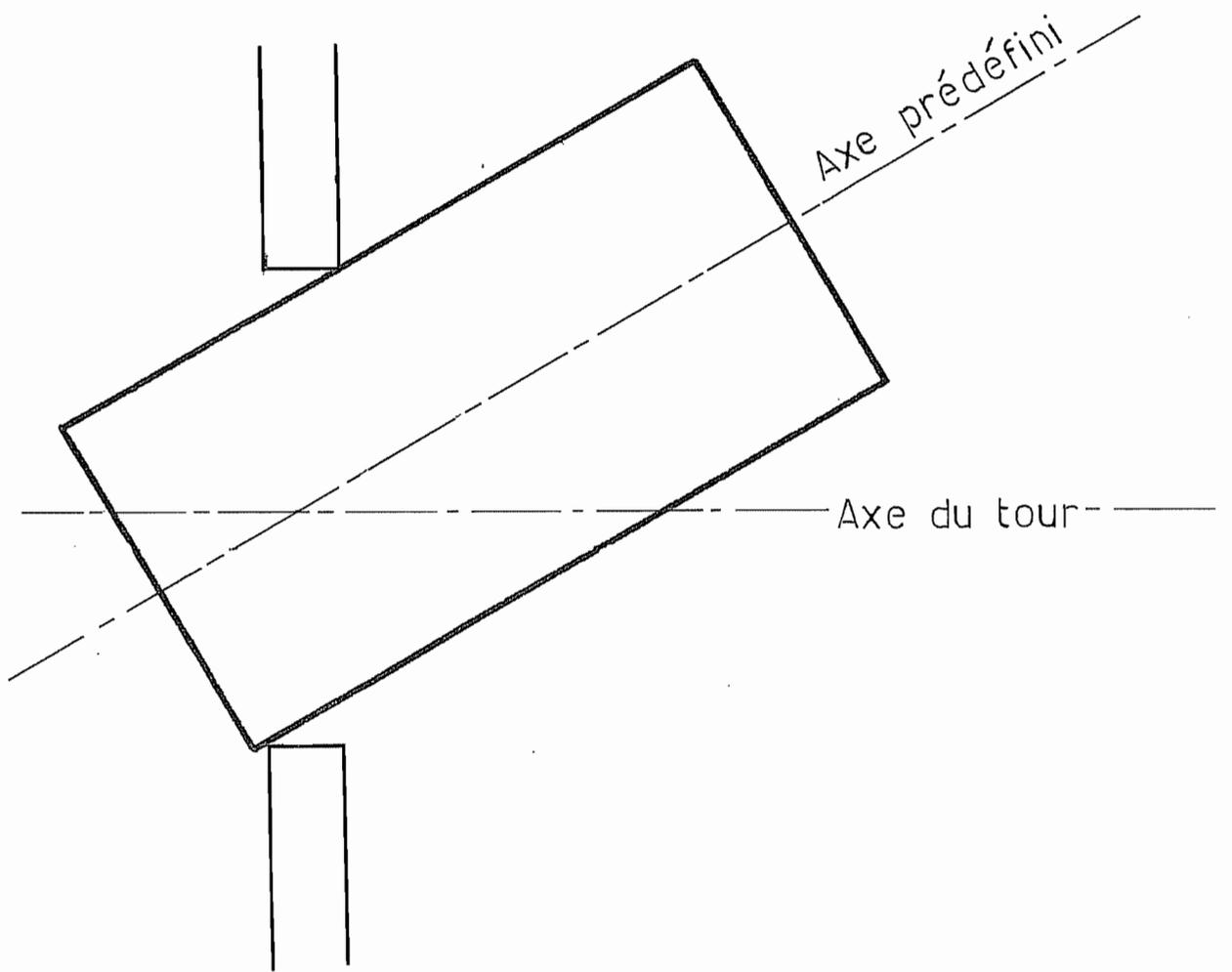
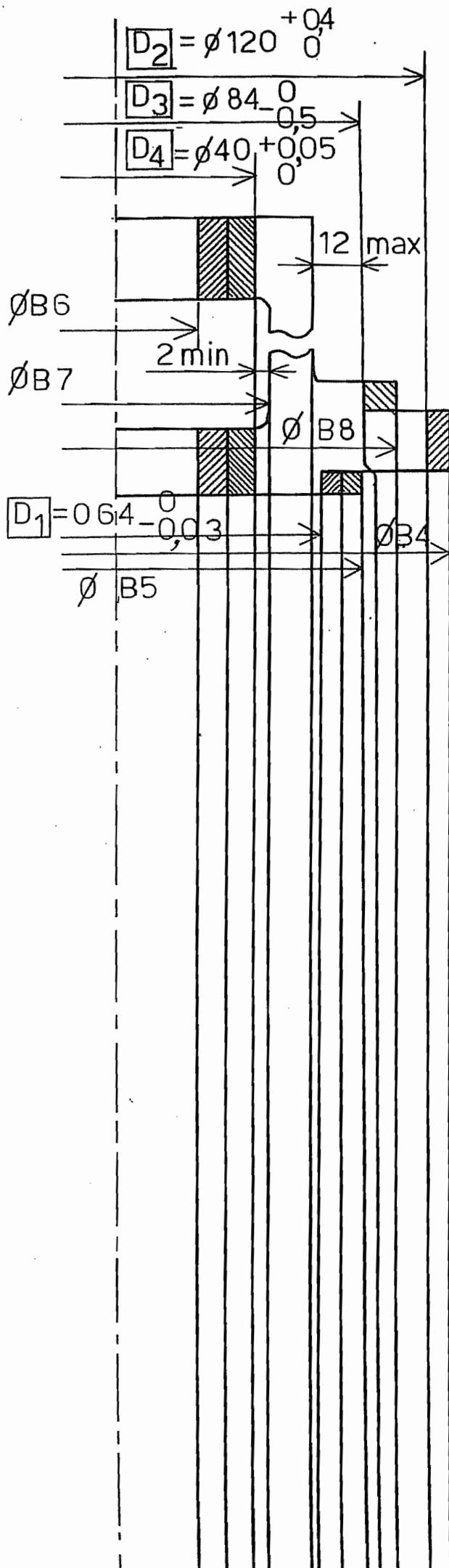


Fig 47



COTES RADIALES

D ₁	⊙	ø 1,5	B ₁
D ₂	⊙	ø 0,5	D ₁
D ₃	⊙	ø 0,5	D ₁
D ₄	⊥	0,05	F ₂
D ₄	⊙	ø 0,05	D ₁

$$C_{pm} = \begin{cases} 0,5 \text{ finition} \\ 2 \text{ dégrossissage} \end{cases}$$

$$I.T = \begin{cases} 0,2 \text{ finition} \\ 0,8 \text{ dégrossissage} \end{cases}$$

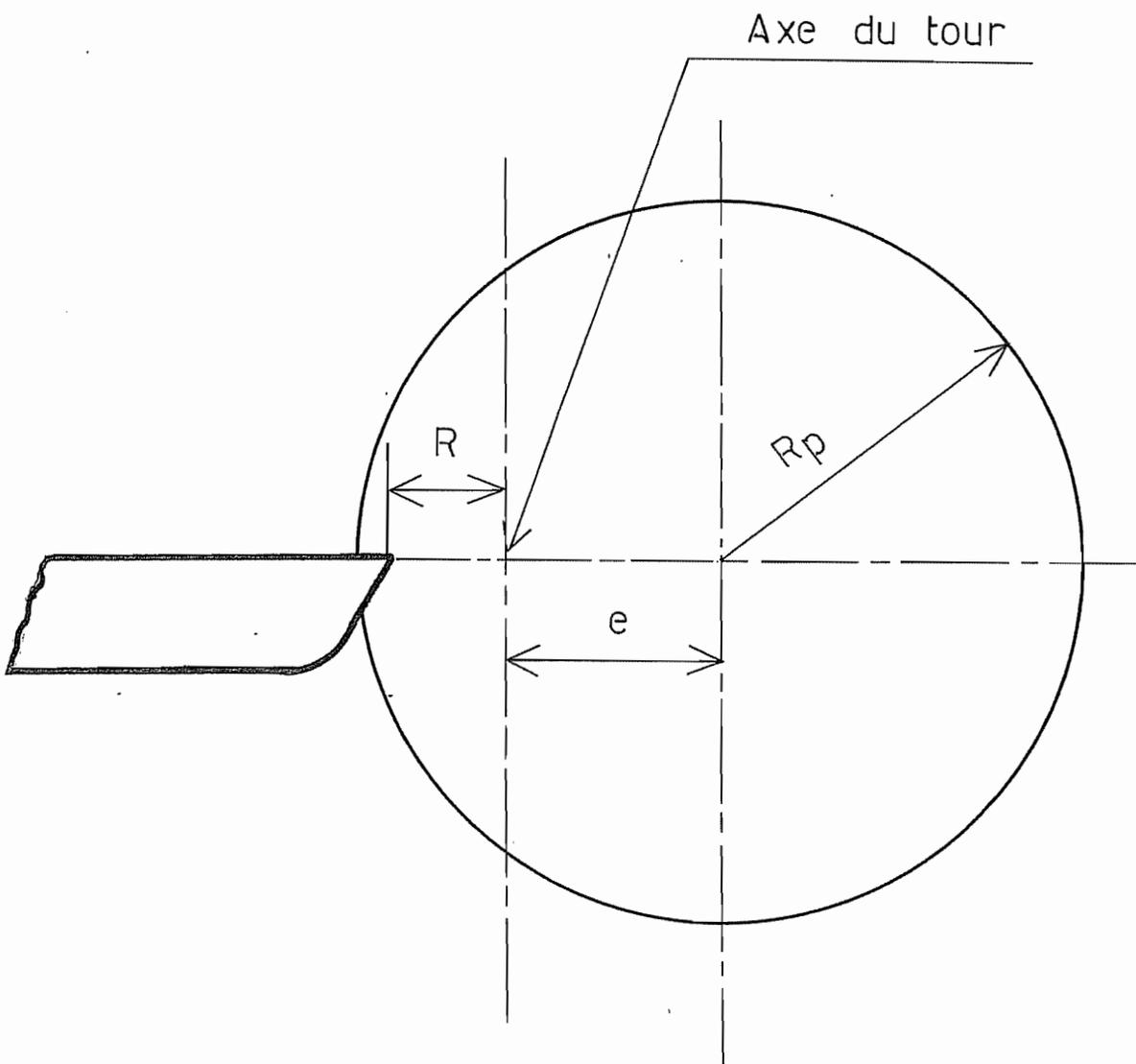


Fig 48

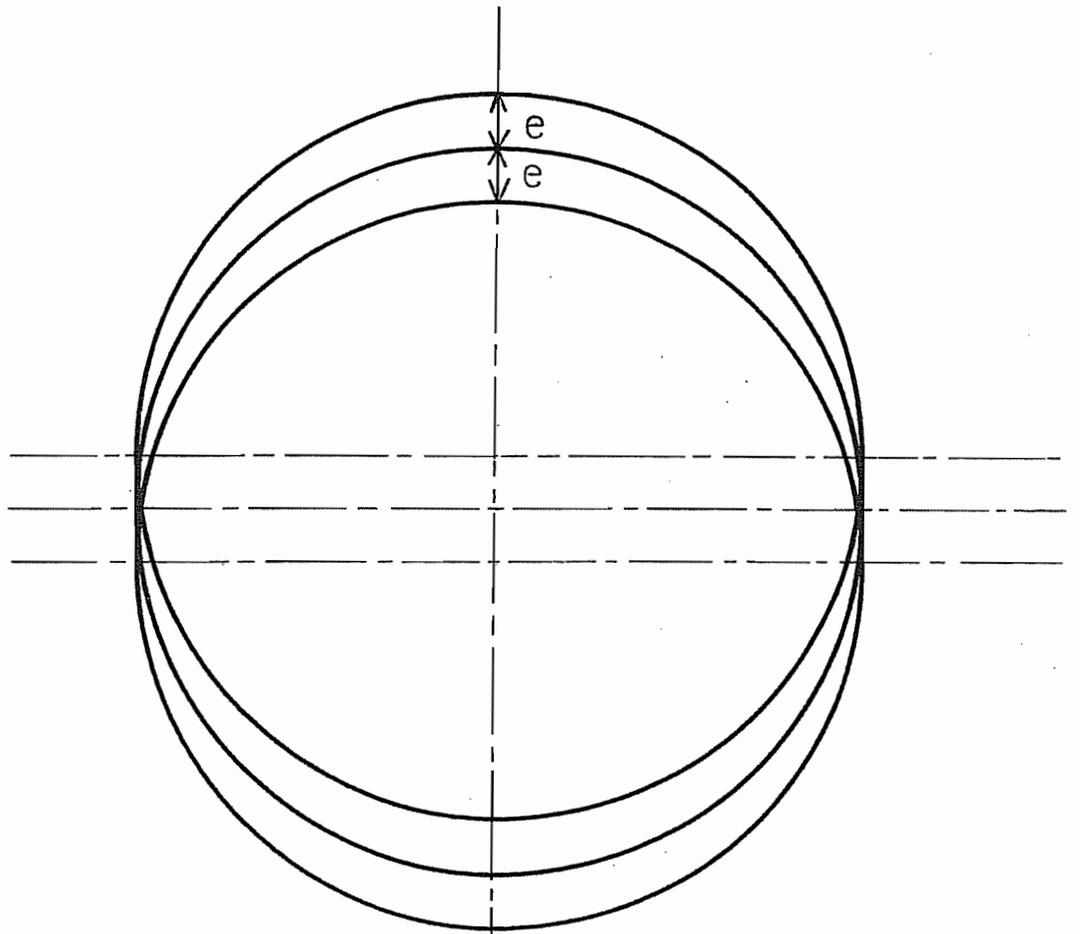
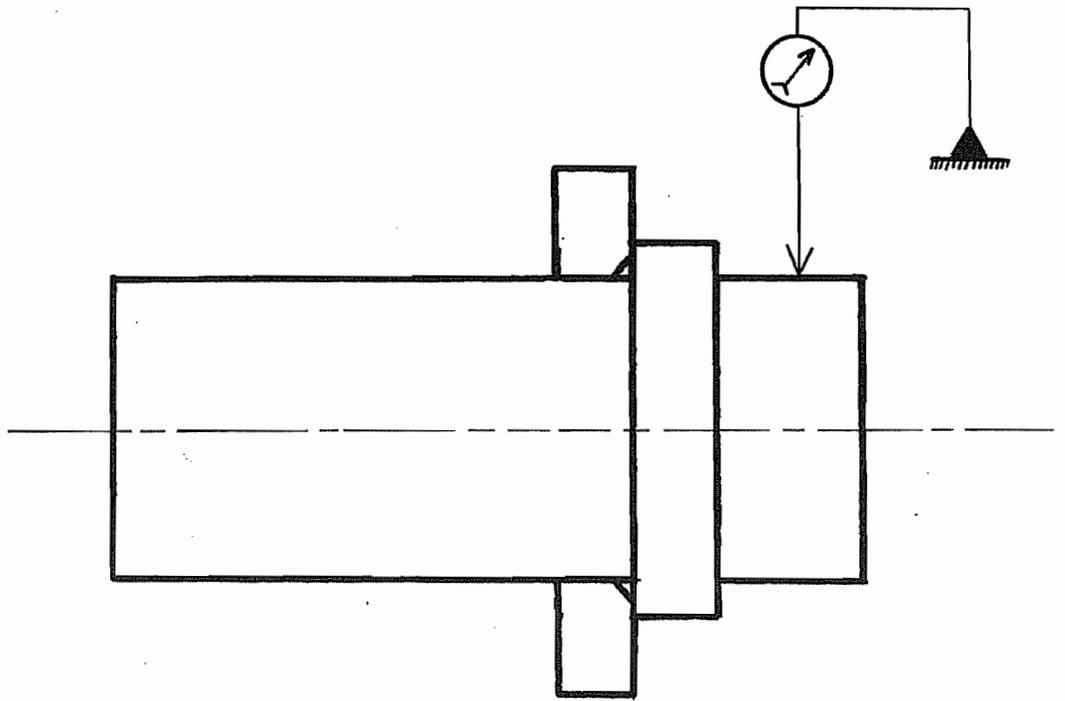
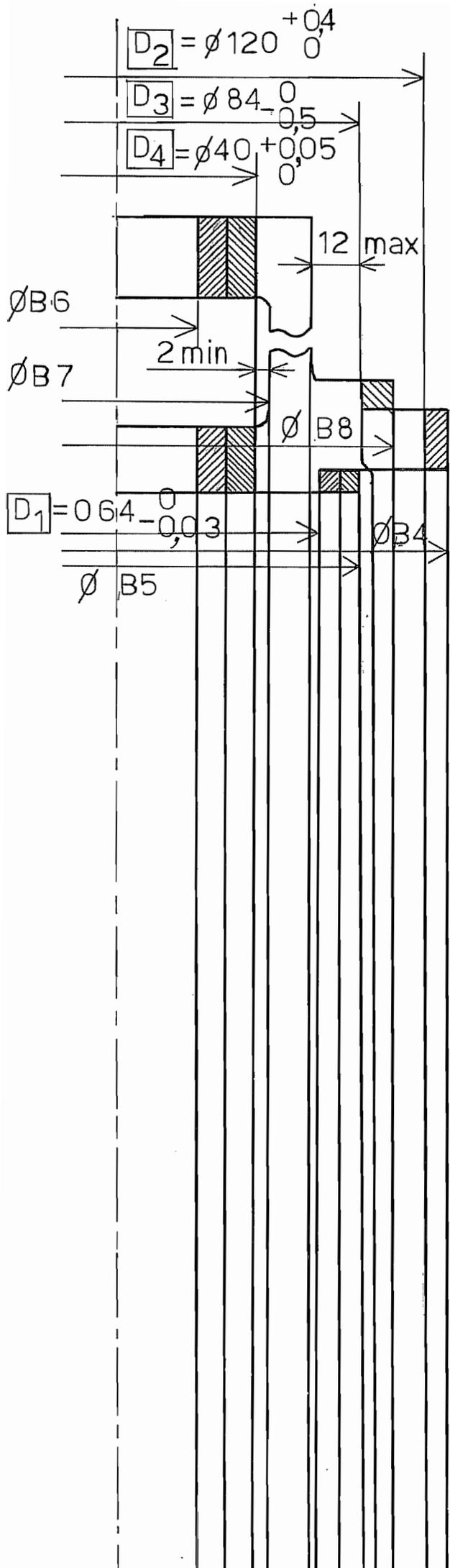


Fig 49

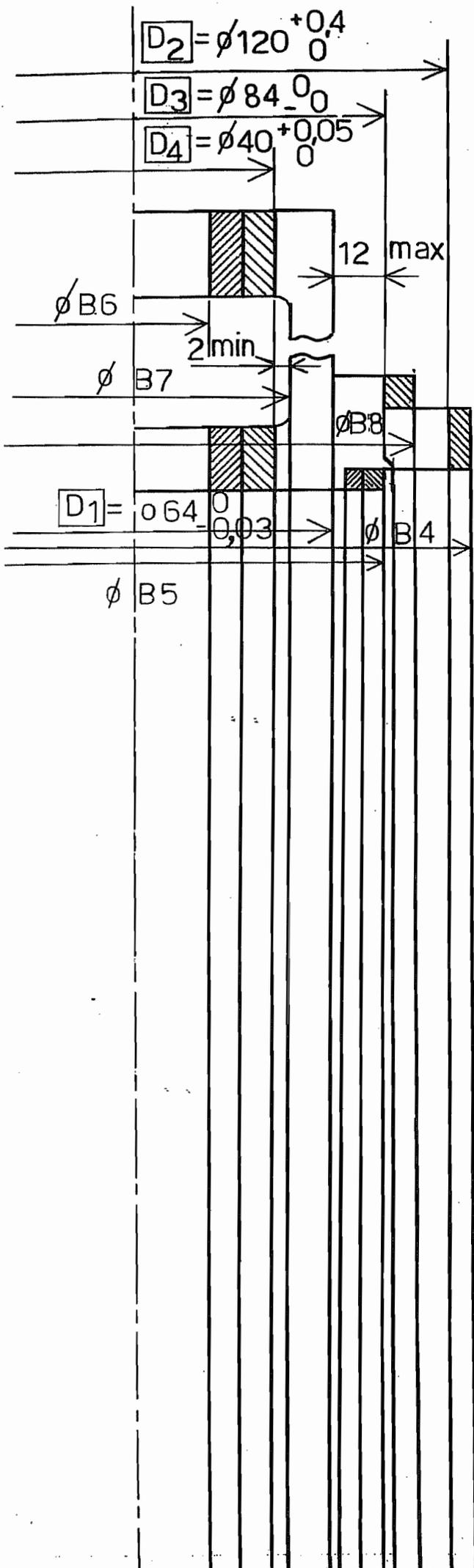


COTES RADIALES

D ₁	⊙	∅ 1,5	B ₁
D ₂	⊙	∅ 0,5	D ₁
D ₃	⊙	∅ 0,5	D ₁
D ₄	⊥	0,05	F ₂
D ₄	⊙	∅ 0,05	D ₁

$$C_{pm} = \begin{cases} 0,5 \text{ finition} \\ 2 \text{ dégrossissage} \end{cases}$$

$$l.T = \begin{cases} 0,2 \text{ finition} \\ 0,8 \text{ dégrossissage} \end{cases}$$



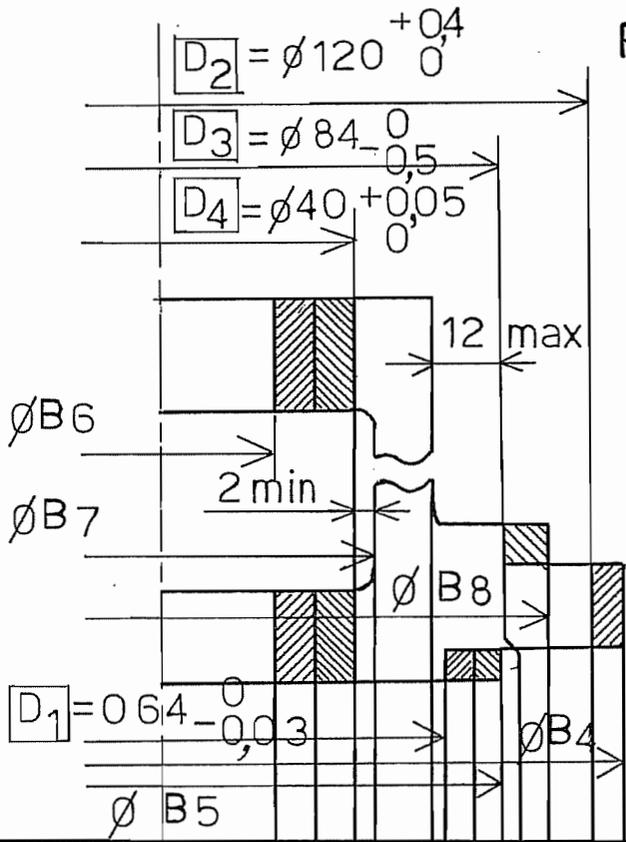
COTES RADIALES

D ₁	⊙	∅ 1,5	B ₁
D ₂	⊙	∅ 0,5	D ₁
D ₃	⊙	∅ 0,5	D ₁
D ₄	⊥	0,05	F ₂
D ₄	⊙	∅ 0,05	D ₁

$$C_{pm} = \begin{cases} 0,5 \text{ finition} \\ 2 \text{ dégrossissage} \end{cases}$$

$$I.T = \begin{cases} 0,2 \text{ finition} \\ 0,8 \text{ dégrossissage} \end{cases}$$

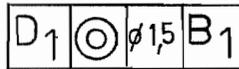
Fig 50



D ₁	⊙	ø 1,5	B ₁
D ₂	⊙	ø 0,5	D ₁
D ₃	⊙	ø 0,5	D ₁
D ₄	⊥	0,05	F ₂
D ₄	⊙	ø 0,05	D ₁

C_{pm} = { 0,5 finition
2 dégrossissage
IT = { 0,8 dégrossissage
0,2 finition

Phase 10



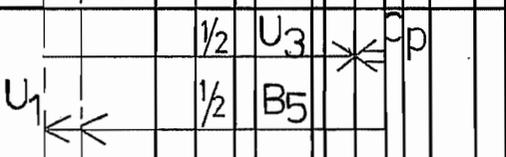
$$U_1 = 0 \pm 0,75$$

note directe



C_p $C_{pm} = \frac{1}{2} B_{4m} + U_{1m} - \frac{1}{2} U_{2M} = 2$ (part du brut) $U_2 = 120 \begin{smallmatrix} +0,4 \\ 0 \end{smallmatrix}$

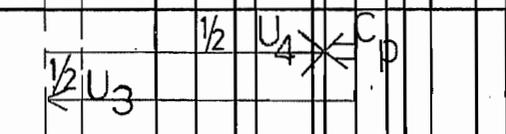
$B_{4m} = 4 - 2(-0,75) + 120,4 = 125,9$ $B_4 = 125,9 \text{ min}$



C_p $C_{pm} = \frac{1}{2} B_{5m} + U_{1m} - \frac{1}{2} U_{3M} = 2$

$= \frac{1}{2} B_{5m} - 0,75 - \frac{1}{2} U_{3M} = 2$

IT(U₃) = 0,8

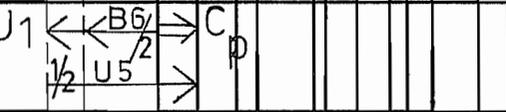


C_p $C_{pm} = \frac{1}{2} U_{3m} - \frac{1}{2} U_{4M} = 0,5$ $U_4 = 64 \begin{smallmatrix} 0 \\ -0,03 \end{smallmatrix}$

$U_{3m} = U_{4M} + 1 = 65$

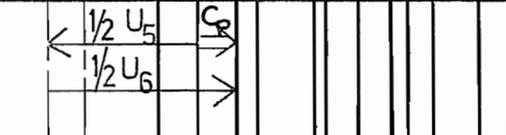
calcul: $U_{3M} = 65 + 0,8 = 65,8$ $U_3 = 65 \begin{smallmatrix} +0,8 \\ 0 \end{smallmatrix}$

$B_{5m} = 1,5 + U_{3M} + 4 = 1,5 + 65,8 + 4 = 71,3$ $B_5 = 71,3 \text{ min}$



C_p $C_{pm} = \frac{1}{2} U_{5m} - U_{1m} - \frac{1}{2} B_{6M} = 2$

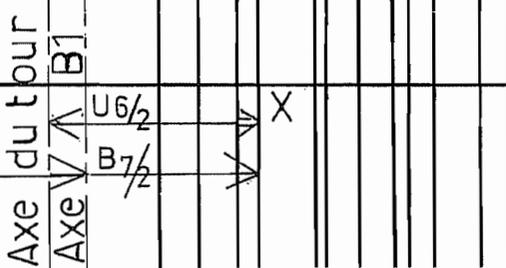
IT(U₅) = 0,8



C_p $C_{pm} = \frac{1}{2} U_{6m} - \frac{1}{2} U_{5M} = 0,5$ $U_6 = 40 \begin{smallmatrix} +0,05 \\ 0 \end{smallmatrix}$

calcul: $U_{5M} = U_{6m} - 1 = 40 - 1 = 39$ $U_5 = 39 \begin{smallmatrix} +0 \\ -0,8 \end{smallmatrix}$

$B_{6M} = U_{5m} - 2U_{1m} - 4 = 38,2 - 2(-0,75) - 4 = 32,7$ $B_6 = 32,7 \text{ max}$



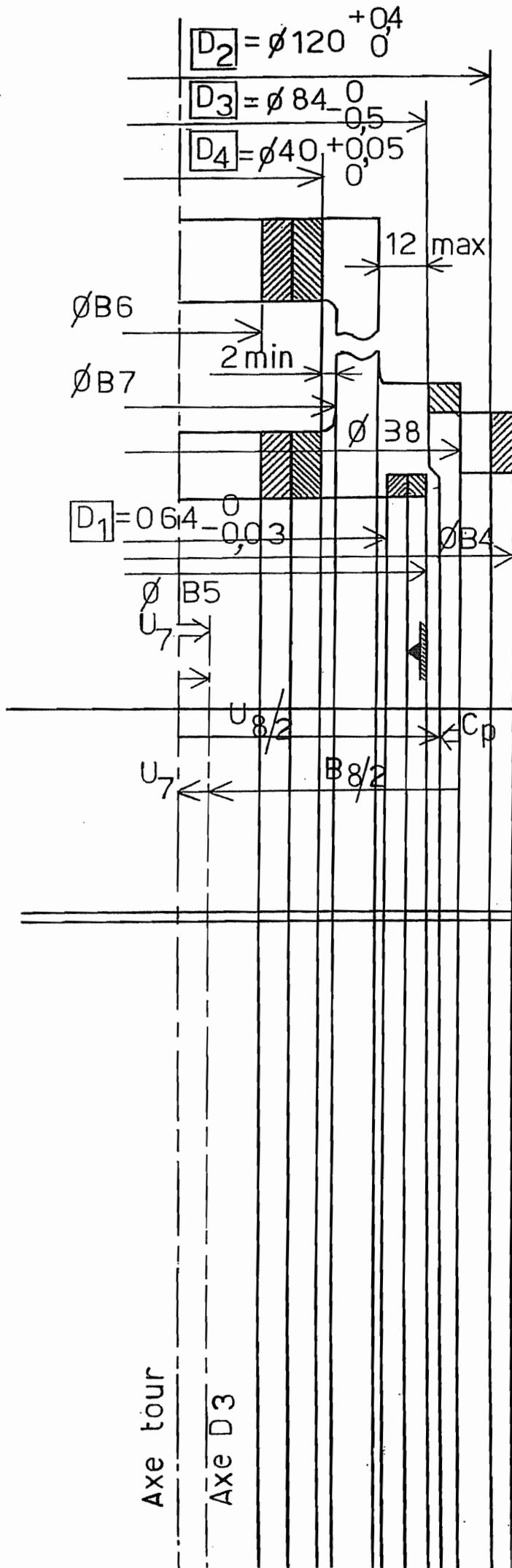
X $x_m = 2$

$x_m = \frac{1}{2} B_{7m} + U_{1m} - \frac{1}{2} U_{6M}$

$B_{7m} = 2x_m - 2U_{1m} + U_{6M} = 4 - 2(-0,75) + 40,05 = 45,55$ $B_7 = 45,55 \text{ min}$

Fig 50 bis

COTES RADIAL
SI



D ₁	⊙	∅ 1,5
D ₂	⊙	∅ 0,5
D ₃	⊙	∅ 0,5
D ₄	⊥	0,05
D ₄	⊙	∅ 0,05

$C_{pm} = \begin{cases} 0,5 \text{ finition} \\ 2 \text{ dégrossi} \end{cases}$

$D_3 \text{ } \textcircled{\text{O}} \text{ } 0,05 \text{ } D_1 \text{ } |.T = \begin{cases} 0,2 \text{ finition} \\ 0,8 \text{ dégrossi} \end{cases}$
 $U_7 = 0 \pm 0,25$ Cote dir

$U_8 = 84_{-0,5}^0$
 $C_{pm} = \frac{1}{2} B_{8m} + U_{7m} - \frac{1}{2} U_{8m} = 2$
 $B_{8m} = 4 - 2U_{7m} + U_{8m} = 4 - 2(-0,25) + 84 = 88,5$
 Mais assuré par le brut B4...

Axe tour
Axe D3

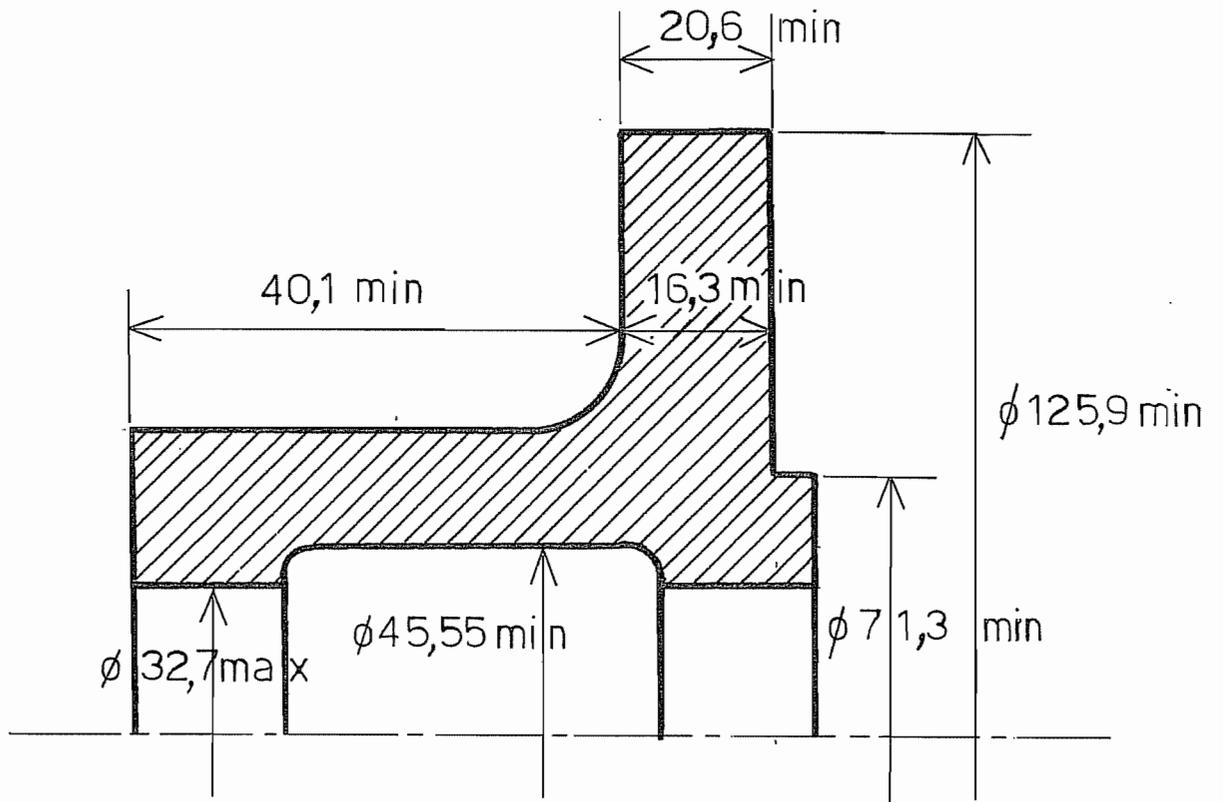


Fig 51