

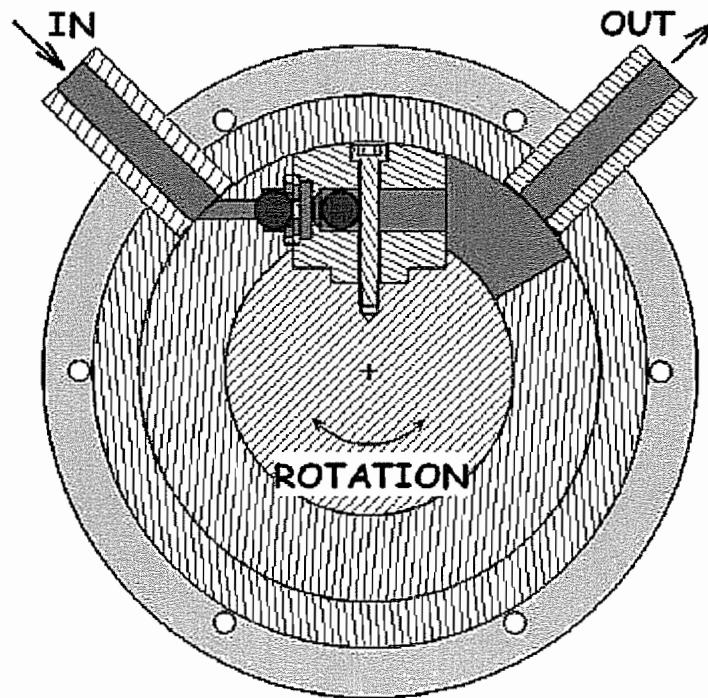
Université Libre de Bruxelles Service de mécanique analytique et cfao Av. F.D. Roosevelt, 50 CP 165/14 1050 Bruxelles N° de convention: 001/4632	Université de Liège Service de méthodes de fabrication Chemin des Chevreuils, 1 4000 Liège N° de convention : 001/4633	Université catholique de Louvain Unité PRM Place de l'université, 1 1348 Louvain-La-Neuve N° de convention : 001/4516
--	--	---

RAPPORT FINAL DE SYNTÈSE DU PROJET 4M- μ POMPE (2001-2003)

ANNEXES

PARTIE 2/2 (SECTIONS 3/6,7,8,9-4-5- 6-7-8)

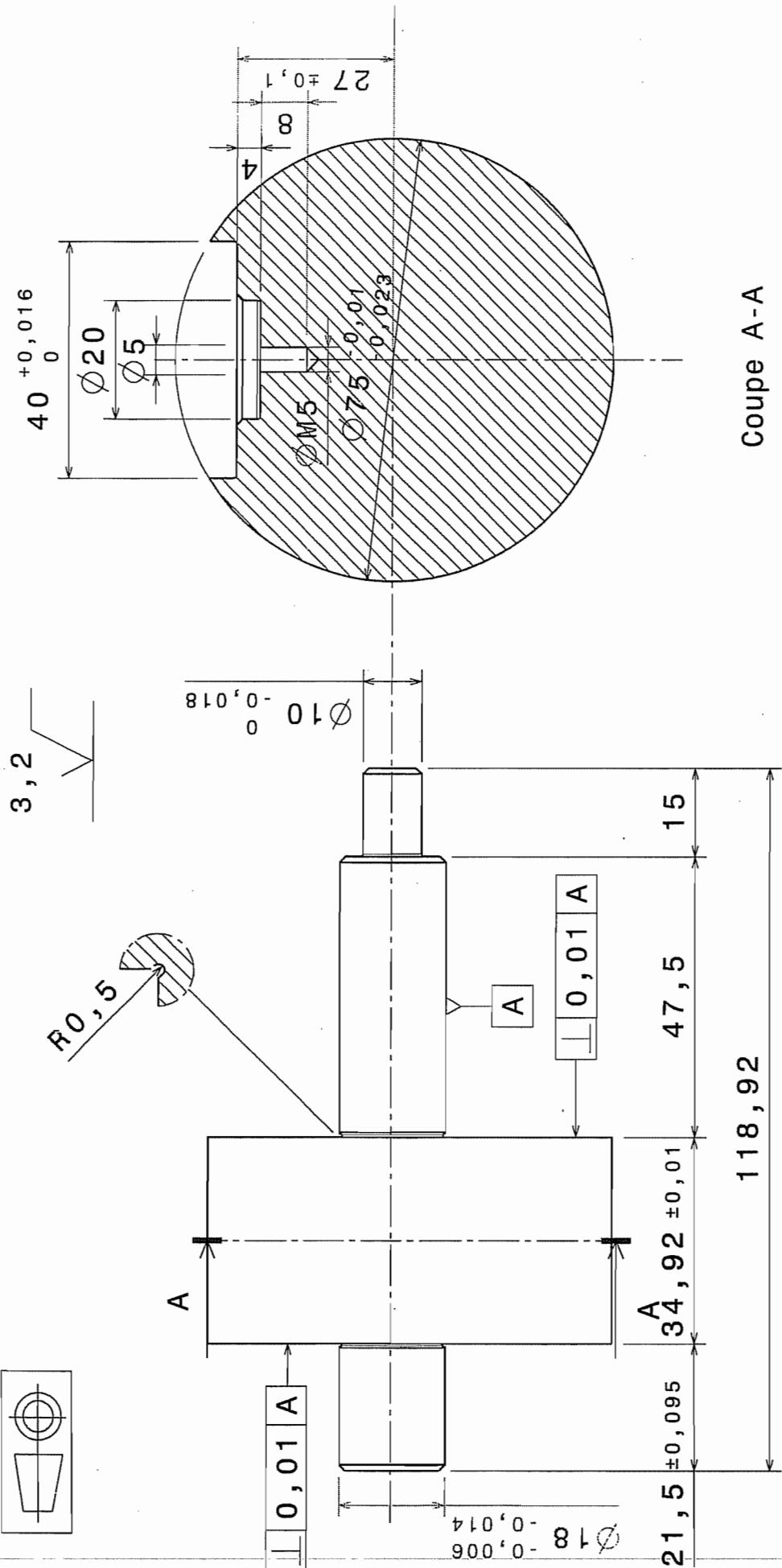
*B.RAUCENT(UCL), E.DEREINE(UCL), O.SMAL(UCL),
J.F.DEBONGNIE(ULG), P.MERKEN(ULG),
A.DELCHAMBRE(ULB), V.CROQUET(ULB)*



Project sponsored by the region wallonne



3.6. Plans du modèle à l'échelle 10 :1

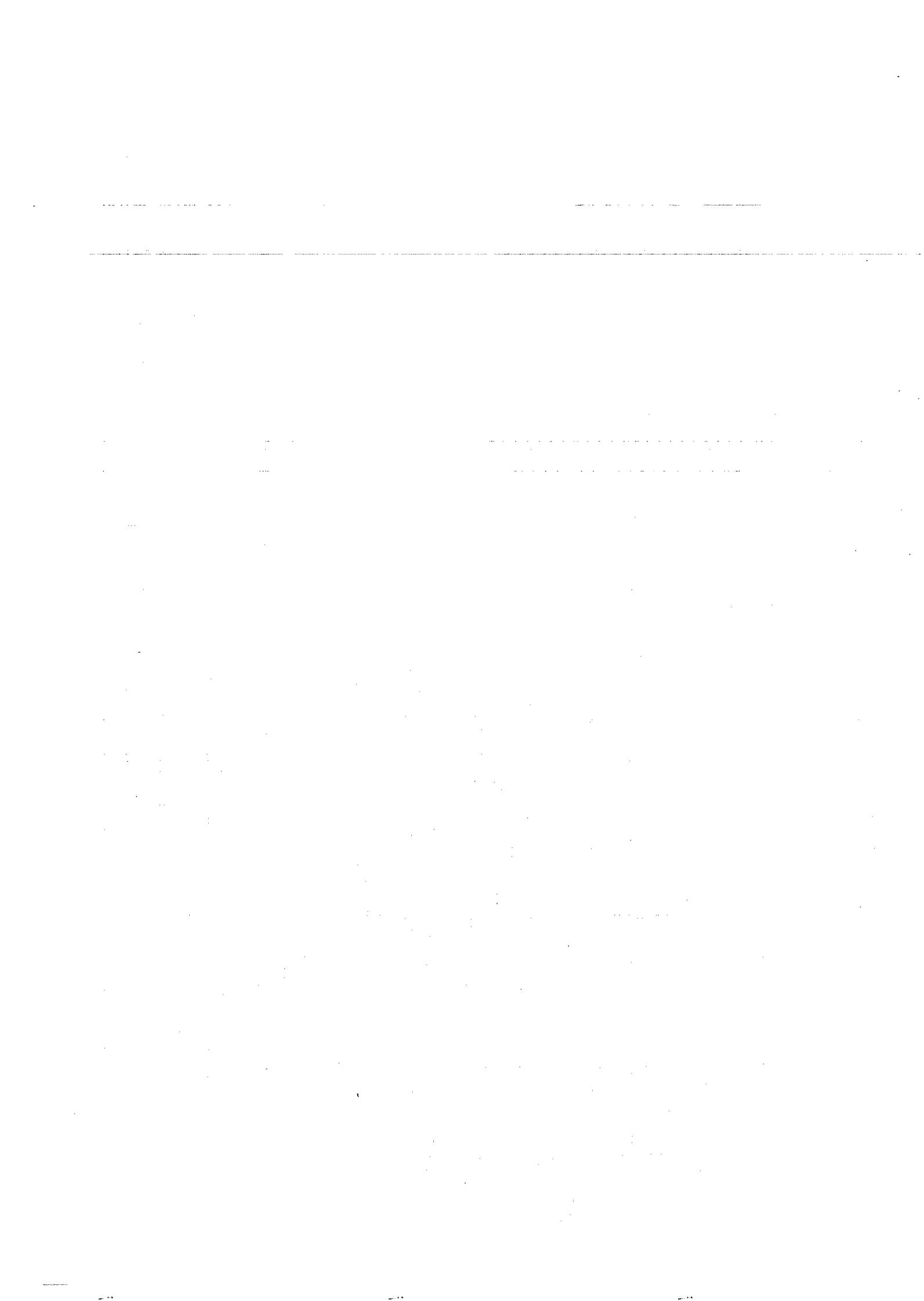


Coupe A-A

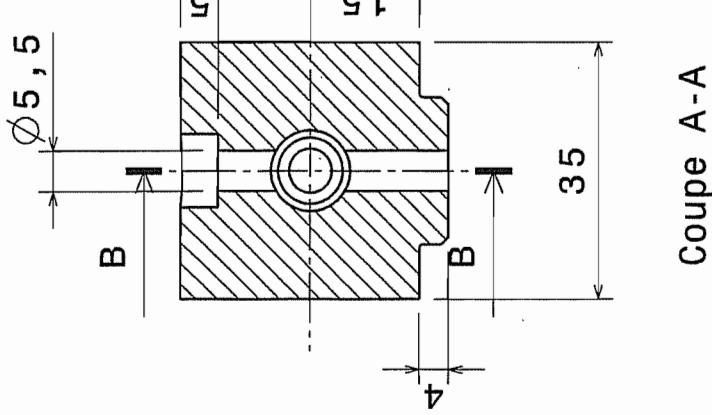
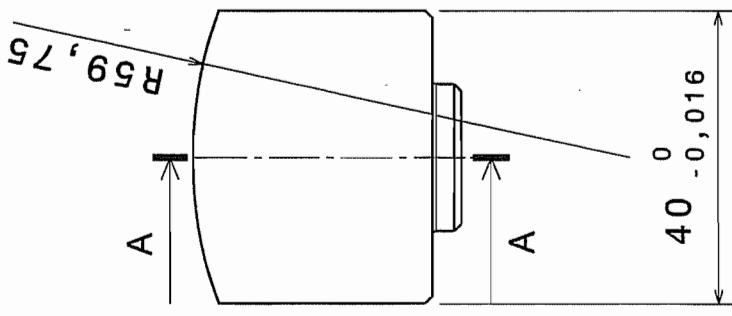
monter repère₃ dans repère₂ puis dresser les faces latérales (cote $34,92 \pm 0,01$)

Modèle 1	repère 2
Arbre	matière : PC 1000
Merken Patrick	ULG
Croquet Vincent	ULB
17 décembre 2001	

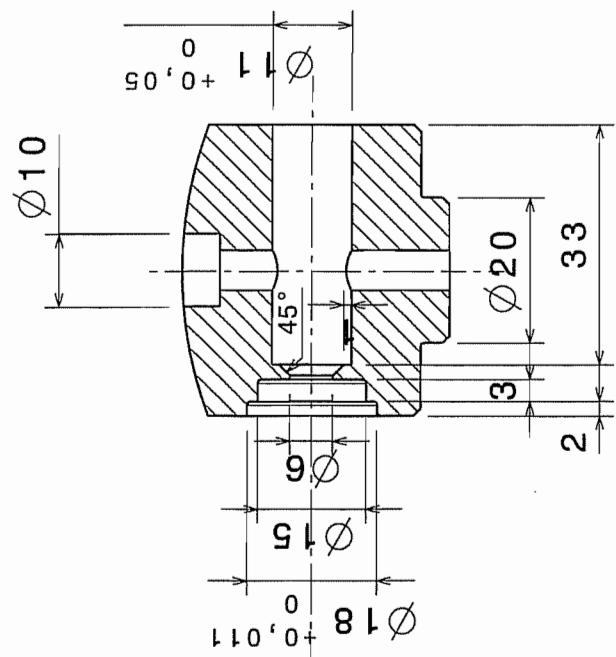
Echelle : 1:1
 congés : $\phi 0,5$ maxi
 chanfrein : 1 à 45°
 Tolérance générale : $\pm 0,2$



3 , 2



Coupe A-A



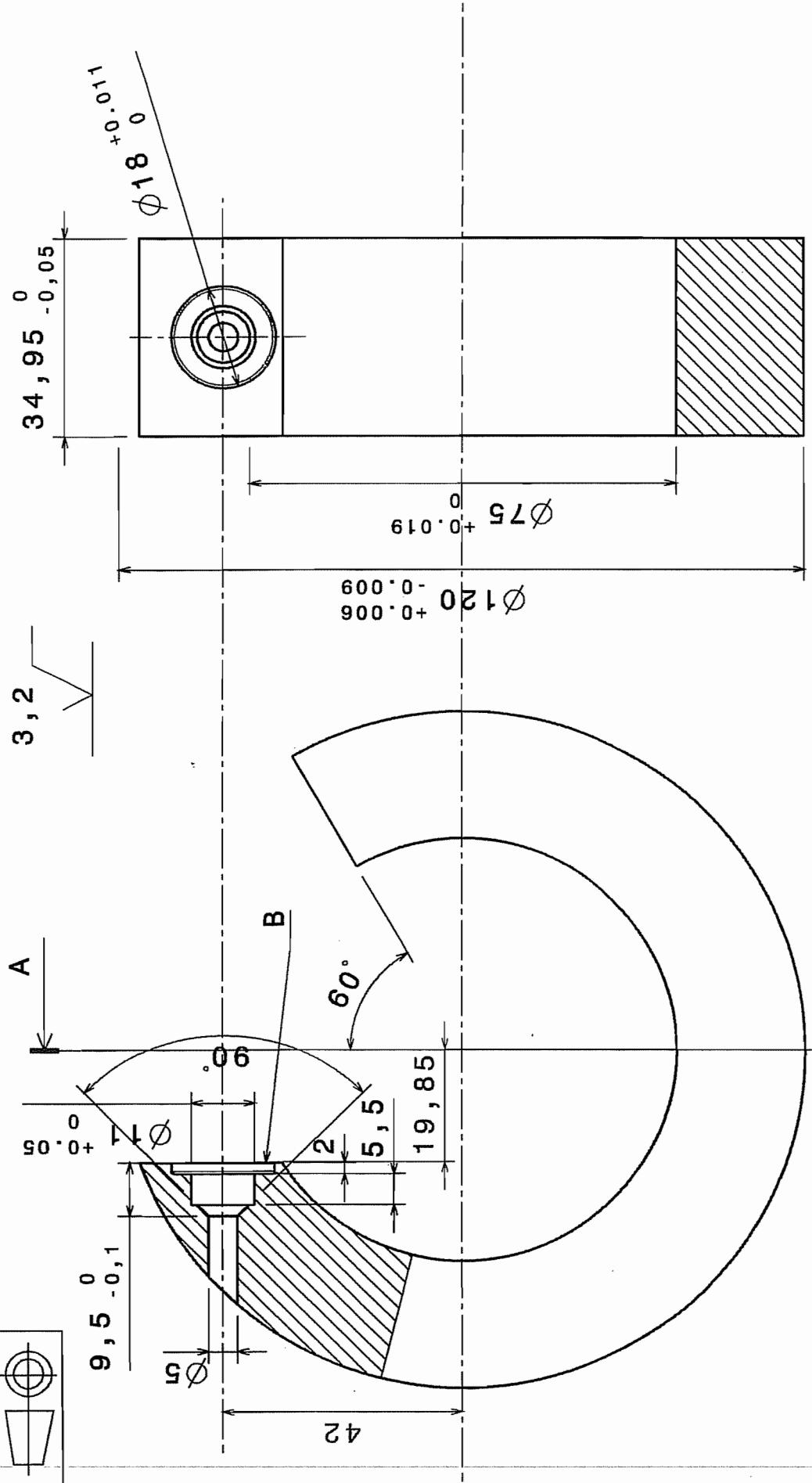
Coupe B-B

orienter repère_3 dans repère_2 avant d'utiliser la côte 35, dresser les faces à la côte du repère_2

Echelle : 1:1
cognés : Ø 0,5 maxi
chanfreins : 1 à 45°

Tolérance générale : ± 0,2

Modèle 1	repère_3
Piston	matière : PMMA
Merken Patrick	ULG
Croquet Vincent	ULB
17 décembre	2001

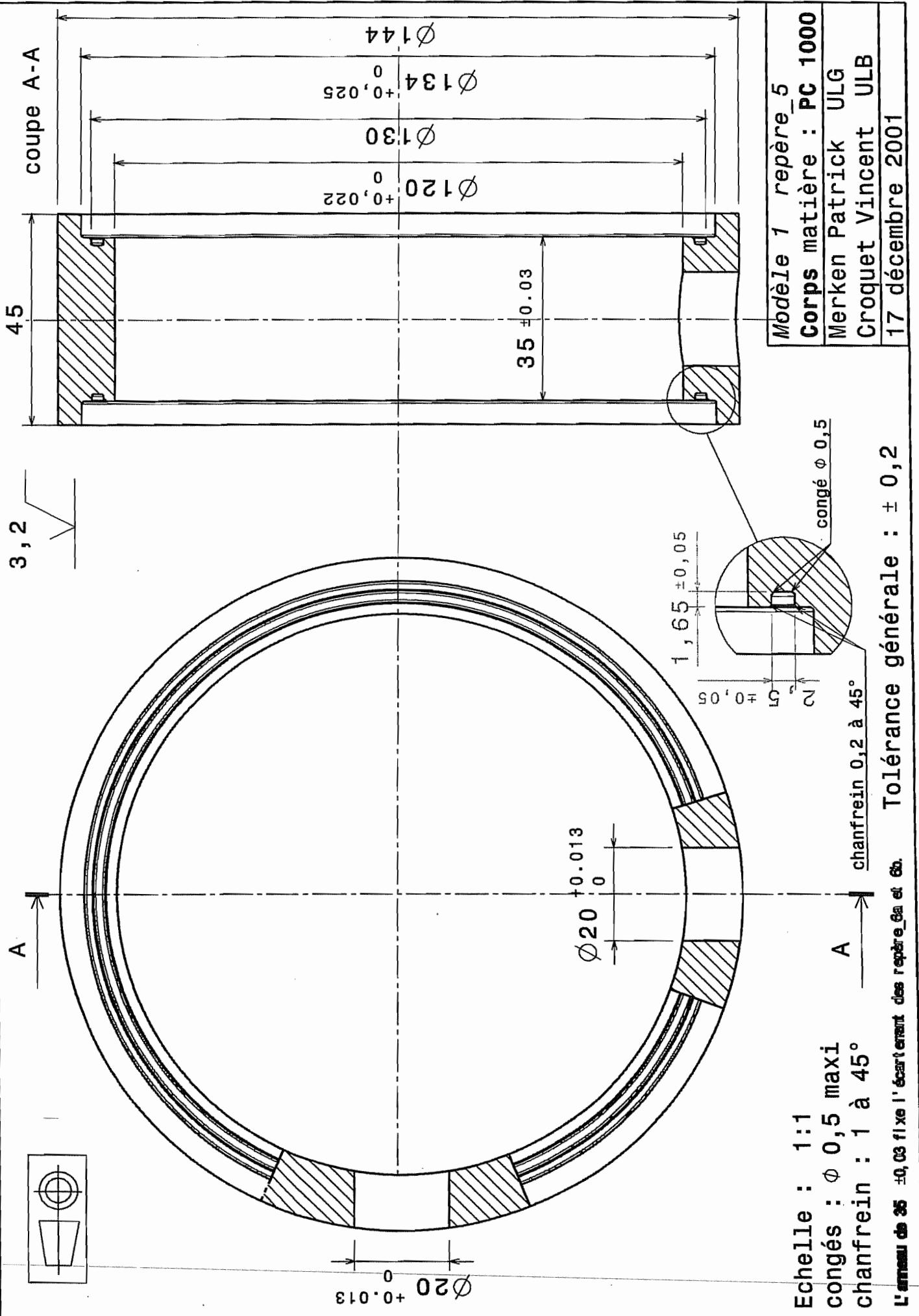


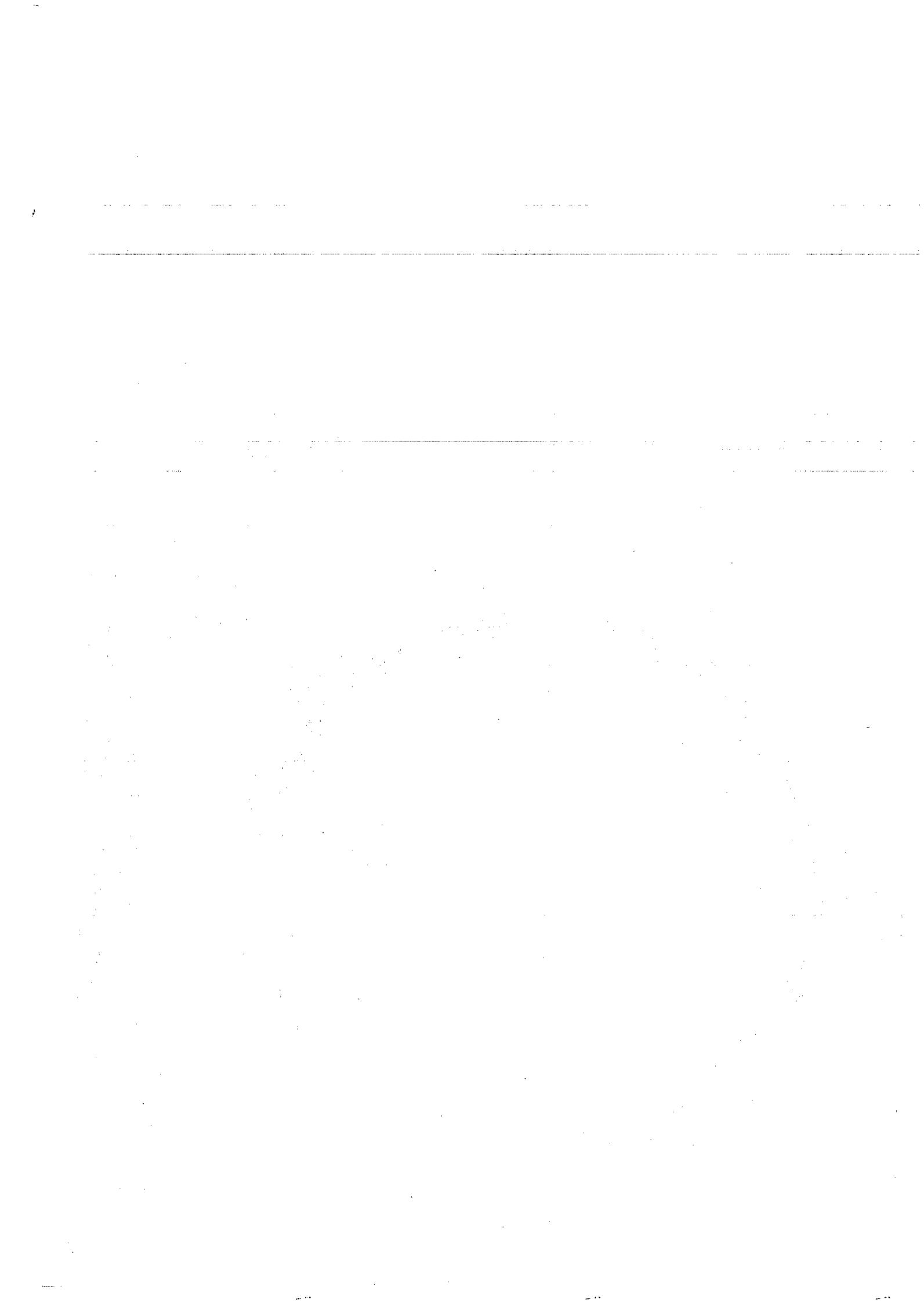
Echelle : 1:1
Congés : 0,5 max
Chantrein : 1 à 45

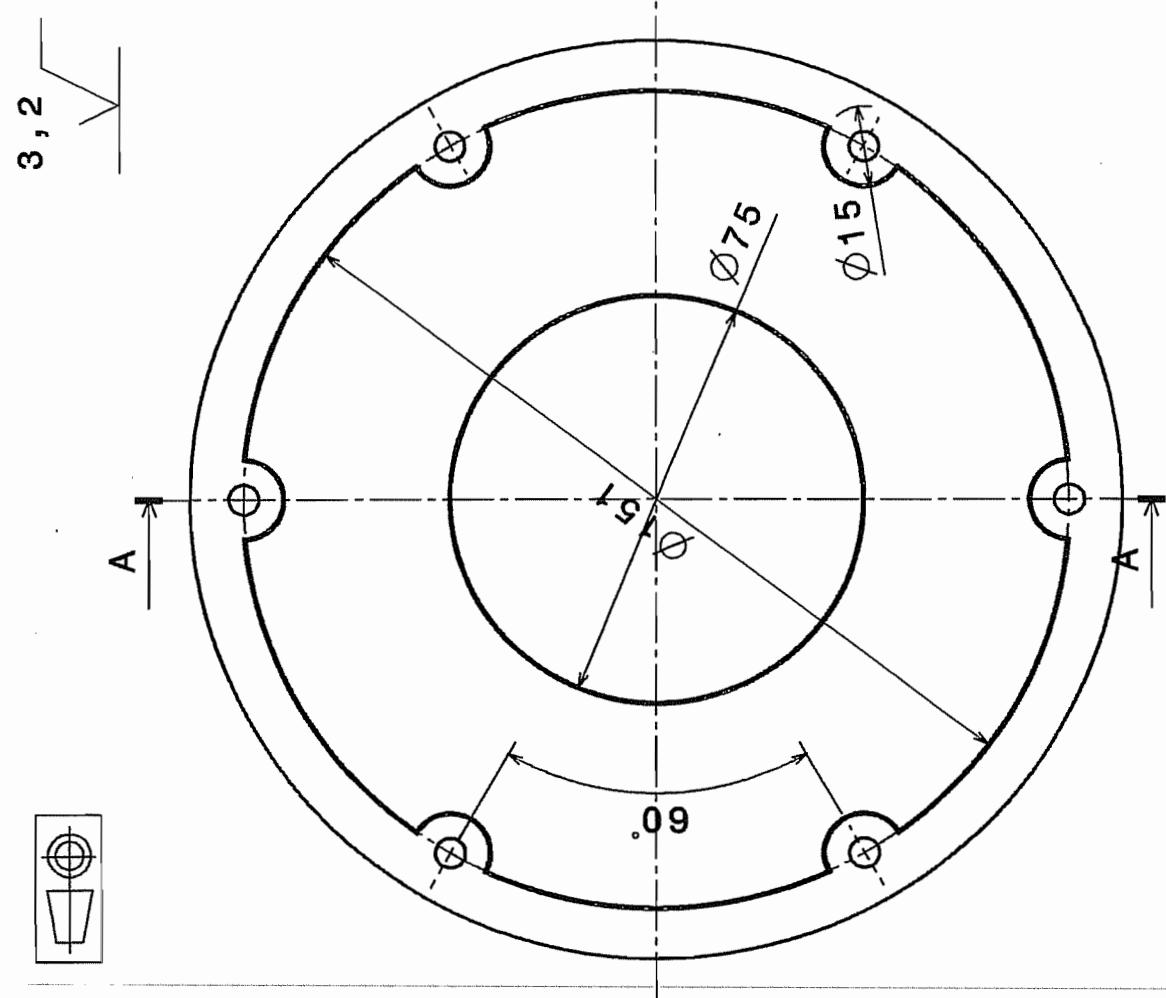
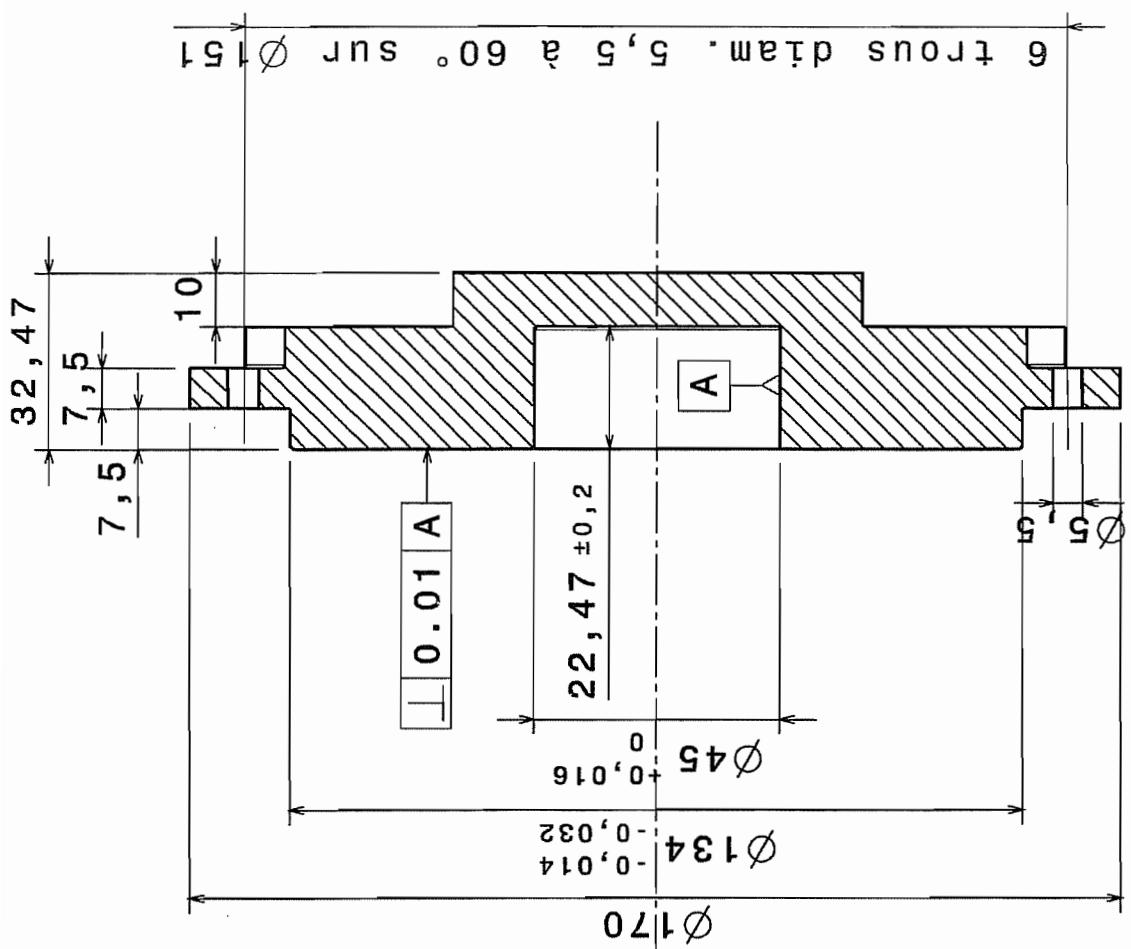
Tolérance générale : $\pm 0,2$
Choper la pâtes en 2 au niveau d'un d'entre eux d'utiliser la face B
Etendre la face B flétrir le repère_12 puis flétrir la face B

Coupe A-A

Modèle 1 repère_4
Bague fendue matière : PMMA
Merken Patrick ULG
Croquet Vincent ULB
17 décembre 2001

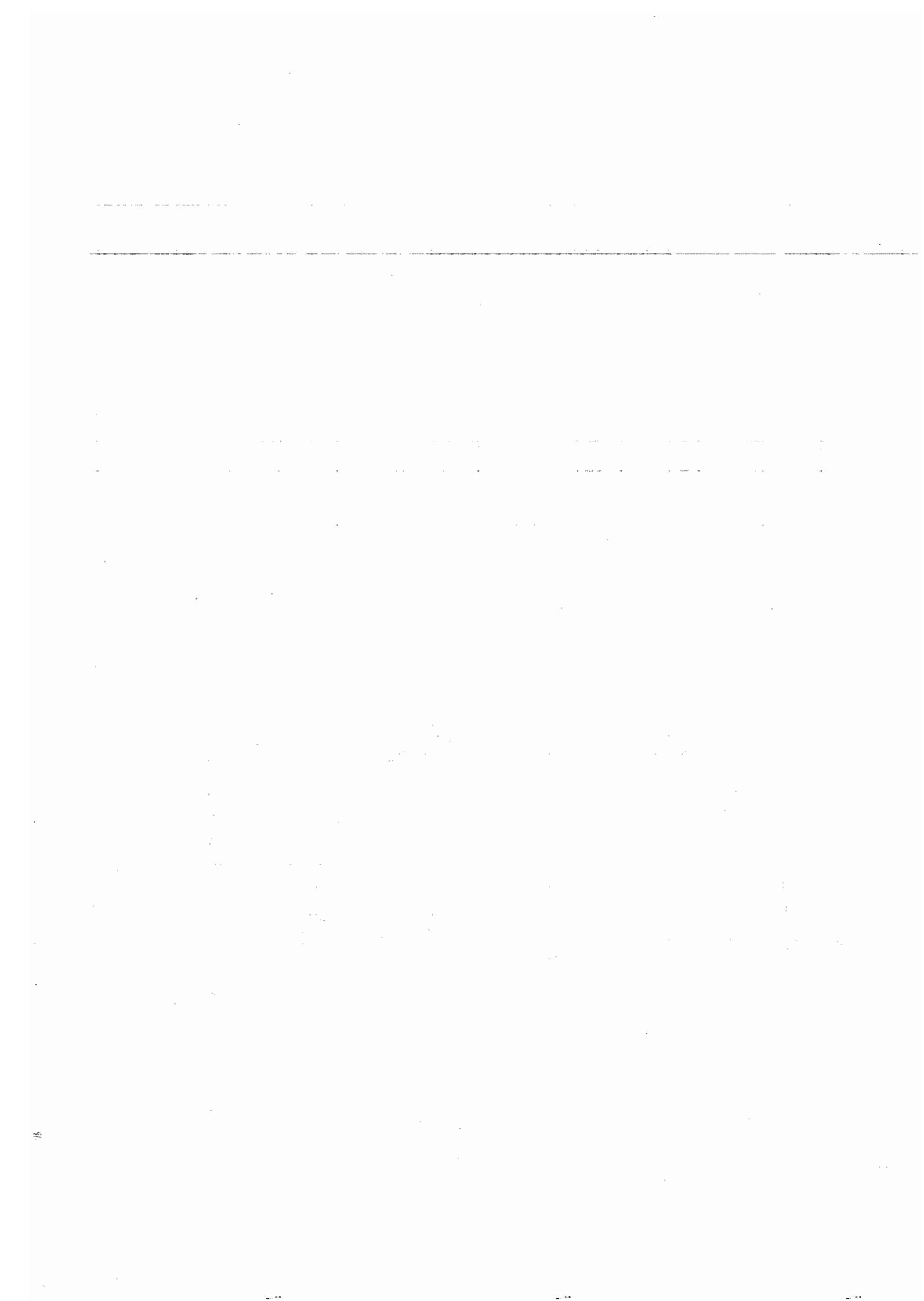


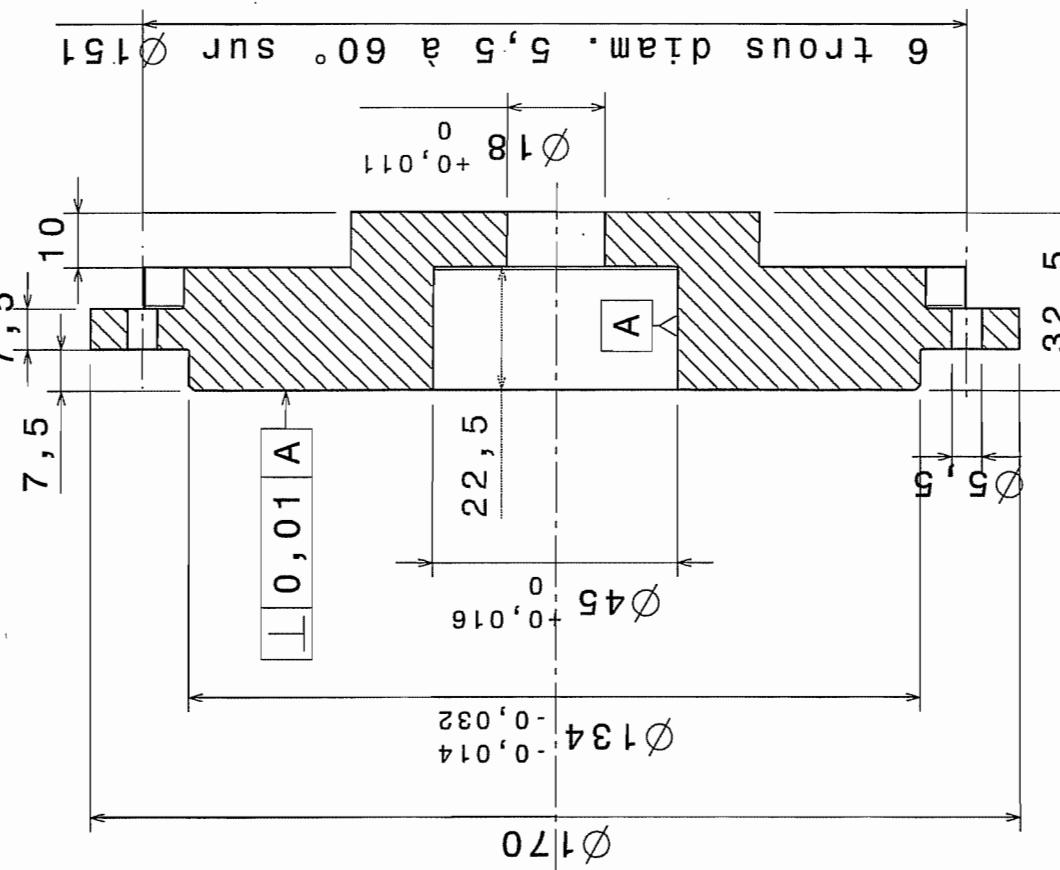




Modèle 1 repère 6a
Flasque matière : PMMA
Merken Patrick ULG
Croquet Vincent ULB
17 décembre 2001

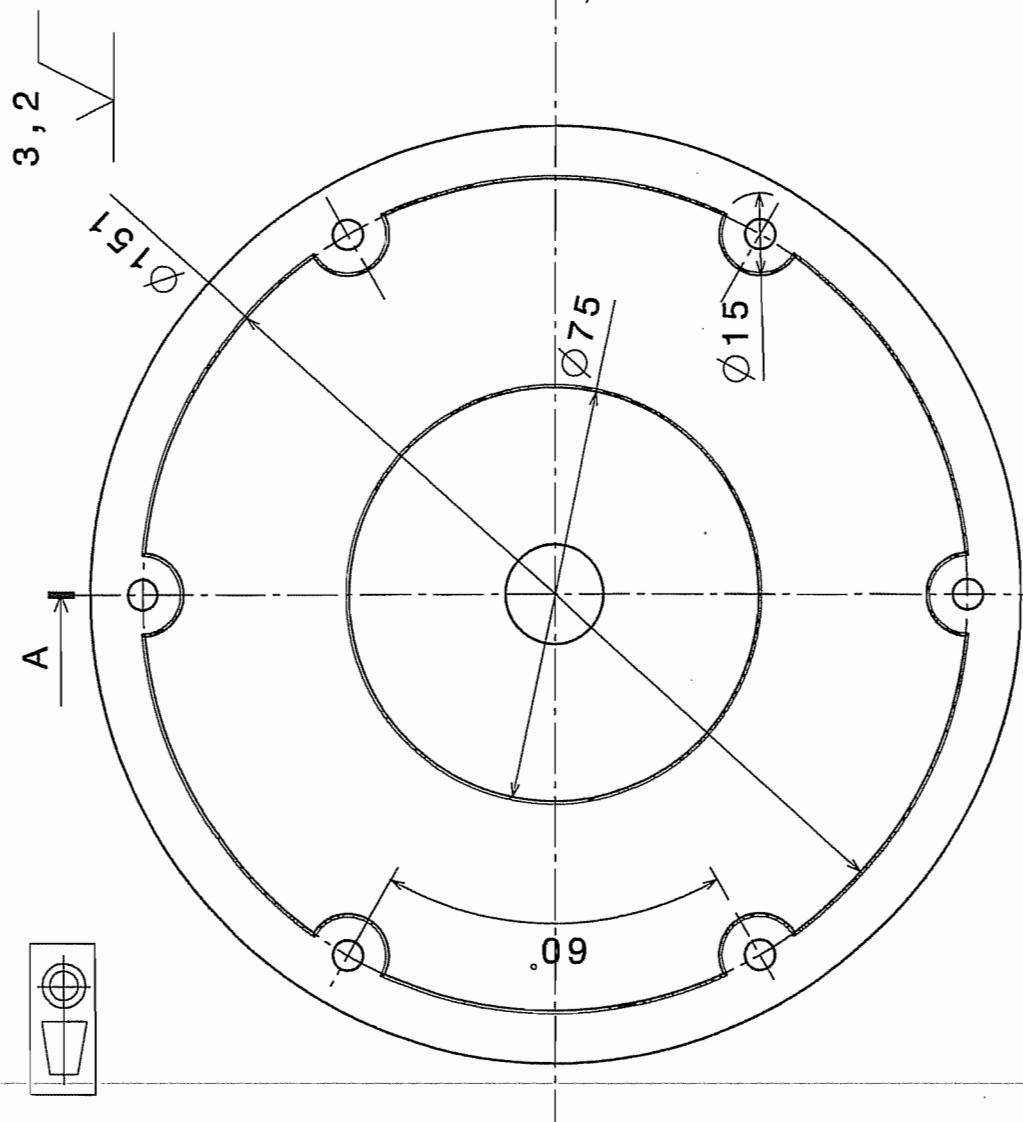
Echelle : 3:4
 congés : Ø 0,5 maxi
 chanfreins : 1 à 45° Tolérance générale : ± 0,2





Coupe A-A

Modèle 1 repère_6b
Flasque matière : PMMA
Menken Patrick ULG
Croquet Vincent ULB
17 décembre 2001

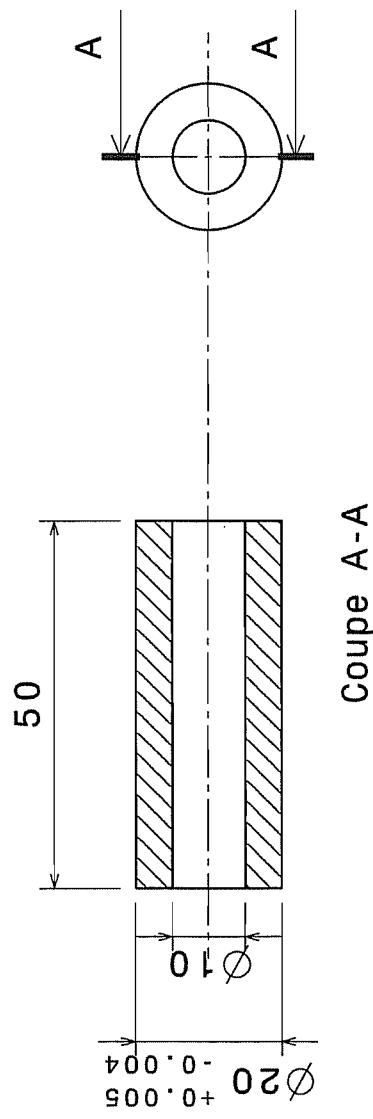


Modèle 1 repère_6b
Echelle : 3:4
congés : $\phi 0,5$ maxi
chanfreins : 1 à 45° Tolérance générale : $\pm 0,2$

Modèle 1 repère_6a
Echelle : 3:4
congés : $\phi 0,5$ maxi
chanfreins : 1 à 45°



3 , 2

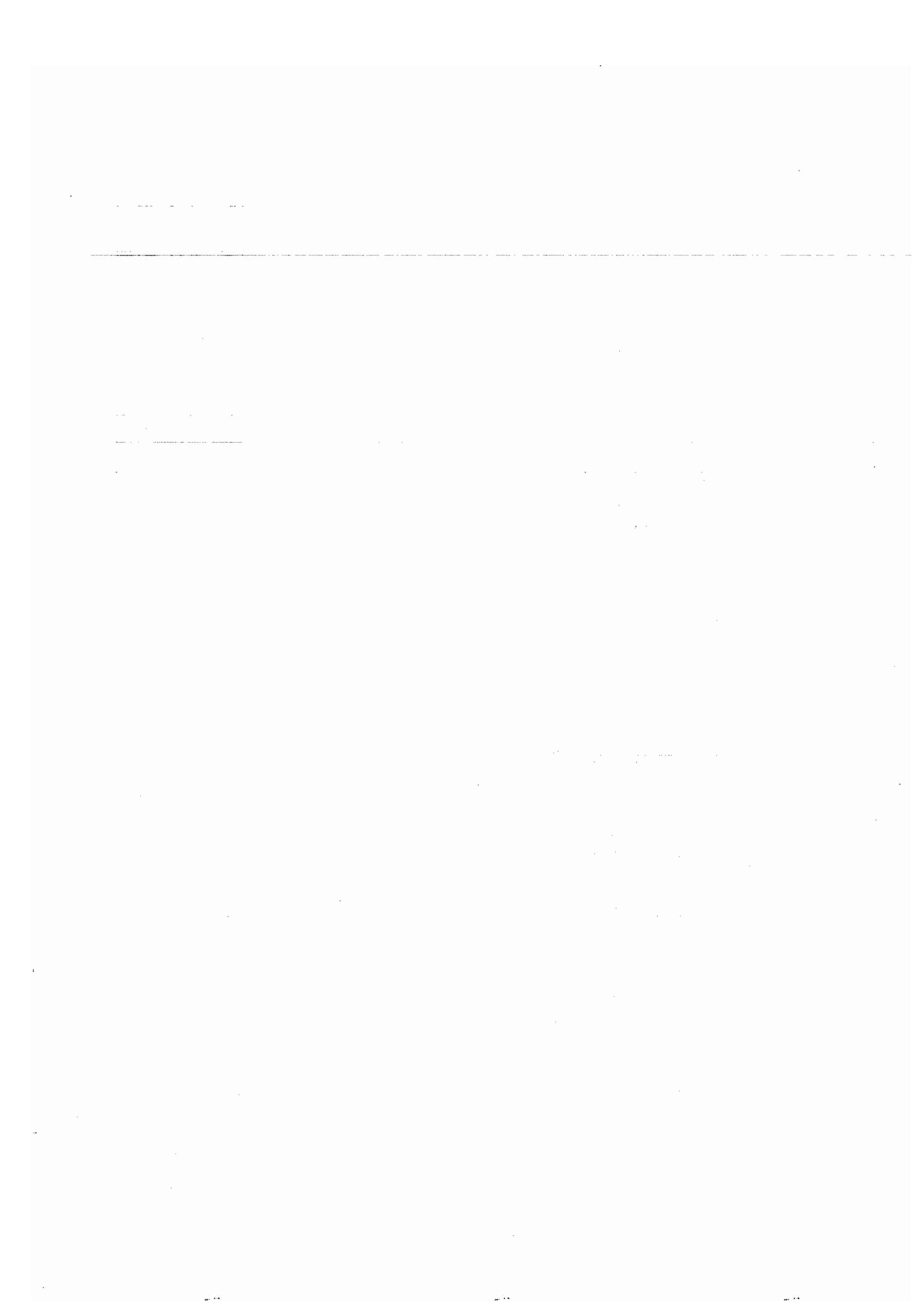


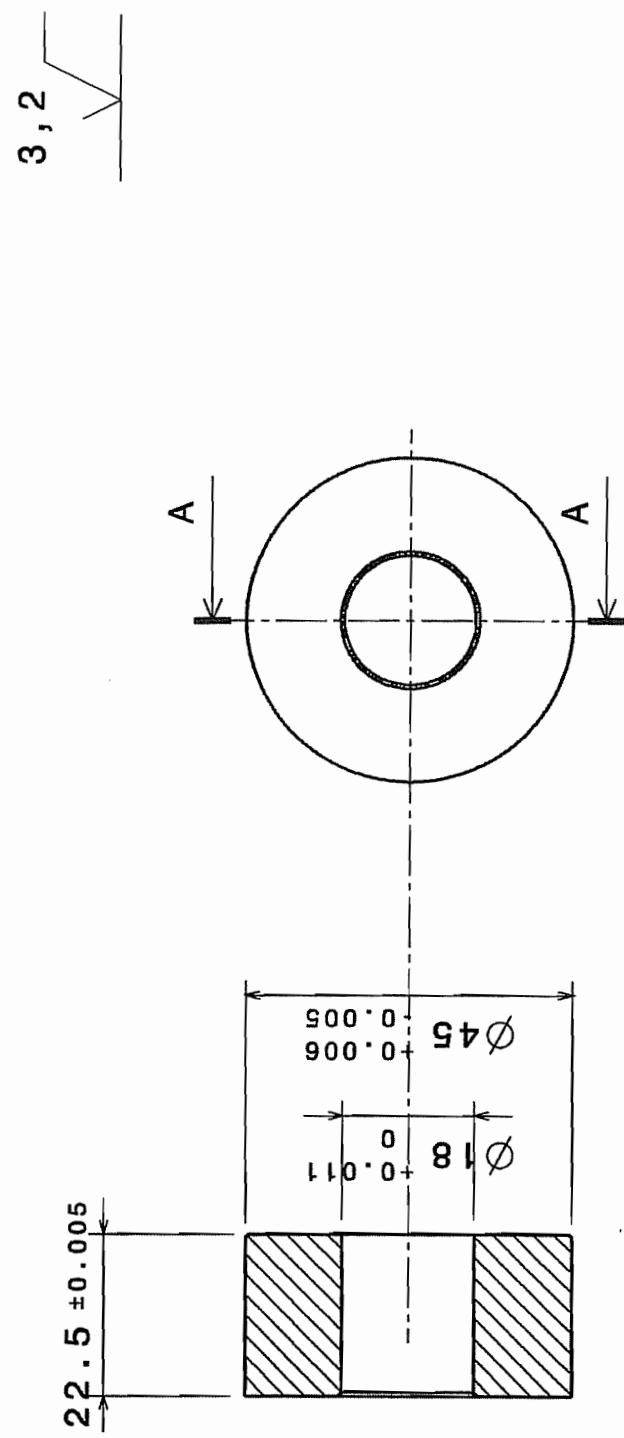
ment serrant dans repère_4

Echelle : 1:1
congés : ϕ 0.5 maxi
chancfreins : 1 à 45°

Tolérance générale : ± 0,2

Modèle 1 repère_7	2 pièces
Tubulure matière :	PC1000
Merken Patrick	ULG
Croquet Vincent	ULB
17 décembre 2001	



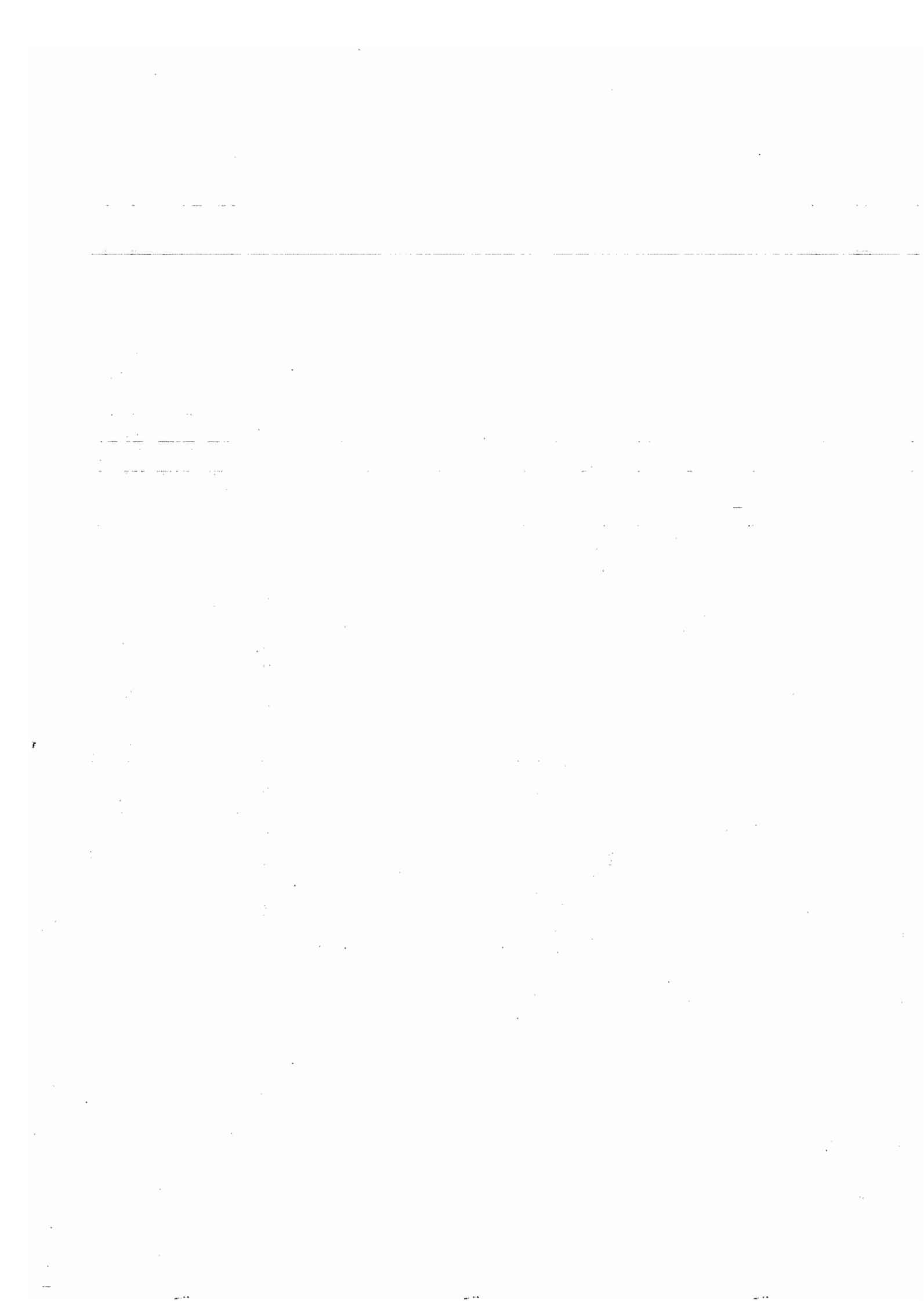


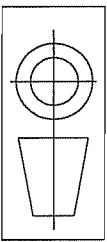
à marquer dans les repères_Ga et Gb afin de régler le jeu entre chacunes de ces pièces et le repère_2 à 0,1

Echelle : 1:1
chanfreins : 1 à 45°

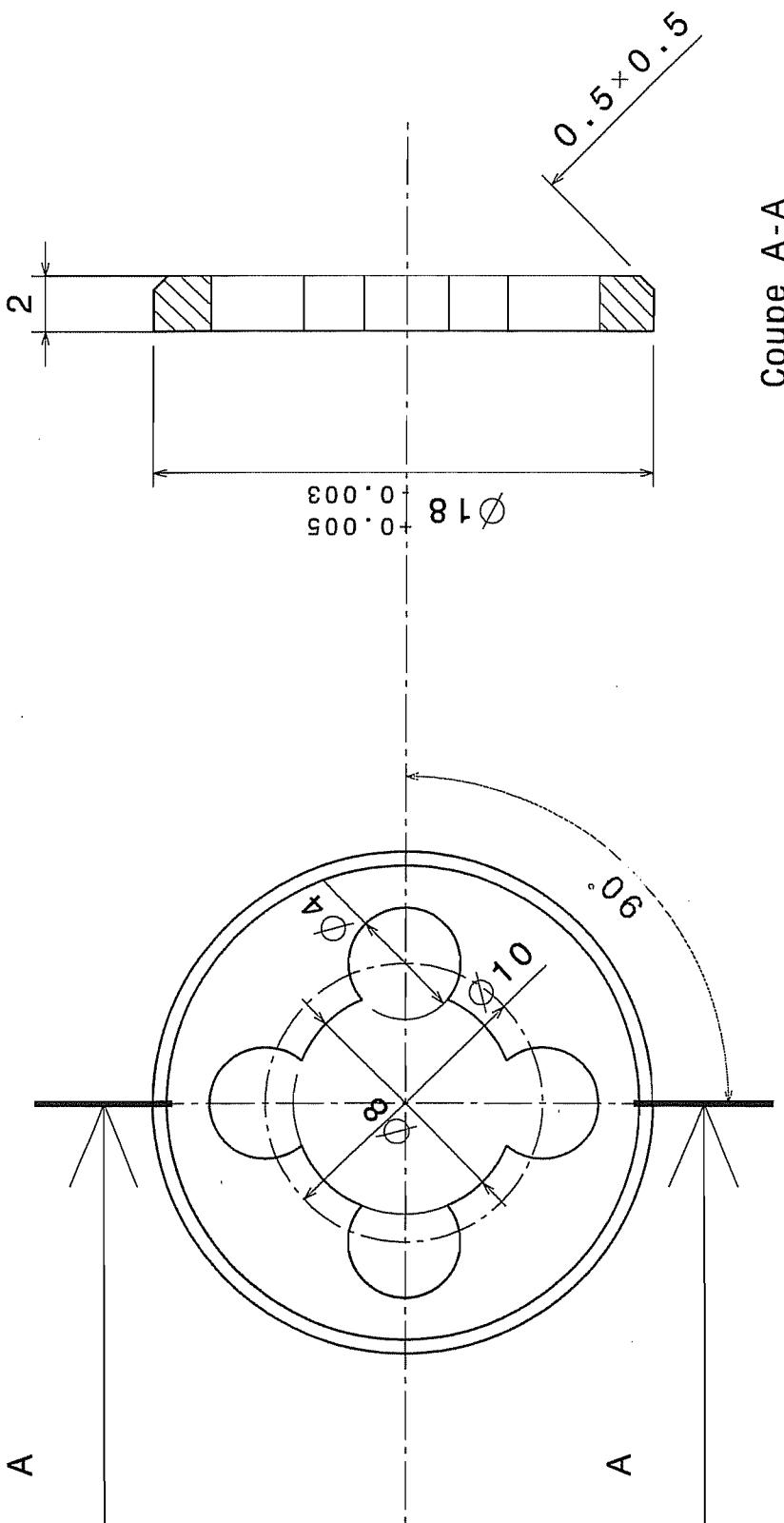
Tolérance générale : ± 0,2

Modèle 1	repère_8	2 pièces
Coussinet	matière :	POM-C blanc
Merken	Patrick	ULG
Croquet	Vincent	ULB
17 décembre 2001		





3,2



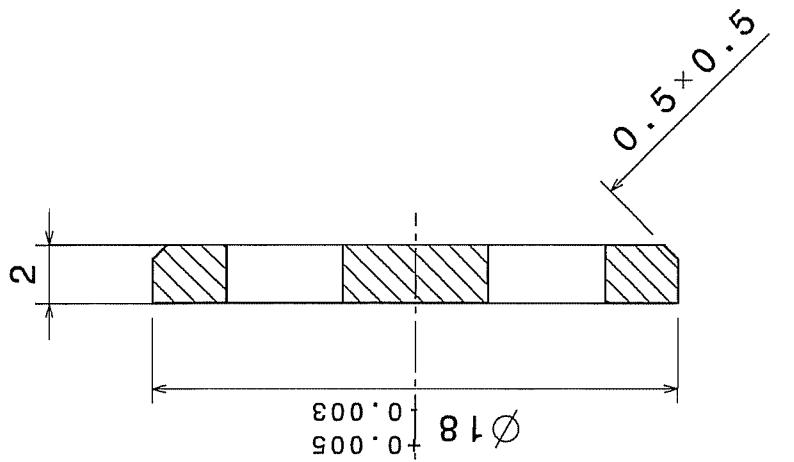
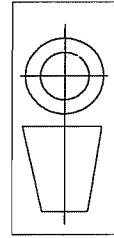
Coupe A-A

à monter dans le repère_4 avant de mettre à épaisseur

Echelle : 4:1

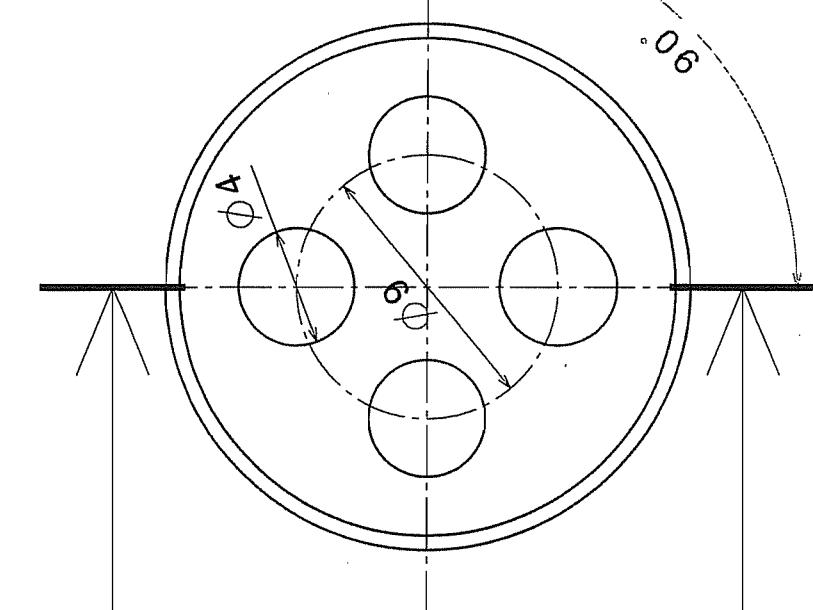
Tolérance générale : $\pm 0,2$

Modèle 1 repère 12
Arrêt matière : PC1000
Merken Patrick ULG
Croquet Vincent ULB
17 décembre 2001



Coupe A-A

3,2



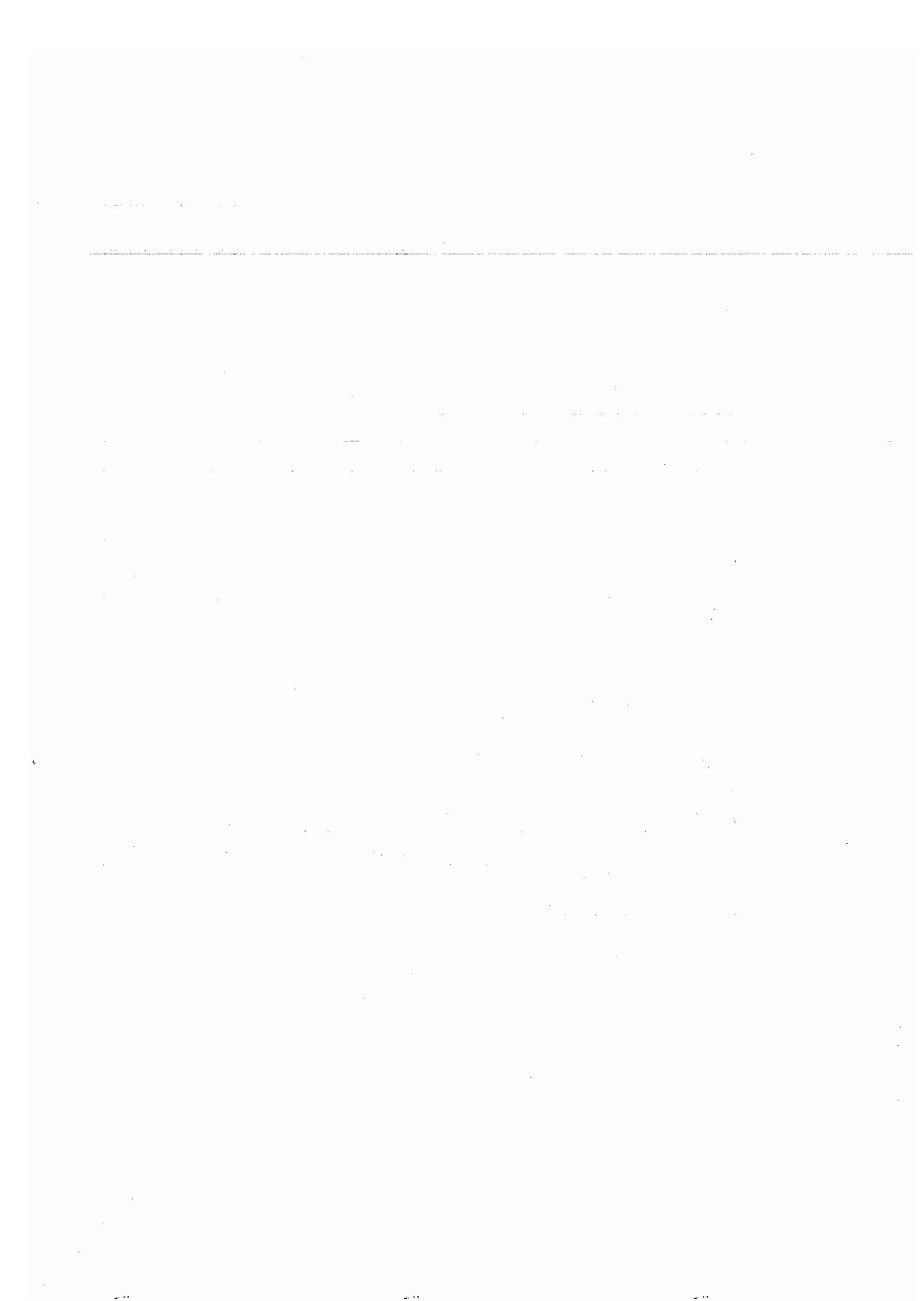
A

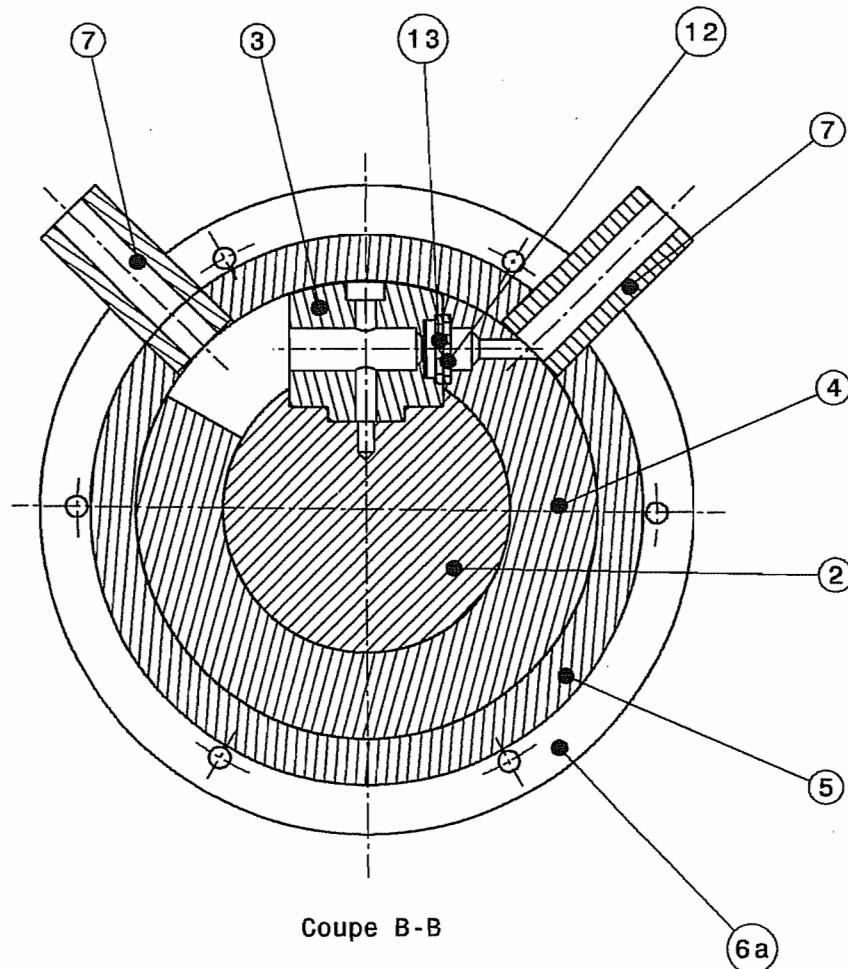
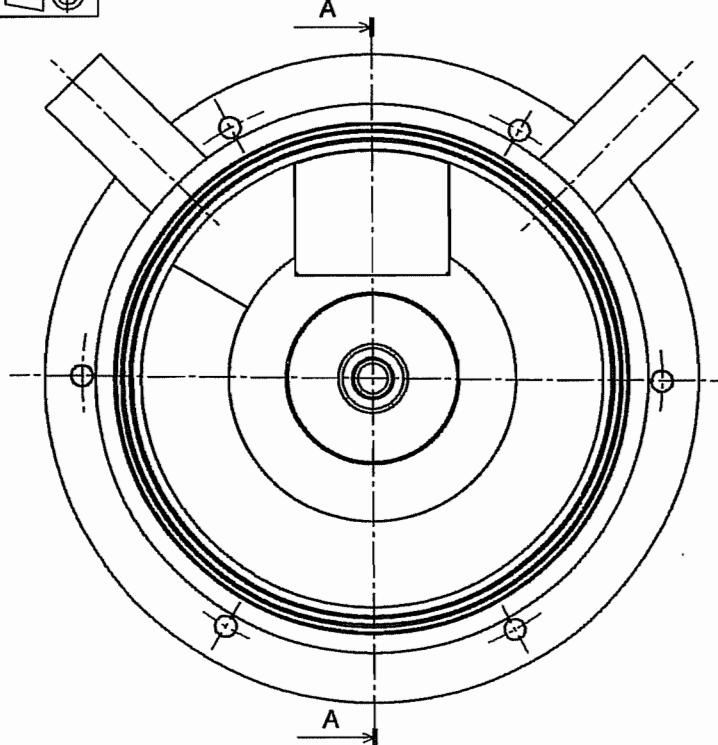
A

Echelle : 4:1

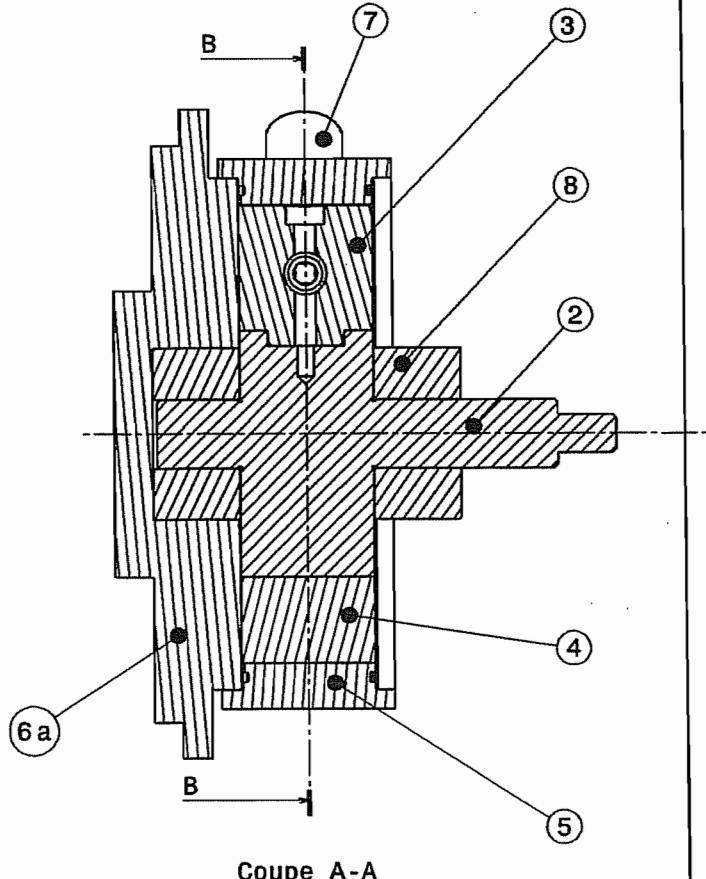
Tolérance générale : ± 0,2

Modèle 1 repère_13
Poussoir matière : PC1000
Merken Patrick ULG
Croquet Vincent ULB
17 décembre 2001





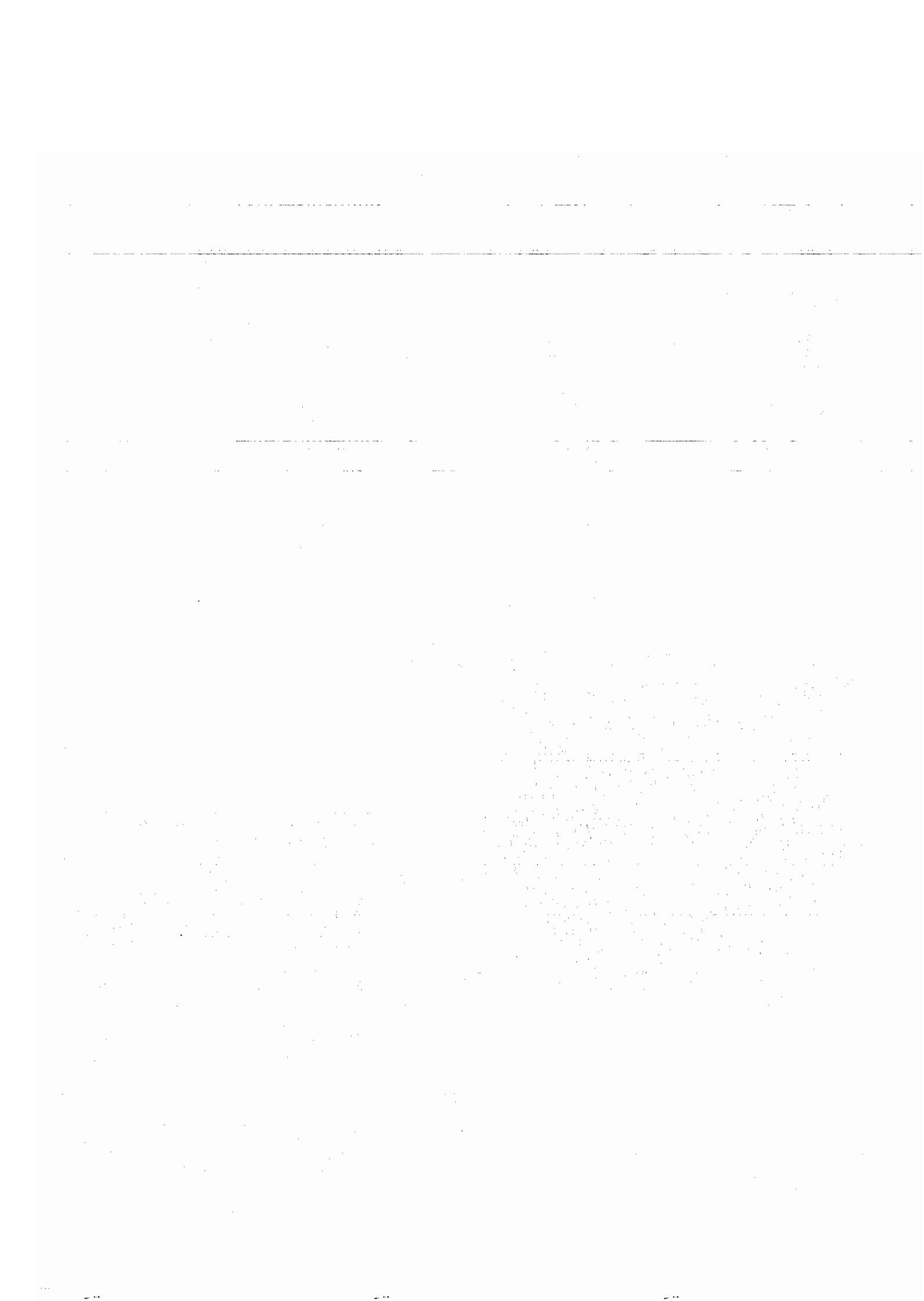
La pièce 6b n'est pas représentée.
Les spécifications détaillées sont présentées
dans un document séparé.



Coupe A-A

Echelle : 3:4

Rep	Désignation	nbre	Mat.
<i>Modèle 1 plan d'ensemble</i>			
Merken Patrick	ULG		
Croquet Vincent	ULB		
Date : 17 décembre 2001			



3.7. Fiche technique du clapet LEE



LEE FICHE TECHNIQUE

CLAPET ANTI-RETOUR 187 - FUITE NULLE

VUE EN COUPE



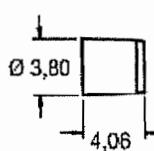
DÉBIT LIBRE DANS LE SENS NORMAL DE PASSAGE



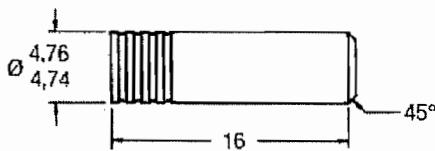
DÉBIT LIBRE EN SENS INVERSE

The Lee Company a développé un clapet anti-retour miniature à fuite nulle de 4,76 mm de diamètre extérieur et de 16 mm de long. Ce clapet offre les mêmes caractéristiques qu'un clapet/métal en ce qui concerne sa résistance et sa durée de vie tandis qu'un siège en élastomère moulé assure une étanchéité parfaite. Ces clapets sont prévus pour une pression maximum de fonctionnement de 21 MPa et ont une masse nominale de 1,5 gramme. Les différents composants sont entièrement réalisés en acier inoxydable.

CLAPET ANTI RETOUR A FUITE NULLE



GOUPILLE



CORPS

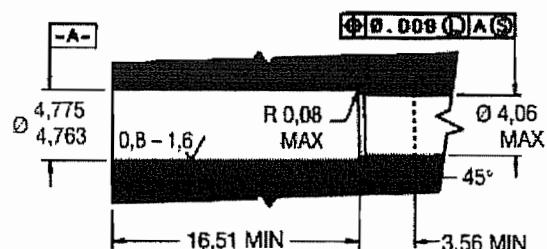
MATÉRIAUX

Référence	Matériau	Spécification	Passivation
Corps	Acier inox 304	QQ-S-763	MIL-S-5002
Cage	Acier inox 304	QQ-S-763	MIL-S-5002
Soupape	Acier inox 15-5PH	AMS-5659	MIL-S-5002
Siège	Acier inox 15-5PH	AMS-5659	MIL-S-5002
Ressort	Acier Inox 17-7PH	AMS-5678	MIL-S-5002
Goupille	Acier inox 17-4PH	AMS-5643	MIL-S-5002
Siège élastomère	Fluorocarbonate	MIL-R-83248	-

DIMENSION RÉELLE

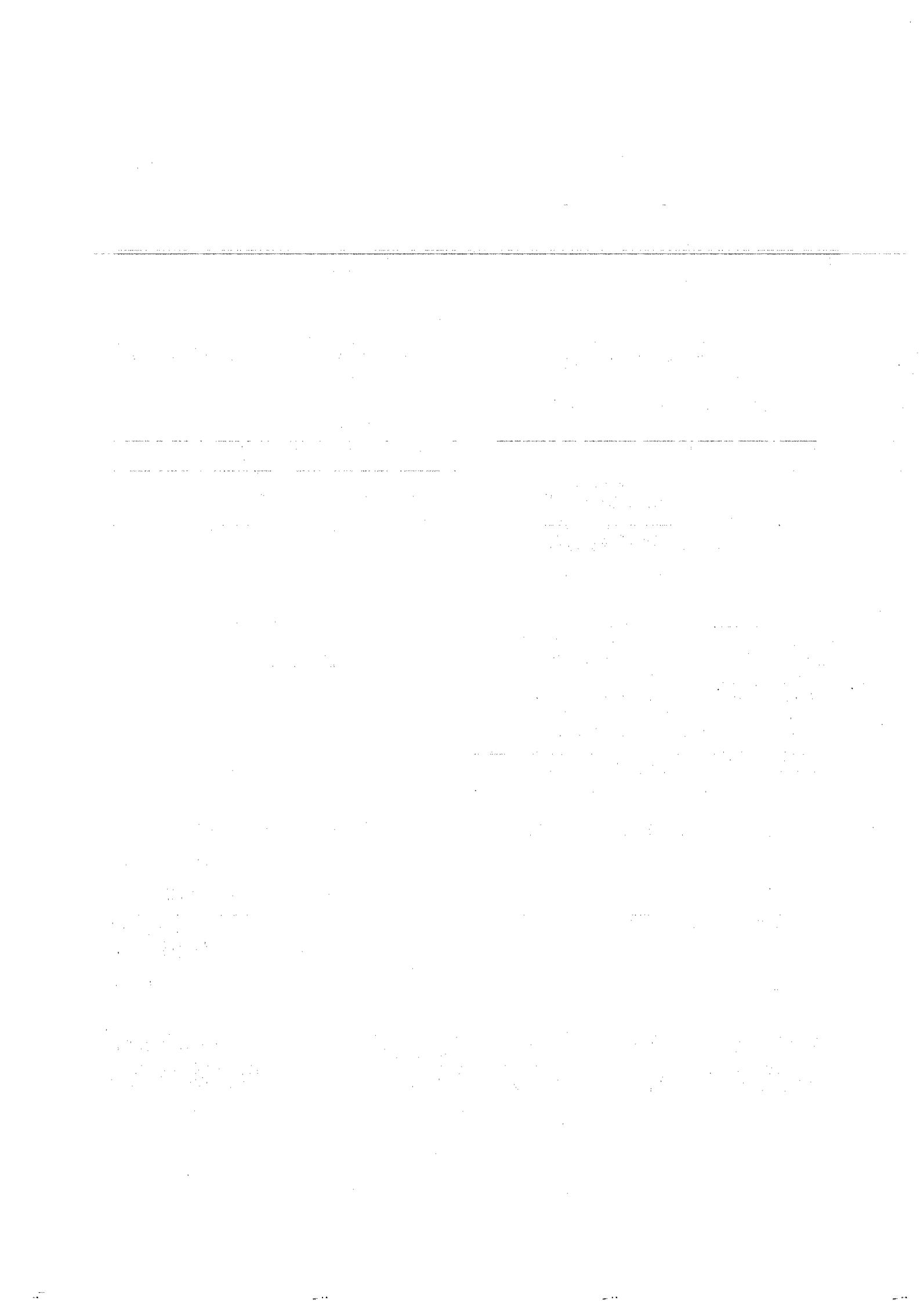


TROU D'INSTALLATION



RÉFÉRENCE	PRESSION D'OUVERTURE (MPa)	FUITE DANS LE SENS FERMÉ (0,035 - 21 MPa)	VALEUR DE LOHM À PLEINE OUVERTURE (Max.)	SENS D'ÉCOULEMENT
CSFA 1876005 A	0,035 ± 0,02	ZERO	400	NORMAL
CSRA 1876005 A	0,035 ± 0,02	ZERO	400	INVERSE

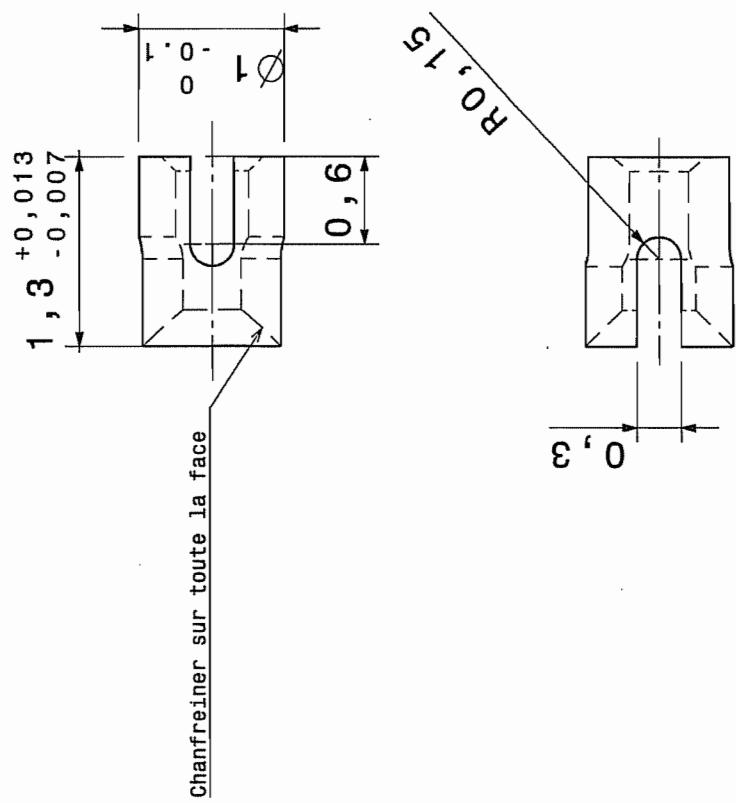
PDS 17/10/90



3.8. Plans du prototype v02



3.2

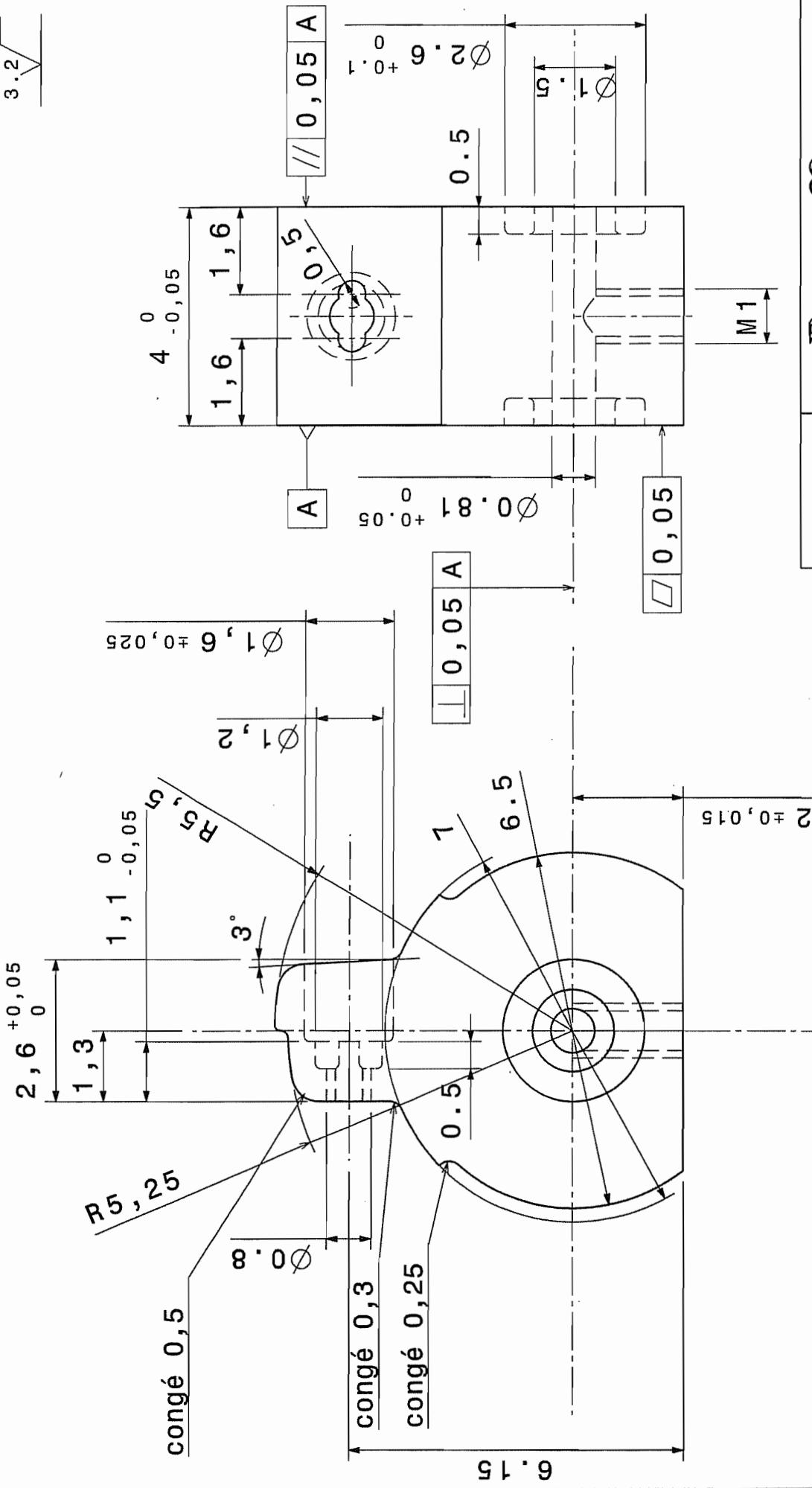


Echelle		Poussoir Ø2	
20:1	Matière	TiAl6V4	$\pm 0,1$
	Tolérance générale		
Merken Patrick		ULG	
A4	Version 02	21/08/2002	

Casser les arêtes 0,1 à 45°

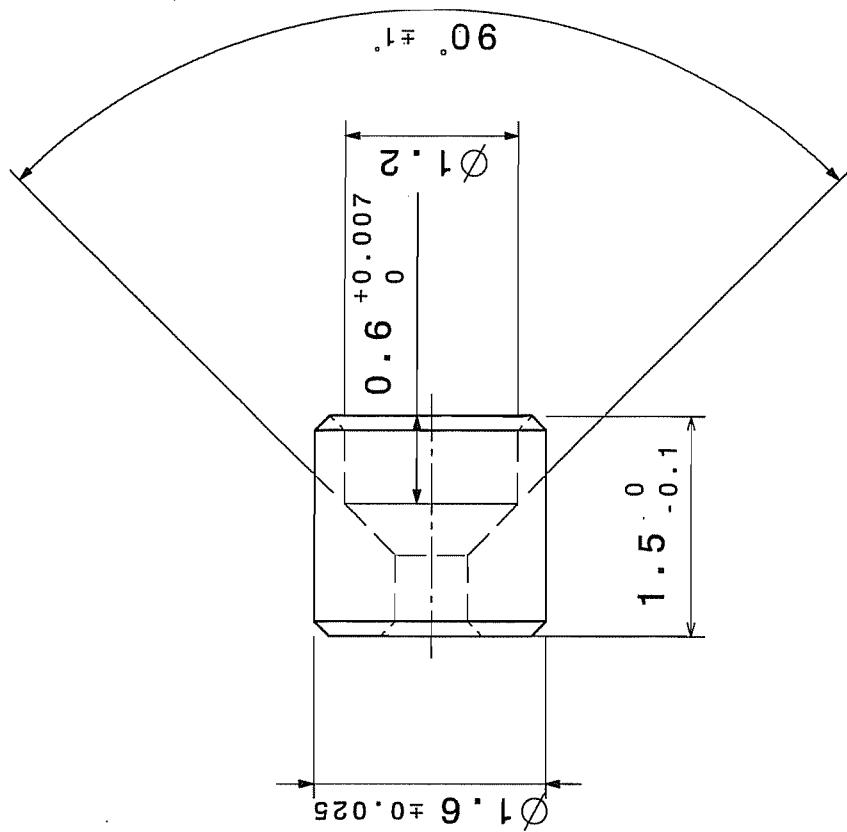
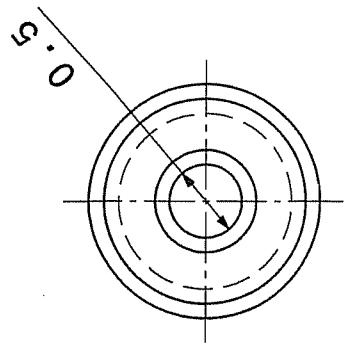


3.2



Echelle	<i>Rastom 02</i>		
10:1	Matière	TiAl6V4	
	Tolérance générale	+0,1	
A4	Version 02	ULG	22/08/2002

3 . 2

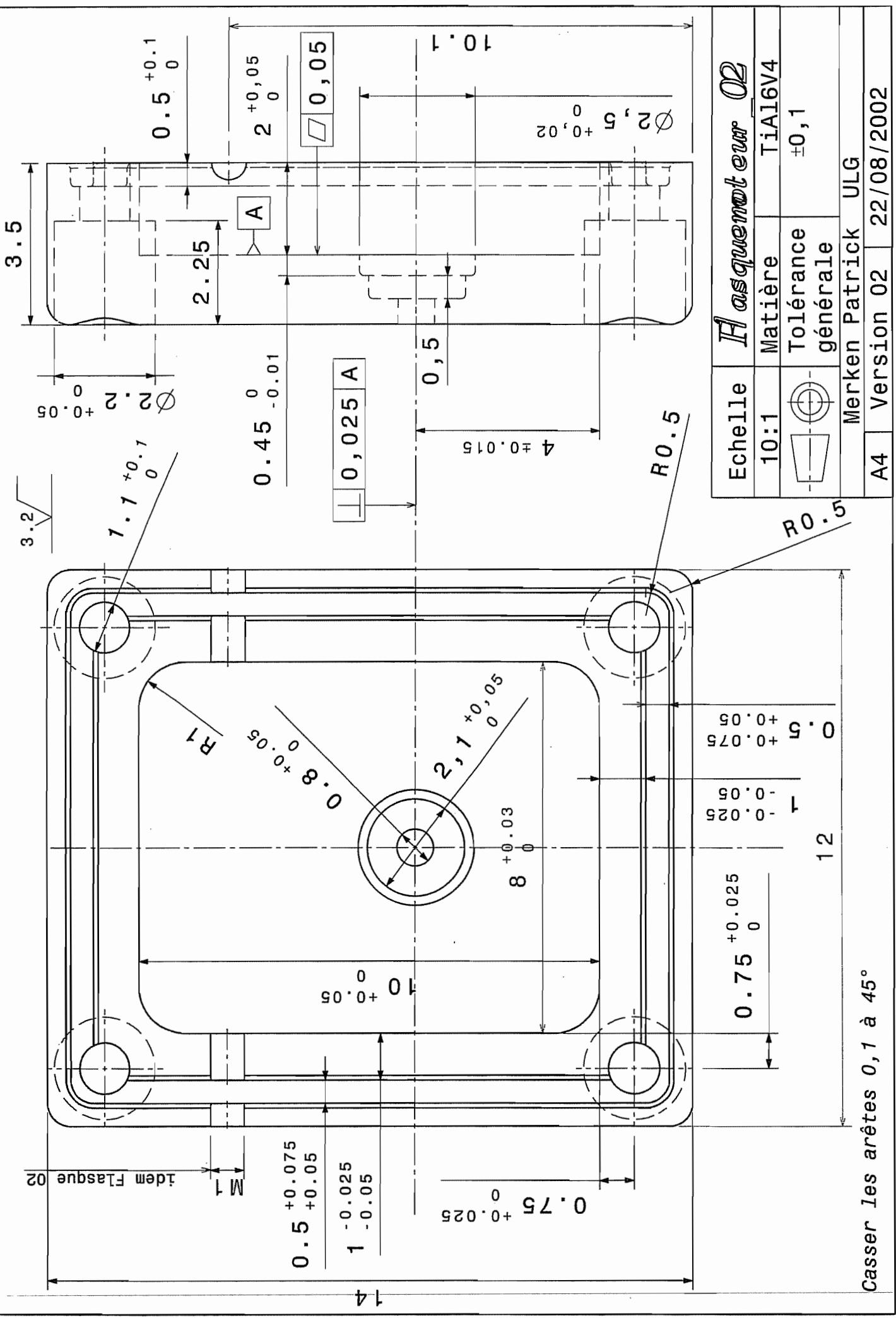


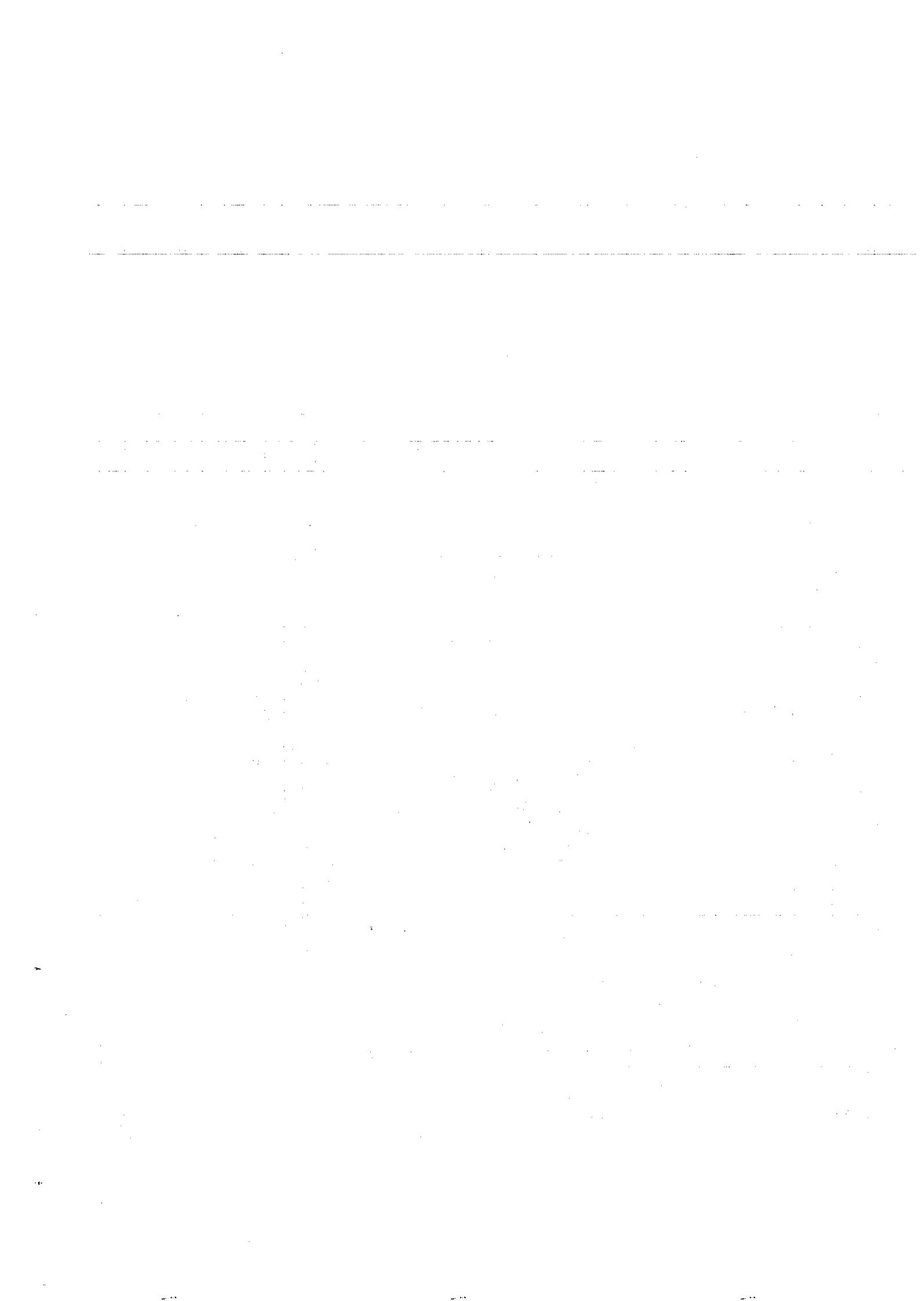
Nombre de pièces : 2

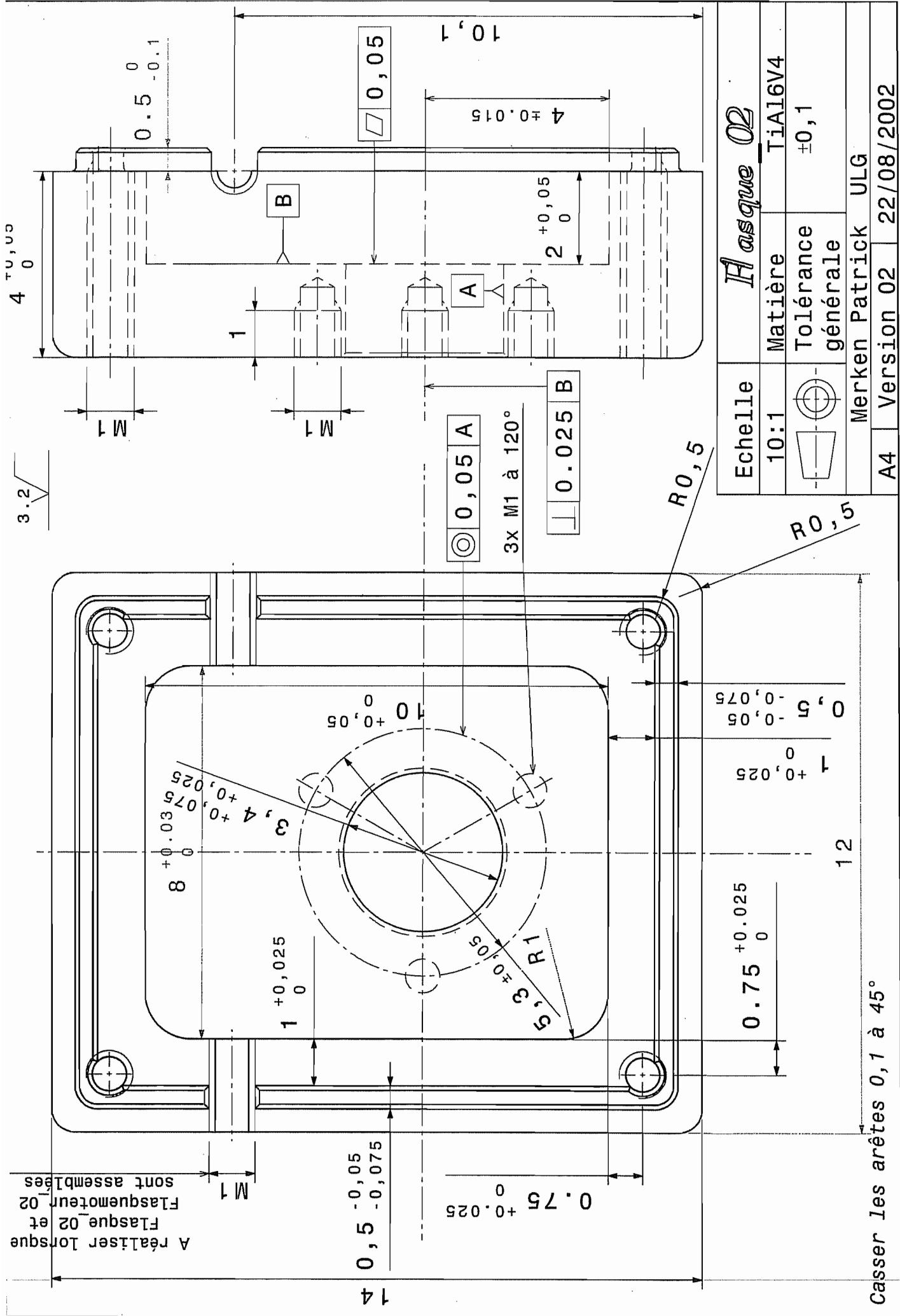
Echelle Insertclapets_02			
20 : 1	Matière	TiAl6V4	$\pm 0,1$
	Tolérance générale		
	Merken Patrick	ULG	
A4	Version 02	19/08/2002	

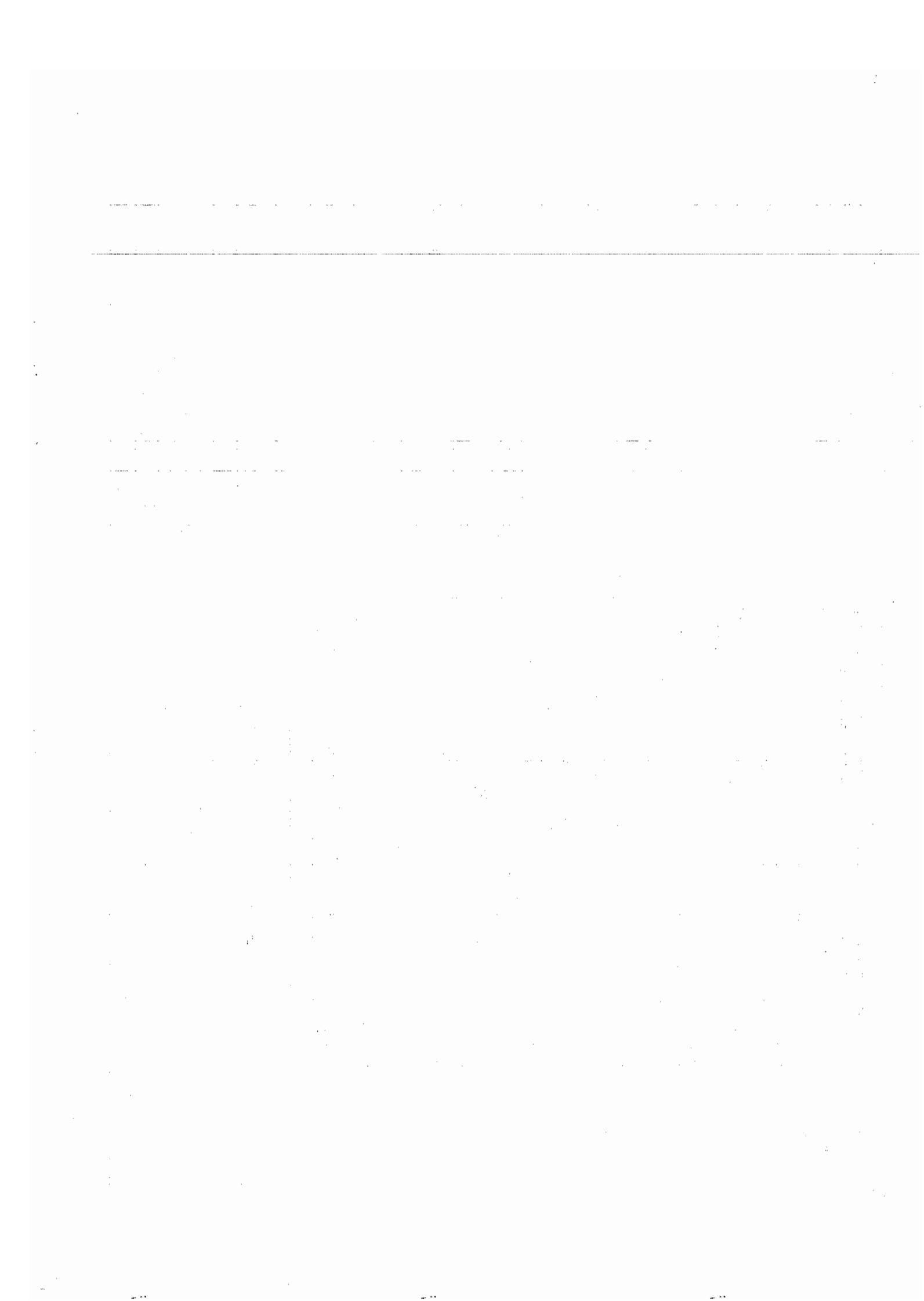
Casser les arêtes 0, 1 à 45°



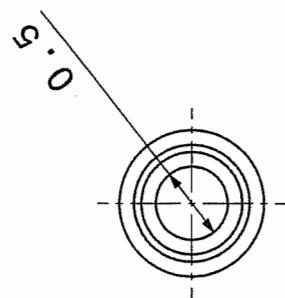
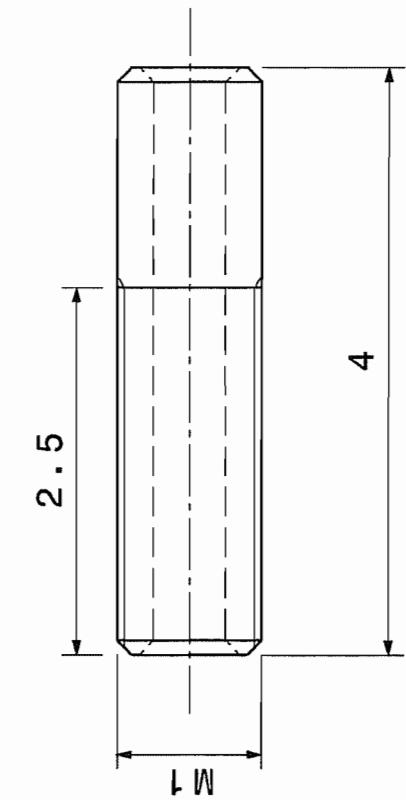








3 . 2

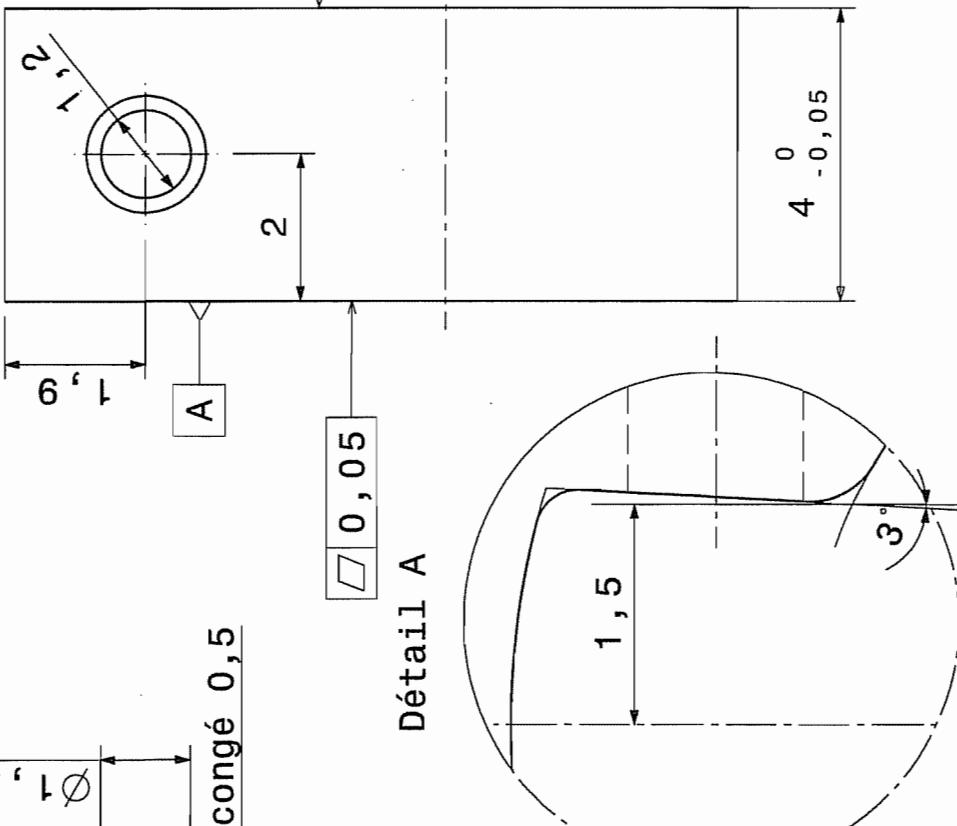
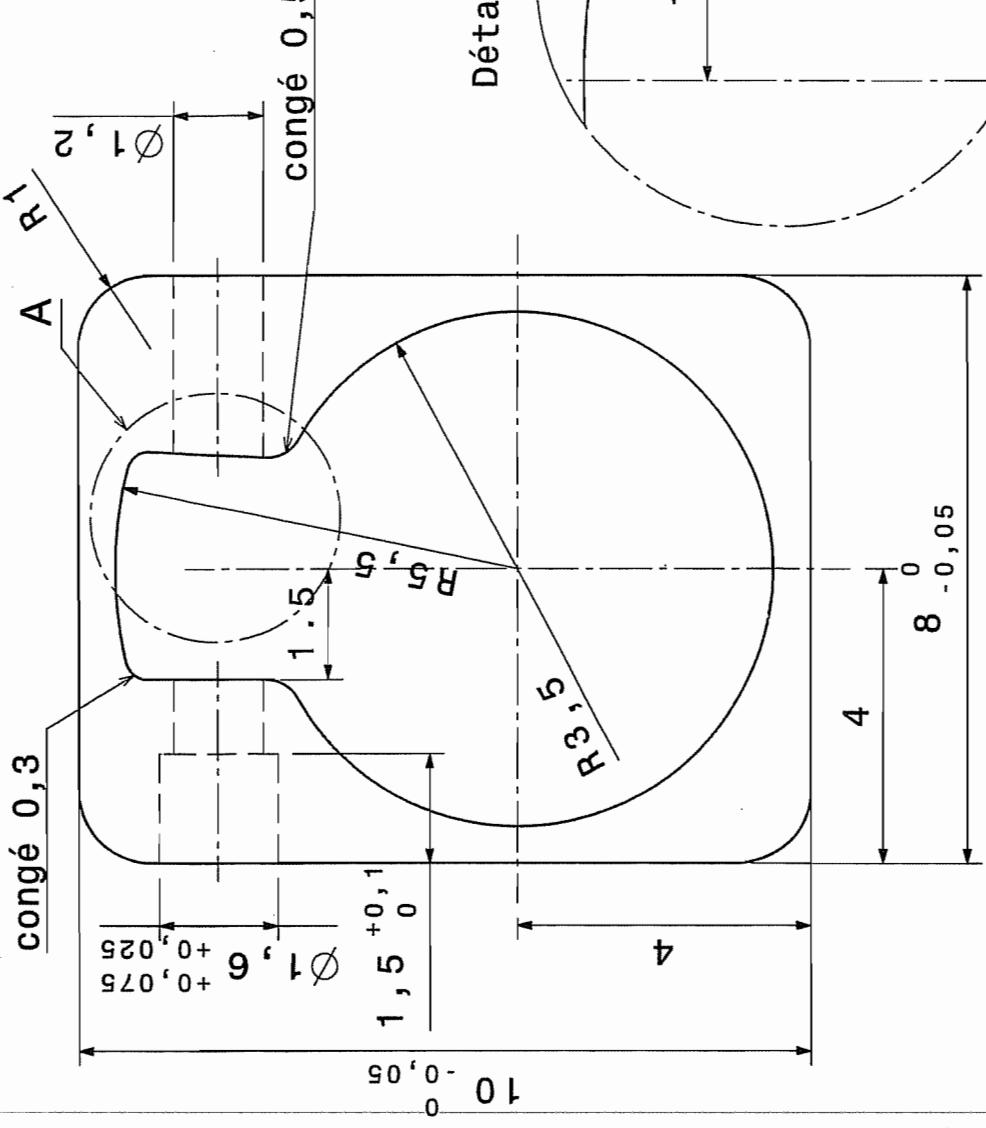


Nombre de pièces : 2

Echelle				Tubeadm 02	
20:1	Matière	TiAl6V4			$\pm 0,1$
	Tolérance générale				
A4	Version 02	Merken Patrick	ULG		19/08/2002

Casser les arêtes 0,1 à 45°

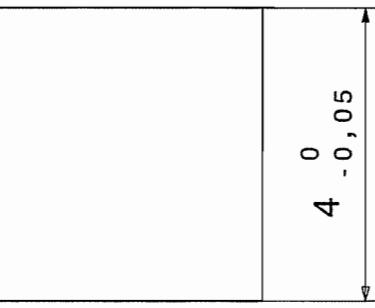
$\sqrt{3,2}$



// 0,05 A

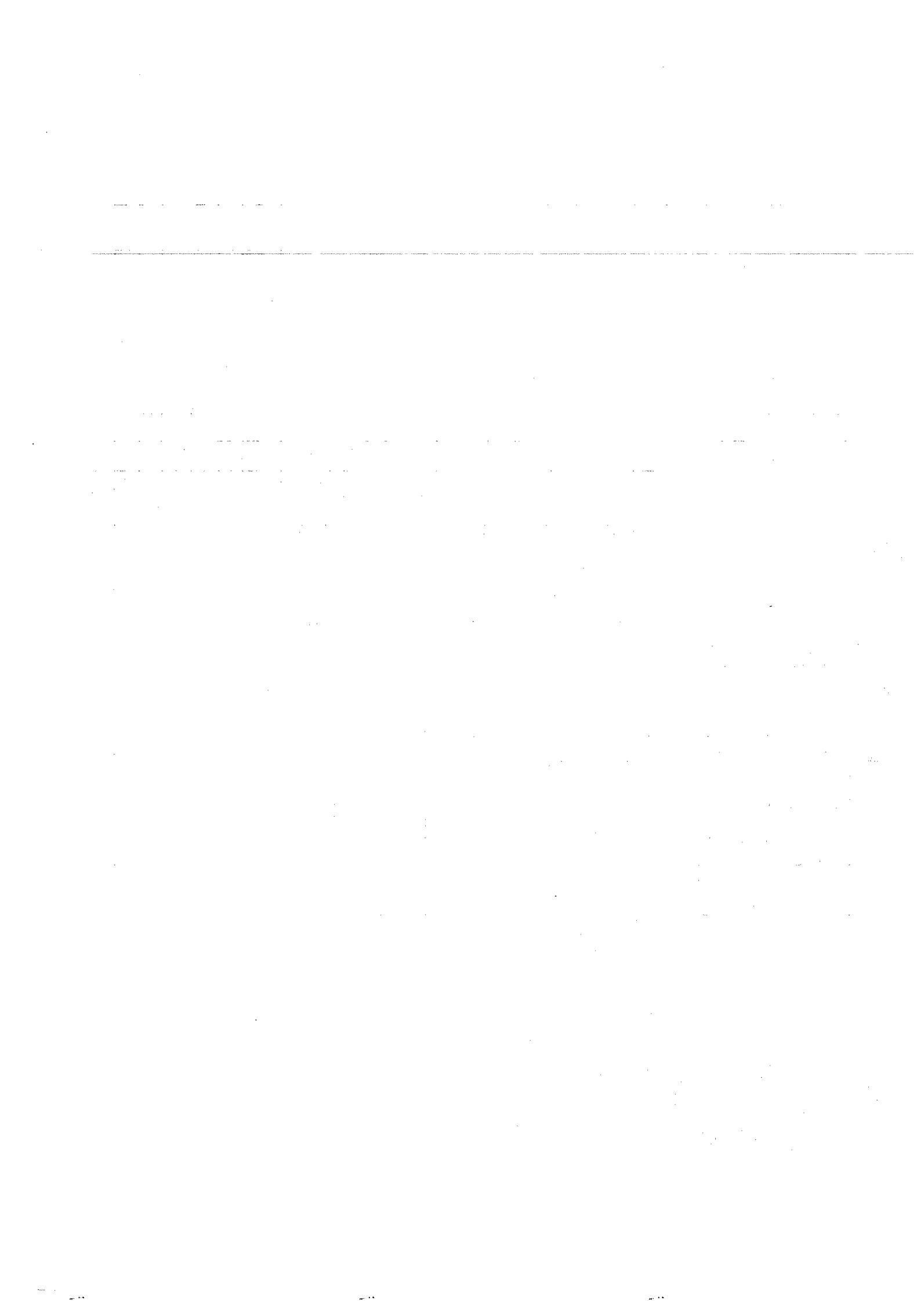
□ 0,05

Détail A

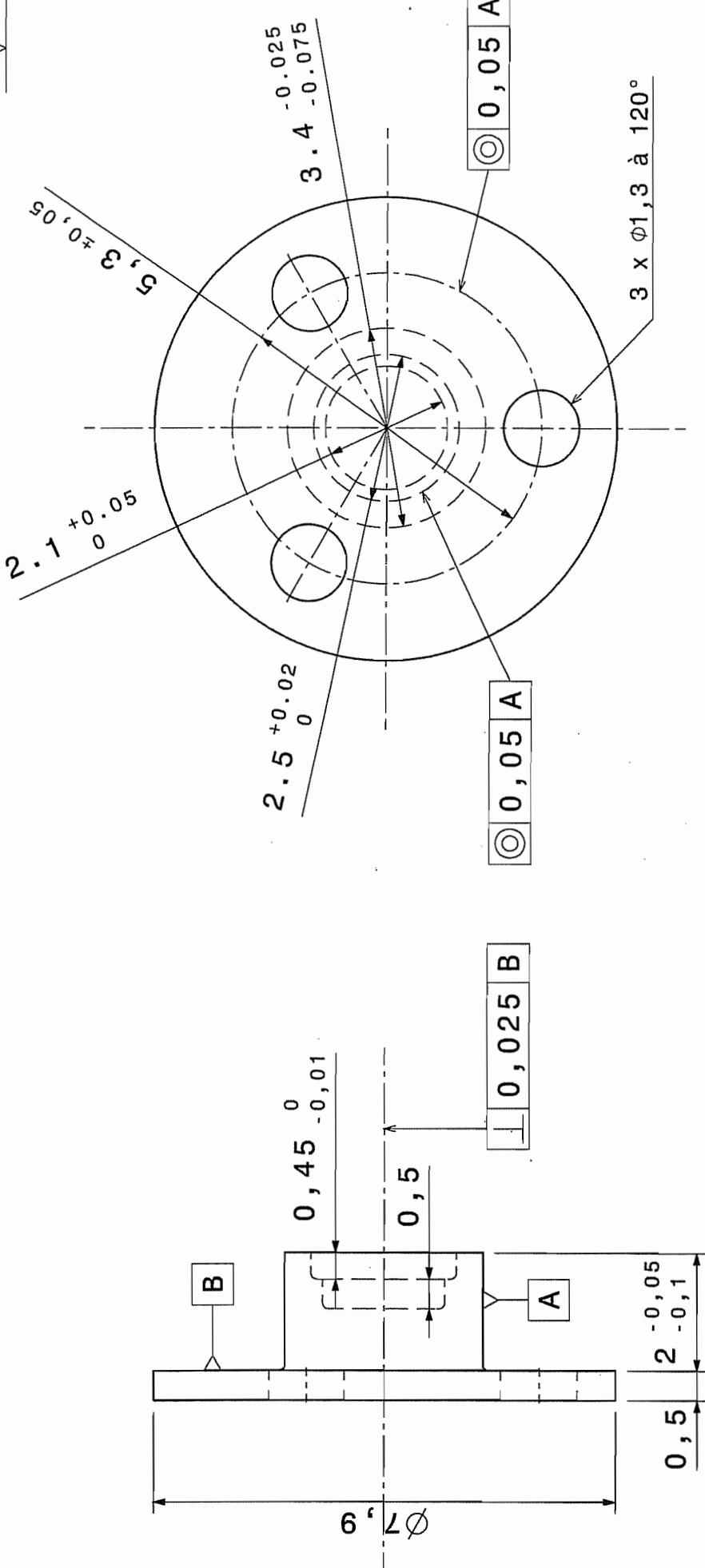


CorpsCentral 02	
Echelle 10:1	Matière TiAl6V4
Tolérance générale $\pm 0,1$	
Merken Patrick	ULG
A4	Version 02 22/08/2002

Casser les arêtes 0,1 à 45°

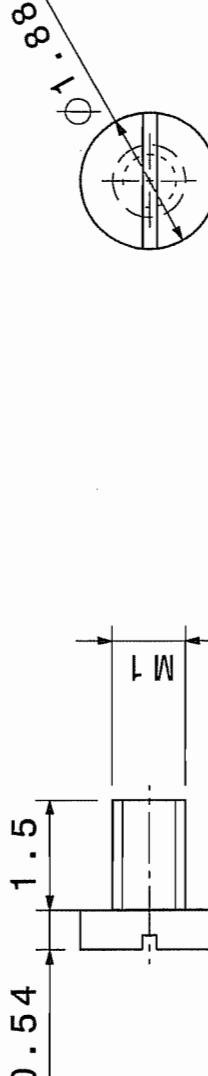
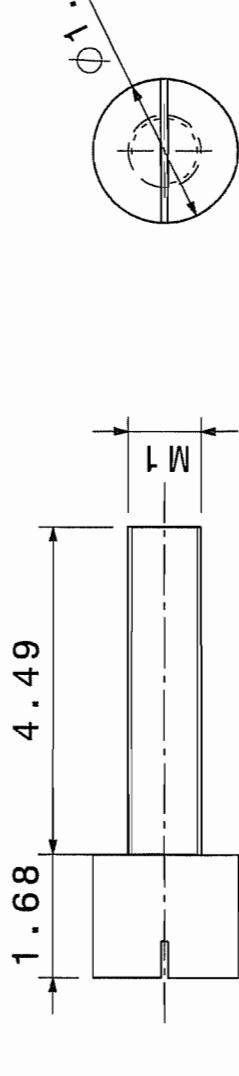


3.2

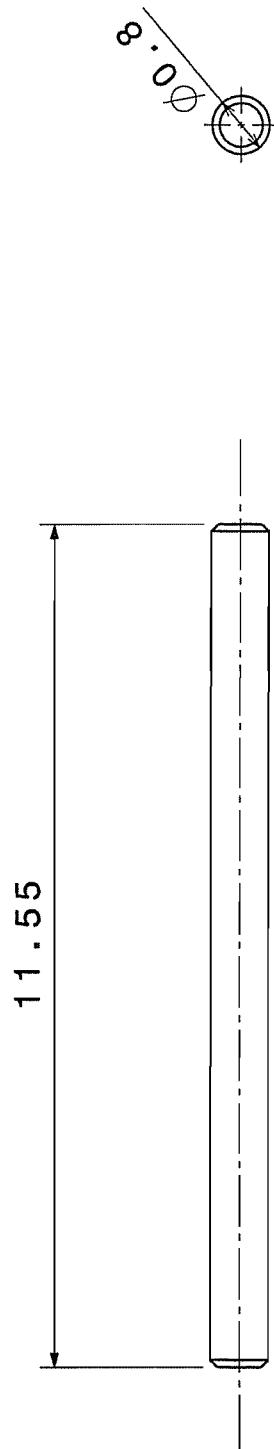


Echelle	Bâti fer ou 02	
10:1	Matière	TiAl6V4
	Tolérance générale	±0,1
Merken Patrick	ULG	
A4	Version 02	22/08/2002

Casser les arêtes 0,1 à 45°

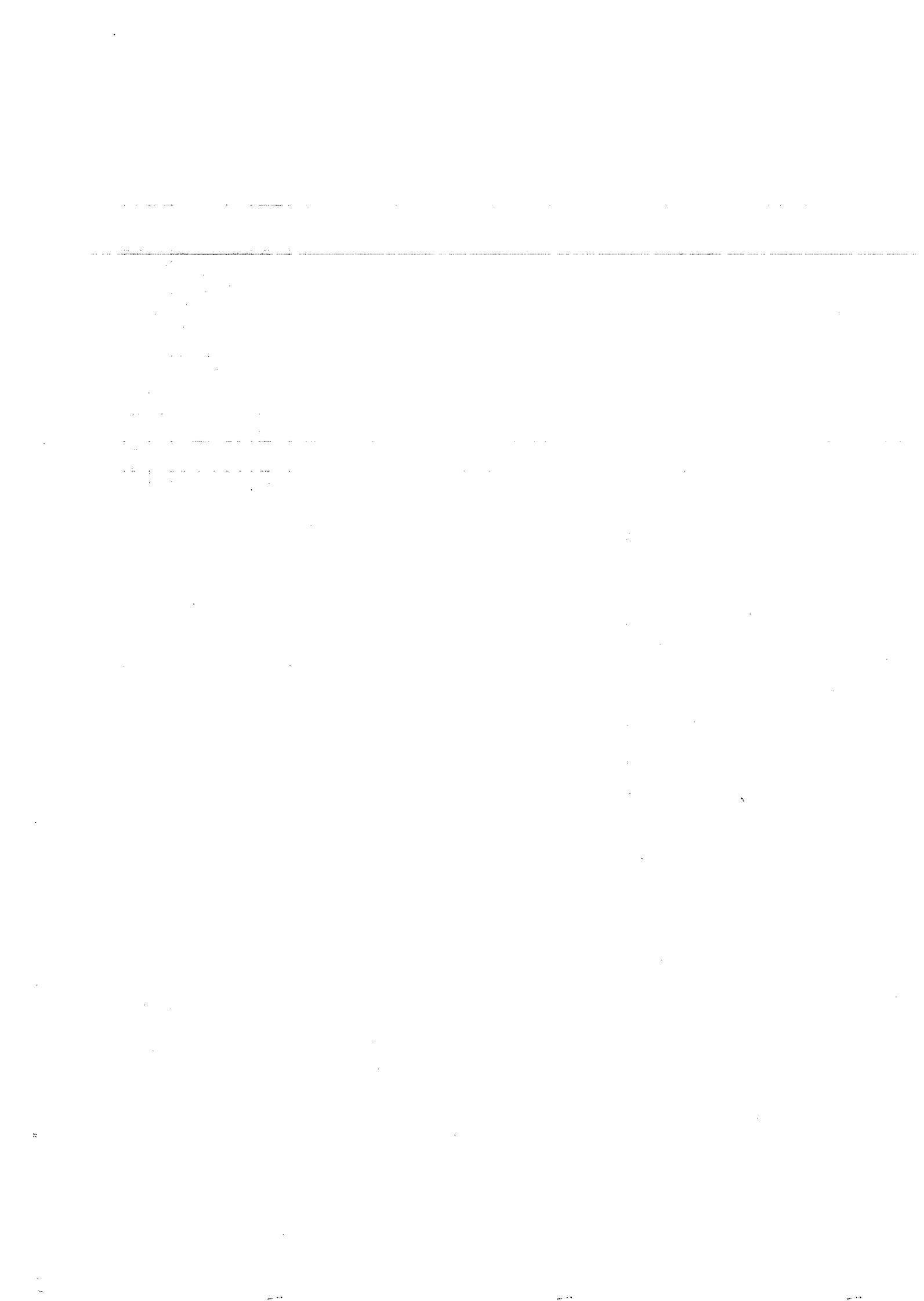
Vis d'axe M1x1.8	1	
Vis de boitier M1x1.5	3	
Vis de flasque M1x4.49	4	
Dénomination	Qte	Visserie
10:1	Matière	
	Tolérance générale	
Merken Patrick	ULG	
A4	Version 02	03/07/2002

3 . 2



Echelle		Axe Ø2	
10:1	Matière	TiAl6V4	
	Tolérance générale	±0,005	
	Merken Patrick	ULG	
A4	Version 02	01/07/2002	

Casser les arêtes 0,1 à 45°



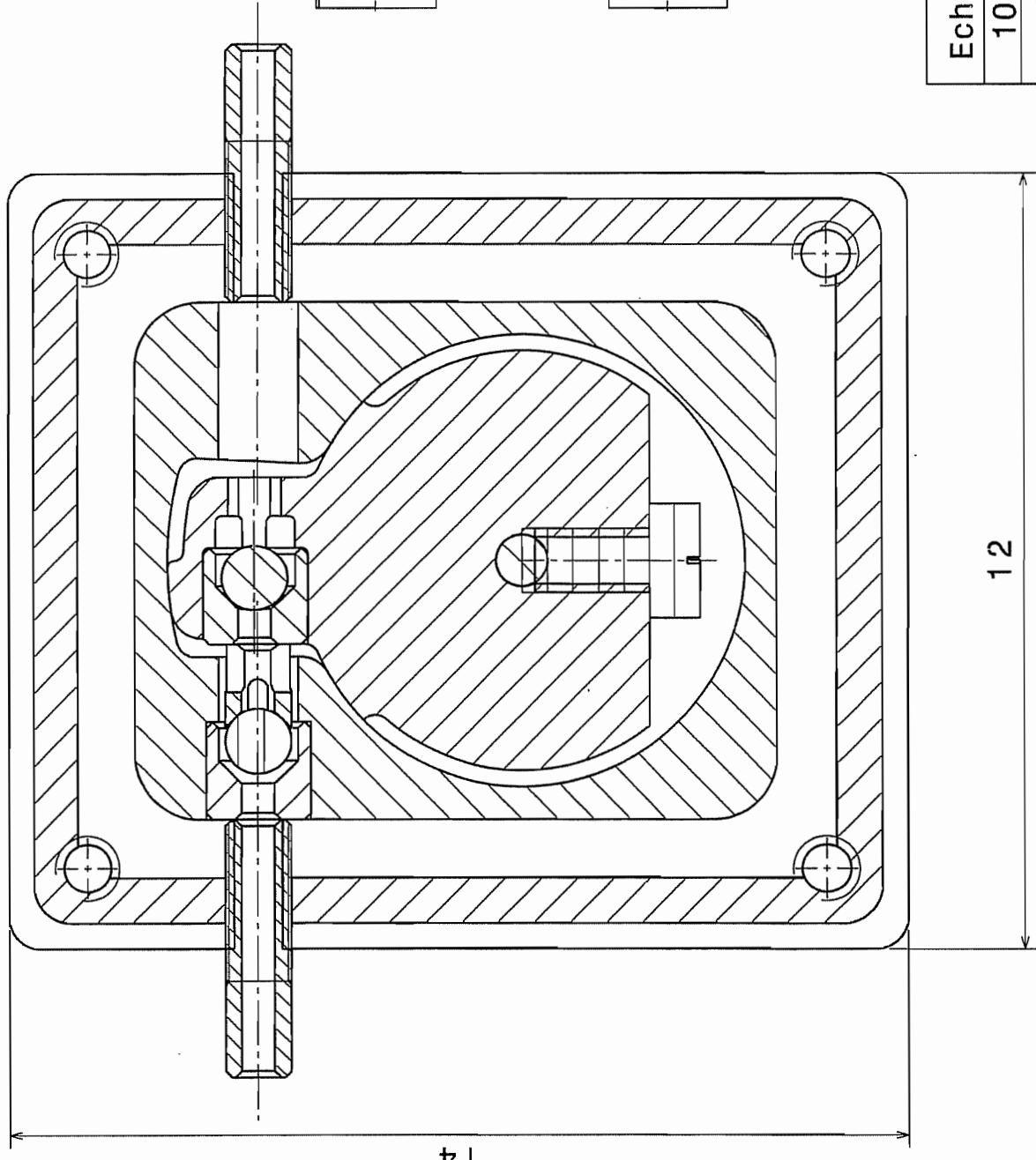
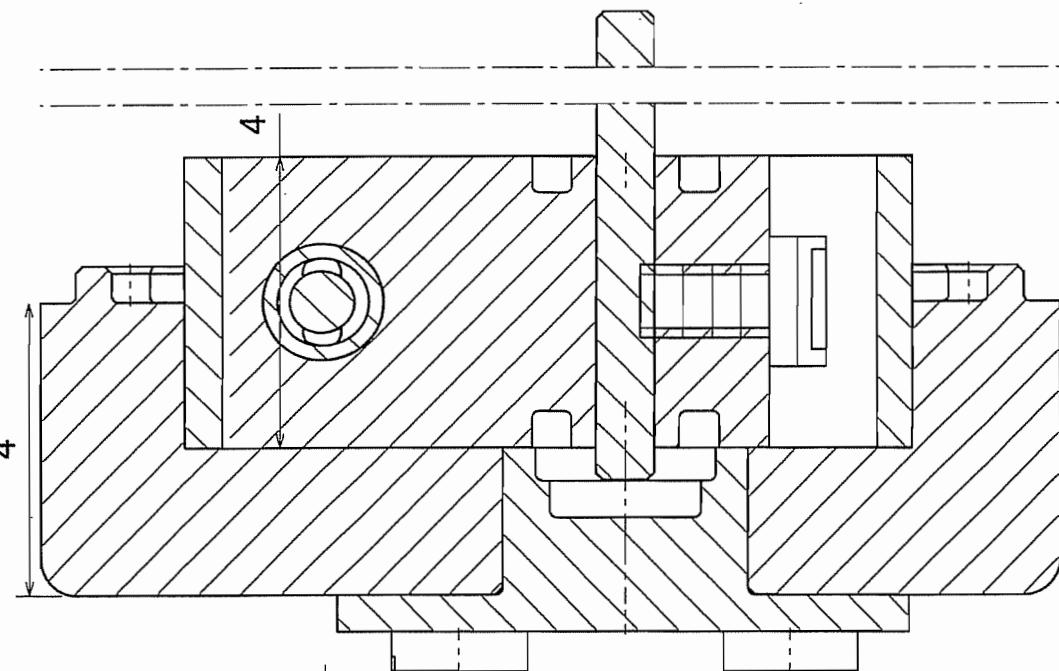
Micropompe coupe

Echelle
10:1

Matière
Tolérance
générale

Merken Patrick ULG

A4 Version 02 09/10/2002



3.9. Plans du prototype V03



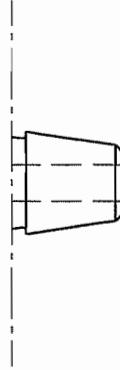
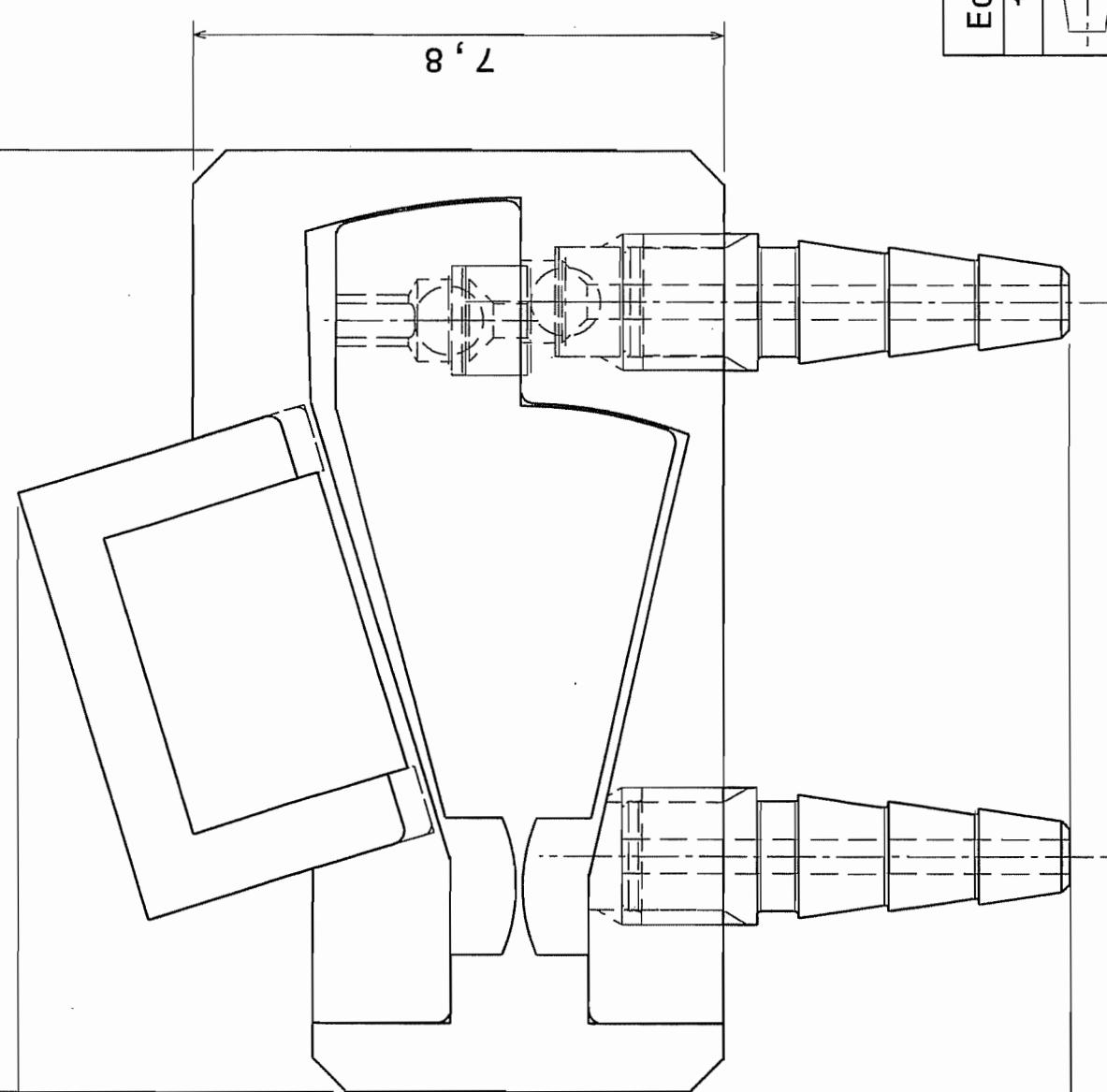
Ra 0.8

5

13,73

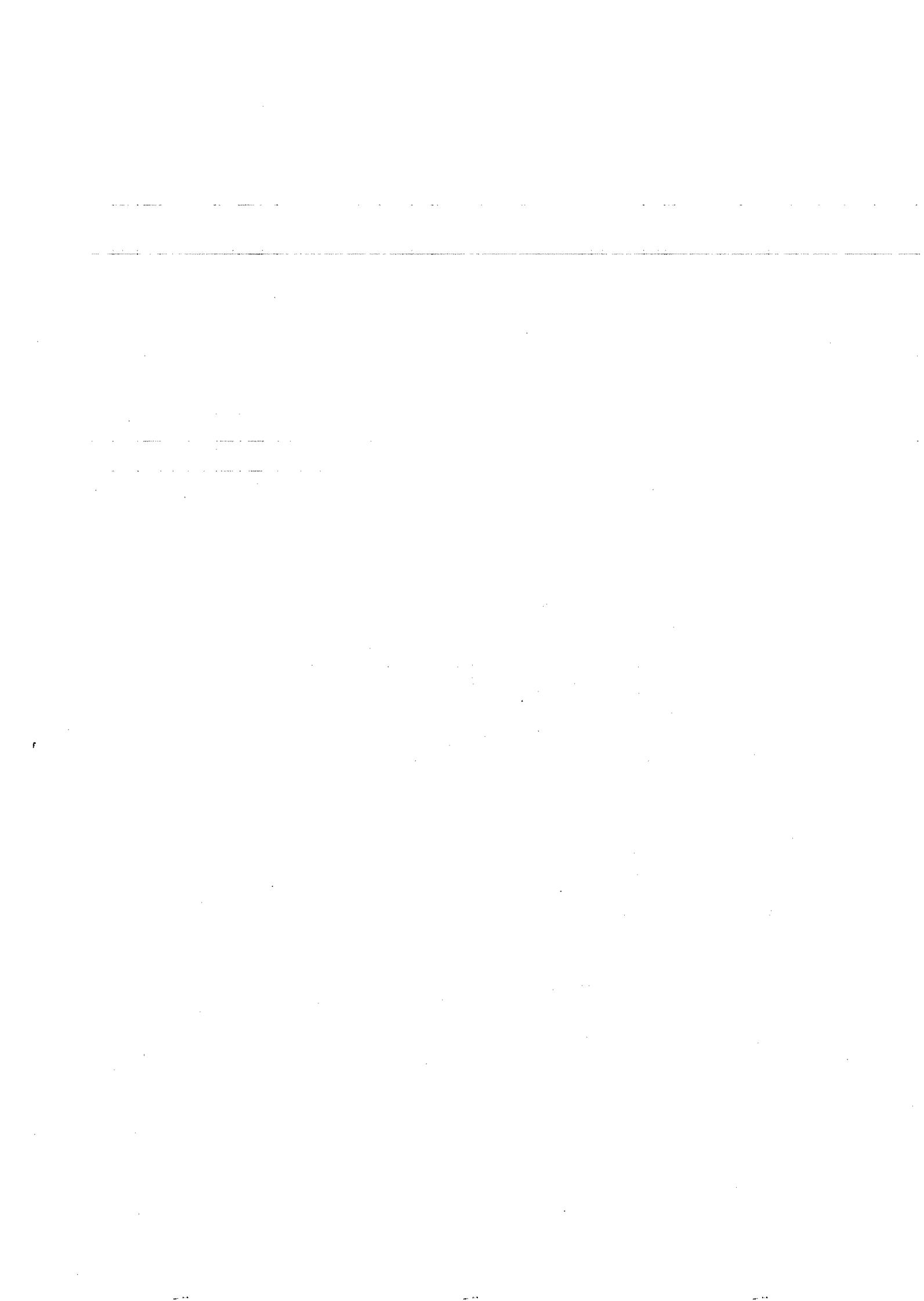
15,36

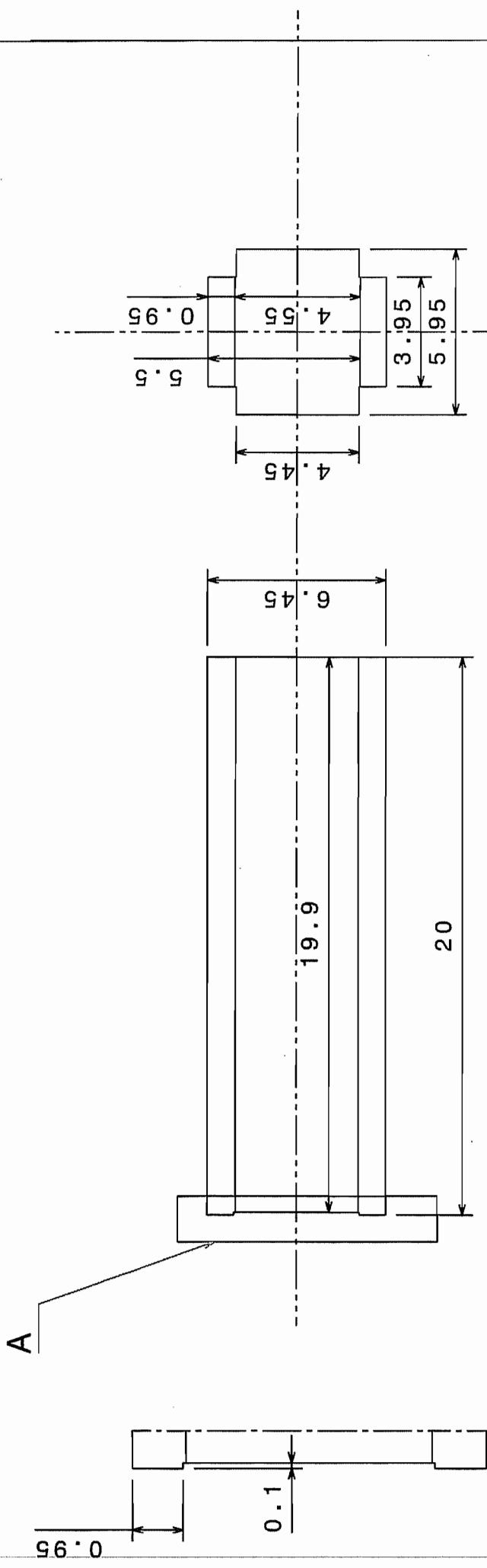
8,7



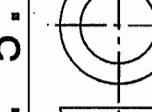
Micropompe 031	
Echelle	10 : 1
Matière	TiAl6V4 X20Cr13
Tolérance générale	
Merken Patrick	ULG
A4	Version 03 12/03/2003

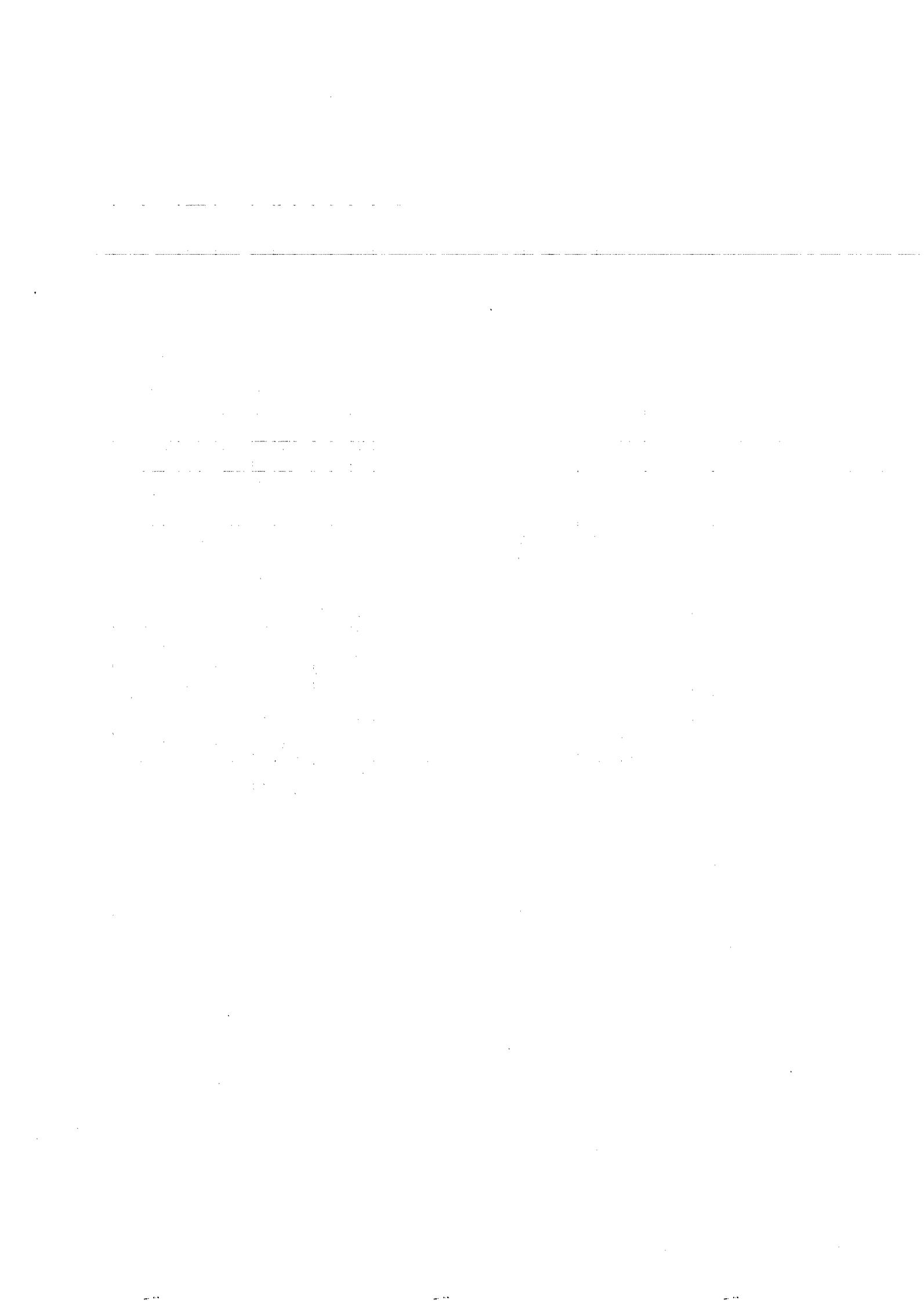
Casser les arêtes 0,1 à 45°



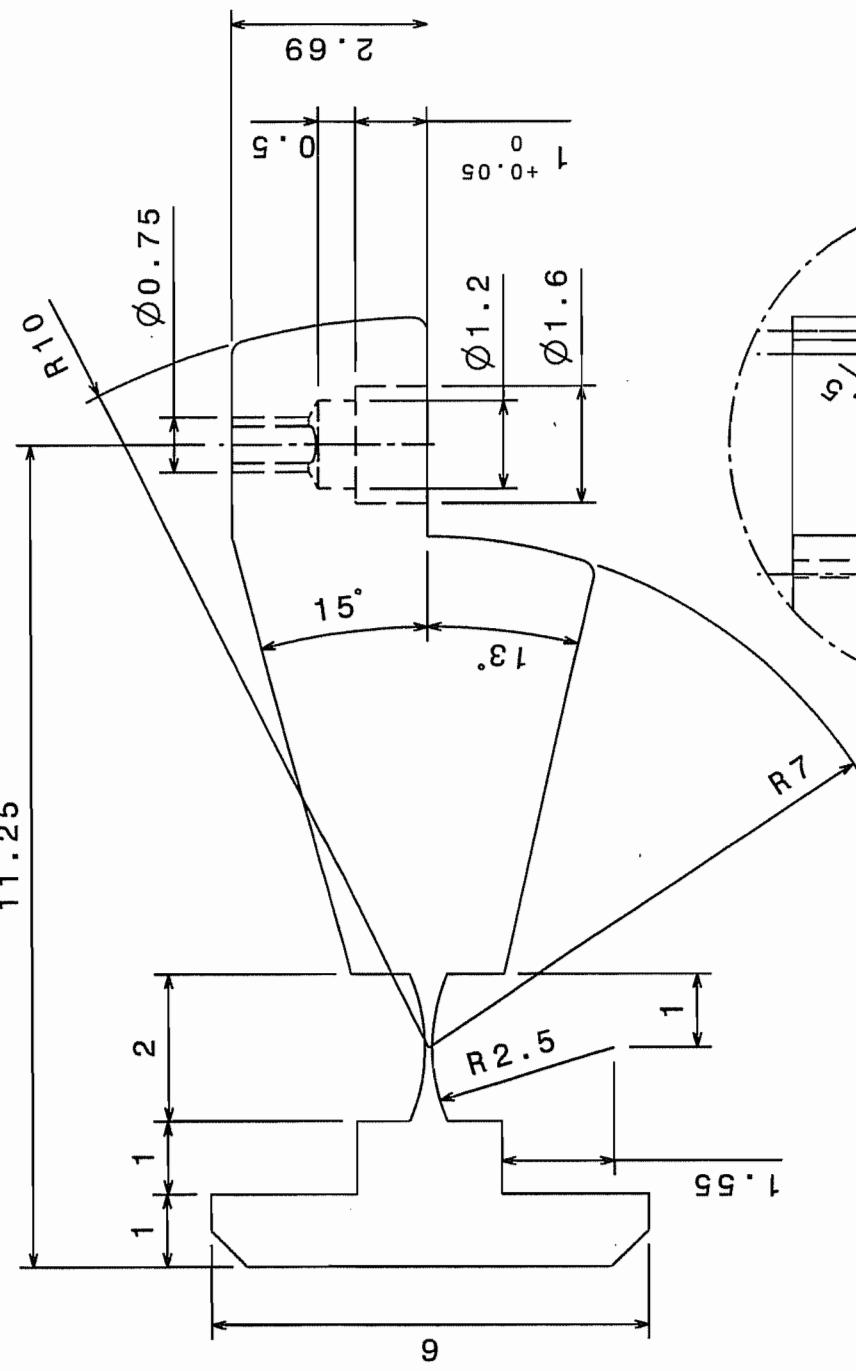


Détail A

N°	Auteur	Date	Correction
02	Merken	15/07/2003	Sur-épaisseur couple CuLt/Cu +0.135 mm
01	Merken	10/07/2003	Sous dim. radial : -0.16 mm
Ech :	5:1	Electrode EM	
		Merken Patrick	10/07/2003
		Matière Cuivre	
			
			



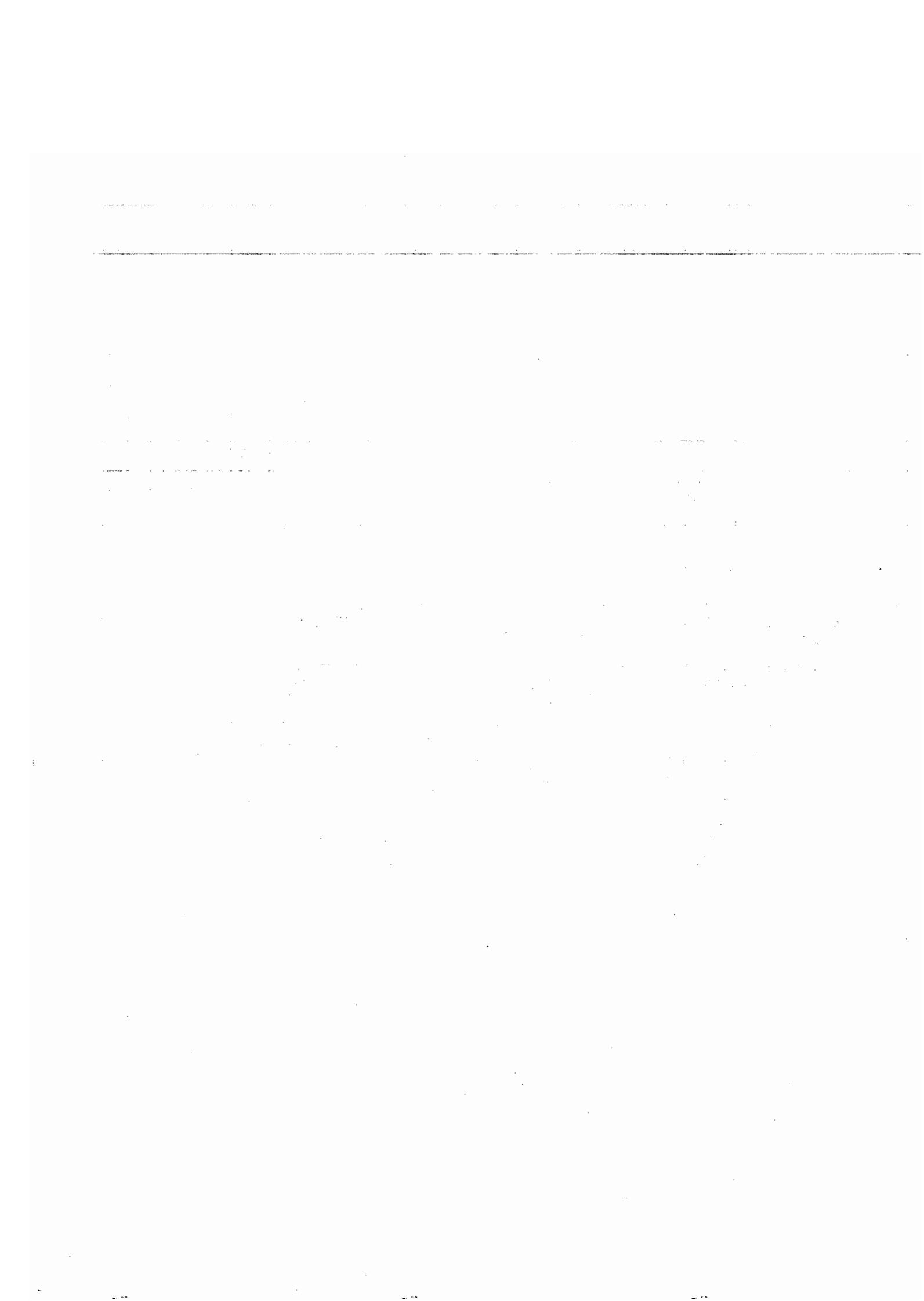
$1.6\sqrt{ }$

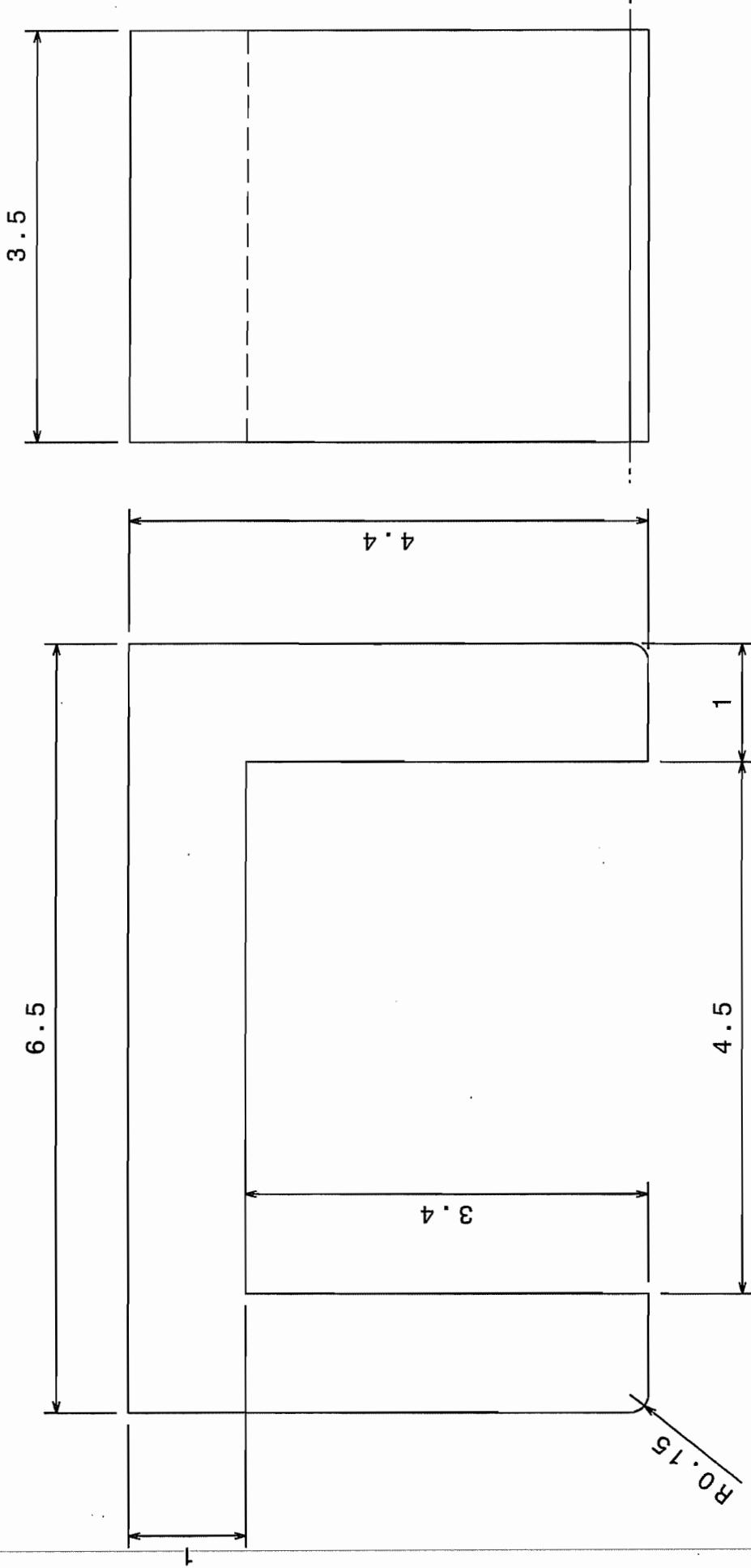


Palette

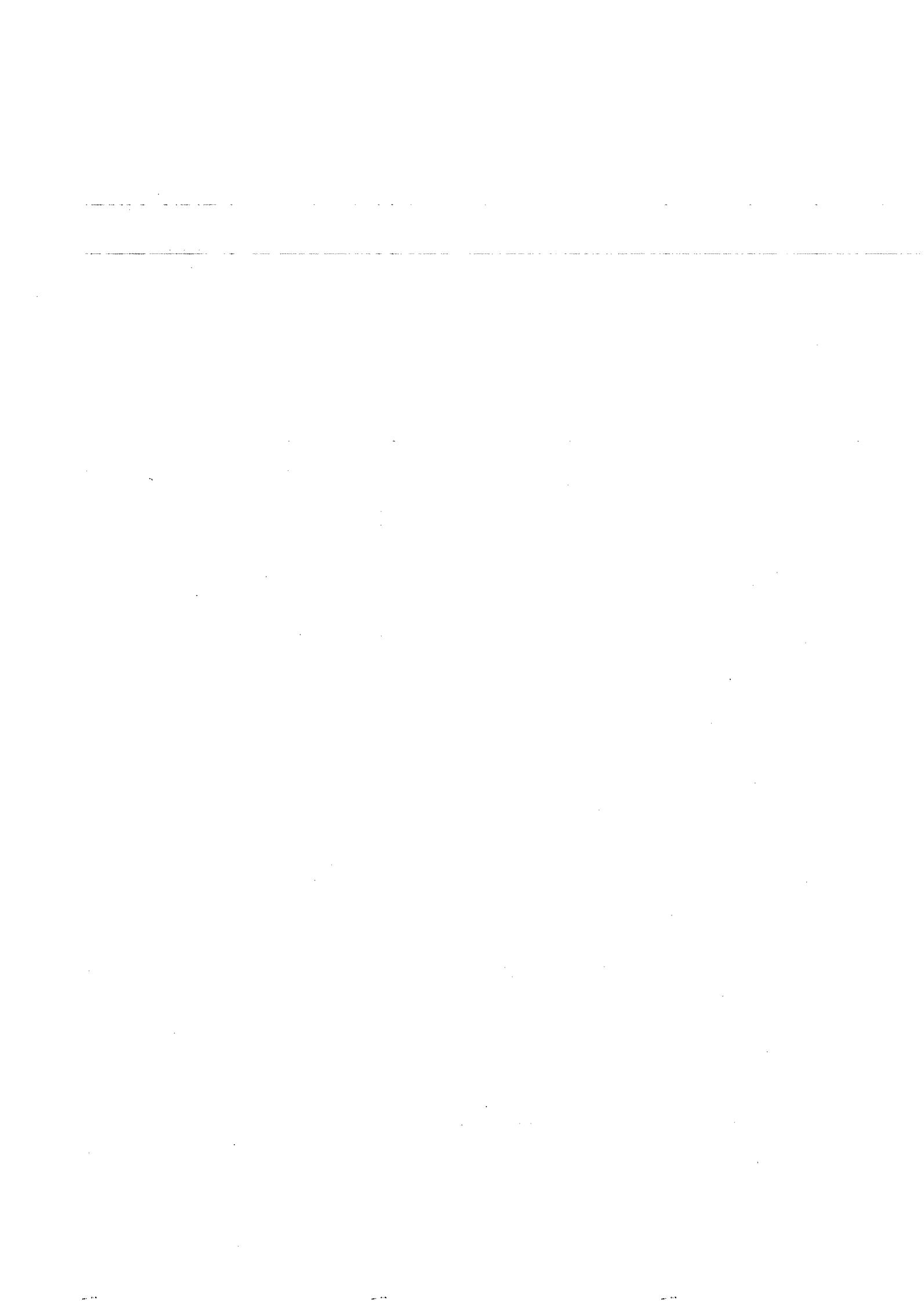
Echelle		Matière	X20Cr13
10:1		Tolérance générale	
		Merken Patrick	ULG
A4	Version 03	06/06/2003	

Le clapet doit coulisser parfaitement
Casser les arêtes 0, 1 à 45°

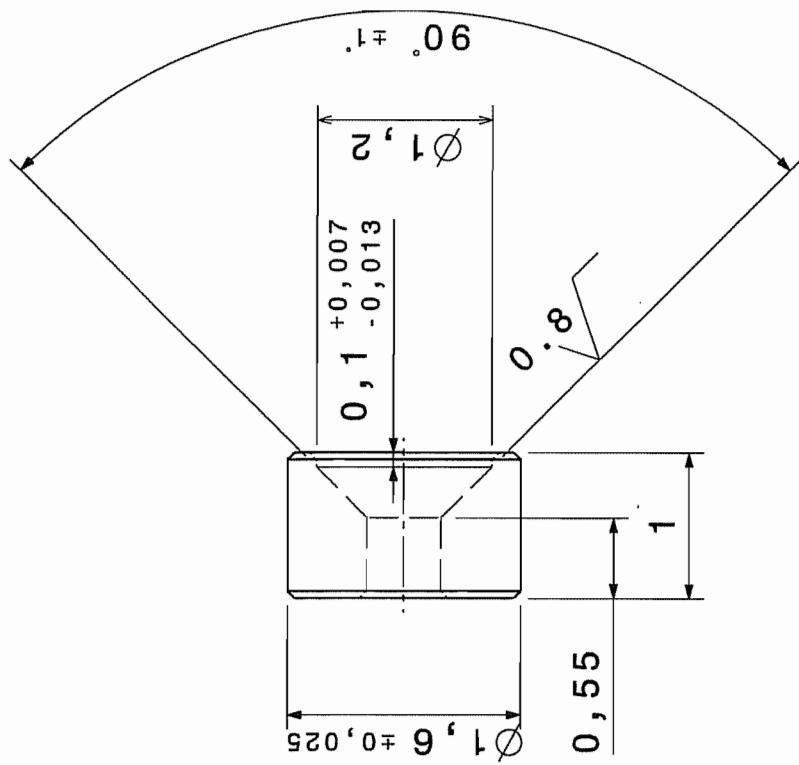
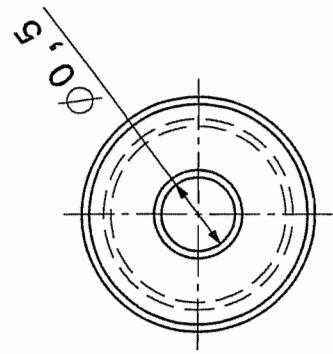




Noyau EA	
Echelle	
20 : 1	Matière X20Cr13
	Tolérance générale
	Merken Patrick ULG
A4	Version 03 05/05/2003



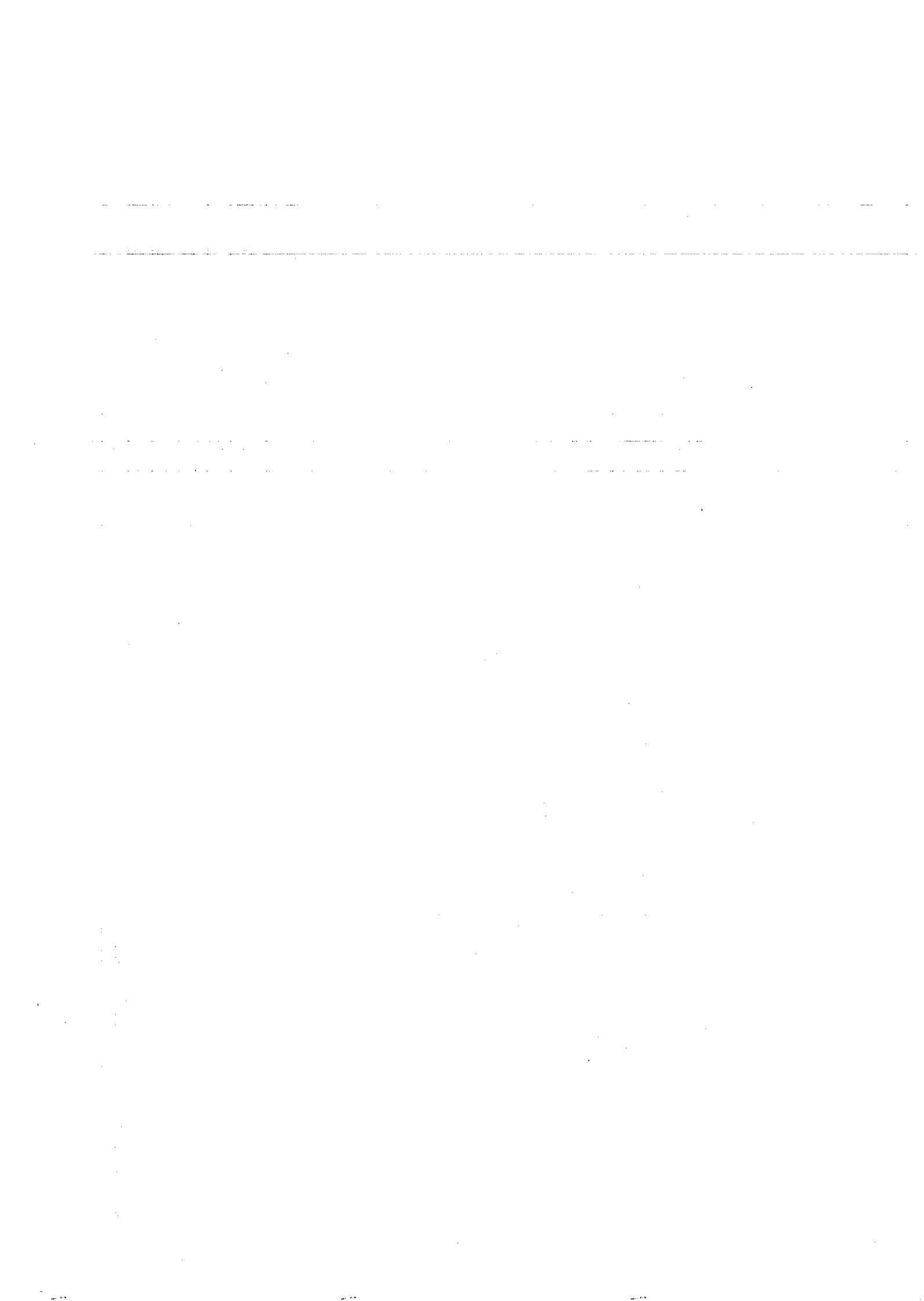
Ra 1.6

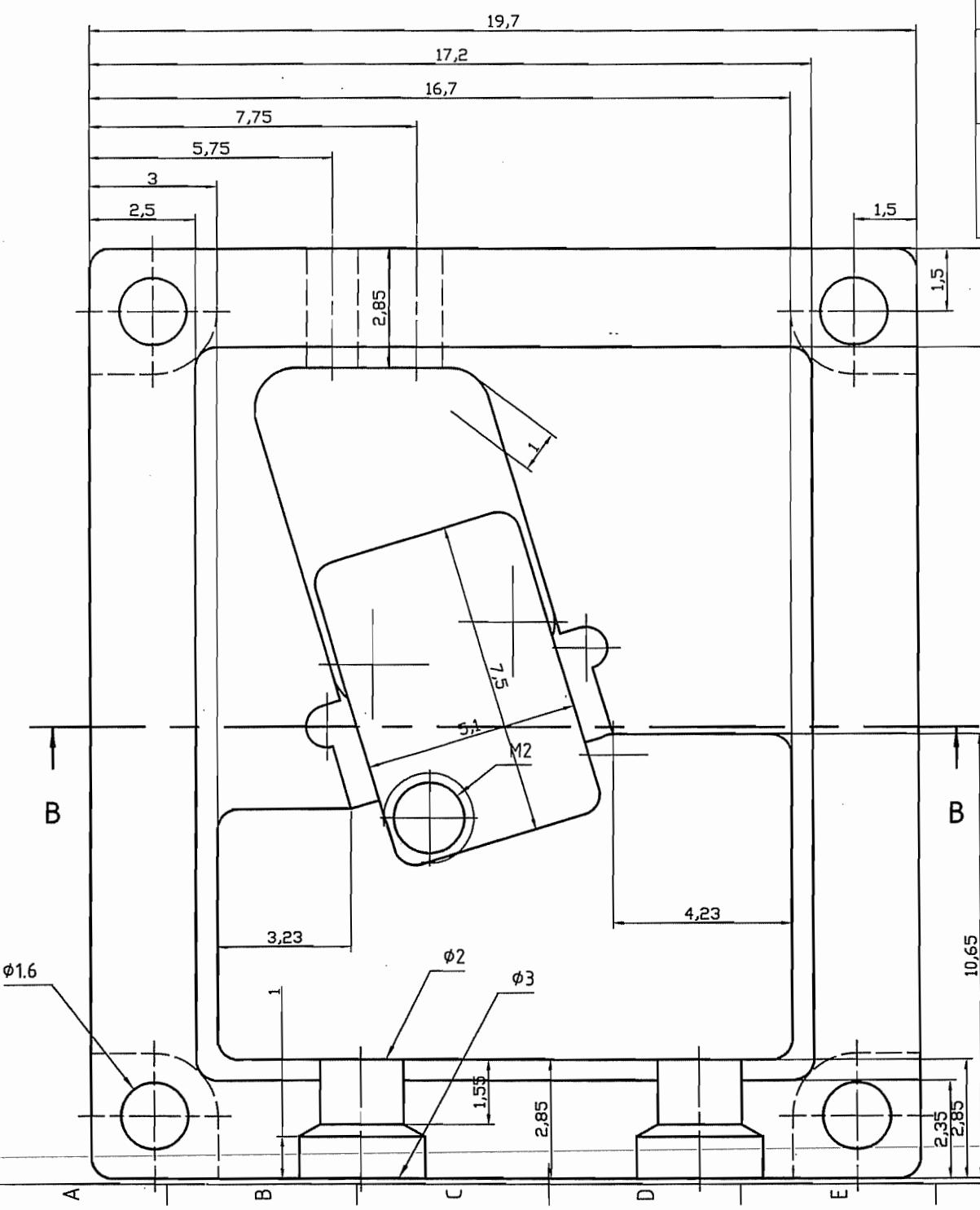
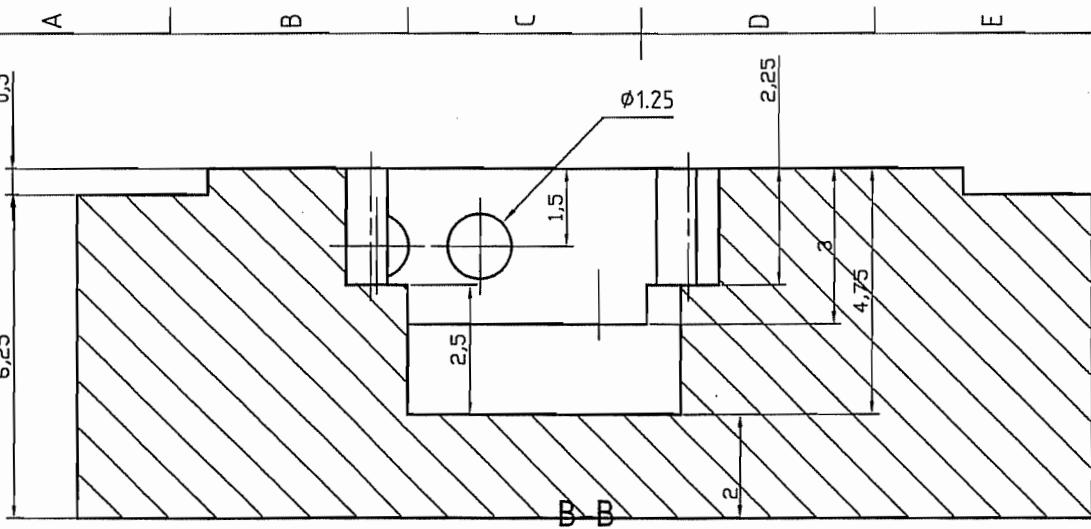


Nombre de pièces : 2

Insert clamps 03			
Echelle	Matière	Alumine	
20:1		Tolérance	±0,1
		générale	
	Merken Patrick	ULG	
A4	Version 03	29/11/2002	

Casser les arêtes 0,1 à 45°

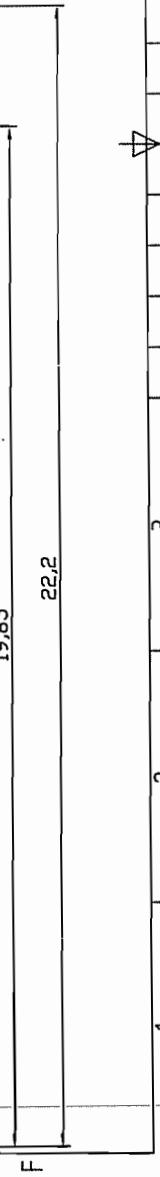


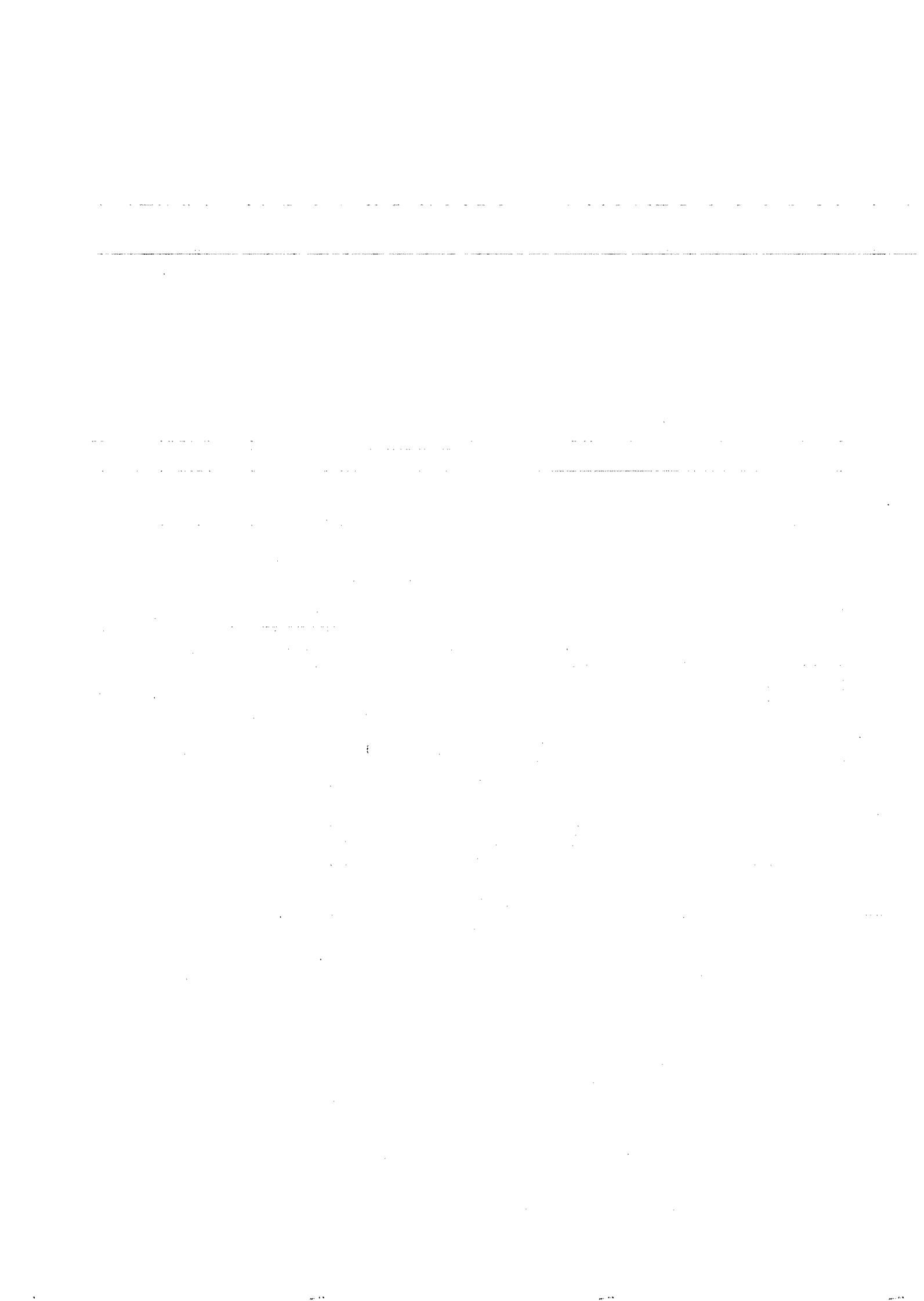


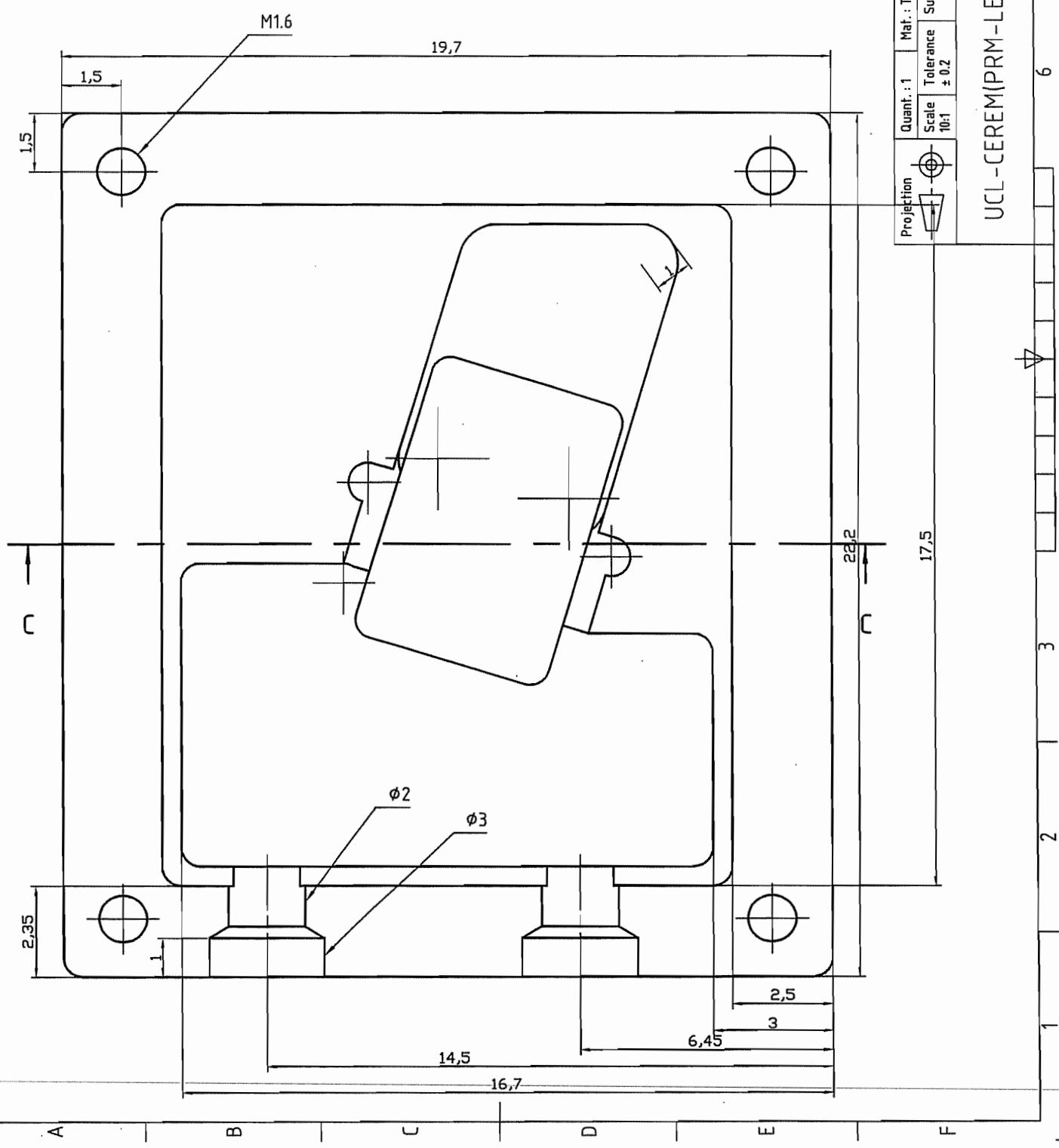
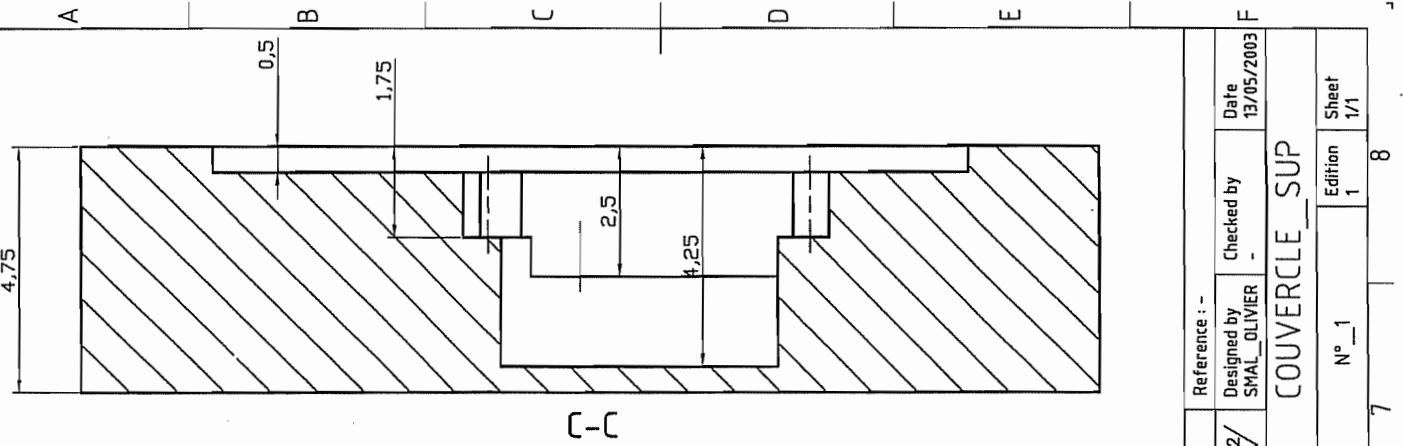
Projection	Quant. : 1	Mat. : Titane	Reference : -
	Scale 10:1	Tolerance ± 0.2	Surf. fin. : Ra 3.2/ Designed by SMAL OLIVIER
			Checked by - Date 13/05/2003 F

COUVERCLE_INF

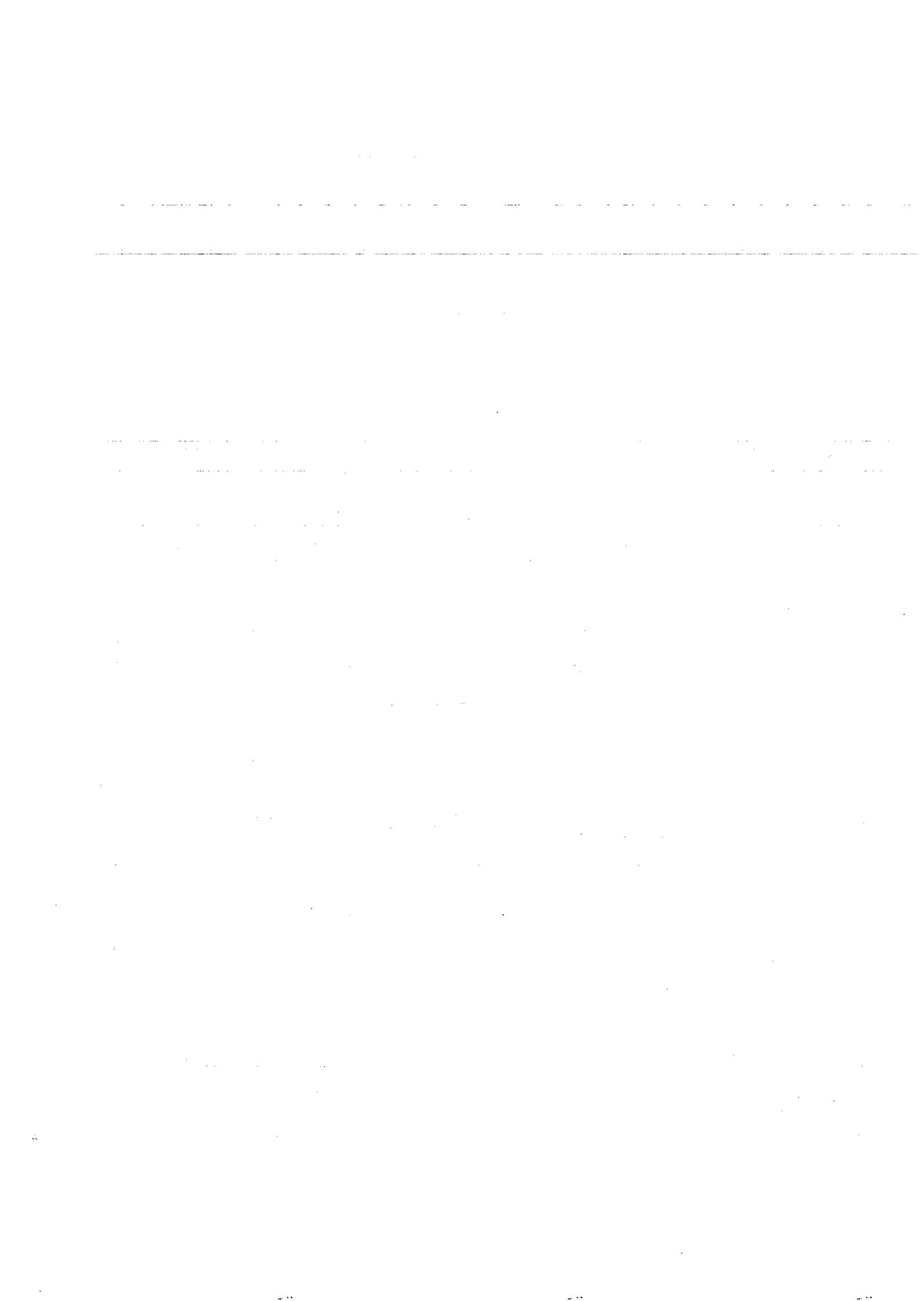
N° 1	Edition 1	Sheet 1/1
------	-----------	-----------



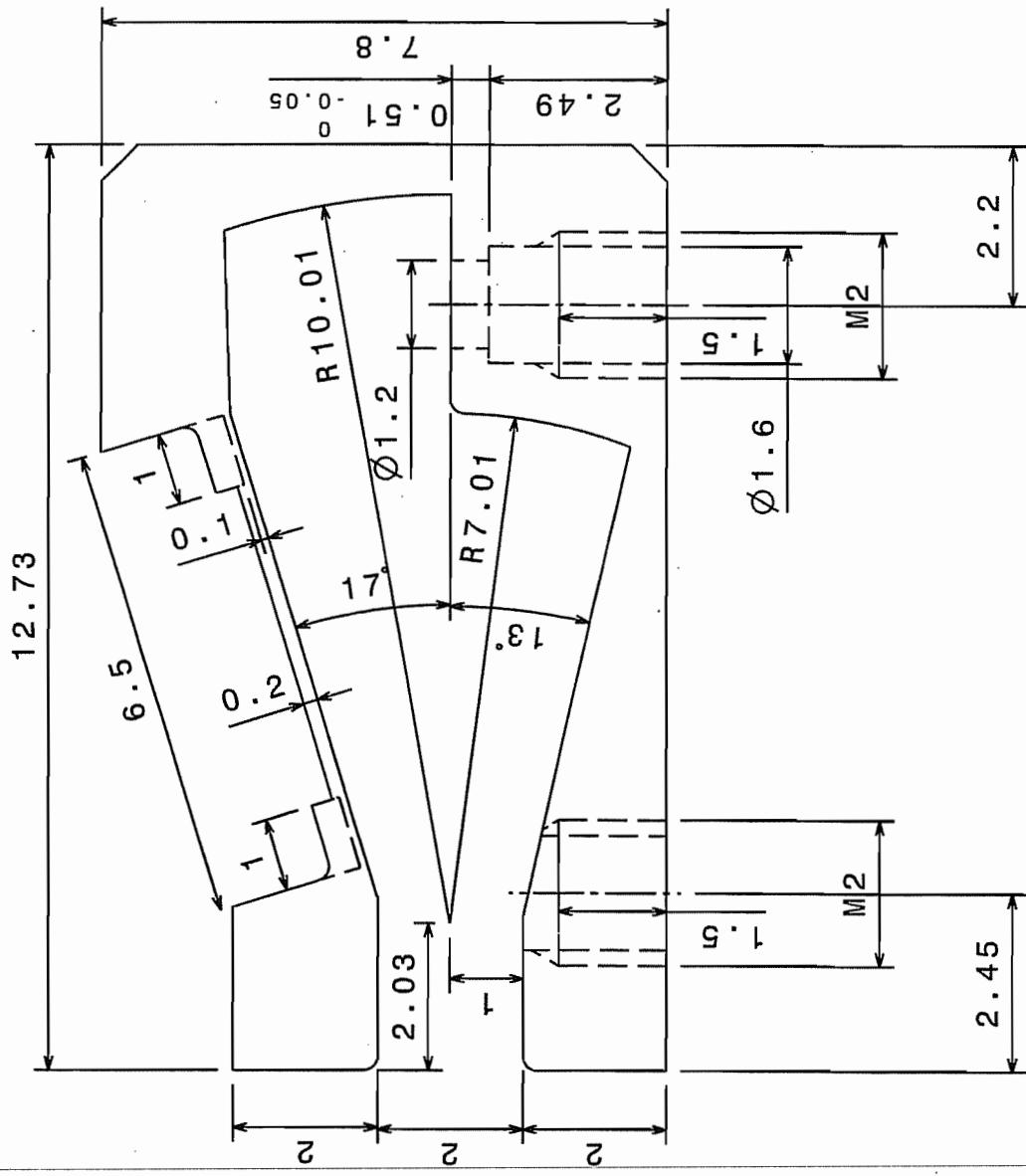
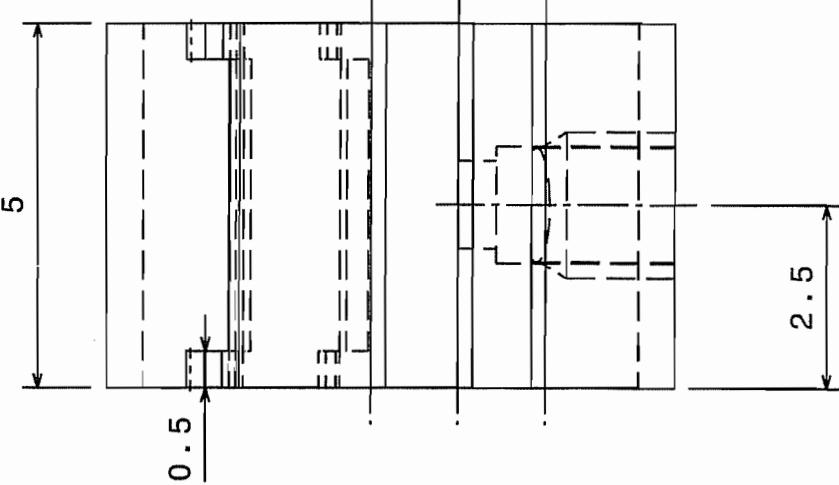




Projection	Quant: 1	Mat. : Tifane	Reference : -
	Scale 10:1	Tolerance ± 0.2	Surf. fin. : Ra 3.2/ Designed by SMAL_Olivier
			Checked by -
			Date 13/05/2003 F
COUVERCLE_SUP			
N° 1			Edition 1
Sheet 1/1			

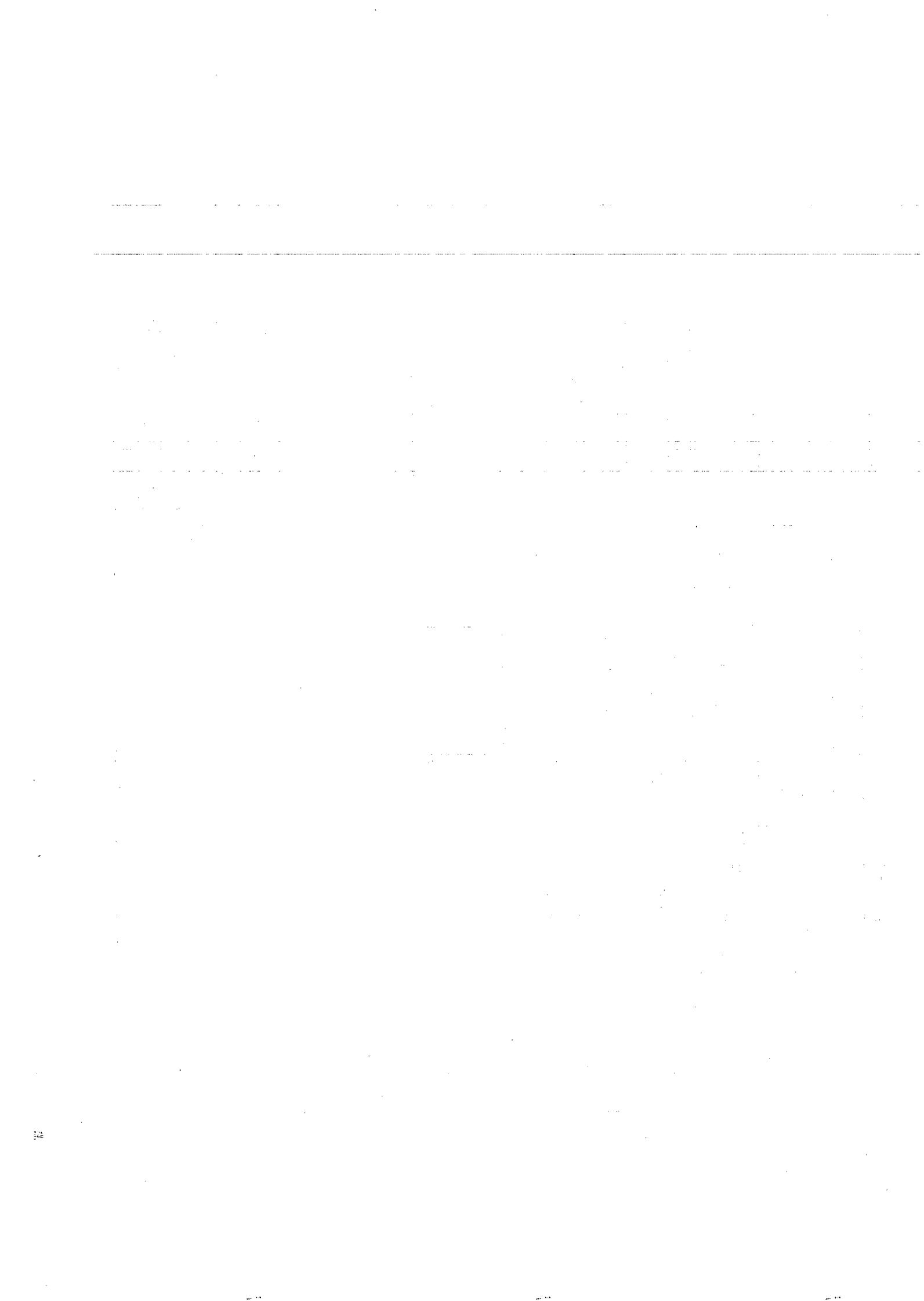


$1.6\sqrt{ }$

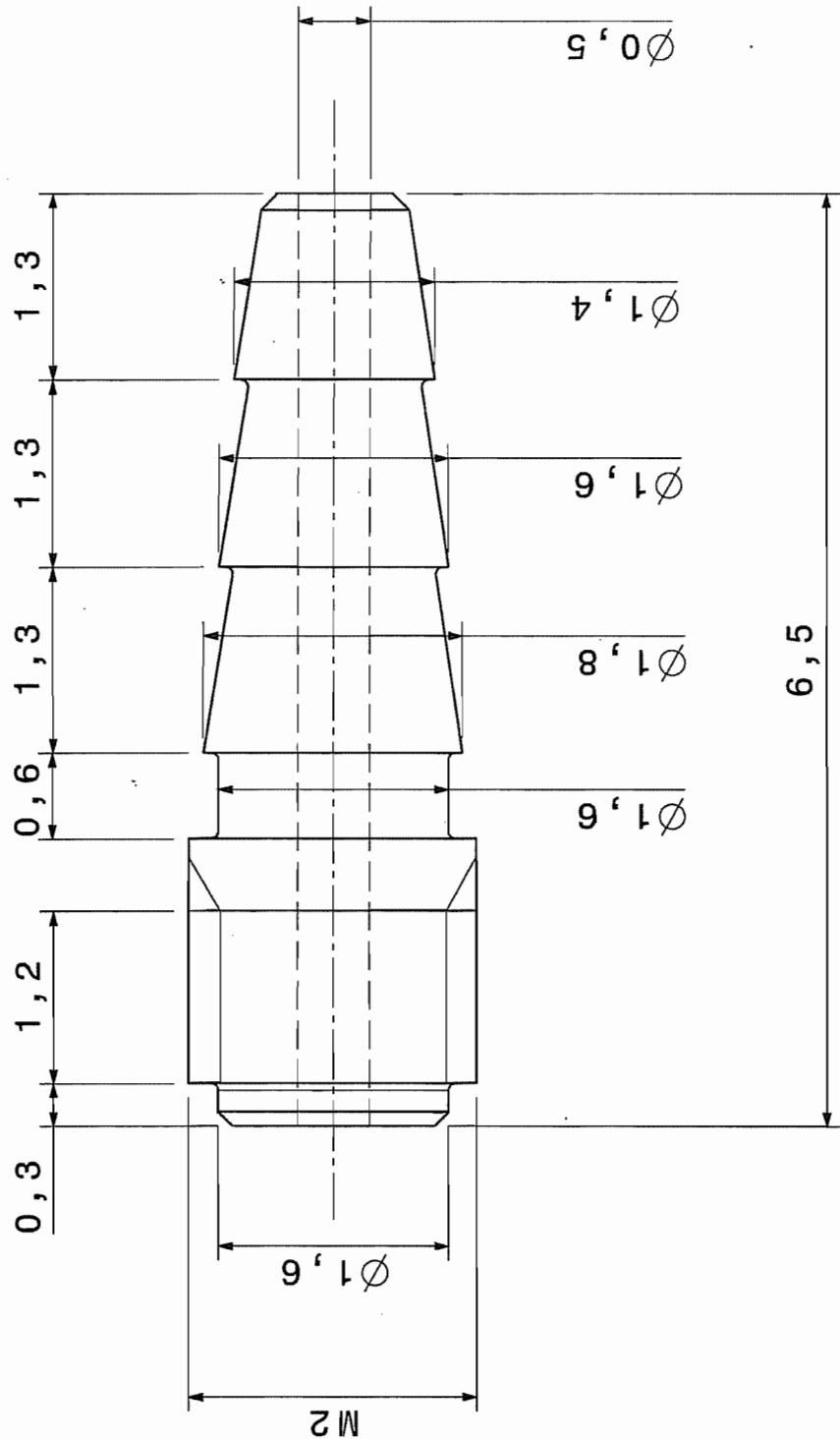


Corps de pompe			
Echelle	Matière	Tolérance	
10:1	TiAl6V4	générale	
Merken Patrick	ULG		
A4	Version 03	06/06/2003	

Casser les arêtes 0, 1 à 45°



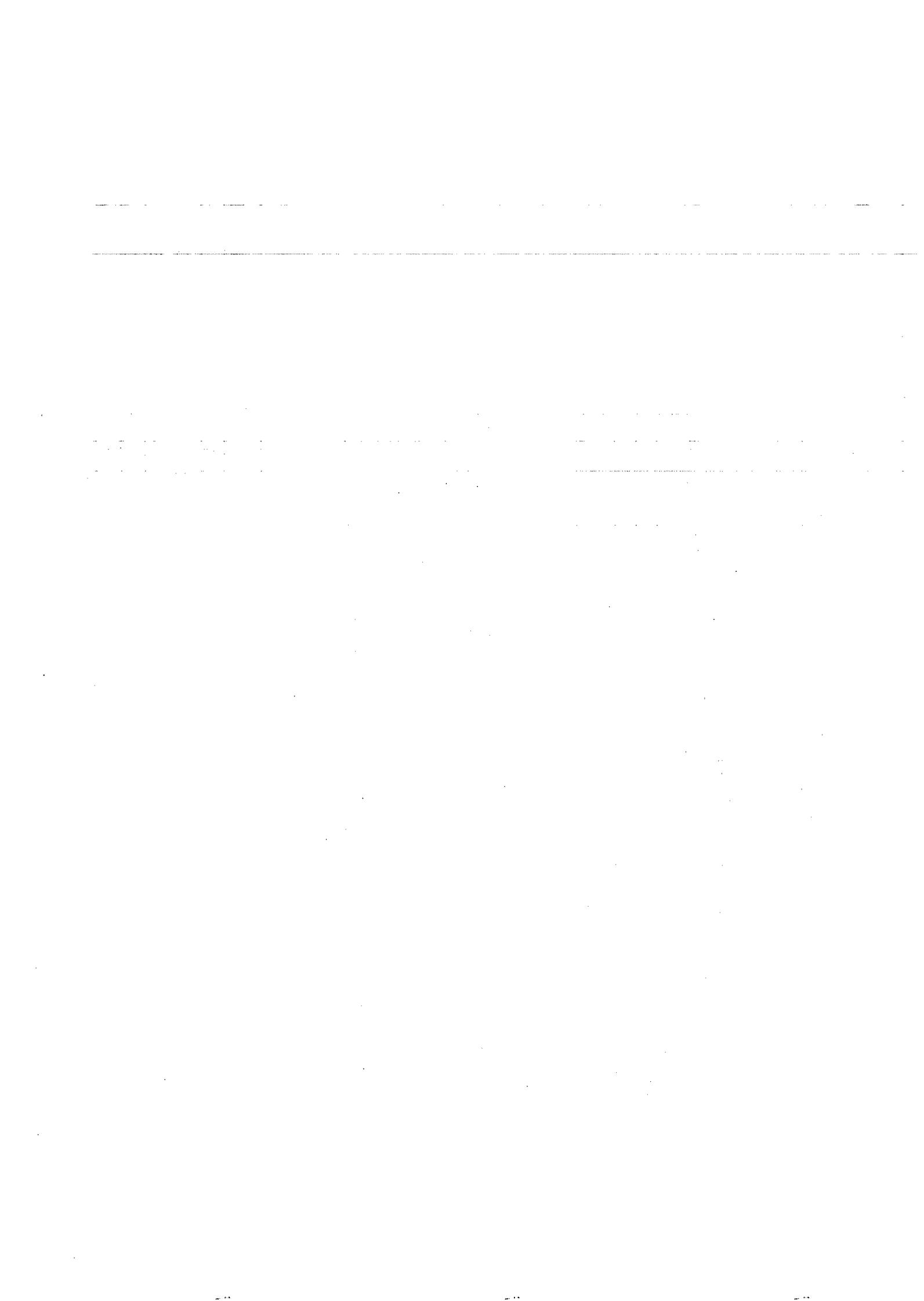
Ra 1,6

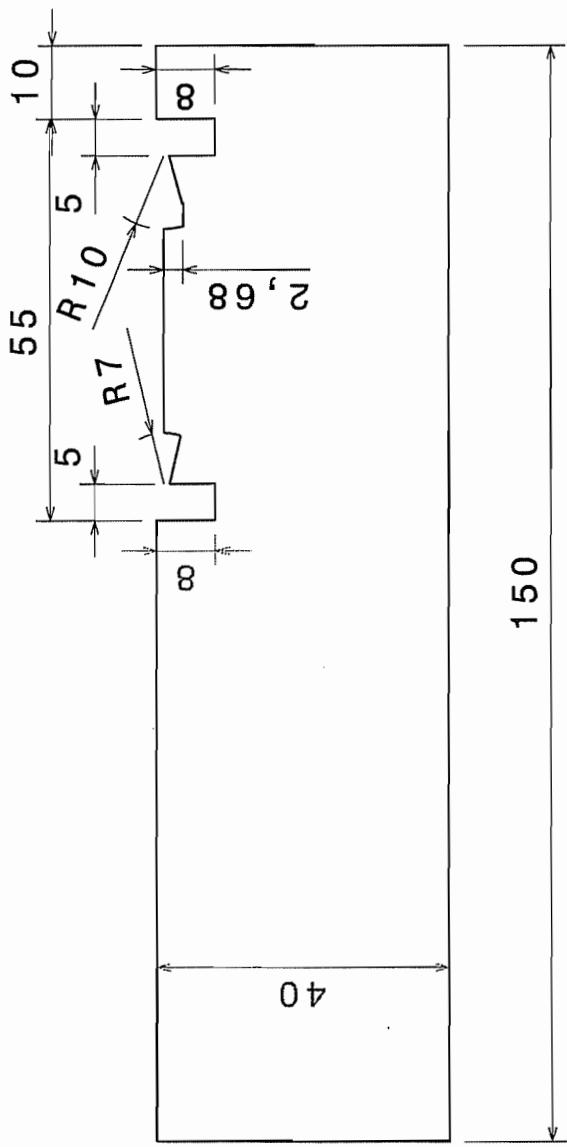


Nombre de pièces : 2

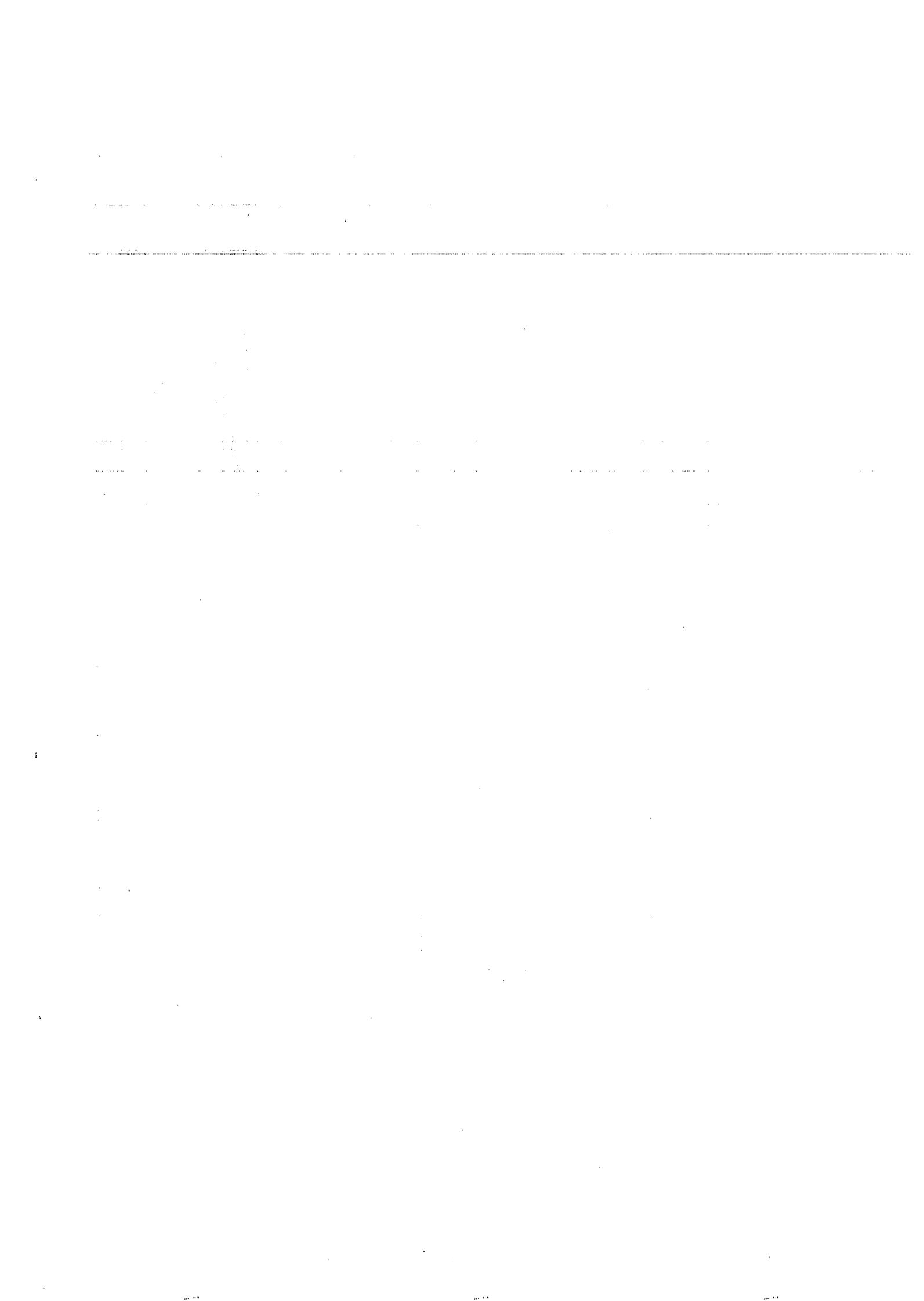
Echelle		Tubeadm 03	
20:1	Matière	TiAl6V4	
	Tolérance générale	$\pm 0,1$	
Merken Patrick	ULG		
A4	Version 03	05/02/2003	

Casser les arêtes 0,1 à 45°





Echelle Berceau 03			
1:1	Matière	Sverker 21 55HRC	
	Tolérance générale		
	Merken Patrick ULG		
A4	Version 03	24/02/2003	



4. Tests

4.1. Résultats des tests du modèle à l'échelle 10 : 1



Analyse des tests sur le modèle 10 :1 de la pompe implantable

SMAL O.

Septembre 2002

1 Introduction

Dans ce document, nous fournissons un rapport concernant les tests qui ont été effectués sur le modèle de la pompe à l'échelle 10 :1. Les résultats que nous obtenons permettront de vérifier ou non le modèle théorique qui a été établi auparavant.

Les différents tests ont été effectués sur le site de Louvain-La-Neuve. La pompe est placée sur un banc d'essai qui permet de fixer celle-ci dans de nombreuses positions (possibilité de faire varier l'inclinaison) et de la solidariser avec son actionneur. Comme actionneur, nous avons retenu un moteur DC, qui sera commandé de manière adéquate afin de générer un mouvement alternatif. Tout le système est géré par un logiciel fonctionnant sur PC : dSpace. Ce logiciel permet à la fois de commander l'actionnement, mais aussi de récupérer et d'enregistrer des données, si toutefois celles-ci sont présentes sous forme de signaux en tension. Du côté admission de la pompe, nous avons un réservoir qu'il est possible de placer à différents niveaux par rapport à la pompe, de manière à créer une dépression plus ou moins forte à l'entrée. En sortie de la pompe, nous plaçons un simple tuyau, avec néanmoins une petite dérivation permettant d'insérer un capteur de pression. Il est à noter aussi qu'en aval de ce capteur, nous utilisons un tuyau de diamètre plus fin de manière à créer une perte de charge, qui rend possible la mesure de pression.

La suite de ce document sera structurée de la manière suivante :

- Précisions générales sur les tests
- Tests faisant varier la vitesse
- Tests faisant varier la pression
- Conclusion

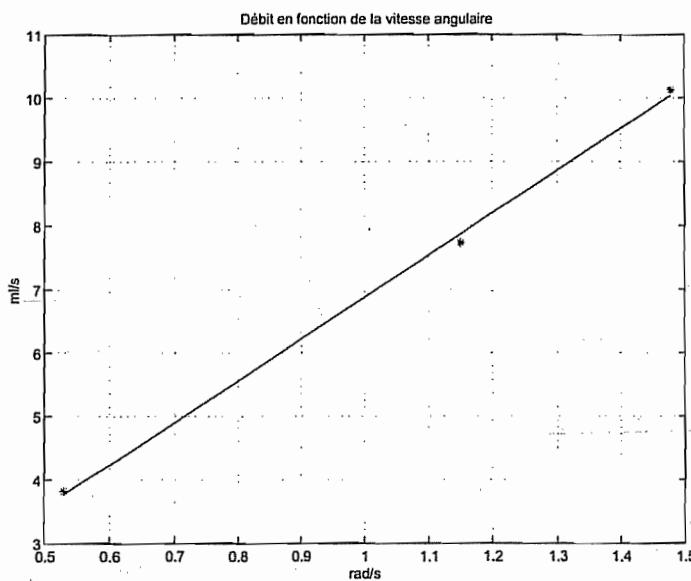


FIG. 1 – courbe débit/vitesse pour une inclinaison de 45 degrés

2 Objet des tests

Comme nous l'avons dit précédemment, ces tests ont pour objet de vérifier les hypothèses théoriques précédemment établies. Les conditions d'exécution de ces tests ont été soigneusement établies. Un impératif était de noter rigoureusement toutes les conditions opératoires. Lors de l'exécution de ces tests, nous avons donc rempli un certain nombre de fiches et sauvegardé pas mal de données. Ces données ont ensuite pu être récupérées et traitées à l'aide du logiciel Matlab, afin de tracer des courbes et de pouvoir ainsi faire une analyse des résultats. La dernière étape n'est plus qu'une comparaison de ces résultats avec ceux déterminés grâce à la théorie.

3 Tests faisant varier la vitesse angulaire

La première batterie de tests consiste à mesurer le volume de liquide expulsé en un certain laps de temps suivant la vitesse angulaire de la palette et suivant l'orientation de la pompe. Ces tests sont effectués en fixant la dépression d'entrée à 0.1 bar.

Tout d'abord une première remarque concernant les figures 1, 2, 3. Pour chacune des trois positions de la pompe, nous avons effectué de mesures pour 3 vitesses. Nous essayons donc d'établir une courbe à partir de 3 points, ce qui n'est pas très représentatif.

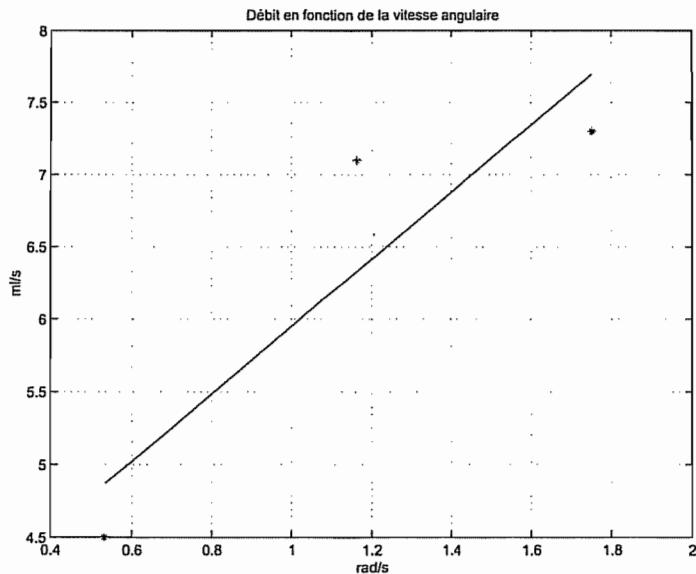


FIG. 2 – courbe débit/vitesse pour une position horizontale

Au vu des courbes, nous pouvons néanmoins dire que l'observation pour la position à 45 degrés colle bien avec la théorie qui prédisait une relation linéaire. La plus mauvaise observation est celle pour la pompe en position horizontale. C'est dans cette position que nous observons l'apparition du plus de bulles ainsi que le moins bon fonctionnement des clapets. En effet dans les 2 autres cas, l'effet de la gravité peut aider à maintenir les clapets en position fermée.

4 Tests faisant varier la dépression à l'entrée

Cette fois-ci, nous allons travailler à une vitesse angulaire fixée pour la palette mais en faisant évoluer la dépression d'entrée depuis 0.1 bar jusqu'à une dépression nulle. Nous noterons pour chaque expérience, la durée et le volume total de liquide déplacé (le reste des informations étant comme précédemment sauvegardé par dSpace).

L'observation des figures 4, 5, 6 conforte l'hypothèse d'une évolution linéaire du débit en fonction de la dépression d'entrée. Comme pour les tests précédents nous avons une moins bonne correspondance entre la théorie et les expériences pour la pompe en position horizontale.

La figure 7 représente l'évolution de la pression en sortie de la pompe au cours du temps, et ce pour les 4 valeurs différentes de dépression d'entrée que nous avons retenues. Les valeurs de pression sont indiquées en relatif

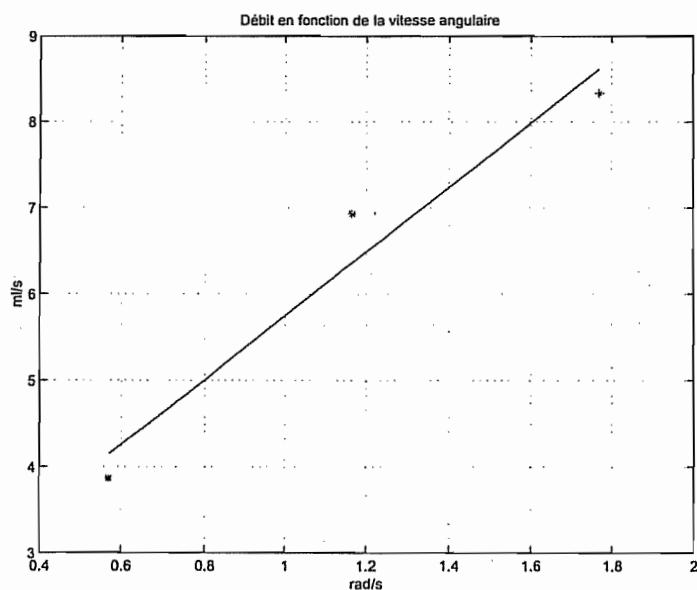


FIG. 3 – courbe débit/vitesse pour une position verticale

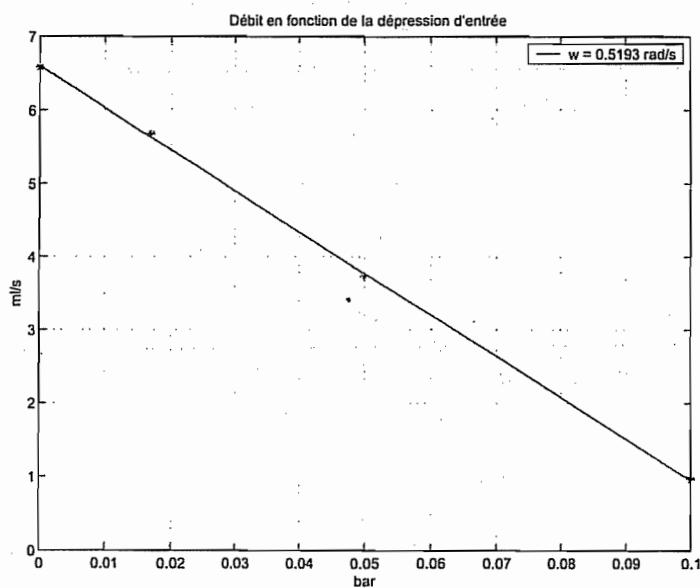


FIG. 4 – courbe débit/dépression d'entrée pour une inclinaison à 45 degrés

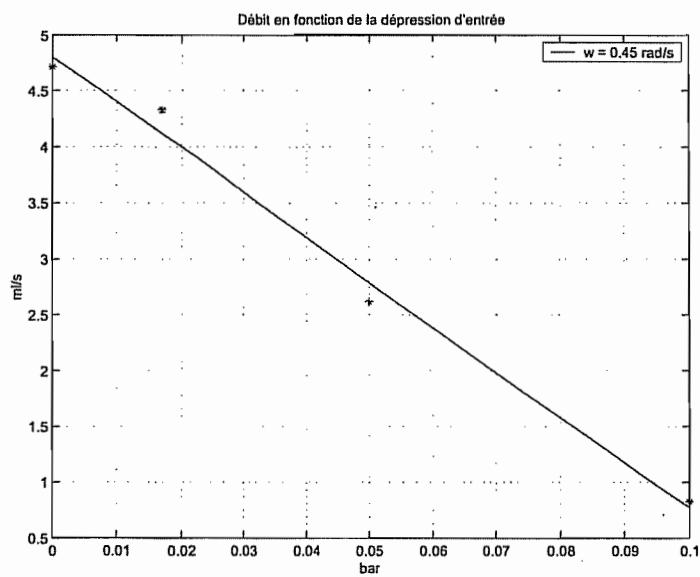


FIG. 5 – courbe débit/dépression d'entrée pour une position horizontale

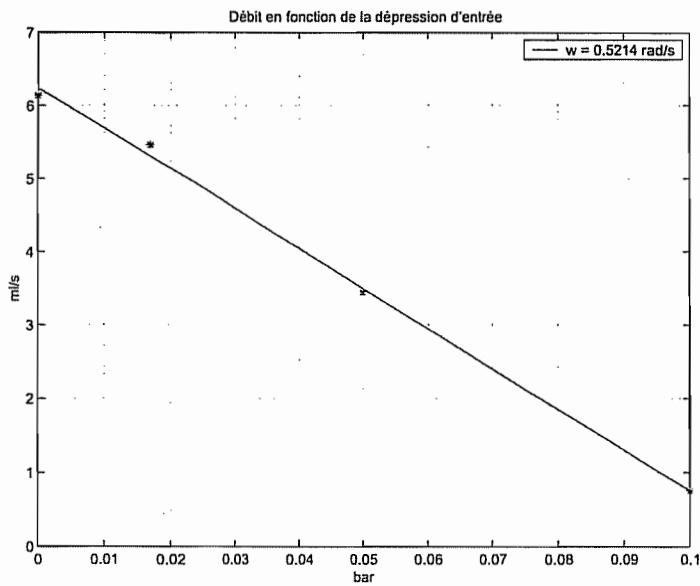


FIG. 6 – courbe débit/dépression d'entrée pour une position verticale

inclinaison de la pompe (degrés)	vitesse moyenne (rad/s)	dépression à débit nul (bars)
0	0.45	0.1192
45	0.5193	0.1168
90	0.5214	0.1138

TAB. 1 – Dépression d'entrée pour un débit nul

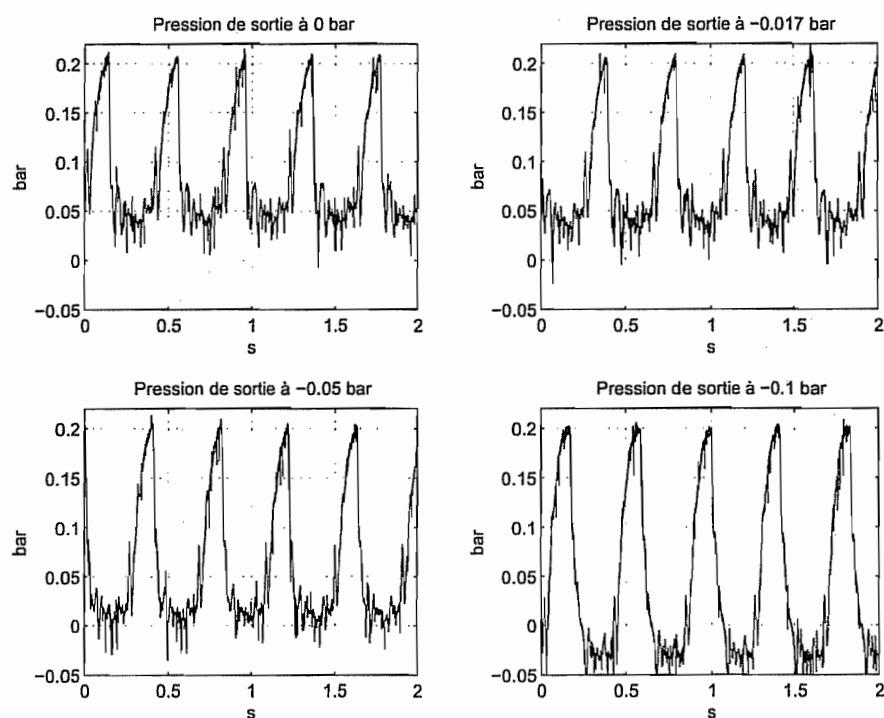


FIG. 7 – pression de sortie pour différentes valeurs de dépression d'entrée
(inclinaison à 90 degrés)

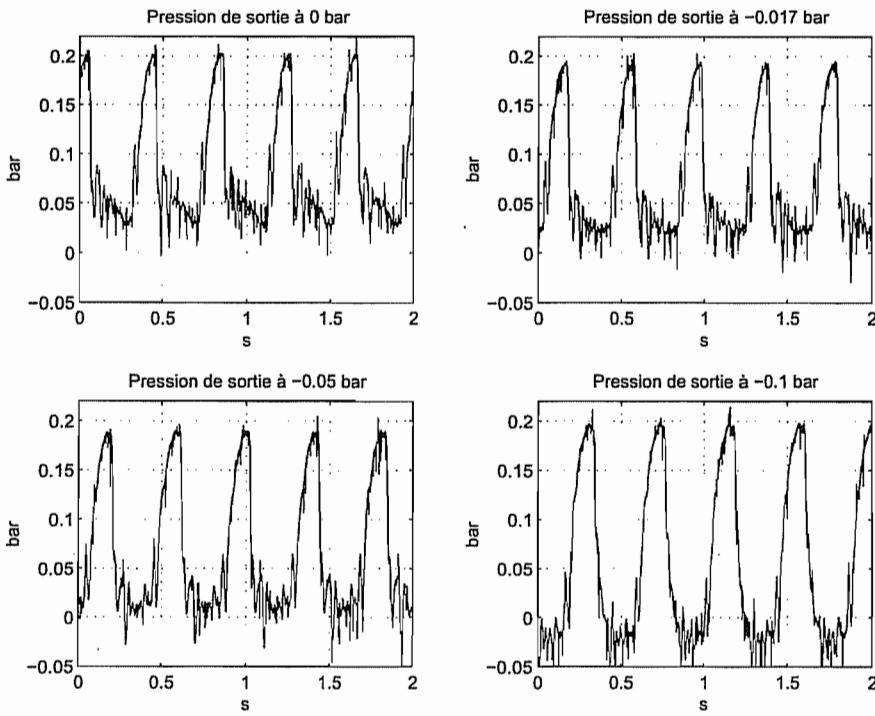


FIG. 8 – pression de sortie pour différentes valeurs de dépression d'entrée (pompe inclinée à 45 degrés)

par rapport à la pression atmosphérique.

pompe inclinée à 90 degrés		
dépression d'entrée	pression max	pression moyenne
0	0.2150	0.0872
0.017	0.2192	0.0804
0.05	0.2131	0.0601
0.1	0.2082	0.0472

Dans ce tableau, toutes les valeurs de pression sont en bar. Elles correspondent à la figure 7. La valeur maximale de la pression en sortie de la pompe est quasiment indépendante de la dépression d'entrée. Nous observons aussi que lors de la course de retour (le fluide est transmis d'une chambre à l'autre dans la pompe), la pression est assez voisine de la valeur de la dépression d'entrée.

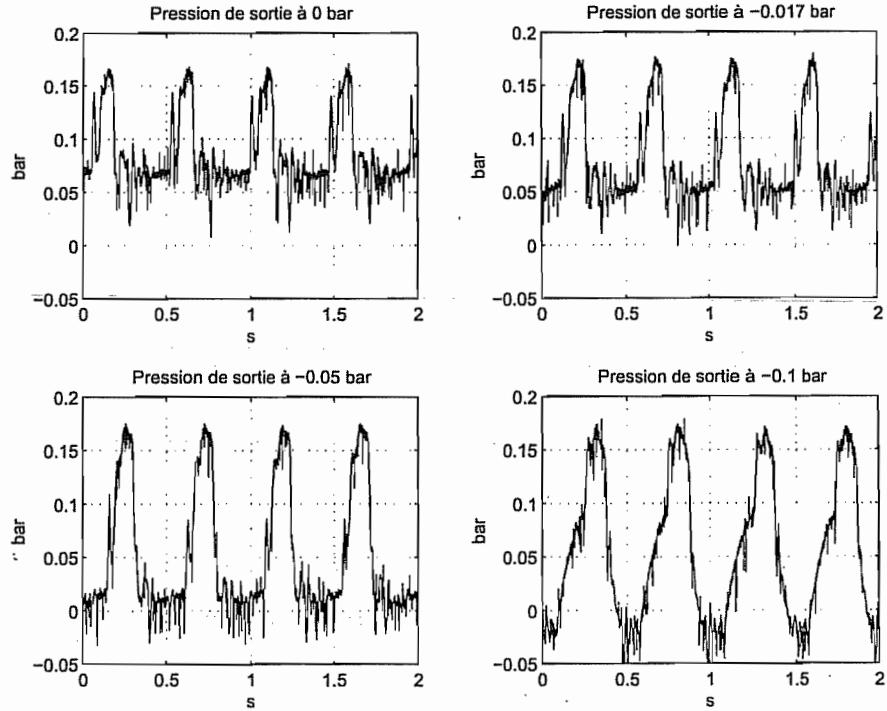


FIG. 9 – pression de sortie pour différentes valeurs de dépression d'entrée (pompe en position horizontale)

pompe inclinée à 45 degrés		
dépression d'entrée	pression max	pression moyenne
0	0.2191	0.0839
0.017	0.2026	0.0716
0.05	0.2044	0.0670
0.1	0.2144	0.0539

pompe en position horizontale		
dépression d'entrée	pression max	pression moyenne
0	0.1710	0.0857
0.017	0.1795	0.0777
0.05	0.1750	0.0506
0.1	0.1786	0.0548

Comme conclusion à la suite de l'observation des figures 7, 8 et 9, nous pouvons dire que lors de la course de retour de la palette, la valeur de la pression en sortie de la pompe est dépendante de la dépression en entrée et est très voisine de celle-ci. Au contraire, la valeur de la pression maximale

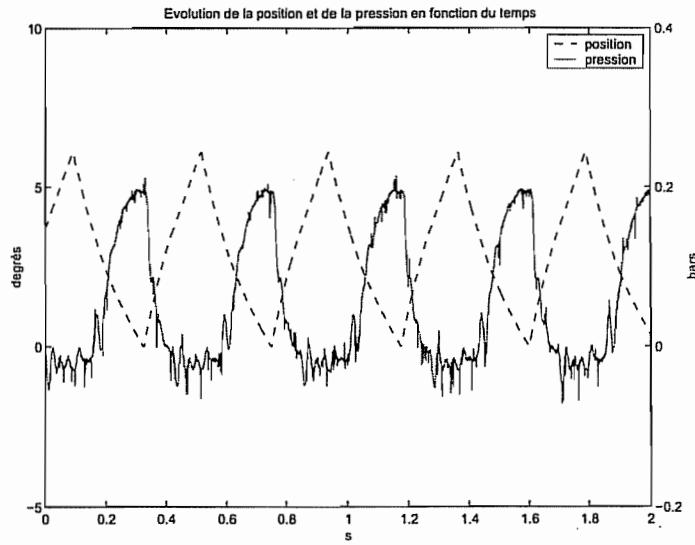


FIG. 10 – position et pression avec la pompe inclinée à 45 degrés

observée lors de l'éjection du fluide est constante quelle que soit la dépression d'entrée. Cette valeur de pression maximale en sortie de la pompe est sensiblement moins élevée dans le cas de la pompe placée en position horizontale.

La figure 10 montre que la pression augmente progressivement lors de la phase d'éjection (la position angulaire passe de 6 à 0 degrés) pour atteindre un max quand la pompe arrive en butée et ensuite diminue rapidement lors de la phase de transfert interne pour se stabiliser autour d'une valeur minimale. Cette valeur minimale dépend fortement de la valeur de la dépression d'entrée.

5 Modifications apportées pour la mesure de pression

Comme nous l'avons annoncé précédemment, l'ajout d'une section de tuyau a été nécessaire pour l'introduction d'un capteur de pression. Les tests faisant varier la vitesse ont été effectués sans ce système. Nous observons donc une différence de débit par rapport aux tests qui ont suivi.

Dans ce qui suit nous déterminons la perte de charge due à l'introduction du circuit de dérivation. L'équation (1) nous donne une expression du débit pour un écoulement laminaire dans une conduite. A l'aide d'une table, nous pouvons déterminer la valeur de la viscosité dynamique de l'eau (qui est une fonction de la température). Connaissant tous les autres paramètres, il nous

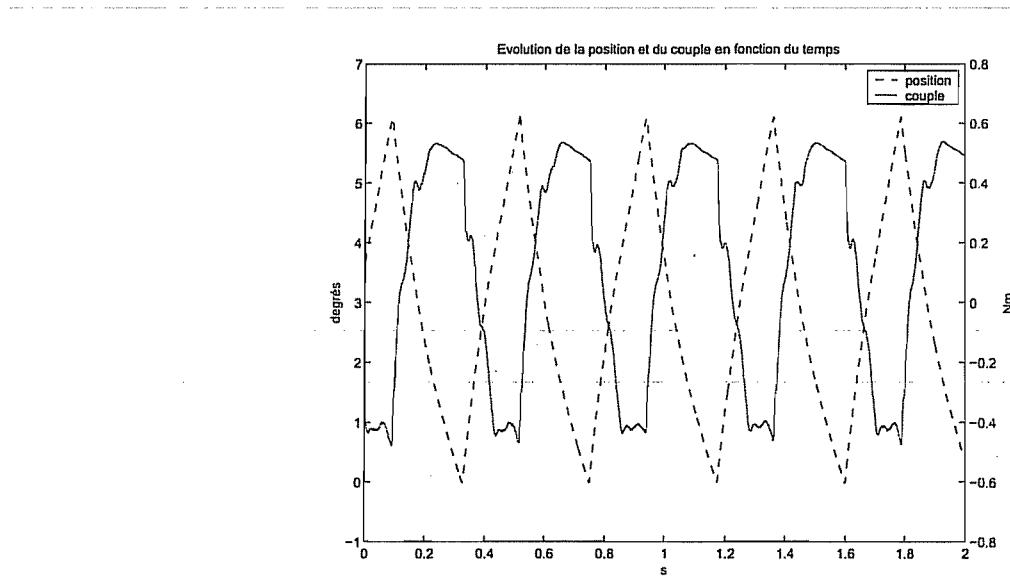


FIG. 11 – position et couple avec la pompe inclinée à 45 degrés

reste seulement la variation de pression. Nous nous ramenons donc à une expression du type : $Q_v = \alpha \Delta p$.

$$Q_v = \frac{\pi d^4 \Delta p}{128 \eta l} \quad (1)$$

- Q_v = débit en m^3/s
- l = longueur de la conduite en m
- d = diamètre de la conduite en m
- η = viscosité dynamique en $Pa\ s$
- Δp = perte de charge en Pa

Si nous introduisons les valeurs numériques, nous obtenons la relation suivante :

$$\Delta p = 282549362,02 Q_v \quad (2)$$

En introduisant la valeur du débit que nous avons mesuré, nous en déduisons donc la chute de pression causée par la canalisation. Prenons pour exemple le débit mesuré pour le cas d'une dépression d'entrée de 0.1 bars, de la pompe inclinée à 45 degrés et pour une vitesse de 0.5 rad/s.

$$\begin{aligned} Q_v &= 0.9615 \text{ ml/s} \\ &= 0.9615 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s} \end{aligned}$$

$$\Delta p = 271.6712 \text{ Pa} \quad (3)$$

De la même façon, nous pouvons calculer la perte de charge pour chacun des tests effectués.

6 Comparaison des résultats avec la théorie

Reprenons en considération les calculs théoriques effectués avant les tests. Nous avions une équation pour le débit sous la forme :

$$D_1 = f D (1 - \beta P) \quad \text{en appelant } D_1 \text{ le paramètre } \frac{Q_1}{\omega r_1^3} \quad (4)$$

Dans cette équation nous avons :

$$D = \frac{1}{2}(\epsilon + H)(\rho_p^2 - \rho^2) \quad (5)$$

$$\beta = \frac{H^3}{3\lambda(\epsilon + H)(\rho_p + \rho)} \quad (6)$$

voici la signification des différents paramètres employés dans les formules qui précèdent :

r_1	rayon minimal de la palette
$\rho = \frac{r_2}{r_1}$	r_2 correspond au rayon maximal de la palette
$\rho_p = \frac{r_p}{r_1}$	r_p correspond au rayon du piston
$\lambda = \frac{l}{r_1}$	l correspond à la longueur du piston
$H = \frac{h}{r_1}$	h correspond au jeu dans la pompe
$\epsilon = \frac{e}{r_1}$	e correspond à l'épaisseur de la palette et du piston
$P = \frac{\Delta p}{\mu \omega}$	nombre sans dimension caractéristique de la pression
f	facteur d'intermittence

Cette formule ne tient compte ni des différentes pertes de charges, ni des pertes dues au fonctionnement des clapets. Dans un premier temps, pour modéliser l'influence des clapets, nous pouvons retirer au débit calculé précédemment le terme suivant :

$$Q_{loss} = f V_{loss} \omega \frac{\theta}{180} \quad (7)$$

Dans cette équation, nous avons :

$$\begin{aligned} V_{loss} &= V_{redloss} l_b S \\ V_{redloss} &= 1 + \frac{2 \omega d_b^2 (r_1 + r_p)}{3 \nu l_b} \\ S &= \frac{\pi (d^2 - d_b^2)}{4} \end{aligned}$$

Avec

d_b	diamètre de la bille
ω	vitesse angulaire
l_b	longueur parcourue par la bille
d	diamètre des clapets
θ	débattement angulaire (en degrés)
ν	viscosité cinématique

Nous obtenons finalement :

$$Q_{tot} = Q_1 - Q_{loss} \quad (8)$$

Nous avons utilisé ces équations dans 2 contextes différents. Dans un premier temps nous travaillons avec les valeurs moyennes, de manière à obtenir des débits moyens, que nous comparerons avec les valeurs que nous avons pu mesurer. A coté de cela, nous avons utilisé ces équations avec les valeurs que nous avions stockées grâce à dSpace. Nous obtenons donc dans ce cas des valeurs qui évoluent au cours du temps.

De plus il faut savoir qu'il y des pertes de charge en entrée et en sortie de la pompe. Nous avons tenu compte dans la mesure du possible de celles-ci. En sachant toutefois que ce n'est qu'une approximation de ces pertes de charge.

Les pertes de charge que nous avons considérées sont principalement de 2 types :

- des pertes régulières dans des conduits de section constante.
- des pertes singulières dues à des élargissements ou des rétrécissements brusques.

Pour les pertes régulières, nous avons utilisé la formule suivante :

$$\Delta p = \lambda \frac{L}{D} \rho \frac{v^2}{2} \quad (9)$$

où nous avons

$$\lambda = \frac{64}{Re} \quad \text{avec} \quad Re = \frac{vD}{\nu} \quad \text{et} \quad \nu = \frac{\mu}{\rho}$$

Nous déterminons la vitesse du fluide à partir de la valeur du débit et du diamètre de la conduite. Pour les pertes dues à des singularités, nous avons des équations du type :

$$\Delta p = K \rho \frac{v^2}{2} \quad (10)$$

K étant un coefficient que nous déterminons à l'aide de table. ce coefficient dépend du nombre de Reynolds, du rapport des 2 diamètres, et du type de singularité (rétrécissement ou élargissement brusque).

Pour le système que nous avons mis au point pour faire fonctionner la pompe, nous avons considéré les pertes de charge suivantes :

- Entre le réservoir et la pompe :
 - perte singulière : rétrécissement brusque dû à l'entrée de la vanne
 - perte singulière : coude dans la vanne
 - perte régulière : tuyau entre le réservoir et la pompe
 - perte singulière : rétrécissement brusque du tuyau à l'entrée de la pompe
- Dans la pompe elle-même :
 - perte régulière : tubulure d'admission
 - perte singulière : rétrécissement brusque tubulure d'admission-canal d'entrée
 - perte régulière : canal d'entrée
 - perte régulière : tubulure d'expulsion
 - entre la pompe et le capteur de pression
 - perte singulière : élargissement brusque sortie de la pompe-tuyau
 - perte régulière : tuyau entre la pompe et le capteur de pression
 - perte singulière : rétrécissement brusque entre le tuyau et le "T"

Maintenant nous utilisons les valeurs numériques caractéristiques du modèle de la pompe et nous obtenons des courbes caractéristiques du débit en fonction de la dépression et de la vitesse angulaire. Nous pouvons alors les comparer avec les valeurs mesurées et tirer des conclusions quant à la validité de ces lois pour le cas particulier de notre pompe.

6.1 Utilisation avec les valeurs moyennes

Nous avons fait nos calculs en utilisant des valeurs moyennes pour les grandeurs physiques. concrètement nous avons pris une valeur moyenne de la

vitesse dans la phase d'éjection du fluide et dans la phase de transfert interne. Pour la pression, nous avons pris la moyenne sur la phase d'éjection. Pour les calculs faits dans cette partie, nous avons introduit le facteur d'intermittence qui donne la fraction de cycle que représente la phase d'éjection.

6.2 Utilisation en "instantané"

6.2.1 Démarche suivie

Nous sommes partis de la mesure de pression-lue sur le capteur. Nous disposons de l'évolution de cette valeur en fonction du temps. Si nous connaissons la résistance hydraulique du tuyau placé derrière le capteur (une extrémité au capteur, l'autre libre), nous pouvons transformer la mesure de pression en une mesure de débit. Nous voilà donc avec une mesure de débit en instantané. C'est ce débit que nous appellerons dorénavant le débit mesuré (par opposition au débit calculé avec le modèle théorique de la pompe).

Pour déterminer le débit à partir du modèle théorique de la pompe, il nous faut la différence de pression entrée-sortie de la pompe. Cette différence de pression nous allons la déterminer à partir de la mesure du capteur mais en la corrigeant grâce au débit que nous venons de mesurer. Ce débit va nous permettre de quantifier les pertes de charges que nous avons entre le réservoir et la pompe et entre la pompe et le capteur. Nous introduisons alors cette différence de pression dans la formule et obtenons une valeur de débit que l'on appellera débit calculé. Nous pouvons maintenant comparer les 2 débits que nous avons à notre disposition et critiquer le modèle. Nous pouvons aussi intégrer le débit sur le temps pour faire une comparaison avec le volume que nous avions mesuré dans l'éprouvette.

6.2.2 Problèmes rencontrés

En premier lieu, il s'est avéré que la mesure renvoyée par le capteur de pression n'était pas exacte. Nous avons donc du effectuer en quelque sorte un étalonnage du capteur. En gros nous avons mesuré la pression créée par une colonne d'eau et ce pour plusieurs hauteurs. Nous nous sommes ainsi aperçus qu'il y avait un décalage entre la valeur mesurée et la valeur réelle et avons pu quantifier ce décalage. Nous pouvions maintenant corriger toutes les valeurs que nous avions mesurées précédemment avec ce capteur.

En second lieu, nous avons eu quelques problèmes pour l'évaluation de la résistance hydraulique du tuyau placé en sortie du système. En effet, nous avions dans un premier temps approximé la perte de charge comme celle due à un rétrécissement brusque et une perte régulière sur un tuyau. Le débit instantané que nous obtenions alors était vraiment très éloigné de la réalité. Comme nous avions encore tout le matériel à notre disposition, nous avons décidé de mesurer la résistance hydraulique du tuyau. Nous avons donc

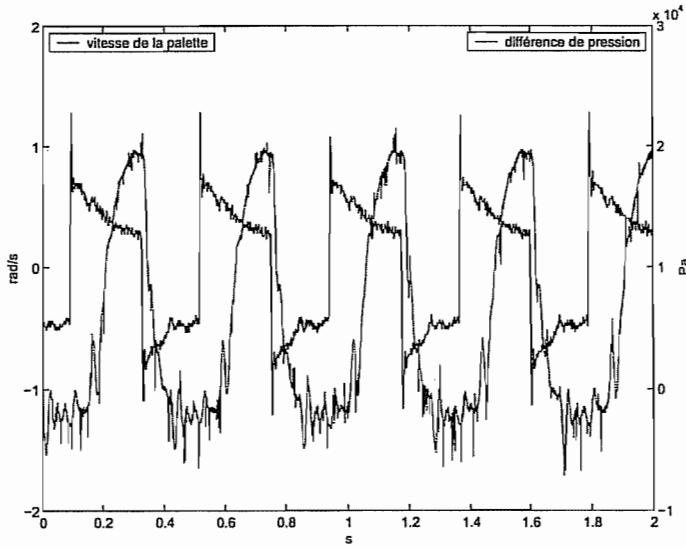


FIG. 12 – pompe à 45° avec une dépression d'entrée de 0.1 bars

refait une expérience où nous mesurions pour différentes valeur de débit, le différence de pression correspondante. Nous en avons déduit une courbe caractéristique de la différence de pression en fonction du débit.

6.2.3 Résultats

La première chose était donc d'obtenir la différence de pression observée sur le tuyau placé en sortie et d'en déduire le débit instantané. La figure 12 montre l'évolution de la différence de pression en fonction du temps pour une dépression d'entrée de 0.1 bar et une inclinaison à 45 degrés. Nous avons aussi tracé l'évolution de la vitesse de la palette. Nous remarquons ainsi que la pression augmente pendant la phase de pompage et diminue pendant la phase de transfert interne. Avec la courbe caractéristique de la résistance hydraulique du tuyau de sortie (figure 13) nous déduisons un débit instantané (figure 14). En intégrant ce débit nous pouvons effectuer une comparaison avec le volume de liquide que nous avions mesuré au cours des tests dans l'éprouvette. Nous avons rassemblé ces données dans un tableau.

6.3 Commentaires

Notons d'abord que sur les figures 15, 16 et 17, qui représentent l'évolution du débit en fonction de la valeur de la dépression d'entrée, la courbe théorique est toujours un peu au dessus des valeurs mesurées. Il y a sans doute plus de pertes dans la pompe que ce que nous avons approximé.

	dépression	0.1	0.05	0.017	0
inclinaison : 45°	débit mesuré	0.9615	3.7313	5.6818	6.5789
	débit déduit	4.0671	6.7966	7.5071	8.6222
	débit calculé	8.8615	8.7989	8.8538	9.1757
inclinaison : 90°	débit mesuré	0.7530	3.4483	5.4645	6.135
	débit déduit	3.4126	6.3702	8.4040	8.9113
	débit calculé	7.0797	8.0567	8.6978	8.1577
inclinaison : 0°	débit mesuré	0.8237	2.6178	4.3290	4.7170
	débit déduit	5.0494	8.3760	8.4348	9.1033
	débit calculé	8.3321	8.9384	9.1011	8.9039

TAB. 2 – Débit en ml/s

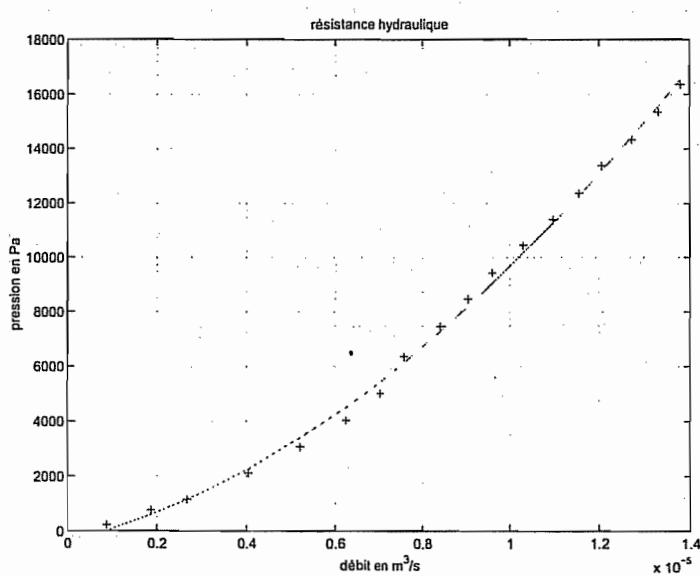


FIG. 13 – Perte de charge en fonction du débit

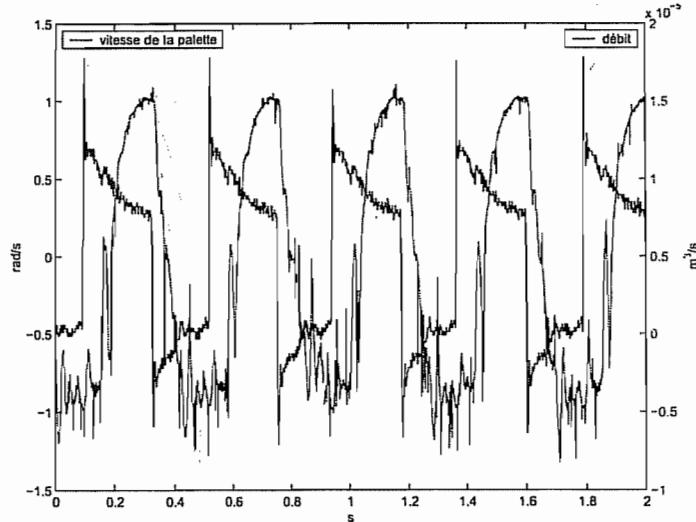


FIG. 14 – Evolution du débit pour une dépression d'entrée de 0.1 bars et une inclinaison à 45°

Pour les figures 18, 19, 20, qui représentent l'évolution du débit en fonction de la vitesse angulaire de la palette, nous remarquons surtout que les courbes théoriques s'écartent de plus en plus des courbes observées au fur et à mesure que la vitesse augmente. Plus la vitesse angulaire est élevée, plus les clapets se comportent mal. La courbe théorique ne tient pas compte (ou mal) du fonctionnement de ces clapets.

Avec les différentes mesures effectuées pour chaque condition particulière, nous avons tracé des droites. Chaque fois nous avons fait une régression linéaire au sens des moindres carrés. Comme nous n'avons que 3 à 4 points pour chaque droite, l'approximation n'est peut être pas très fiable. Néanmoins dans chaque cas, nous avons représenté l'intervalle de confiance à 95% de la droite.

Remarques :

- si nous faisions des tests avec un mouvement angulaire de la palette de plus grande amplitude, nous obtiendrions des résultats beaucoup plus proches de la théorie. En effet, lors de chaque changement de direction de la palette, il faut un certain temps pour que les clapets se mettent correctement. Pour les courbes débit-dépression d'entrée, nous pouvons voir que depuis que la formule théorique a été modifiée, la pente des 2 courbes est moins proche.
- La formule pour l'évaluation du débit a été corrigée en lui retirant un terme qui tient compte de l'influence des clapets. C'est bien sûr une approximation.

Valeurs numériques utilisées		
Nom	Valeur	Unité
r_1	37.75	mm
r_2	37.75	mm
r_p	59.75	mm
h	0.085	mm
l	40	mm
e	35	mm
T	20.3	°C
μ	0.0009958	Pa s
d	11	mm
d_b	10	mm
l_b	4.68	mm

TAB. 3 – Valeurs numériques utilisées pour le calcul du débit

- Les courbes expérimentales et théoriques ont été maintenant tracées en fonction de la différence de pression entrée-sortie. Ce qui semble donner de meilleurs résultats. La pression de sortie que nous avons considérée est en fait une moyenne de la pression mesurée par le capteur sur la course de pompage de la palette (éjection du fluide).

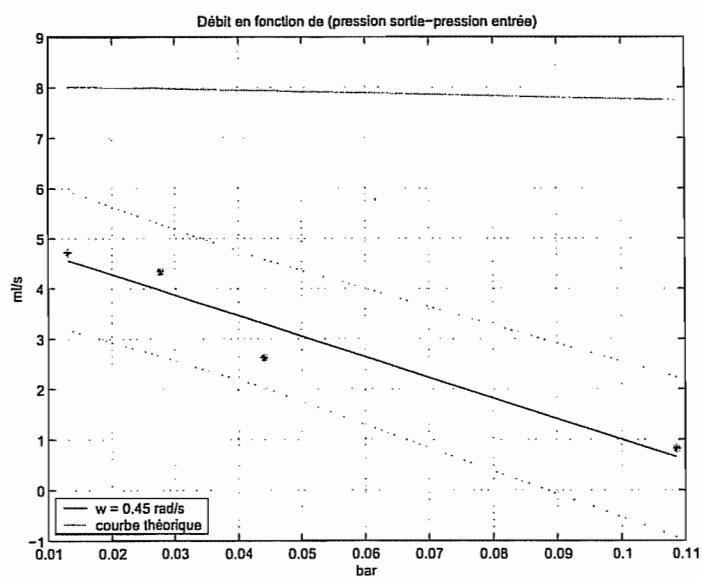


FIG. 15 – pompe en position horizontale

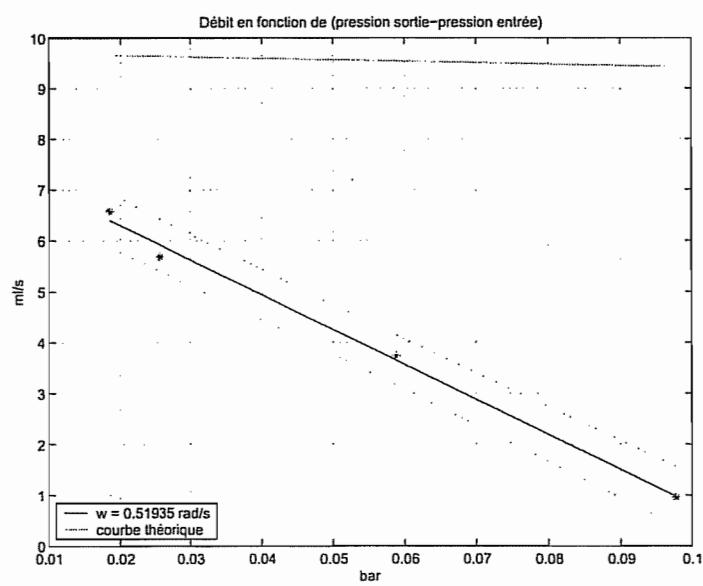


FIG. 16 – pompe inclinée à 45 degrés

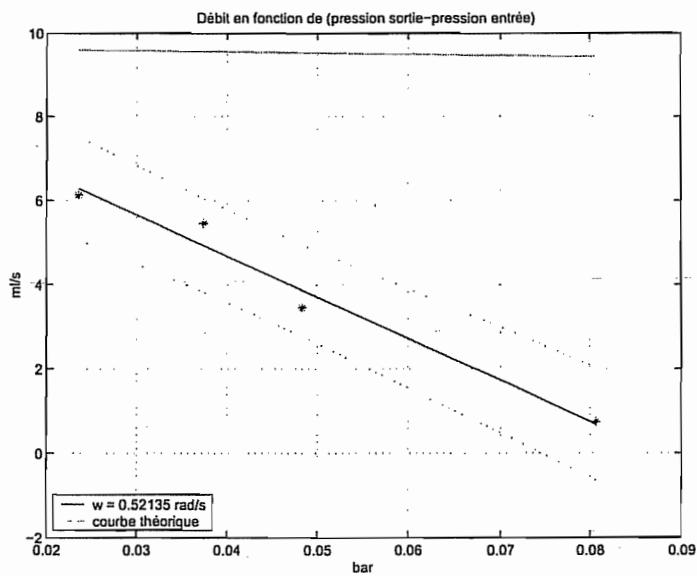


FIG. 17 – pompe en position verticale

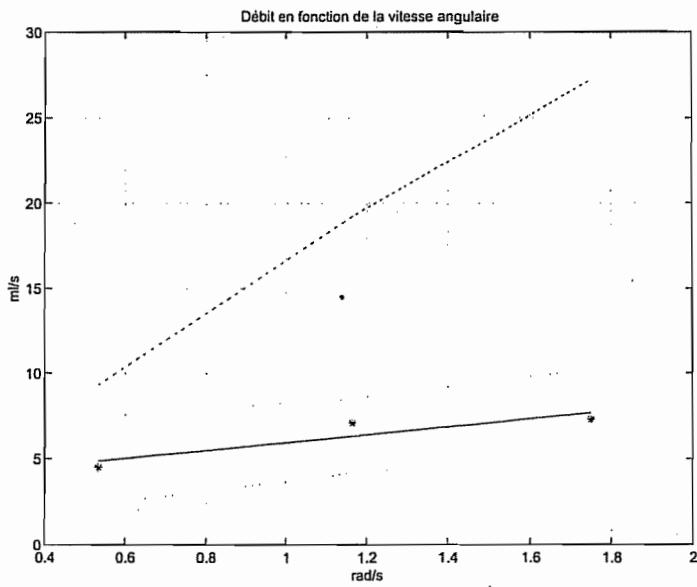


FIG. 18 – pompe en position horizontale

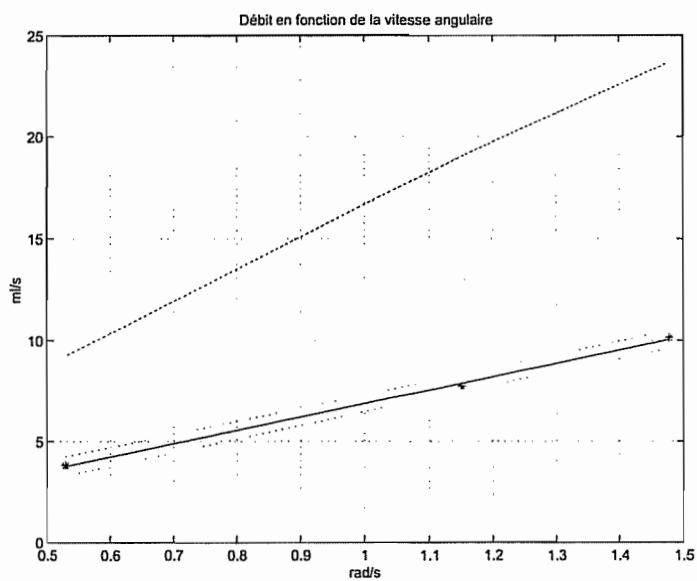


FIG. 19 – pompe inclinée à 45 degrés

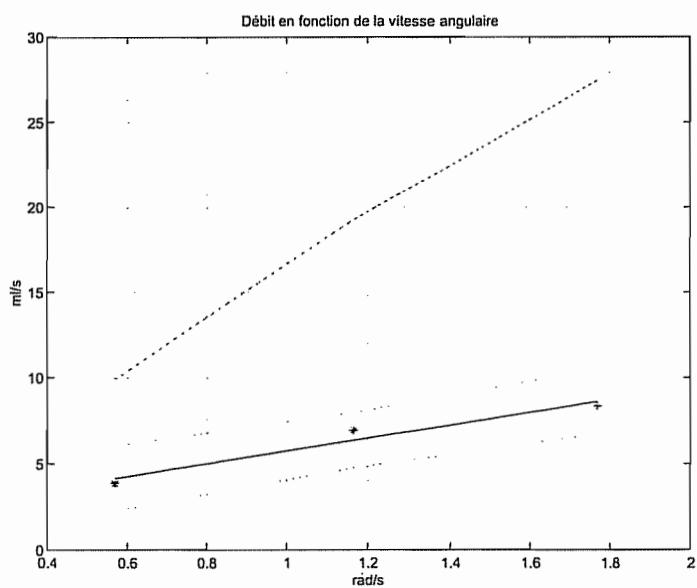
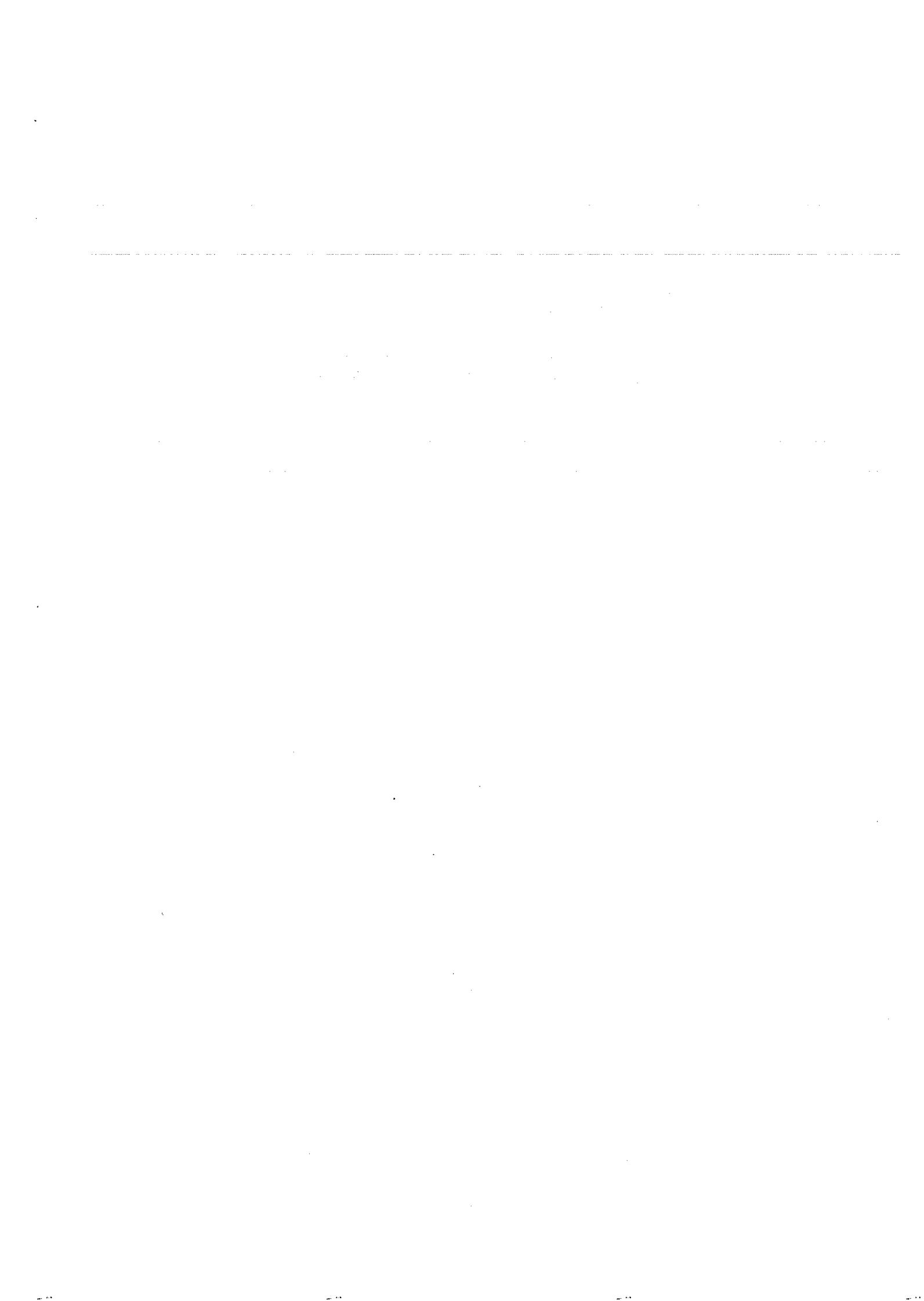


FIG. 20 – pompe en position verticale

4.2. Résultats des tests du col circulaire



Rapport sur les tests de raideur du col circulaire (avec Digimes)

Le but était de valider la loi que nous avions déterminée pour l'évolution de la raideur en fonction du déplacement pour un col circulaire. Le col est donc déplacé à différents niveaux et, pour chacun de ceux-ci, le couple de rappel est mesuré. Pour ce faire un capteur de force est utilisé ainsi qu'un bras de levier placé dans l'axe du col. La force lue sur le capteur peut ainsi aisément être transformée en couple. La différence par rapport aux expériences précédentes est qu'un boîtier électronique pour récupérer les données du capteur a été acheté. Les problèmes d'instabilité des mesures devraient donc en principe être résolus.

Le « Digimes » que nous venons de recevoir est un boîtier électronique qui, à partir de la tension renvoyée par le capteur de force et de la valeur de la tension d'alimentation (toutes 2 alternatives rappelons-le), nous affiche la force mesurée. Il est également possible d'avoir cette force sous forme d'une tension continue, qui peut alors être traitée par dSpace par exemple.

La première étape consiste à faire une sorte de calibrage de l'appareil à l'aide de poids dont on connaît précisément la masse. Une fois ce calibrage effectué, les mesures proprement dites peuvent commencer.

Pour chaque col, nous avons répété les mesures 3 fois et observons que celles-ci se répètent très bien (contrairement à tout ce que nous avions observé jusqu'à présent). Il devient alors aisément de tracer des courbes et la tendance linéaire de celles-ci se dégage très nettement.

Conclusions :

Pour les cols 1 et 4, les résultats mesurés sont très proches de la théorie. En ce qui concerne les cols 2 et 3, il y a une différence dans la pente des courbes théoriques et expérimentales. Pour les premiers graphes, l'influence de la flexion et de la torsion du bras de levier ainsi que la torsion du col ont été négligés pour le calcul de la courbe théorique. Pour être plus rigoureux, il va de soi qu'il faut aussi en tenir compte. La formule de la flèche maximale pour une poutre encastree à une extrémité et libre à l'autre est la suivante :

$$\text{Max } y = \frac{-Wl^3}{3EI} \quad (1.1)$$

dia de la barre : 0.325 cm

lg de la barre : 48 mm

$$I = \frac{\pi d^4}{64} \quad (1.2)$$

suivant la charge qui est appliquée sur le col, on peut déduire la déflection de la barre et ainsi déterminer quelle portion du déplacement observé est bien due à la déformation du col et à la flexion de la barre.

Il faut également quantifier l'influence de la torsion du col. Pour ce faire, partons de l'expression :

$$M_t = \frac{F(b+d)}{2} \quad (1.3)$$

avec b l'épaisseur du col, ici 5 mm

et d le diamètre du bras de levier, ici 3.25 mm

connaissant la rigidité en rotation R_t du col :

$$\theta_r = \frac{M_t}{R_t} \quad (1.4)$$

Nous obtenons donc l'angle du à la déformation par torsion du col.

Nous pouvons le ramener à une distance connaissant le bras de levier

$$u_t = \frac{\theta_r(b+d)(l_1+l_2)}{2 \cdot l_2} \quad (1.5)$$

avec l_1 la longueur de la barre d'aluminium allongeant le bras de levier

et l_2 la distance entre le centre du col et le point de fixation de la barre d'aluminium

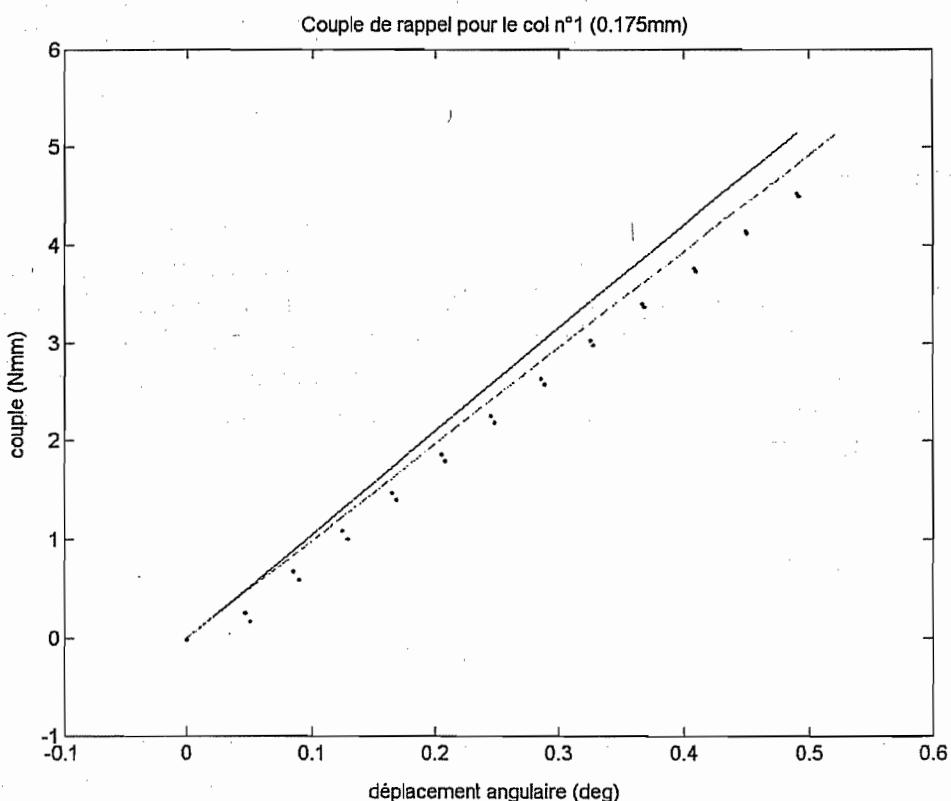
nous pouvons alors séparer les différentes composantes du déplacement :

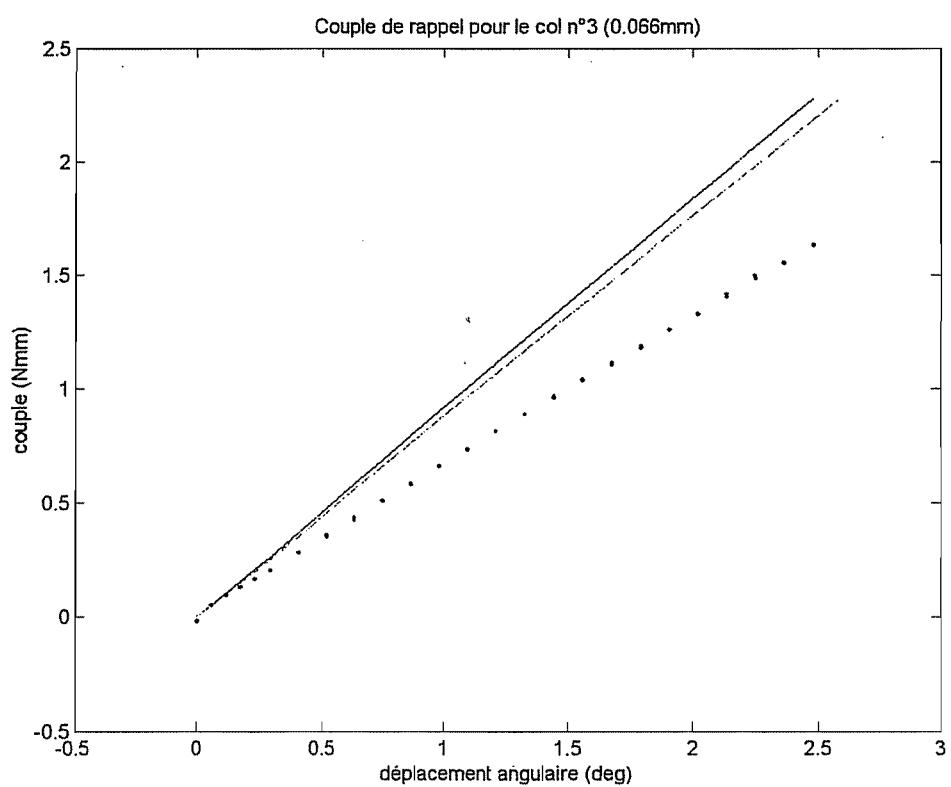
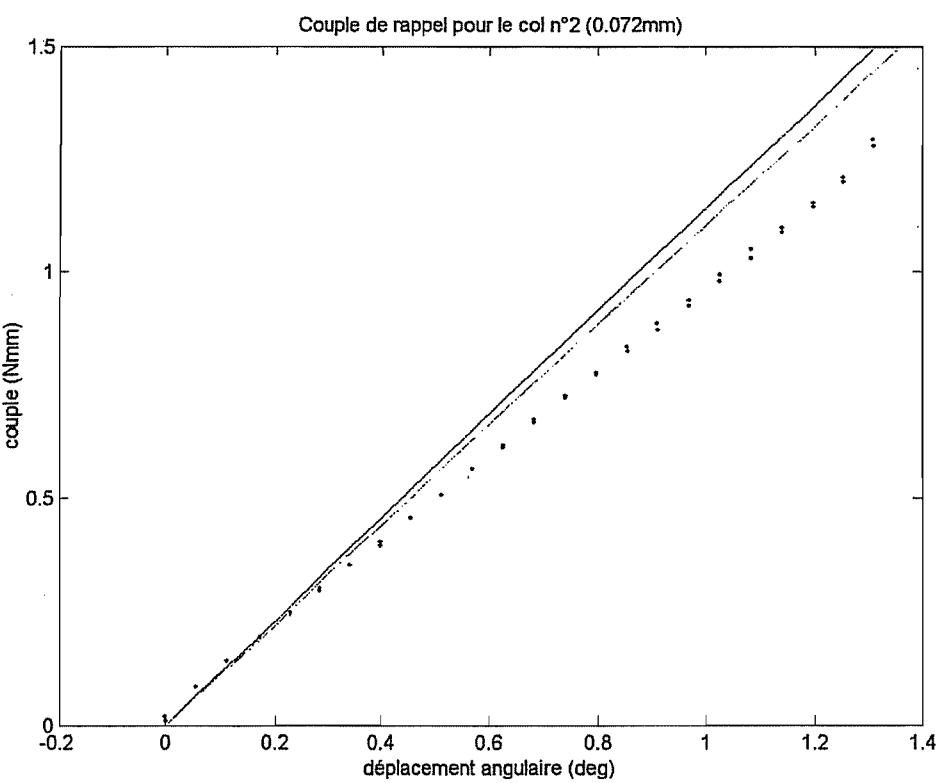
$$u = u_t + u_f + u_{\text{théorique}} \quad (1.6)$$

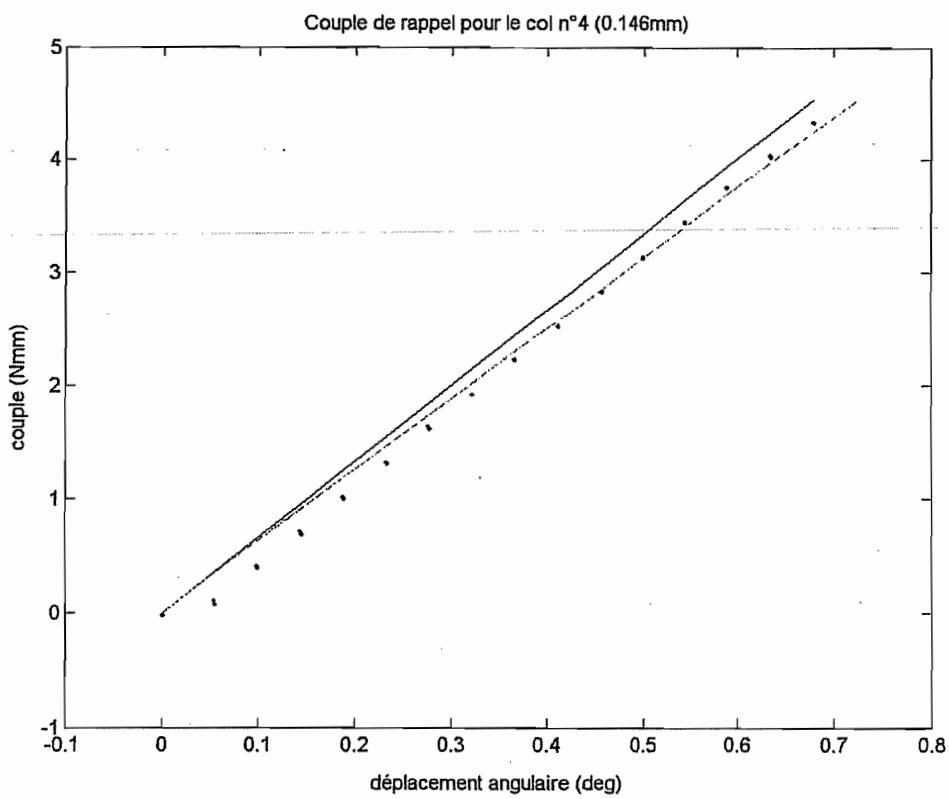
et recalculer un nouvel angle de déplacement :

$$\theta = a \tan\left(\frac{u}{l_1+l_2}\right) \quad (1.7)$$

graphes de résultats







Pour chaque graphe, la courbe verte est la valeur théorique du couple en fonction du déplacement, tenant compte de la flexion de la barre et de la torsion du col. On observe qu'on se rapproche sensiblement des valeurs expérimentales mais la diminution de l'écart n'est pas très significative. Un point positif est le fait que les mesures expérimentales soient fiables.

4.3. Choix du moteur pour le banc d'essai actionneurs



Projet 4M : banc d'essai.

Choix du moteur pour le banc d'essai

O. Smal

Ce document montre le choix du moteur servant à l'actionnement du modèle de la micro-pompe.

Performances attendues du moteur:

- **Couple** : on veut pouvoir exercer une force de 1 à 5 N sur le piston. Sur le modèle, le bras de levier est d'environ 4 cm

$$\text{couple} = 1 \text{ N} \cdot 0.04 \text{ m} = 0.04 \text{ Nm}$$

$$\text{couple} = 5 \text{ N} \cdot 0.04 \text{ m} = 0.2 \text{ Nm}$$
- **Fréquence de fonctionnement** : il est attendu que le mouvement de la pompe se fasse à une fréquence variant de 1 à 10 Hz.
- **Puissance** : pour avoir une idée de la puissance nécessaire, on peut faire un rapide petit calcul (en partant de la vitesse de rotation et du couple).
 Supposons que le débattement de la palette soit de 15° et une fréquence de 10 Hz,
 $\Rightarrow 0.05 \text{ s pour faire } 15^\circ$

$$\Rightarrow 1.2 \text{ s pour faire 1 tour} \Rightarrow 50 \text{ tr/min} = \frac{50 \cdot 2 \cdot \pi}{60} \text{ rad/s} = 5.236 \text{ rad/s}$$

$$\Rightarrow \text{puissance} \cong \text{couple(Nm)} \times \text{vitesse(rad/s)} = 0.2 \text{ Nm} \cdot 5.236 \text{ rad/s} = 1.047 \text{ W}$$

Choix du moteur :

Le moteur que nous avons à notre disposition est un moteur Maxon à Commutation Graphite de 4.5 Watt avec un réducteur 84 :1 et un codeur digital magnétique. Les caractéristiques précises de ce moteur sont fournies en annexe.

1. Couple :

Dans les documents on trouve le couple permanent max : 4.98 mNm.

Ce qui est bien sûr beaucoup trop faible. Maintenant en considérant le réducteur on peut calculer un nouveau couple en sortie du réducteur :

$$\text{rapport de réduction} = 84 : 1$$

$$\text{rendement max du réducteur} = 60 \%$$

$$\Rightarrow \text{couple max} = 0.00498 \text{ Nm} \cdot 84 \cdot 0.60 = 0.25 \text{ Nm}$$

On demandait un couple de 0.2 Nm, cela semble donc suffisant.

2. Vitesse :

Regardons un peu la vitesse de rotation du moteur à sa tension nominale (12 Volts).

On lit une valeur de 13900 tr/min pour la vitesse à vide. Calculons la vitesse avec une charge sur le moteur. Supposons la charge maximum admissible par le moteur, c'est à dire un couple de 4.98 mNm. Comme dans le datasheet on nous donne la valeur de la pente vitesse/couple, on obtient :

$vitesse à charge max = vitesse à vide - pente \times couple = 13900 - 490 \cdot 4.98 = 11459.8 \text{ tr/min}$
 en divisant par le rapport de réduction, on obtient la vitesse en sortie de réducteur :

$$\frac{11459.8 \text{ tr / min}}{84} = 136.426 \text{ tr / min}$$

on pourra atteindre des vitesses plus faibles en baissant la tension d'alimentation du moteur. En effet tous les calculs ont été en supposant qu'on alimentait le moteur à sa tension nominale (12 Volts). Eventuellement on pourrait utiliser un autre réducteur (par ex : 370 :1) mais alors la vitesse maximale en sortie du réducteur tomberait à 31 tr/min. Avec cette valeur on ne saurait plus faire fonctionner le système à 10 Hz comme il est demandé.

4.4. Cahier des charges du banc essais du modèle à l'échelle 10 :1



Projet 4M : banc d'essai.

Proposition de cahier des charges pour le banc d'essai du modèle.

O. Smal

Parmi les grandeurs à mesurer sur la pompe, il y en qui sont directement liées à une mesure de performance de la pompe et d'autres non.

Grandeurs liées aux performances de la pompe :

- **Débit** : mesure du débit moyen via une mesure du volume éjecté en sortie de la pompe sur plusieurs cycles.
- **Comportement des billes d'étanchéité** : à l'aide d'une caméra, vérification que les billes « se comportent » bien au cours des cycles (qu'elles ne sortent pas de leur sièges et ne se retrouvent pas à des positions d'où elles ne sauraient revenir).
- **Couple** appliqué sur l'axe de la pompe : le moteur utilisé pour actionner le modèle sera commandé en couple, cette mesure est donc implicite.

Autres grandeurs :

- **Position angulaire de la palette.**
- **Vitesse de la palette** : les débit (et surtout les fuites) dépendent de cette vitesse. Cette mesure de vitesse sera effectuée en parallèle de la mesure de la position de la palette.

Dimensions associées à ces grandeurs :

- Les billes ont un diamètre de 10 mm.
- Si on reprend une valeur de la force devant être exercée située entre 1 et 5 N, on arrive à des valeurs entre 0.04 et 0.2 Nm pour le couple en utilisant les dimensions fixées pour le modèle.
- Pour le modèle, la plage de variation de la position angulaire de la palette est de 6°. Comme on veut pouvoir faire évoluer cette course afin de voir son influence sur le comportement de la pompe, nous avons choisi une plage de variation de 15°.

Contraintes liées au banc d'essai :

- Fixation de la pompe dans plusieurs positions (principalement horizontale et verticale).
- Fixation du moteur pour chacune de ces positions, permettant un actionnement de la pompe. Le moteur va être fixé dans le prolongement de l'axe de la pompe via un accouplement flexible.
- Fixation de la caméra, de manière à pouvoir observer ce qui se passe dans chacune des positions de la pompe.

Questions :

- Est-il utile de pouvoir faire des mesures de dimension sur le modèle ? par exemple une mesure du jeu entre la palette et les flasques (couvercles), ce qui permettrait d'évaluer les performances de la pompe en fonction de ce jeu.

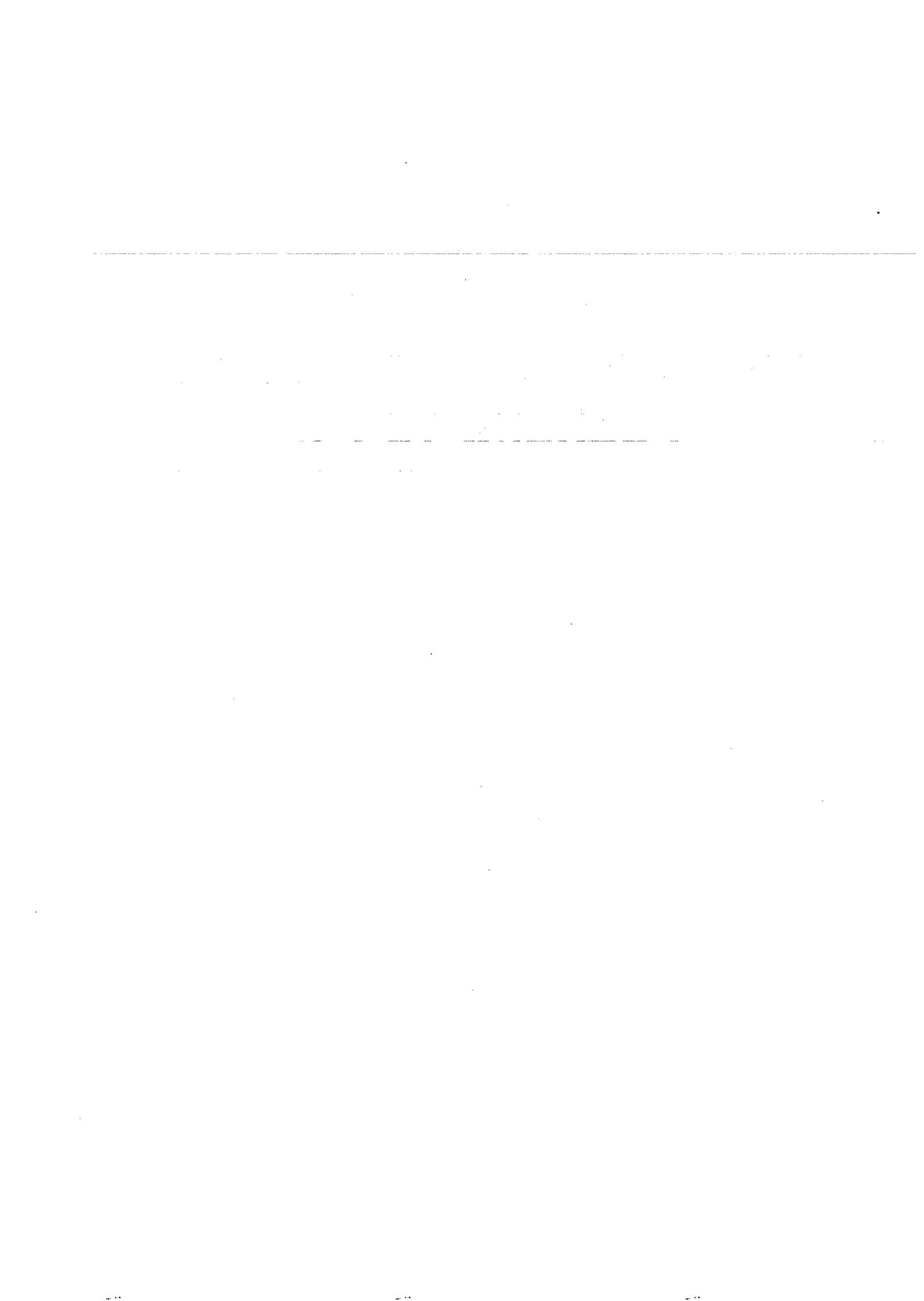
Réponse : il n'est pas nécessaire de mesurer les jeux dans la pompe car ceux-ci seront fixés par la fabrication même. Les pièces seront mesurées pour vérifier leur exactitude et leur concordance avec le dessin de définition. Nous connaîtrons donc les dimensions qui fixent les jeux. C'est par la fabrication et en particulier par les tolérances que les jeux seront fixés par l'intermédiaire de pièces calibrées.

- Est-il intéressant de tester le fonctionnement de la pompe dans diverses positions (position horizontale, verticale, « la tête en bas »,...) de façon à mettre en évidence l'influence de la gravité (si elle existe) sur le comportement de la pompe.
Réponse : oui bien sûr. Du moins l'influence de la position sur le comportement sera sans doute moins forte pour le prototype que pour le modèle.

Remarque :

- Après discussion avec B. Dehez, l'utilisation d'un système 4 bras pour actionner le modèle est apparue inutile. En effet il est tout aussi facile d'actionner directement le modèle avec un moteur auquel on donnera une loi de commande comme on le souhaite. De cette manière, la dynamique du mouvement n'est pas dictée par le système 4 bras mais peut être réglée comme on l'entend.

4.5. Commentaires sur le banc essais du modèle à l'échelle 10 : 1



Projet 4M : banc d'essai.

Commentaires relatifs au banc d'essai.

O. Smal

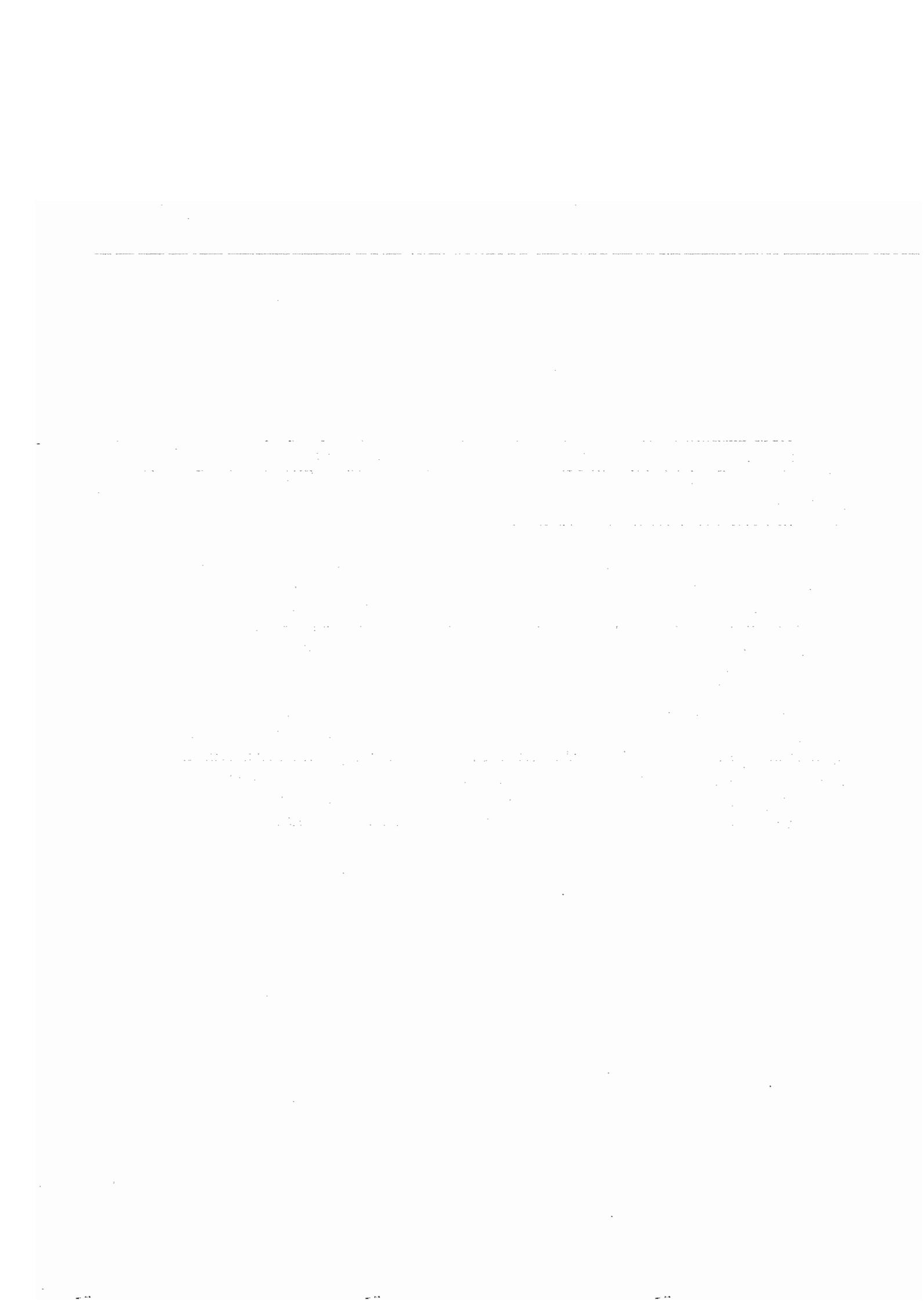
Voici quelques explications relatives aux dessins du banc d'essai du modèle 10 :1 de la pompe.

Fixation de la pompe sur le banc d'essai :

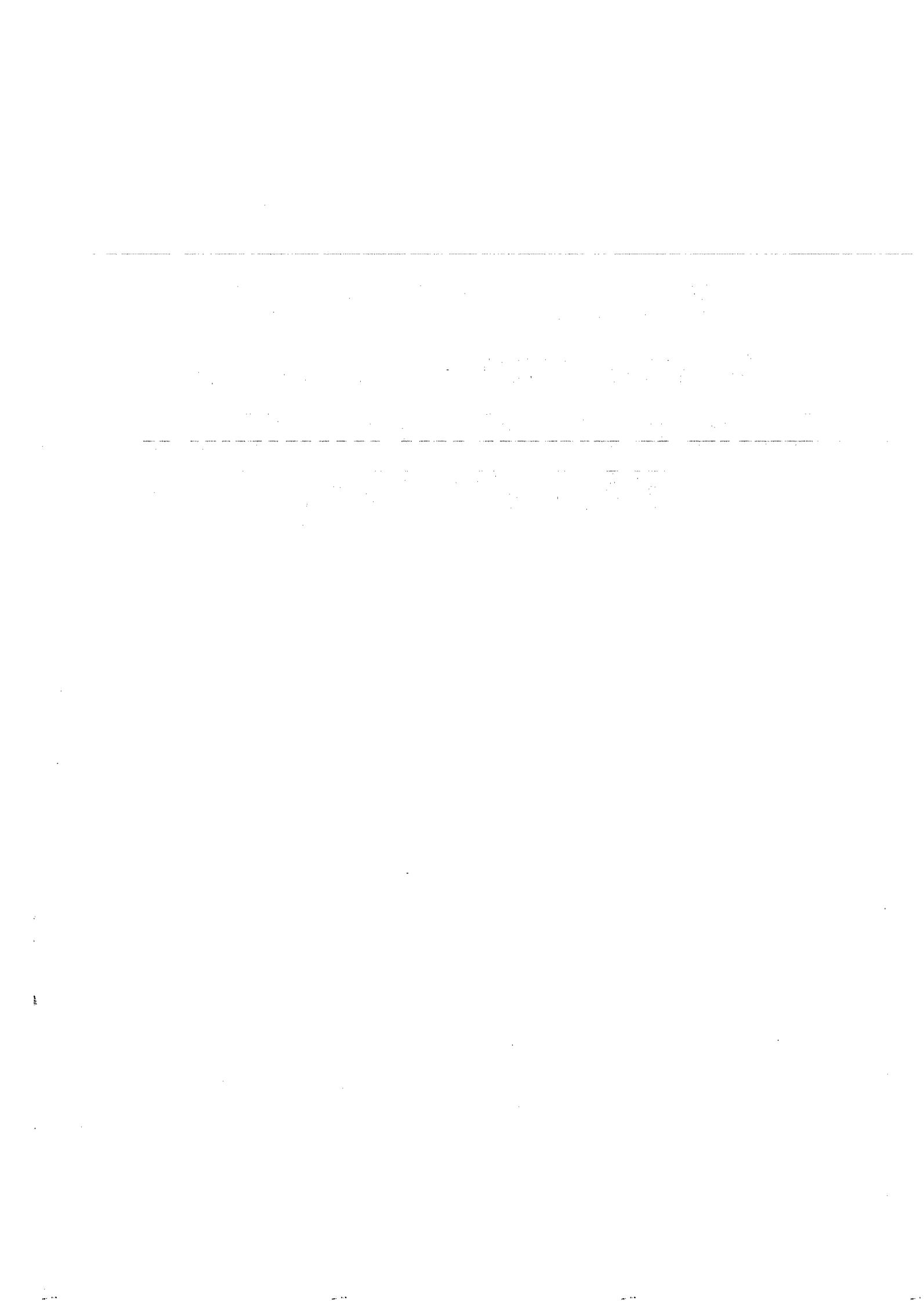
Nous utilisons 3 des 6 trous présents dans les couvercles de la pompe pour fixer celle-ci au banc d'essai. Pour ce faire nous utilisons des vis plus longues venant se visser dans des piliers. Comme il a été établi qu'il fallait pouvoir tester la pompe dans différentes positions, la plaque solidarisant la pompe et le moteur est placée sur un axe de façon à pouvoir orienter la pompe différemment pour effectuer les tests.

Le moteur va être fixé directement à l'axe de la pompe grâce à un accouplement flexible. Le moteur sera soutenu par la pompe elle-même. De cette façon le moteur restera correctement aligné par rapport à l'axe de la pompe. On évite ainsi une rupture potentielle de l'axe du moteur. Il faut juste un système qui empêche le corps du moteur de tourner. On peut faire une rainure dans la plaque et visser une tige filetée dans un des trous du moteur servant normalement à le fixer.

Pour bloquer la plaque dans les différentes positions, nous utilisons des billes sur ressort et un papillon. Des trous sont percés (en arc de cercle) dans un des deux montants supportant la plaque mobile. Un système de billes sur ressort est logé dans l'épaisseur de la plaque. Ces billes peuvent venir se « caler » dans les différentes encoches du montant. Une fois la plaque dans la position voulue, il ne reste plus qu'à visser le papillon sur l'axe de l'autre côté de manière à la bloquer. Les trous dans les montants sont réalisés tous les 15 degrés.



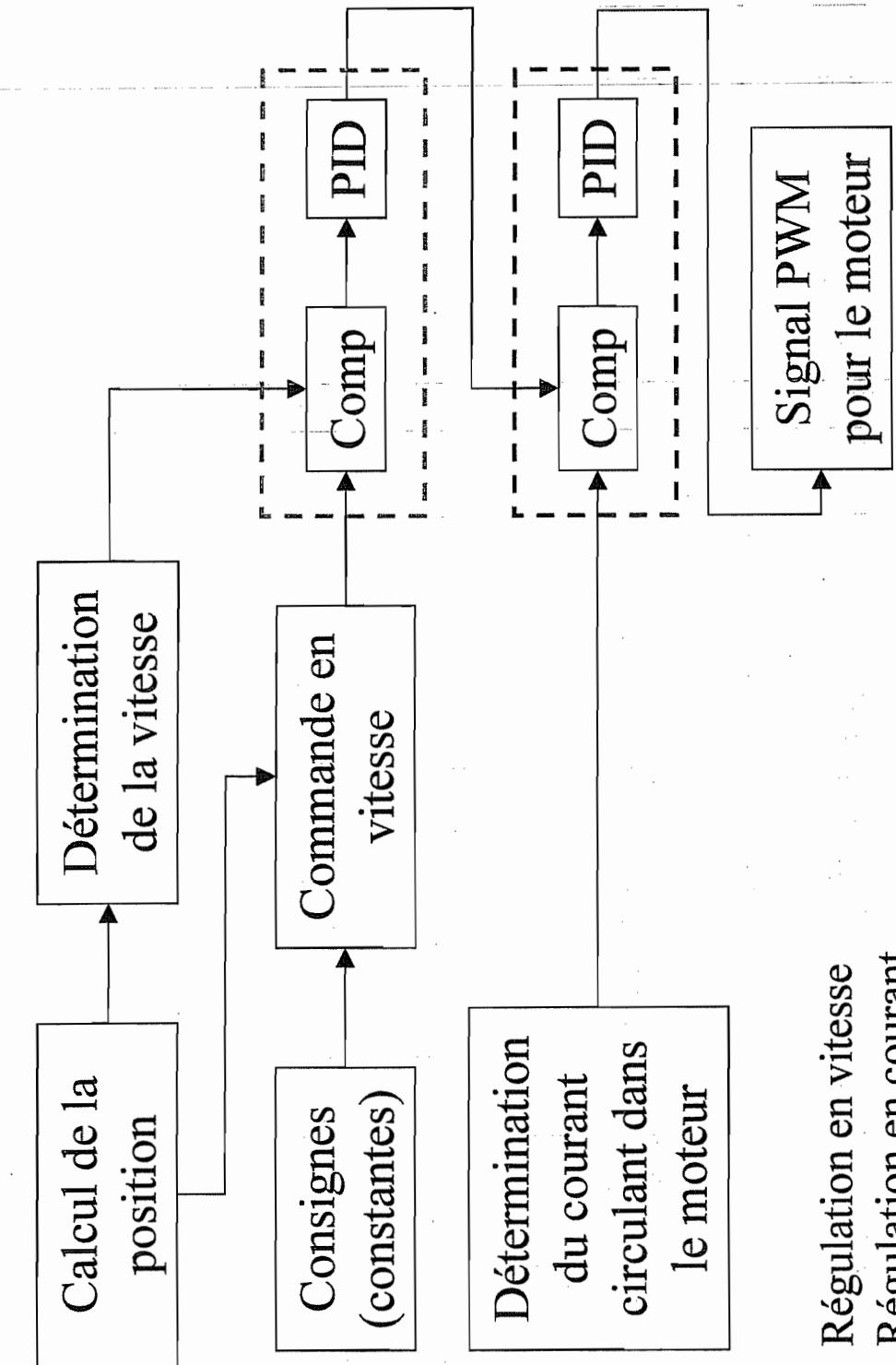
4.6. Description de la commande moteur du banc d'essai du modèle à l'échelle 10 :1



Commande du moteur (type bang-bang)

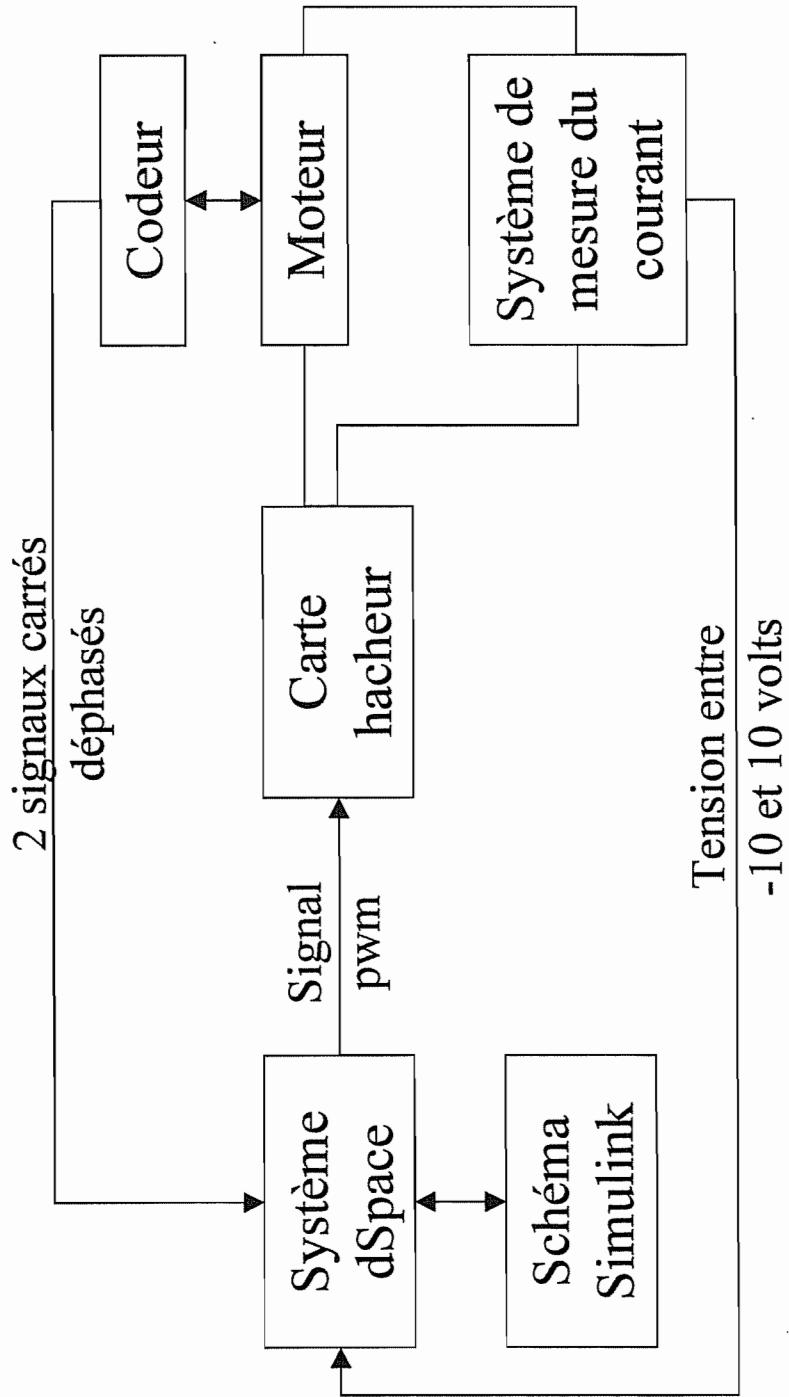
- Consignes en vitesse (dans les deux sens): 2 constantes
- Spécification du débattement angulaire
- 2 boucles de régulation: en courant et en vitesse

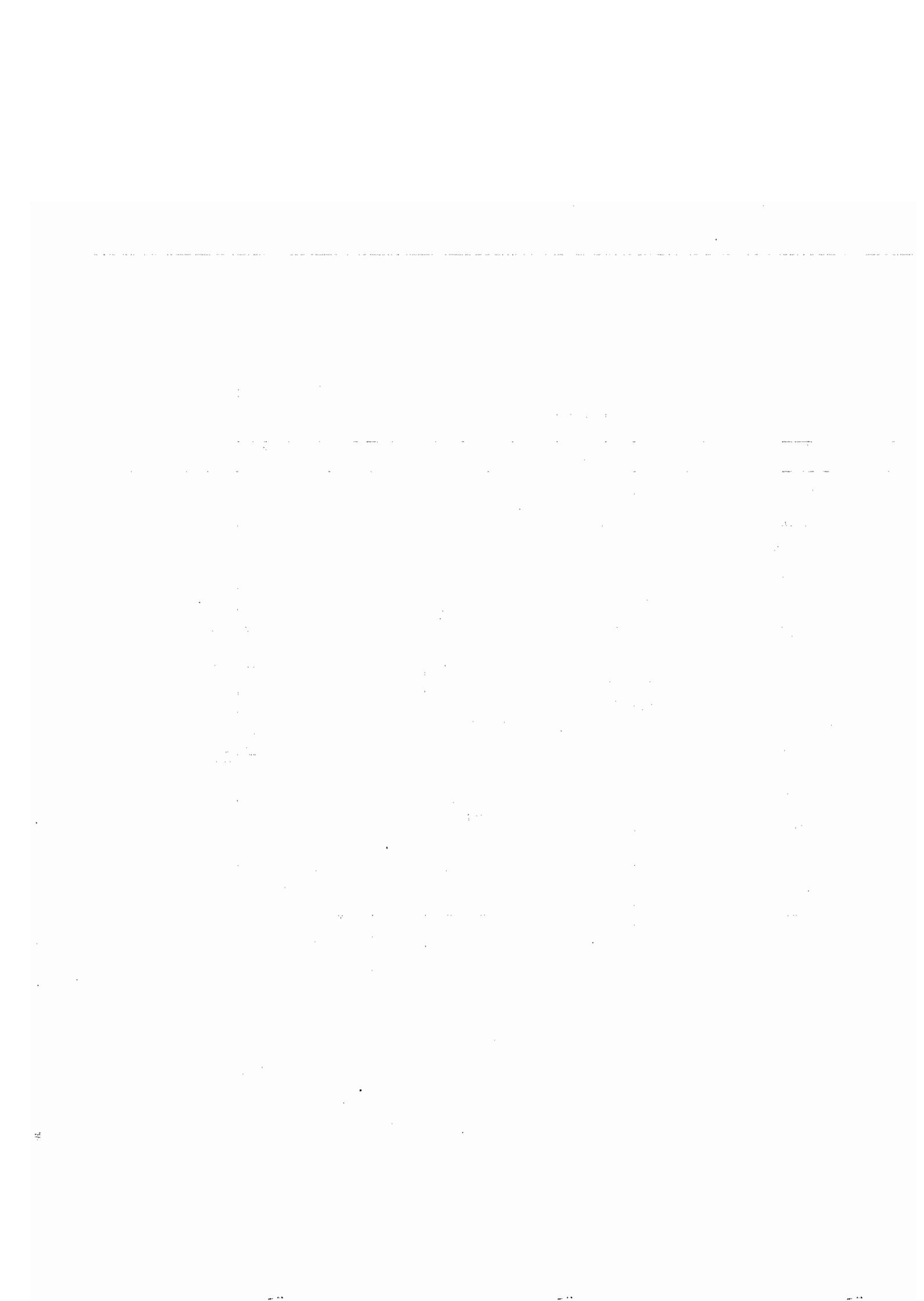
Principe de la régulation



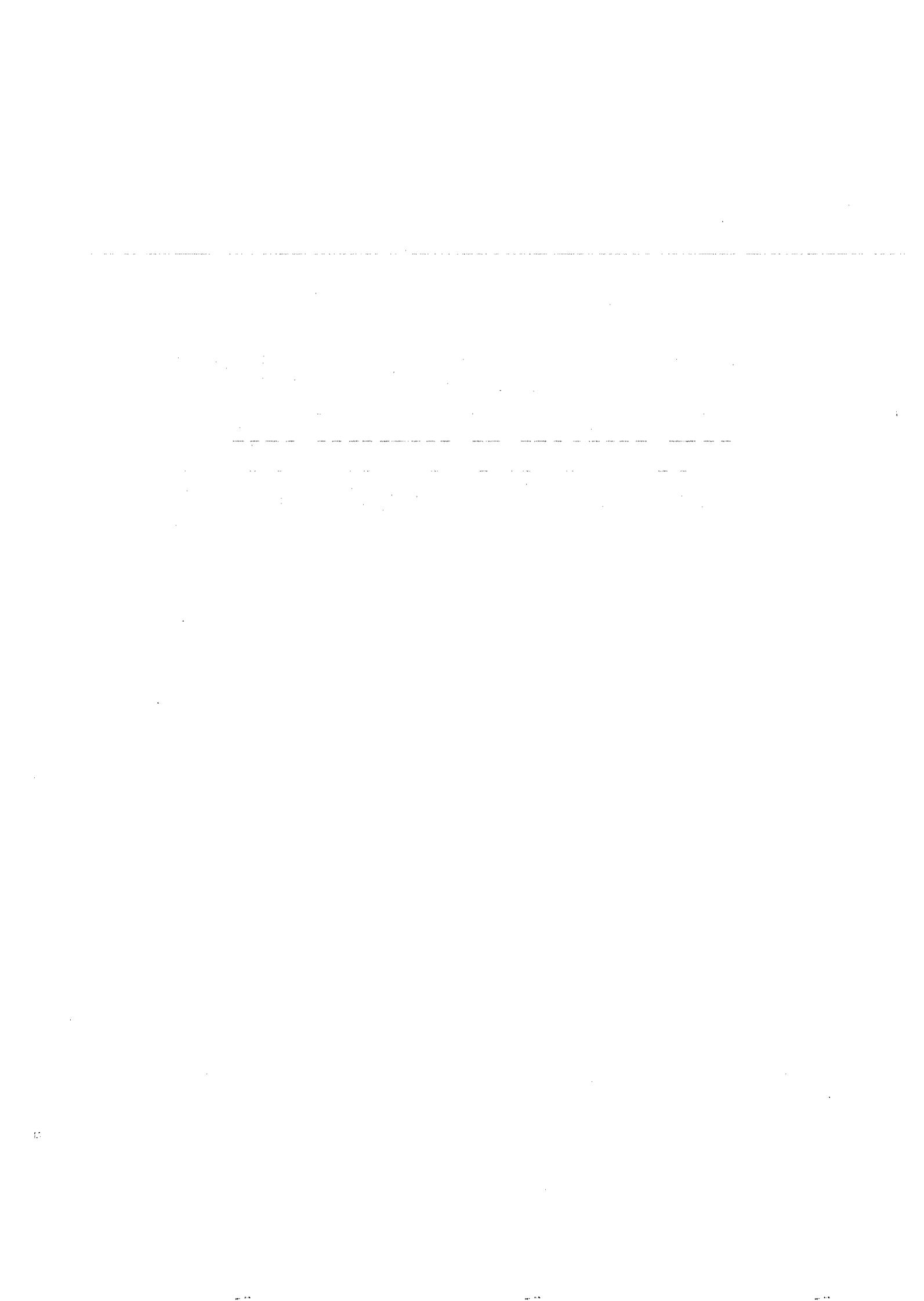
- Régulation en vitesse
- Régulation en courant

Structure du système





4.7. Types commandes possibles pour le moteur du banc d'essai du modèle à l'échelle 10 :1

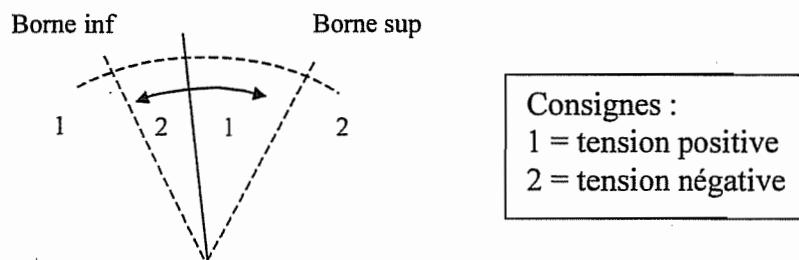


Banc d'essai mécanique : types de commandes possibles.

Le moteur qui actionnera le modèle de la pompe à l'échelle 10:1 peut être commandé via dSpace selon plusieurs lois de commande. Cela permettra d'évaluer l'influence de la vitesse et de la dynamique du piston sur le fonctionnement et le comportement général de la pompe. Voici les trois lois de commandes implémentées.

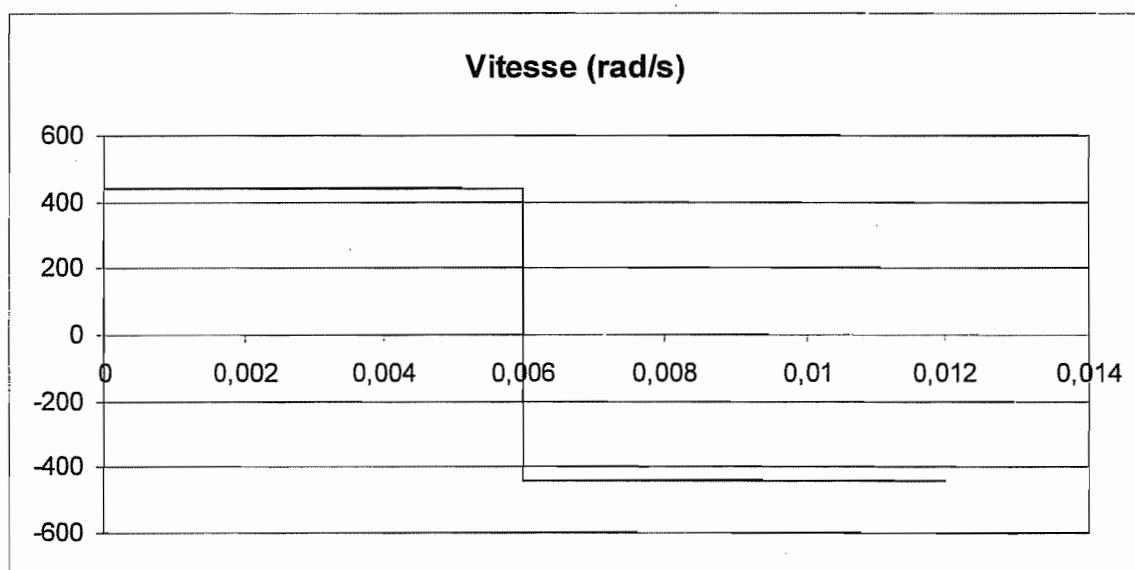
Commande en tension

C'est la plus simple. La consigne est un niveau de tension (entre -12V et 12V) qui est transformé par la suite en un signal PWM. Aucune mesure n'est effectuée sur le moteur, la commande est en boucle ouverte (absence de rétroaction).



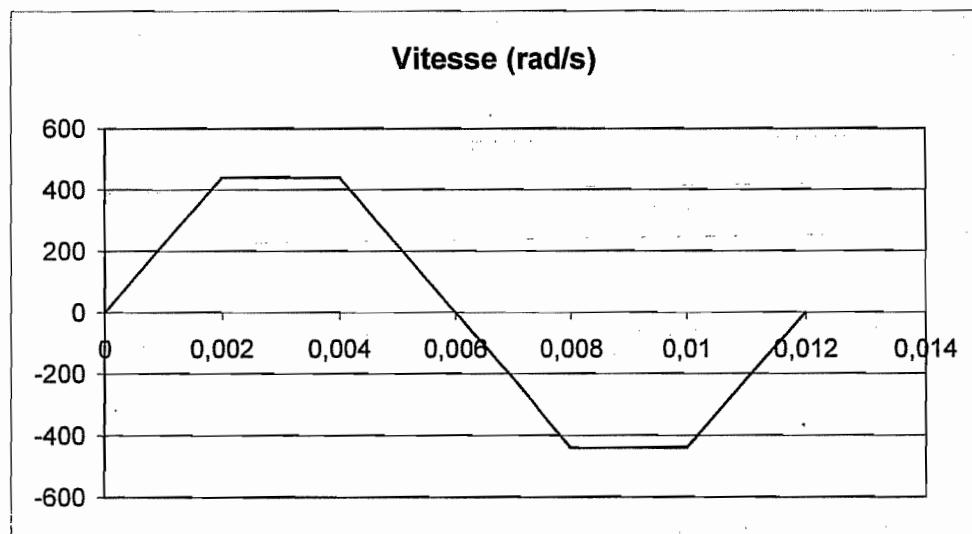
Commande en vitesse

La consigne est cette fois une vitesse (en rad/s). Il y a de plus deux boucles de régulation imbriquées l'une dans l'autre. La première est une boucle avec une comparaison en vitesse et la deuxième avec une comparaison en courant. La vitesse est imposée constante pour un aller (ou un retour). Via traitement des signaux renvoyés par le codeur Maxon, une valeur de la vitesse est obtenue et comparée à la consigne. Ensuite l'erreur passe dans un régulateur PI et est ensuite comparée au courant qui circule dans le moteur. Ce courant étant mesuré avec un LEM de façon à perturber le moins possible le moteur. La différence entre les deux signaux est à son tour envoyée dans un régulateur PI et sert ensuite de consigne pour générer le signal PWM.



Commande en vitesse évolutive

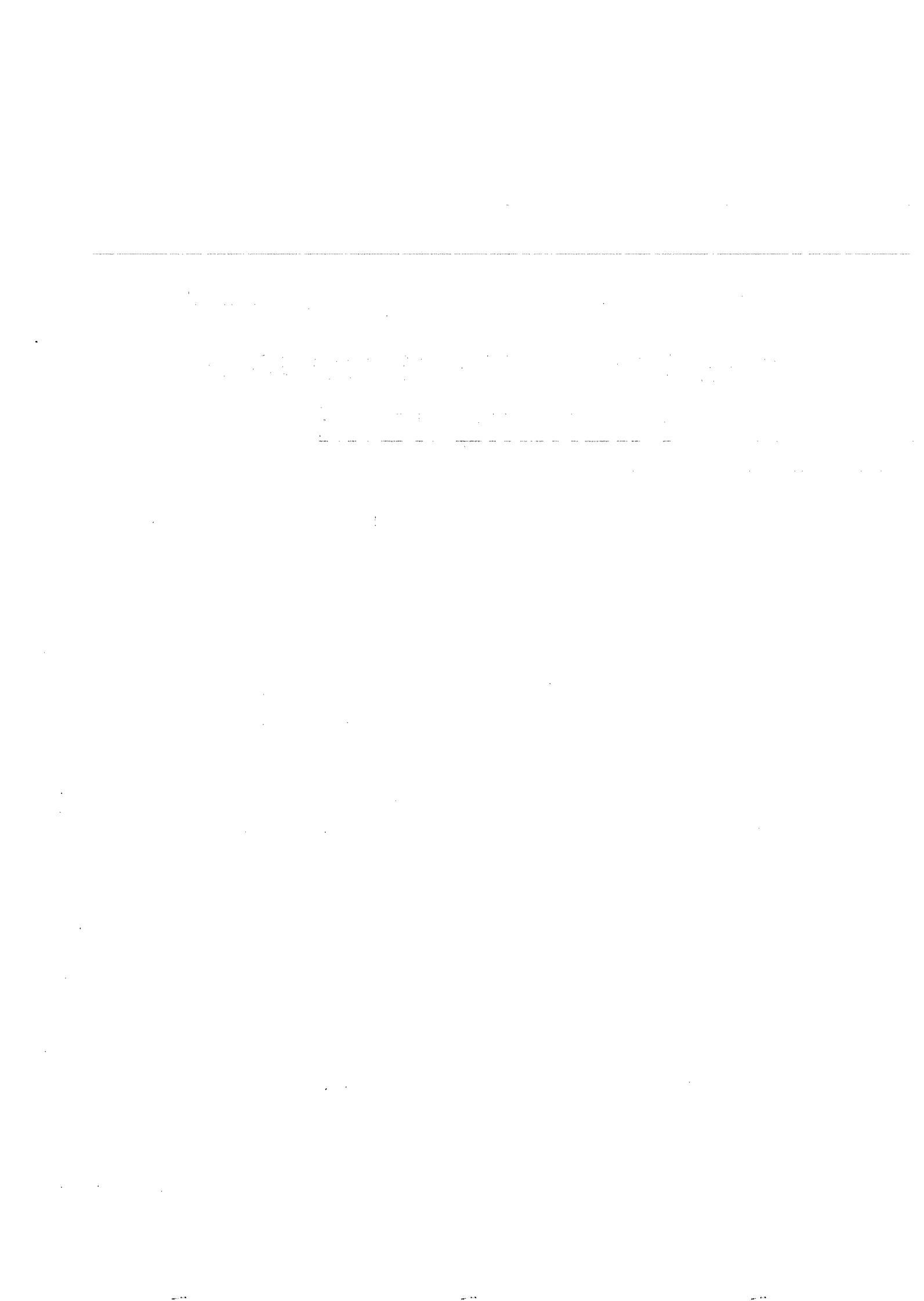
L'inconvénient dans la commande précédente est qu'il y a une transition en vitesse très abrupte à chaque fois que le moteur change de sens de rotation. Il passe d'une consigne de vitesse fortement positive à une fortement négative sans aucune vitesse intermédiaire. Pour remédier à cela il faut donc créer une loi de commande sans transition abrupte, avec une phase d'accélération et de décélération. Ce qui est fait ici. Pour le reste, rien ne change par rapport à la commande en vitesse simple. Les deux boucles de rétroactions sont toujours présentes. Il y a juste la consigne qui change : ici c'est une vitesse avec une phase d'accélération et de décélération pour chaque demi-cycle alors que précédemment c'était une simple constante.



Caractéristiques communes à chaque loi de commande :

Les bornes qui délimitent le débattement angulaire du moteur dans son mouvement alternatif sont des bornes électriques (mesurées via le codeur). Il est donc possible de faire varier celles-ci très facilement (une simple variable à modifier dans dSpace).

4.8. Cahier des charges des tests du modèle à l'échelle 10 :1





Modèle 1

Cahier des charges des tests

Le premier test sera simplement un test de vérification du principe de fonctionnement de la pompe. Celui-ci se fera pompe horizontale (axe de rotation de la pompe vertical). Seules les conditions initiales doivent être respectées.

Un fonctionnement satisfaisant doit être observé lors de ce test avant d'aller plus loin.

Viennent ensuite une série de tests permettant de caractériser le fonctionnement de la pompe. Lors de ces tests, certaines conditions doivent être respectées, elles sont explicitées par la suite. De même, certaines mesures doivent être effectuées.

Un tableau de résultats est présenté en annexe. Chaque résultat doit être consigné dans un tableau identique.

Données

Spécification des conditions d'utilisation

Certaines conditions doivent être remplies avant de procéder à un test sur le modèle,

- dépression à l'entrée : 0,1 bar ; il a été convenu de moduler cette dépression d'entrée afin d'obtenir une courbe caractéristique de fonctionnement dépendante de cette dépression,
- la pompe doit impérativement être complètement remplie de liquide,
- le liquide en question doit être dégazé (pour éviter une formation de bulles dues à un autre phénomène que la cavitation),
- la configuration initiale est celle de la position de repos, avec sécurité (le poussoir retient la bille du clapet d'aspiration).
- l'introduction du colorant doit se faire au goutte à goutte, de façon intermittente,

Spécification d'orientation de la pompe

Au minimum 3 positions différentes doivent être testées.

- position verticale (axe de rotation de la pompe horizontal),
- position horizontale,
- position verticale inversée.

Spécification de dépression à l'entrée

Comme expliqué au paragraphe des conditions d'utilisation, cette dépression doit être modulée. La plus forte dépression sera celle qui annule le débit de la pompe : $50,74 \cdot 10^4$ Pa (à 0,58939 rad/s, voir annexe 2). Cette dépression semble cependant difficile à obtenir ; en réduisant la vitesse à 0,1 rad/s, cette dépression se réduit à $9,23 \cdot 10^4$ Pa, dépression qu'il est également difficile à obtenir ; il faudra faire un compromis entre la dépression et la vitesse et

noter ces différentes valeurs sur la fiche. Ensuite, il suffit de faire progresser cette dépression par palier jusqu'à arriver à une dépression nulle. On prévoira 4 valeurs de dépression différentes dont 3 de celles-ci sont les dépressions extrêmes et -0,1 bar, il ne reste plus qu'une seule valeur libre.

Il faut donc prévoir un tuyau d'entrée suffisamment long.

Spécification d'orientation angulaire de la pompe sur le plateau

L'axe suivant lequel les billes se meuvent doit être perpendiculaire à l'axe de rotation du plateau du banc d'essai. Cette position doit être respectée pour tous les tests impliquant une rotation du plateau par rapport à l'horizontale.

Spécification de jeu dans la pompe (jeu entre les flasques et la palette)

Les jeux minimum et maximum doivent être testés (il faut définir le jeu maximum). Entre ces 2 valeurs, le choix subsiste entre soit tester une valeur intermédiaire, soit tester toute une gamme de valeurs échelonnées entre les valeurs minima et maxima.

Ces différentes valeurs de jeu sont données physiquement par un changement de pièces, à savoir les coussinets et le corps de la pompe. Il faut donc répertorier ces pièces et indiquer laquelle on utilise dans la fiche de résultats.

Le premier jeu de pièces que l'on possède nous donnent un jeu de 0,085 mm dans la pompe.

Spécification de vitesse de la palette

Il est nécessaire d'effectuer des tests à des vitesses différentes.

Ces vitesses doivent être spécifiées. Il s'agit d'un vitesse moyenne qui peut être calculée grâce au temps mis pour effectuer un stroke.

Elles pourraient être la vitesse minimale que le moteur peut atteindre et la faire progresser.

En annexe 2, on trouvera des valeurs de vitesses particulières, à savoir :

- 0,010703 rad/s, qui correspond à une vitesse de pompage nul,
- 0,58939 rad/s, qui correspond à la vitesse de pompage régulier,
- 2,2 rad/s, qui correspond à la vitesse maximale du moteur.

Spécification de choc

Un test de fonctionnement sous choc doit être effectué pour chacune des configurations de jeu. Cette situation de choc doit encore être définie clairement.

Il est clair qu'il est difficile de respecter certaines conditions initiales (comme la vitesse initiale, la hauteur de chute, etc) et d'obtenir des informations quantitative suite à cet essai. Son intérêt est de vérifier que la pompe fonctionne encore d'une manière suffisamment satisfaisante lorsqu'elle est soumise à un choc.

Spécification de jeu « strié »

Ces stries ménagées sur les surfaces déterminant le jeu servent à diminuer les fuites. Ces stries seront usinées sur un piston différent du piston lisse. Ces 2 piston seront répertoriés et il faudra donc indiquer, sur la fiche de résultats, quel piston est employé.

Résultats

Débits

Le débit mesuré par l'intermédiaire de la mesure du temps de l'essai et de la mesure du volume déplacé.

Une donnée intéressante, sinon la plus intéressante, est le débit mesuré par mouvement de la palette (un aller-retour).

Le volume balayé par le piston est de $0,67 \text{ cm}^3$ par degré de déplacement angulaire. Donc un déplacement de 6° nous donne un volume balayé de 4 cm^3 .

Comportement des billes

La première constatation à faire est le bon fonctionnement des clapets à billes.

Ensuite, une analyse plus poussée du mouvement sera effectué avec l'aide d'un enregistrement de celui-ci. Il faut donc indiquer les références permettant de le retrouver facilement.

Il est nécessaire d'éclairer correctement la zone à filmer.

Mesure de la pression en sortie de pompe

Cette pression sera mesurée en m de colonne d'eau, en maintenant vertical le tuyau de refoulement de la pompe.

Il faut alors prévoir un tuyau suffisamment long.

Couple

Le couple sera mesuré par l'intermédiaire du courant fourni au moteur

Résumé des tests

Le premier test est le test de vérification.

Orientation de la pompe : 3.

Dépression à l'entrée : 1 pour chaque n° de test ; viennent s'ajouter les tests en faisant varier la dépression (environ 4 dans chaque configuration).

Jeu dans la pompe : minimum 3.

Vitesse de la palette : minimum 3.

Jeu « strié » : 2 (le premier avec des surfaces lisses).

Le dernier test constitue le test de choc (un pour chaque jeu de pièces, donc 6 tests).

Cela fait donc au total 223 tests.

Etant donné que les tests effectués en modifiant la dépression d'entrée et la vitesse de rotation de la palette se ramènent à une même fiche, nous devrions alors récolter 25 fiches

La première batterie de tests s'effectuera avec le premier jeu de pièces, le nombre de tests se réduira à 38, ce qui correspond à 5 fiches.

Annexe 1 : tableau de résultat.

Annexe 2 : valeurs particulières

Test modèle 1

Test N° : _____

Données

Opérateur : _____ Date : _____ Lieu : _____
Orientation de la pompe : _____
Position angulaire de la pompe sur le plateau : _____
Spécification de jeu : _____ Avec les pièces n° (3 n°) : _____
Choc : oui – non (biffer la mention inutile)
N° du piston utilisé (strié ou non-strié) : _____
Conditions d'utilisation remplies : oui – non (biffer la mention inutile)

Résultats

Dans le tableau suivant, la ligne « comportement billes » doit contenir le n° du film enregistré.

		ω (rad/s) ($\Delta p_{in} = -0,1$ bar)			Δp_{in} (bar) ($\omega = \underline{\quad}$ rad/s)		
Valeurs							
Débit	Durée du test						
	Volume de sortie mesuré						
	Nbre de stroke						
	Volume par stroke calculé						
	Débit global calculé						
	Pression de sortie (m)						
	Couple (Nm)						
	Comportement billes						

Commentaires éventuels

Annexes éventuelles : graphique débit – dépression d’entrée
débit – vitesse angulaire de la palette

Annexe 2 : valeurs particulières des paramètres calculées pour le modèle

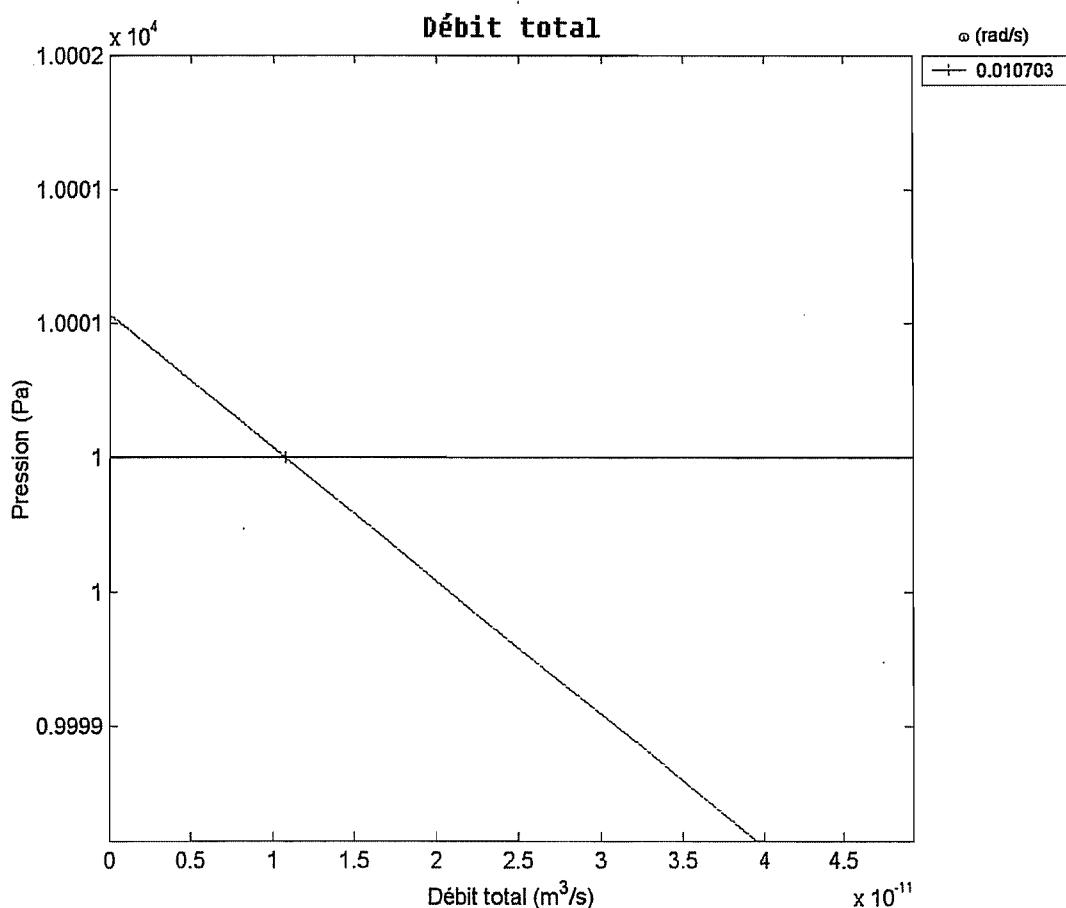
Les valeurs sont calculées en supposant les vitesses aller et retour de la palette sont égales.

Vitesse de pompage nul

Cette vitesse a été déterminée dans les conditions suivantes :

- dépression entrée – sortie globale : 10^4 Pa ,
- jeu dans la pompe : $8,5 \cdot 10^{-5} \text{ m}$ ou $8,5 \cdot 10^{-2} \text{ mm}$.

Sa valeur est de $0,010703 \text{ rad/s}$, comme en témoigne la figure suivante,

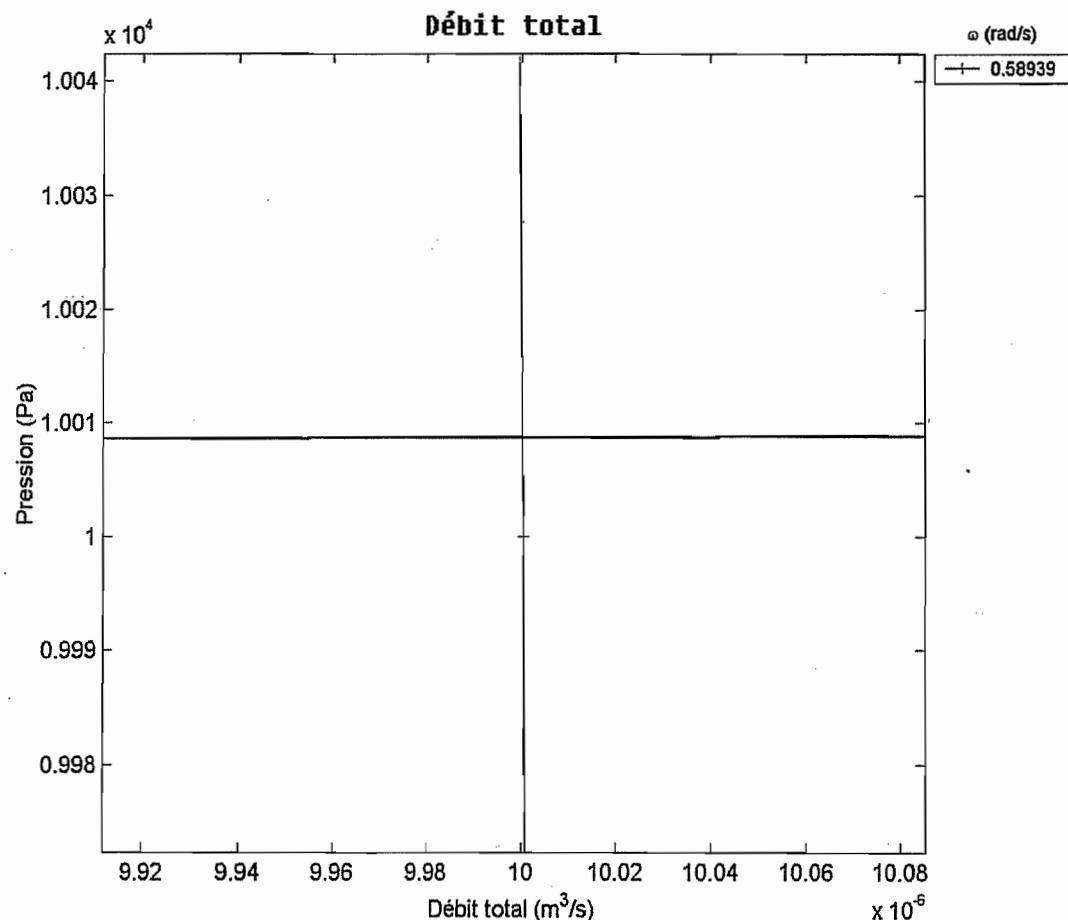


Vitesse de pompage régulier ($10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ ou $10 \text{ cm}^3/\text{s}$)

Cette vitesse a été déterminée dans les conditions suivantes :

- dépression entrée – sortie globale : 10^4 Pa ,
- jeu dans la pompe : $8,5 \cdot 10^{-5} \text{ m}$ ou $8,5 \cdot 10^{-2} \text{ mm}$.

Sa valeur est de $0,58939 \text{ rad/s}$, comme en témoigne la figure suivante,



Dans ce cas,

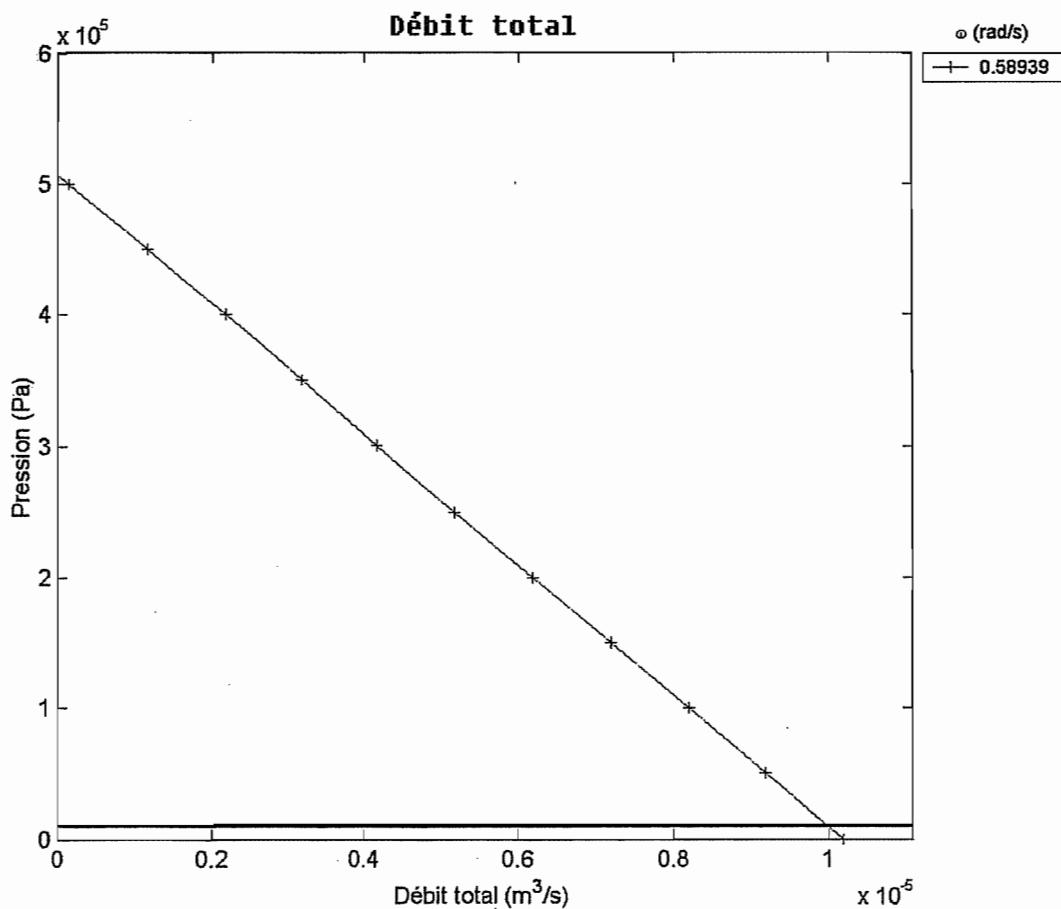
- $C_\mu = 2,4991 \cdot 10^{-3} \text{ Nm}$,
- $C_p = 0,3754 \text{ Nm}$,
- dépression entrée sortie de la pompe : $1,0009 \cdot 10^4 \text{ Pa}$.

Dépression d'entrée à pompage nul

Cette pression a été déterminée dans les conditions suivantes :

- vitesse de la pompe, correspondant à un pompage régulier : 0,58939 rad/s,
- jeu dans la pompe : $8,5 \cdot 10^{-5}$ m ou $8,5 \cdot 10^{-2}$ mm.

Sa valeur est de $50,74 \cdot 10^4$ Pa, comme en témoigne la figure suivante,

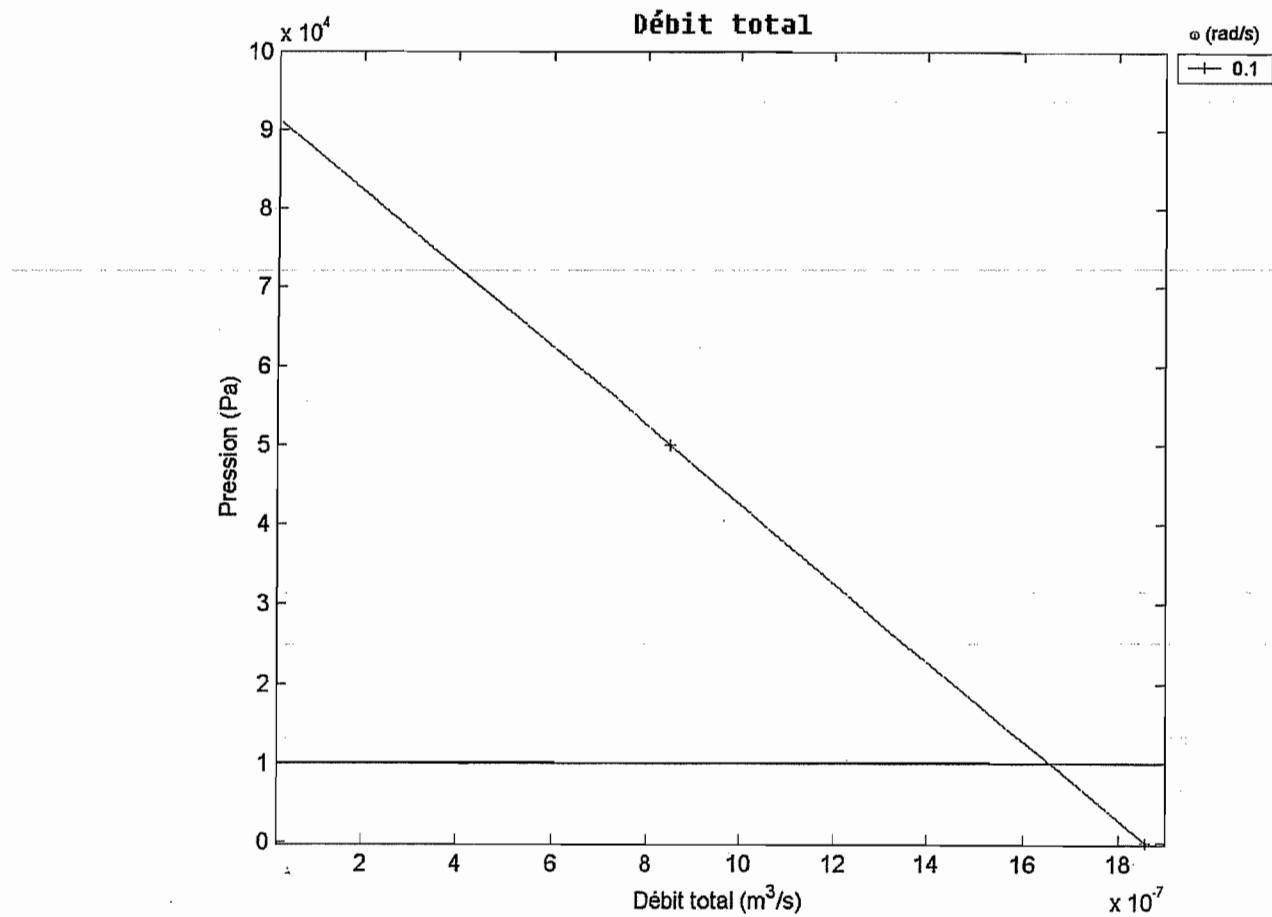


Si on fait varier la vitesse, la dépression d'entrée donnant un débit nul varie.

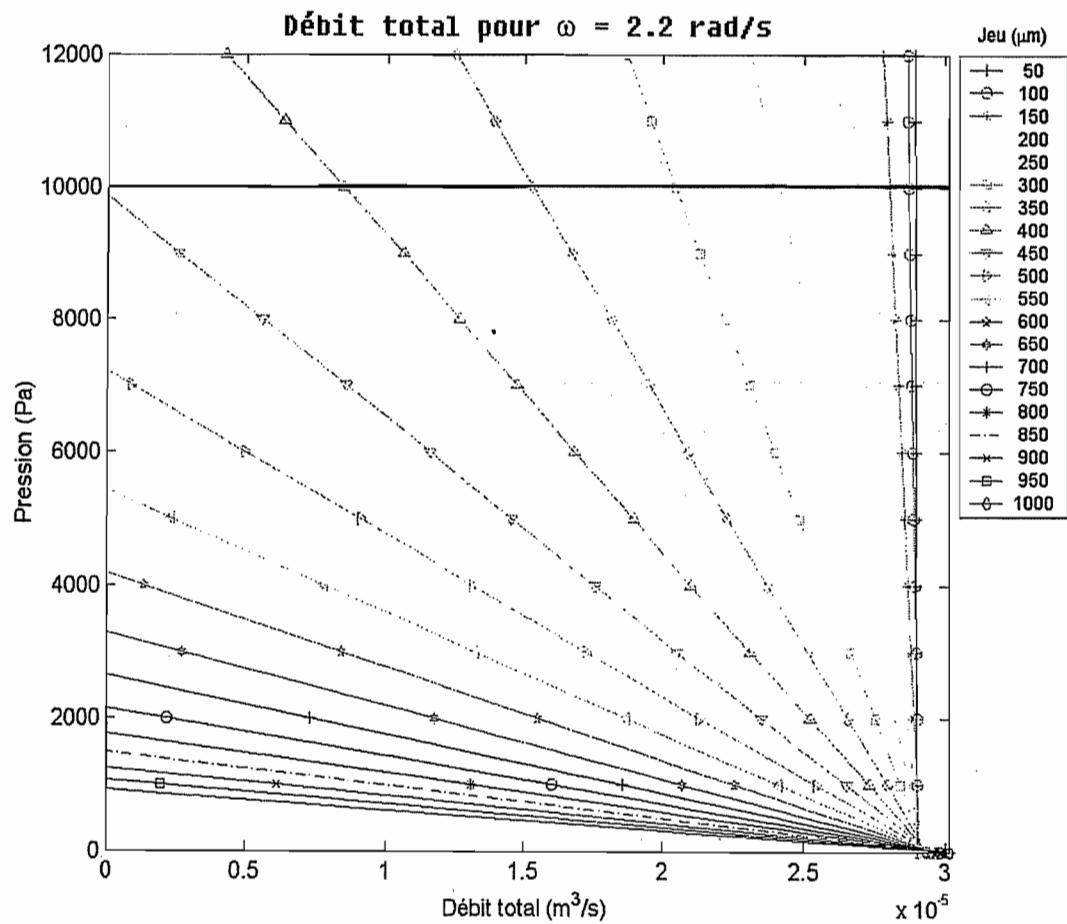
Cette pression a été déterminée dans les conditions suivantes :

- vitesse de la pompe : 0,1 rad/s,
- jeu dans la pompe : $8,5 \cdot 10^{-5}$ m ou $8,5 \cdot 10^{-2}$ mm.

Sa valeur est de $9,23 \cdot 10^4$ Pa, comme en témoigne la figure suivante,



Débit à vitesse max, fonction du jeu



4.9. Tests des clapets

Tests clapets

Objectifs

Le but est d'obtenir plus d'informations quantitatives concernant le fonctionnement de la distribution de la pompe.

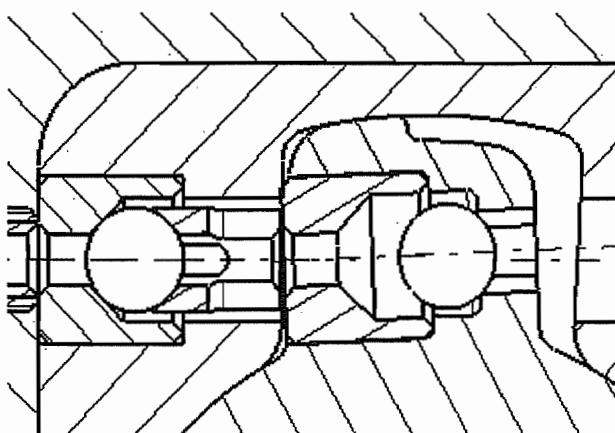
Pour identifier les tests à effectuer, rappelons en détails les étapes de fonctionnement de la distribution.

Les différentes phases de fonctionnement de la micropompe à clapets sphériques

Appelons le premier clapet (à partir de la gauche), le clapet d'admission et le second, le clapet de refoulement.

De même, la première chambre sera la chambre d'admission et la seconde, la chambre de refoulement.

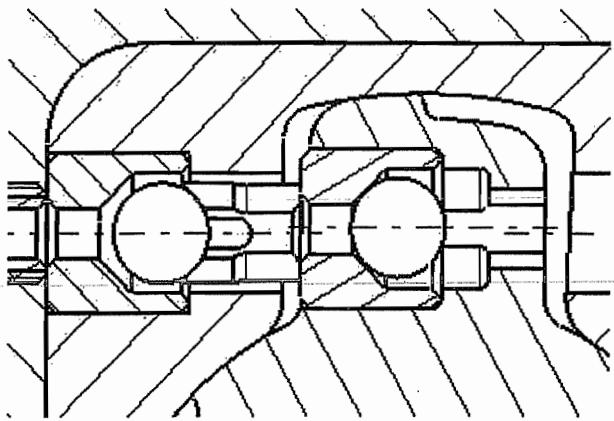
Début d'admission / fin de refoulement



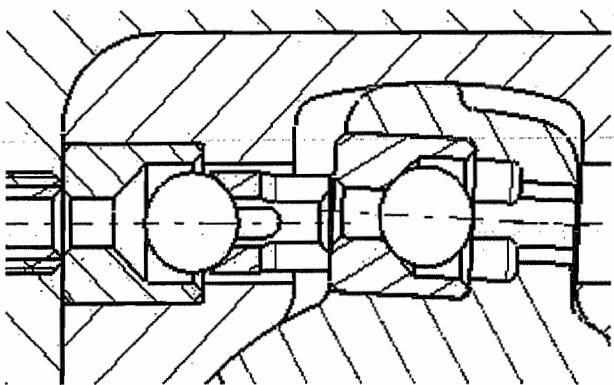
Le clapet d'admission est fermé, le clapet de refoulement est libre, suite à la fermeture par le piston.

Pendant l'admission

Durant l'admission, le clapet de refoulement est « plaqué » contre son siège par le mouvement du piston. Nous créons alors une dépression dans la chambre d'admission, par le même déplacement du piston. Sous l'effet de cette dépression, le clapet d'admission s'ouvre, laissant s'écouler le fluide dans la chambre d'admission jusqu'à annulation de la dépression. Ceci jusqu'à fin de course.

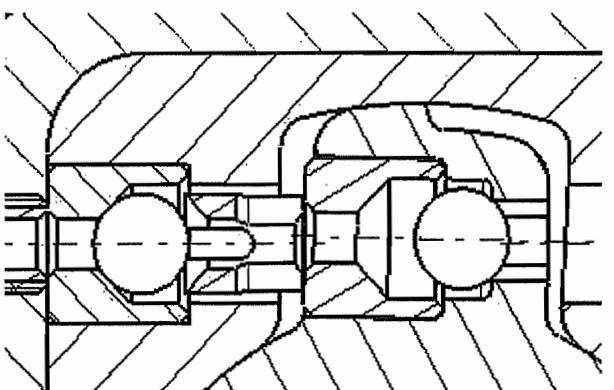


Fin d'admission / début de refoulement



En fin de course, le clapet de refoulement est toujours sur son siège et le clapet d'admission est libre.

Pendant le refoulement



Durant le refoulement, sous l'effet de la surpression que l'on crée dans la chambre d'admission par le mouvement du piston, de la dépression du réservoir et du déplacement de fluide, le clapet d'admission se ferme. Le clapet de refoulement s'ouvre alors pour laisser s'écouler le fluide de la chambre d'admission à la chambre de refoulement.

Phase d'admission

3 phénomènes ont lieu, l'un à la suite de l'autre :

- fermeture du clapet de refoulement.
- création d'une dépression jusqu'à ouvrir le clapet d'aspiration.

- remplissage de la chambre d'aspiration.

Fermeture du clapet de refoulement

Il y a lieu de s'assurer que la course du piston permet effectivement à la bille du clapet de revenir sur son siège et ce, avant la fin de la course. Idéalement, avant la mi-course, ce qui signifie que le débattement de la bille doit être inférieur ou égal à la moitié de la course du piston.

Dépression et ouverture du clapet d'aspiration

Lorsque le clapet de refoulement est fermé, la course du piston doit être encore suffisamment grande pour lui permet de créer une dépression dans la chambre d'aspiration. Ainsi que de permettre à cette même chambre de se remplir.

La création de cette dépression est régie par l'équation suivante,

$$dV = -\chi V dP,$$

$$\chi = 510^{-10} \text{ Pa}^{-1}, \text{ pour l'eau}$$

V correspond au volume initial, χ est le coefficient de compressibilité, dP est la dépression créée par la variation de volume dV , en système fermé.

Il faut, ici, savoir à quel moment le clapet de refoulement sera fermé, ce qui fixera V , le volume initial de la chambre d'aspiration. A partir de cela, nous pouvons alors calculer la course nécessaire pour atteindre une dépression donnée.

La question se pose, ici, de savoir quelle dépression il faut atteindre. En principe, il suffit d'obtenir une dépression plus grande que la dépression du réservoir (fixée à 10^4 Pa), augmentée de la perte de charge du clapet à bille, que l'on ne connaît pas. La chambre de refoulement, en contact initialement avec la chambre d'aspiration, est, en effet, sensée être à la pression atmosphérique.

Remplissage de la chambre d'aspiration

Enfin, lorsque la chambre est ouverte, la différence de pression atteinte entre le réservoir et la chambre d'admission fixe la vitesse à laquelle la chambre va se remplir.

Cette vitesse de remplissage pourra être calculée grâce à la relation,

$$e_f = \lambda \frac{l}{d} \frac{u_f^2}{2}, \quad \lambda = \frac{64}{Re} \quad \text{perte de charge due au cathéter reliant la pompe au réservoir}$$

$$e_s = \zeta \frac{u_s^2}{2} \quad \text{pertes de charge locales entre l'entrée de la pompe et la chambre d'admission}$$

$$\frac{p_1}{\rho} = \frac{p_0}{\rho} - \frac{u_f^2}{2} - e_f - e_s$$

u_f est la vitesse du fluide dans la canalisation et non pas la vitesse de remplissage. Cette dernière s'évalue grâce au volume initial et final de la chambre d'aspiration et du débit de fluide.

Il est évident qu'il existe aussi des effets dynamiques pendant le remplissage car le piston est en mouvement en permanence.

Phase de refoulement

Ici, 3 phénomène ont lieu l'un après l'autre (parfois simultanément) :

- fermeture du clapet d'aspiration.

- ouverture du clapet de refoulement.
- Transfert du fluide entre la chambre d'aspiration et de refoulement.

Fermeture du clapet d'aspiration

Ce phénomène est complexe. Il semblerait qu'il ne soit pas créé par une surpression mais bien par le déplacement du fluide, qui retourne au réservoir. Ce déplacement de fluide est lié à 2 phénomènes :

- mouvement de retour du piston, qui « pousse » le fluide et crée une légère surpression dans la chambre d'aspiration.
- dépression du réservoir qui « rappelle » le fluide.

C'est la force exercée sur la bille par le fluide qui tend à pousser la bille sur son siège.

Cette force s'exprime par,

$$m \frac{dv}{dt} = 6\pi r \mu (V - v)$$

Viscosité cinématique de l'eau à 40°C : $\nu = 0.7 \text{ mm}^2/\text{s}$,

Viscosité dynamique de l'eau à 40°C : $\mu = 7 \cdot 10^{-4} \text{ Pa s}$.

Durant cette phase, une quantité de fluide retourne vers le réservoir, il s'agit donc d'une fuite.

Notons qu'il n'y a plus de problème concernant la course du piston.

Ouverture du clapet de refoulement

Quasiment en parallèle avec la fermeture du clapet d'aspiration, le clapet de refoulement s'ouvre. En effet, le mouvement du piston tend à ouvrir ce clapet, par inertie de la bille. De plus, la légère surpression créée dans la chambre d'aspiration aide cette ouverture.

Transfert du fluide entre les 2 chambres

Lorsque la distribution s'est mise en place, le transfert de fluide se fait simplement par diminution du volume de la chambre d'aspiration. La vitesse de transfert dépend simplement de la vitesse du piston.

Le volume transféré n'est pas le volume total de la chambre d'aspiration car il y a eu une phase de mouvement du piston durant laquelle le transfert n'a pas eu lieu.

Il n'y a rien de spécial à dire de plus à propos de ce transfert.

Tests potentiellement à effectuer

Mesure de la perte de charge du clapet à bille

Condition du test : à définir

Forme des résultats : coefficient, éventuellement fonction du débit.

Phase d'admission

Mesure de la dépression à obtenir dans la chambre d'aspiration pour obtenir l'ouverture du clapet.

Condition du test : à définir

Forme des résultats : valeur de la dépression (ou variation de volume avant ouverture)

Phase de refoulement

Fermeture du clapet, sous l'effet du mouvement de fluide.

Condition du test : à définir

Forme des résultats : vitesse de fermeture du clapet

Mesure de la fuite durant cette phase.

Forme des résultats : à définir

Tests effectifs

Mesure de l'ouverture du clapet

En effet, la caractéristique d'un clapet à vérifier en premier et la fermeture efficace de celui-ci. Si l'étanchéité relative n'est pas assurée, il est inutile de pousser les tests plus loin. C'est ce qu'il s'est passé pour un certain nombre de siège testé.

Sur la figure 1, nous pouvons voir le banc de tests dans son ensemble ainsi que le tube dans lequel viendra s'insérer le siège de clapet à tester (dans ce cas, il s'agit d'un siège en alumine de Micropierre). On peut également distinguer les tubulures permettant la connexion au réservoir. Celles-ci ont été réalisée à l'IATA de Namur

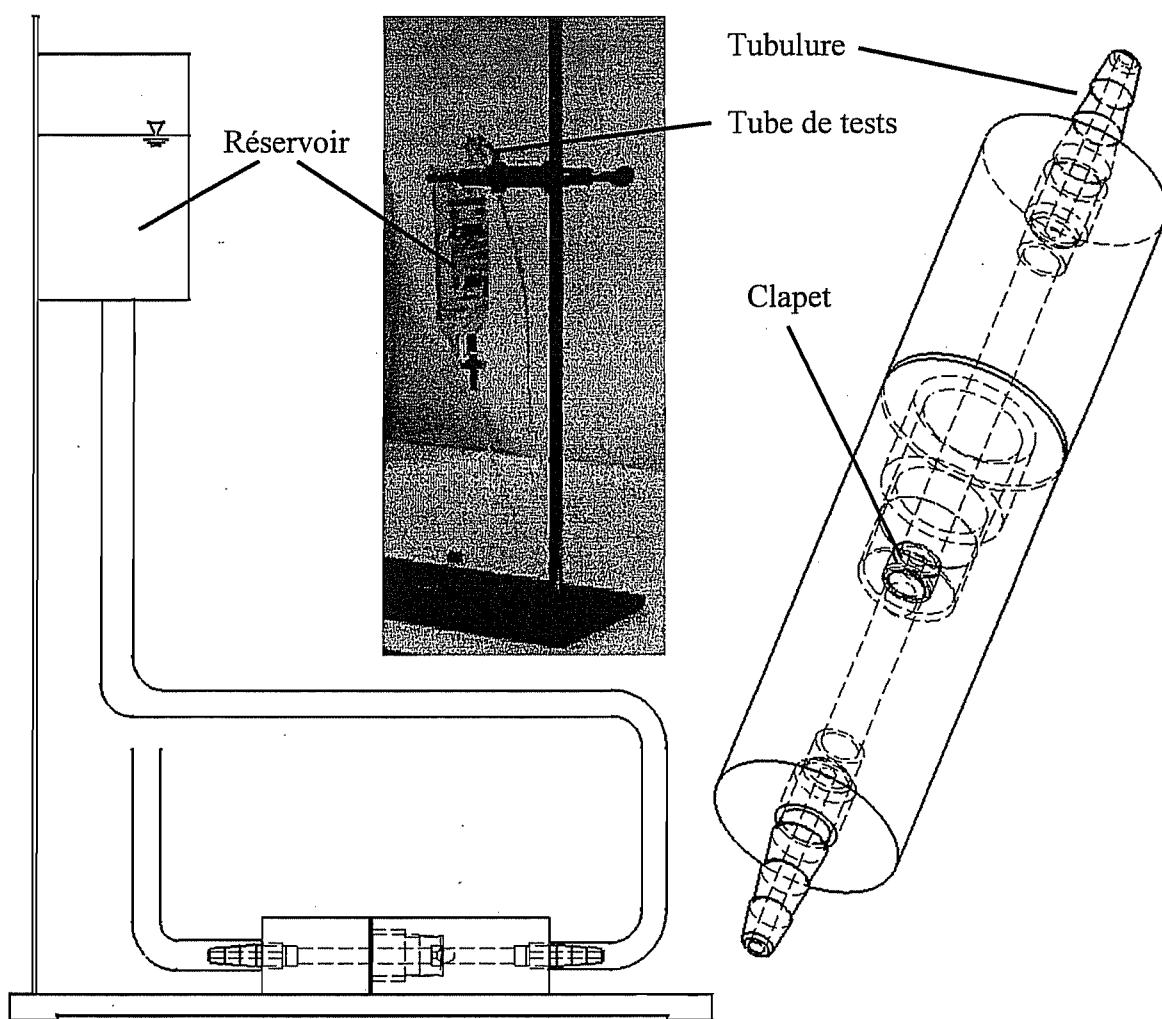


Figure 1 Banc de tests

L'évolution de la recherche nous a conduit à tester un certain nombre de clapets, de forme et de matériaux différents.

La première démarche fut de demander à une firme extérieure de nous fournir, sur base de nos plans (annexe 3.9, plan 3 « insertclapet »), un dizaine de siège de clapet en alumine (figure 2) céramique ayant d'excellentes caractéristiques au niveau de la déformabilité. En effet, étant

donné le nombre important de fois que la bille va venir « frapper » le siège, il semble important d'avoir un matériau très peu déformable, sous peine de perte d'étanchéité.

Sur la figure suivante, on peut voir un détail de l'implantation, dans la pompe, du siège de clapet et de la bille. Les plans détaillés de la pompe entière seront examinés plus loin.

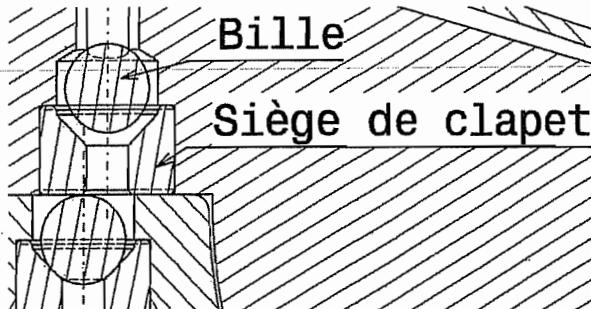


Figure 2 : implantation des clapets dans la pompe

Des premiers tests effectués avec ces sièges de clapets particuliers (figure 3), associés à des billes en rubis, de diamètre 1 mm, de grade 25 (erreur de sphéricité max : $0,625 \mu\text{m}$) ont montré que cette combinaison n'offrait pas une étanchéité parfaite. En effet, au cours du temps, le niveau d'eau dans le tube de mesure diminuait, ce qui montre qu'il existe une fuite,

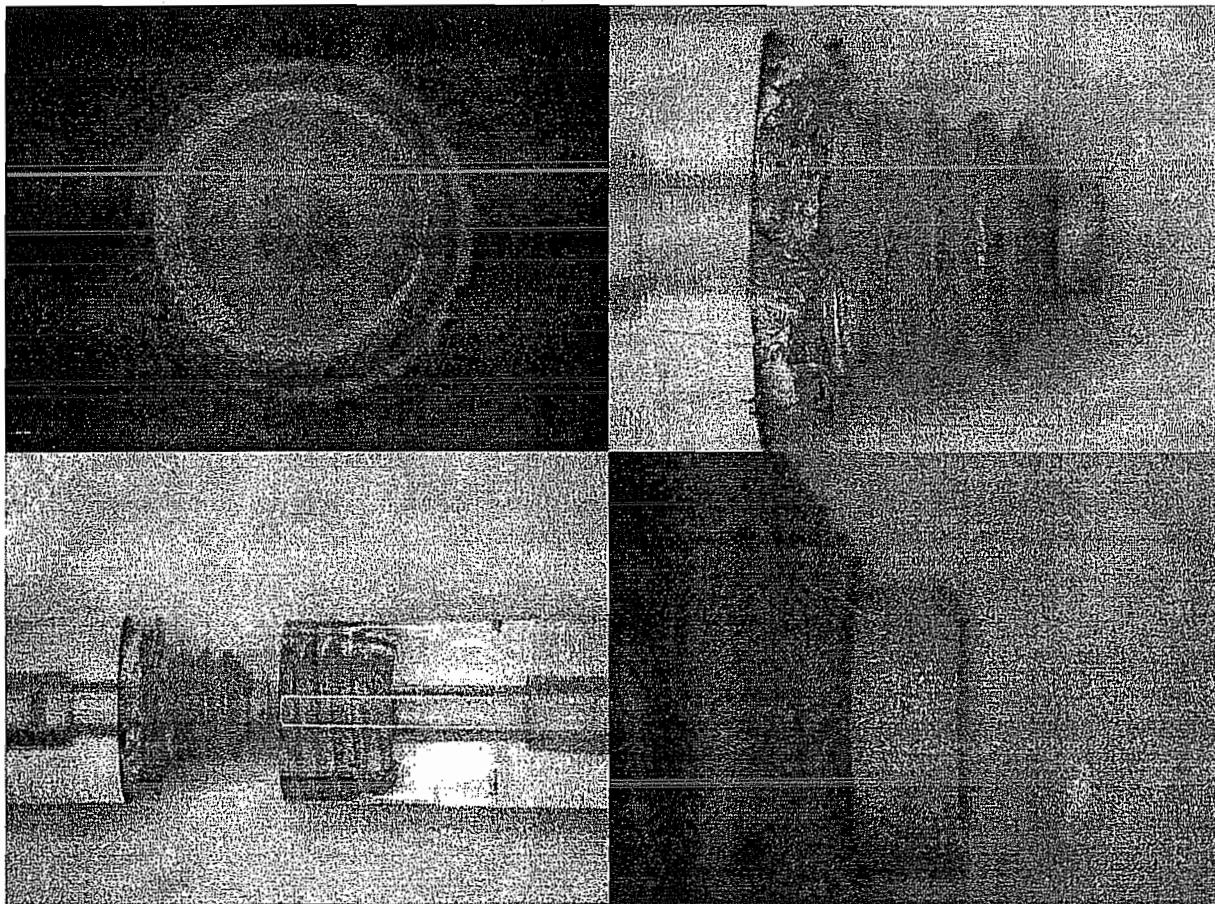


Figure 3 Clapet Alumine

trop importante pour des clapets amenés à fonctionner de temps en temps.

La cause de cette fuite est supposée être la trop grande rigidité de ces sièges de clapets : la moindre imperfection au niveau des surfaces en contact (en particulier si le cône est ovalisé) entraîne irrémédiablement une fuite.

Il a donc été décidé d'opter pour un matériau plus souple, capable de se déformer légèrement sous la force de pression exercée par la bille, afin de pouvoir corriger *in situ* les éventuelles imperfections du siège et ainsi d'obtenir une meilleure étanchéité.

Les différents clapets ont été usinés dans nos locaux, au moyen de foret étagés spéciaux (fig PM 4), fabriqués sur mesure afin de pouvoir usiner toute la partie active du clapet en une seule passe. En particulier, la localisation du cône par rapport aux faces extérieures est très importante, comme en témoigne le plan du siège. Les cotes obtenues étant des cotes d'outil et non des cotes d'appareillage, notre méthode est la plus précise pour obtenir cette géométrie.

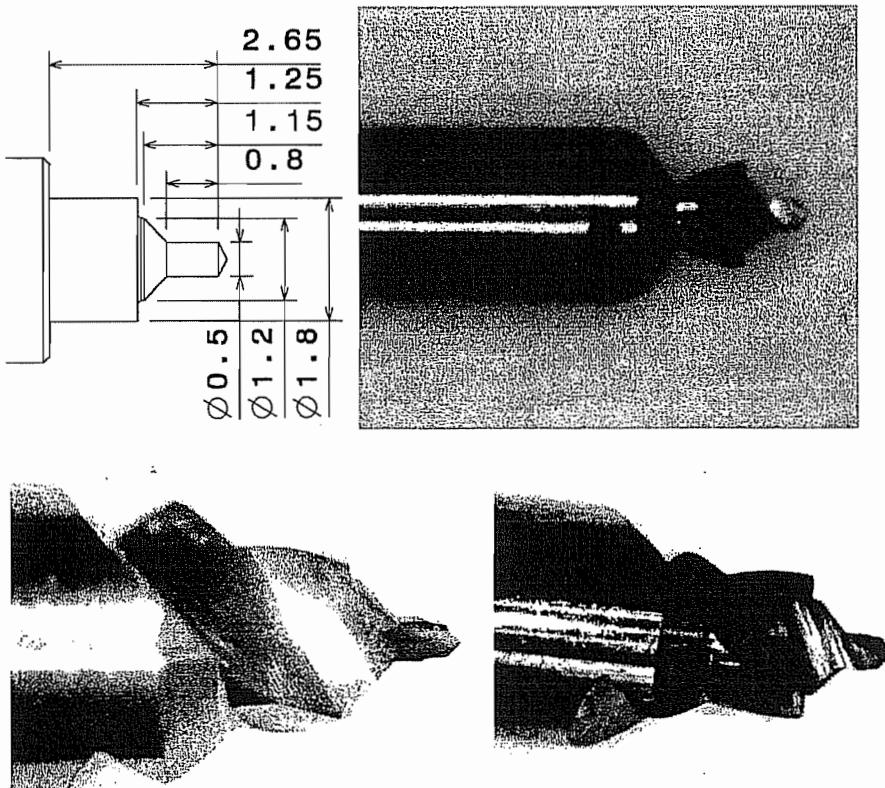


Figure 4 Foret étagé spécial

La première matière testée par ce procédé est le POM-C (figure 5) Ce matériau n'a pas donné d'amélioration par rapport à l'alumine.

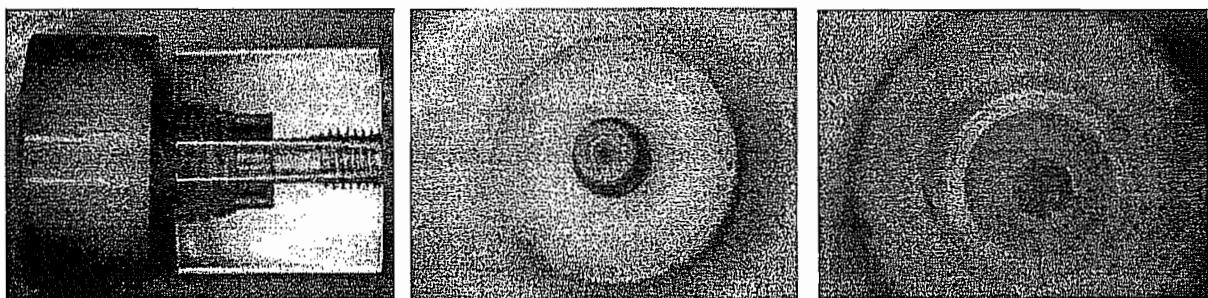


Figure 5 Clapet en POM-C

Nous avons ensuite testé le polycarbonate (figure 6), très déformable. Malheureusement, les résultats n'étaient guère meilleurs.

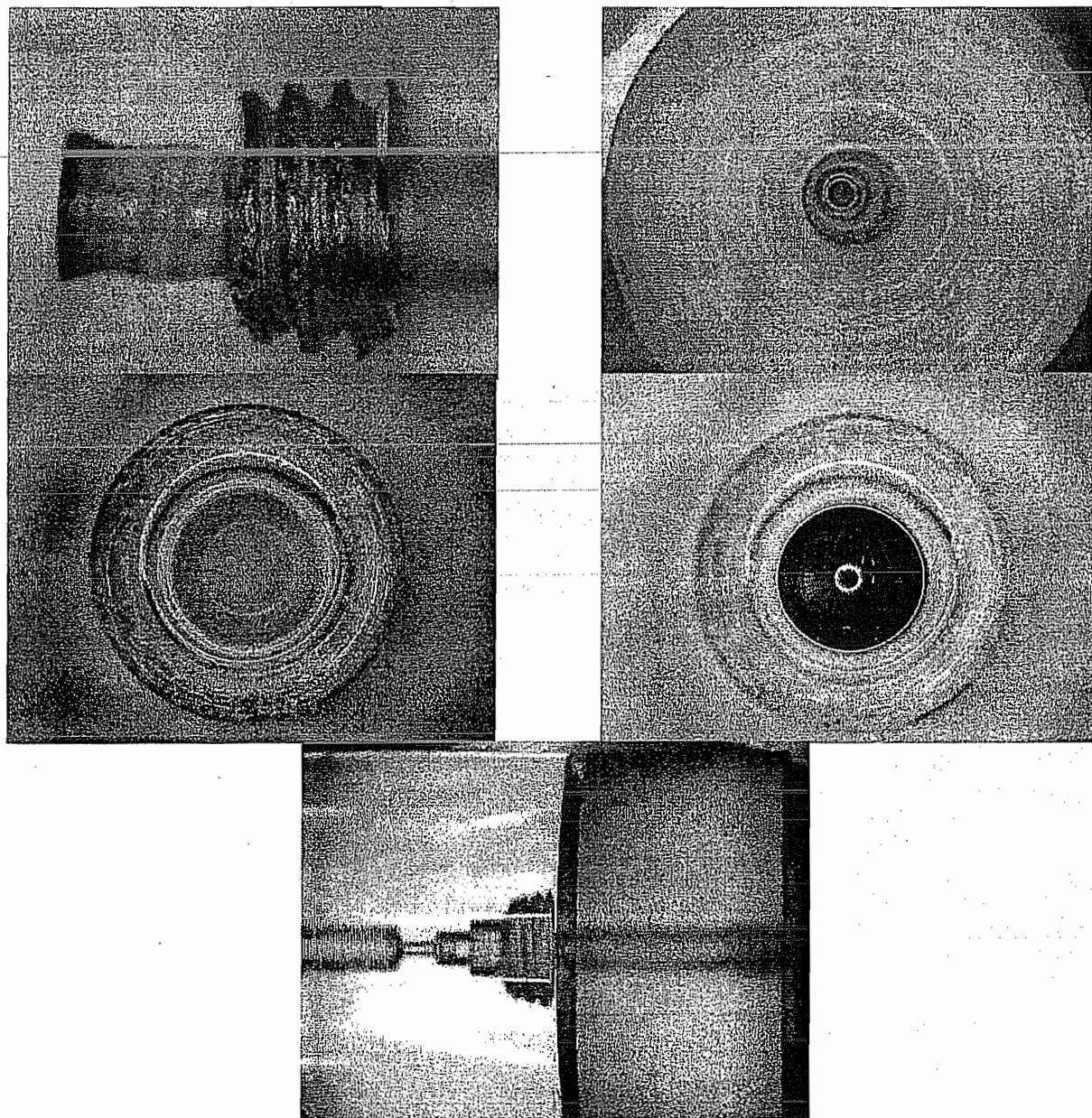


Figure 6 Clapet en polycarbonate

Le caoutchouc a alors été envisagé : la difficulté de mise à forme. Il est impossible d'usiner le caoutchouc, la seule façon de le mettre à forme est de le mouler. Cependant cette opération demande énormément de moyens (moule coûteux, presse d'injection). Nous avons alors voulu simplifier et ne tester qu'une simple rondelle de caoutchouc (figure 7), dont le diamètre extérieur est défini par un emporte-pièce et le diamètre intérieur par enfoncement d'une aiguille chauffée au rouge.

La zone de contact est, dans cas, toujours respectée. Les résultats obtenus étaient très mauvais, comme s'il n'y avait pas de clapet. La raison de ce dysfonctionnement semble être le très mauvais état de la zone de contact du caoutchouc, percée à l'aiguille.

Le plexiglas a également été testé, sans donner de meilleurs résultats.

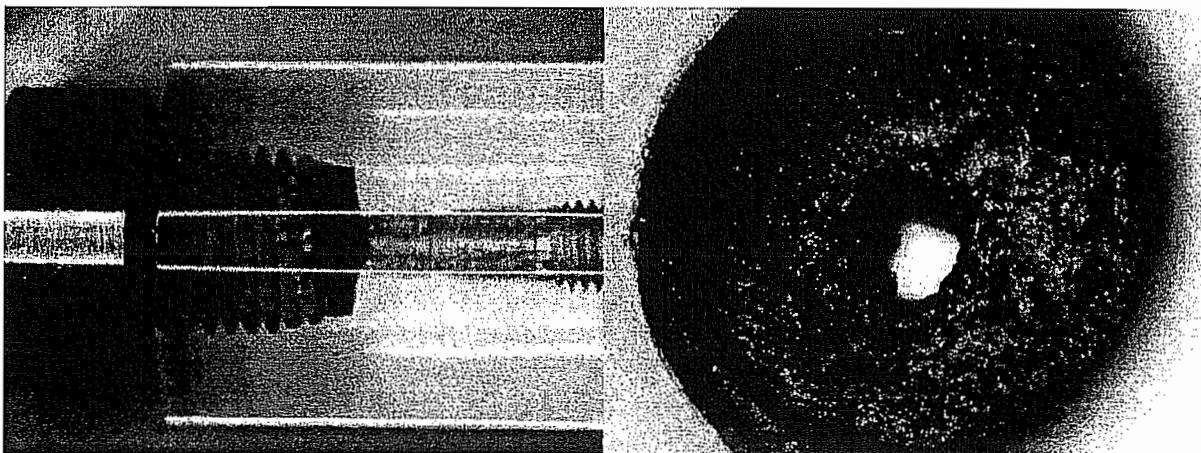


Figure 7 Clapet en caoutchouc

Des recherches sur la possibilité d'acquérir des clapets disponible dans le commerce nous ont conduit vers la firme Lee Company (USA), représentée par la firme néerlandaise Denis De Ploeg N.V. Nous avons acheté quelques clapets afin de les tester (figure 8). Ce sont eux qui ont donné les meilleures résultats, jusqu'à présent.

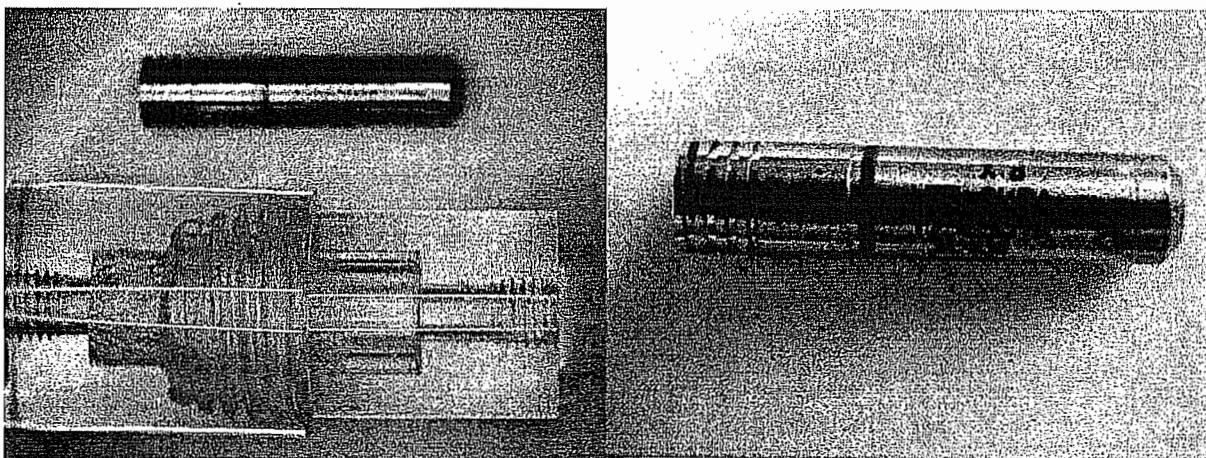


Figure 8 Clapet LEE et son enveloppe

La possibilité de s'aider d'un ressort pour maintenir la bille correctement plaquée sur son siège a été envisagée. Des investigations nous ont menées chez la fabrique de ressort de précision Van Hulen S.A., dans la zone industrielle des Hauts-Sarts. Ils nous ont fournis quelques échantillons des plus petits ressorts qu'ils avaient à leur disposition à ce moment (il faut préciser que la production « normale » de ressort se fait en série de plusieurs millions d'exemplaire, il est donc hors de question de faire fabriquer des ressort sur mesure pour notre application tant que notre demande ne sera pas conséquente, il faut donc faire avec la production du moment).

Parmi ces échantillons, nous avons trouvé un ressort (figure 9) de 3 mm de long, de 1 mm de diamètre extérieur et fait de fil en acier inoxydable de 0,1 mm de diamètre.

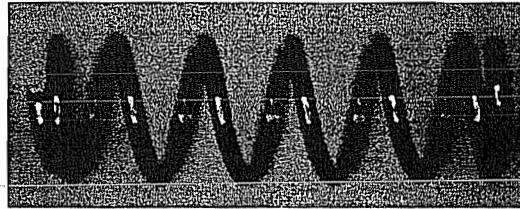


Figure 9 Ressort

Nous avons inclus ce ressort dans un clapet, comprenant un siège en polycarbonate et une bille de rubis (figure 10).

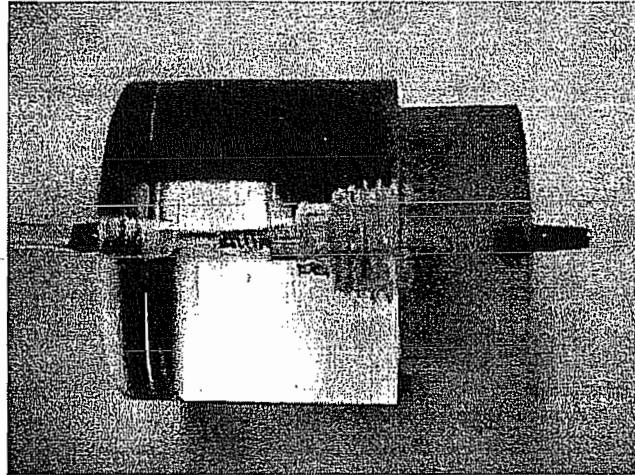


Figure 10 Clapet en plexiglass et ressort

Les résultats obtenus sont prometteur : l'étanchéité est bien assurée, il faut en effet plusieurs jours pour que le niveau d'eau descende au niveau le plus bas.

Sur base de ces résultats, nous avons construit un clapet utilisable à l'entrée de la pompe prototype V03, en plexiglass (afin de voir ce qu'il se passe dans le clapet), avec un ressort, comme on peut le voir sur la figure 11.

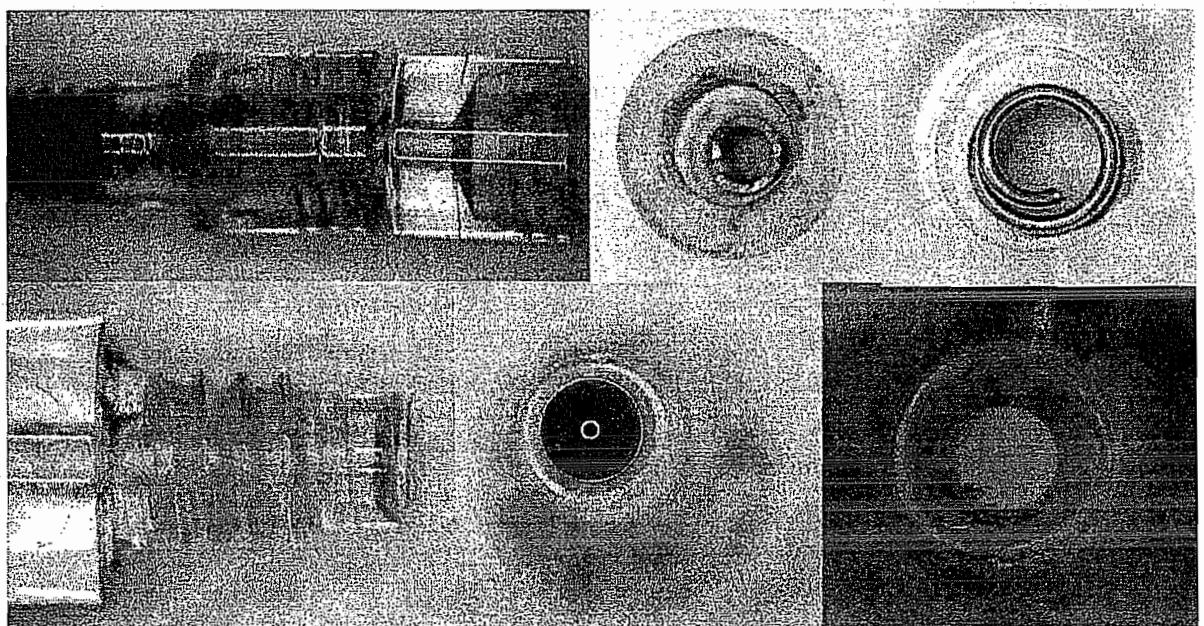


Figure 11 Clapet à resort

4.10. Cahier des charges du prototype V03



14 novembre 2002

Cahier de charge des tests du prototype opérationnel

V.Croquet

Tests préliminaires

Avant d'effectuer les tests proprement dits, un certain nombre de tests préliminaires devront être réalisés avant de vérifier que le système entier banc d'essai - prototype opérationnel soit viable.

Ces tests s'articulent autour de trois points principaux :

- 1/installation du prototype sur son banc d'essai
- 2/vérification du fonctionnement global de la pompe
- 3/paramétrage de certaines inconnues nécessaires au fonctionnement et à la suite des tests.

Le premier point aura pour but la vérification du mariage du prototype opérationnel avec le banc d'essai destiné à le recevoir.

Le second point devrait permettre de vérifier, dans un premier temps, et de manière globale que la commande fonctionne correctement, que le mouvement des clapets est correct, que le prototype pompe correctement et qu'aucune fuite n'est décelée.

Le dernier point consiste au paramétrage des inconnues nécessaires au fonctionnement optimal de la pompe à savoir la calibration des paramètres de la commande afin d'obtenir l'amplitude de déplacement du col souhaitée ainsi que l'étalonnage du capteur de pression.

Il faudra alors vérifier que les chambres d'admission et de refoulement sont totalement remplies durant le fonctionnement et que la valeur du stroke obtenu à la sortie correspond bien à celui prédit par la théorie.

Les conditions de fonctionnement seront les suivantes :

- pompe en position verticale (les tests sur le modèle ont en effet montré que cette position semble être celle qui procure le moins de bulles)
- l'eau utilisée est dégazée afin de limiter la formation de bulles
- la pompe sera entièrement remplie d'eau dégazée durant le pompage
- la valeur de la dépression à l'entrée sera fixée à une valeur fixe (dépression nulle)

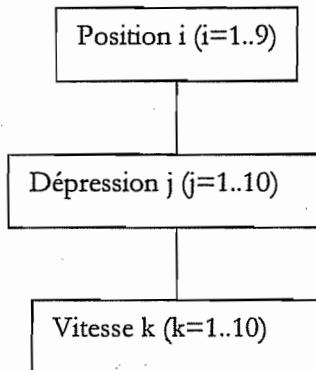
Remarque importante: il est essentiel que chaque point cité précédemment soit vérifié avant de commencer la campagne de tests proprement dite.

La présence de bulles, un mouvement approximatif des clapets, une chambre d'admission ou de refoulement mal remplie, une fuite éventuelle,...sont des petites imperfections qui auront une grande voire énorme influence sur les résultats obtenus et donc sur la comparaison avec les valeurs prédictes par la théorie.

Il faudra donc, avant de commencer les tests proprement dits, prendre le temps nécessaire afin de recenser toute anomalie suspecte et prendre les mesures correctives afin d'y remédier.

Tests proprement dits

Les tests proprement dits s'articulent autour du schéma suivant.



Ces tests consistent à placer le prototype de la pompe dans diverses positions.

La position de départ sera la position verticale, une incrémentation de 45° sera alors fournie en suivant le sens horlogique jusqu'à retrouver la position initiale ; la pompe sera donc testée dans 9 positions intermédiaires à savoir $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ, 180^\circ, 215^\circ, 270^\circ, 315^\circ, 360^\circ$.

Diverses dépressions d'entrée seront alors appliquées pour chacune de ces positions.

La dépression minimale appliquée sera nulle alors que la valeur maximale sera celle qui annule le débit de pompage.

Enfin, à chacun des couples position – valeur de dépression à l'entrée sera appliqué une dizaine de valeur de vitesse de l'actionneur : la vitesse minimale étant celle à laquelle il est impossible de descendre sous peine de voir le mouvement de la pompe s'arrêter par frottement et la vitesse maximale étant celle fournie par l'actionneur au maximum de ces possibilités.

Résultats

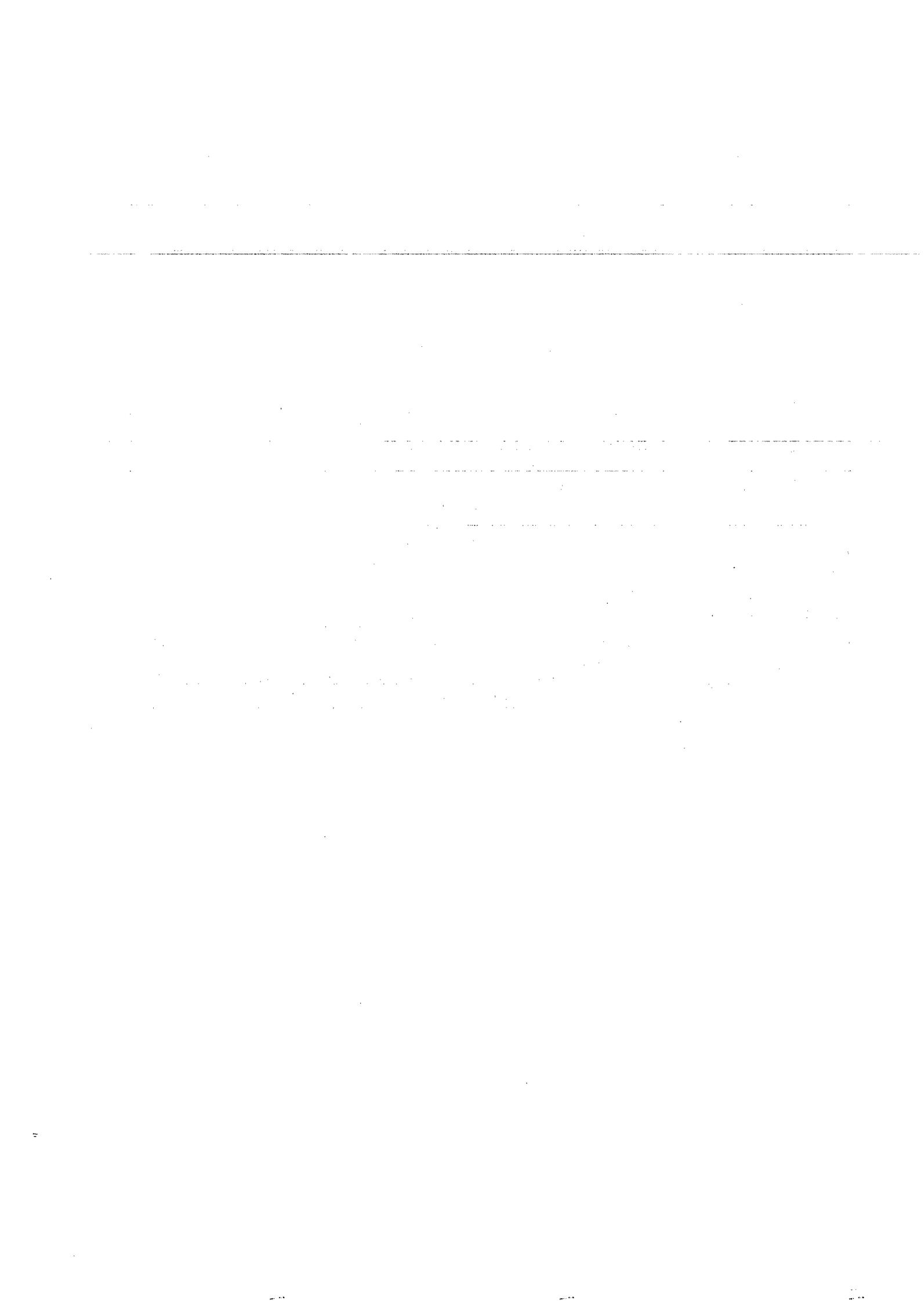
La réalisation de ces tests devra nous fournir les résultats suivants :

- débit (m^3/s)
- valeur du stroke
- pression en sortie de la pompe
- couple exercé (valeur proportionnelle à celle du courant fourni au moteur)
- graphe du débit = f (vitesse) pour une position i et une dépression j
débit = f (dépression) pour une position i et une vitesse k

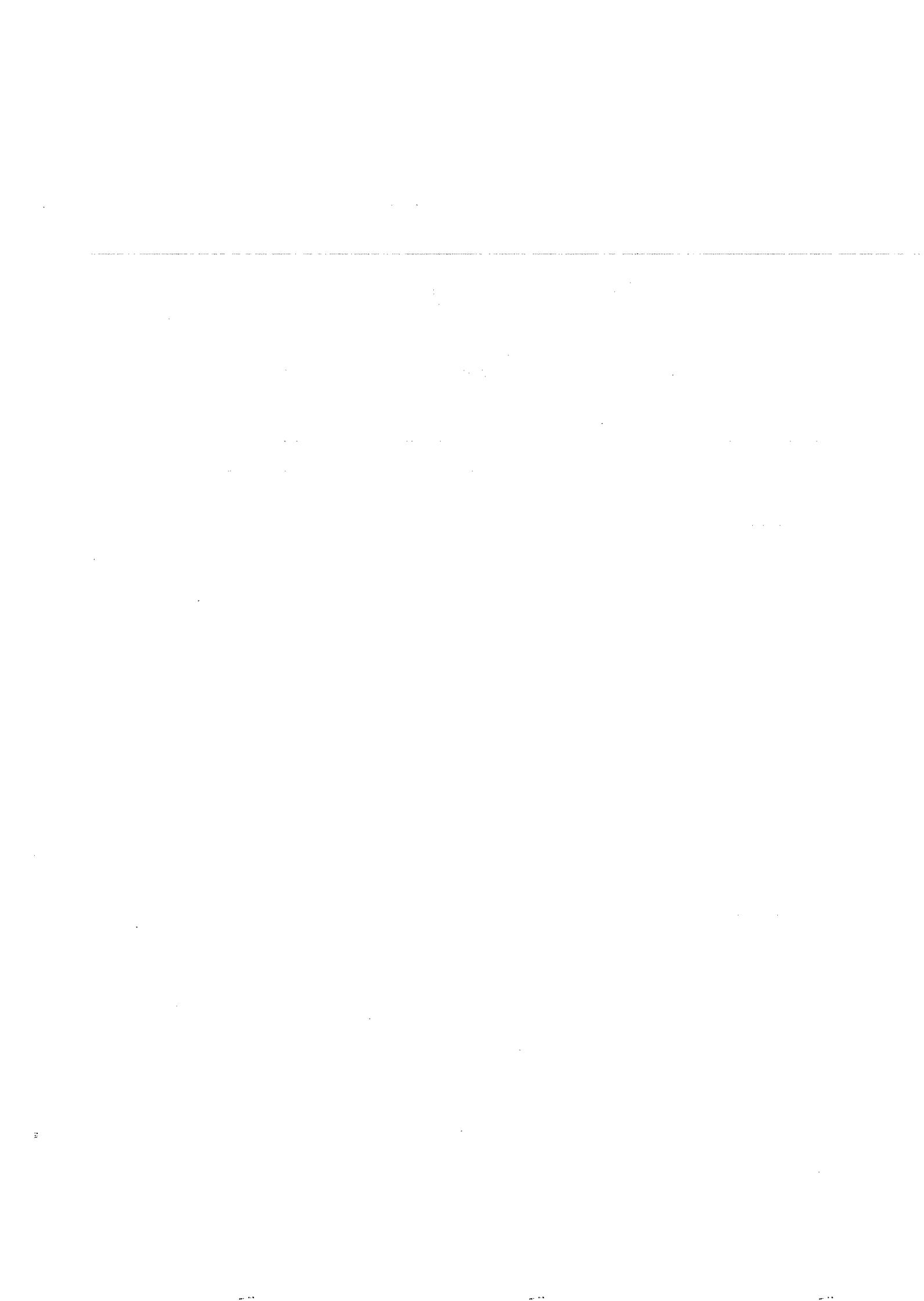
4.11. Cahier des charges du banc d'essai électrique



Projet 4M UCL / PRM		Cahier des charges d'un banc d'essai destiné à évaluer les performances de différents types de micro-actionneurs rotatifs	Date : 24/01/2002 Version : 02 Remplace version 01 du 22/01/2002
Mise à jour			
Date	Origine		
		Fonctions	
22/01/2002	ED	Pour des conditions de mise en charge à <ul style="list-style-type: none"> - couple de freinage constant - vitesse constante - position constante : - Acquisition du couple exercé par l'actionneur en fonction du temps - Acquisition de la position angulaire de l'axe en fonction du temps - Mesure du courant débité et de la tension fournie 	
24/01/2002	ED		
22/01/2002	ED		
22/01/2002	ED		
		Performances	
22/01/2002	ED	<ul style="list-style-type: none"> - Couple exercé par l'actionneur : -10 à 10 Nmm Précision absolue de la mesure : 0.05 Nmm - Déplacement angulaire : inférieur à 6° Précision absolue de la mesure : 0.2° - Courant maximum débité : 2 A Précision absolue de la mesure : 1 mA - Tension maximum fournie : 10 V Précision absolue de la mesure : 10 mV - Cadence maximum d'acquisition des mesures : 100 Hz 	
22/01/2002	ED		
		Contraintes	
22/01/2002	ED	<ul style="list-style-type: none"> - Minimisation des frottements : < 1% du couple utile - Espace disponible autour de l'axe pour placer l'actionneur : 45 mm diam x 30 mm largeur 	
22/01/2002	ED		
24/01/2002	Groupe 4M	<ul style="list-style-type: none"> - Types d'actionneurs à tester : AMF, micromoteur C.C. industriel avec et sans balais, actionneur « maison » 	

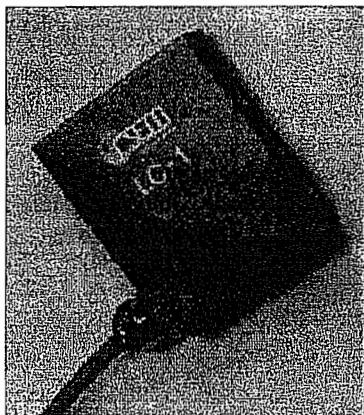


4.12. Fiche technique du capteur force LC-01



CAPTEURS DE FORCE LC-01 ET LC-1

Types inductif ½ pont



Ce capteur de force, bidirectionnel, est de type inductif. Le système de mesure est constitué d'un capteur de déplacement dont le noyau mobile est accouplé à deux ressorts lames en cuprobéryllium. La touche de mesure, solidaire du noyau mobile, est interchangeable, permettant ainsi l'utilisation de touches spéciales

CARACTERISTIQUES PRINCIPALES

Capacité nominale
Surcharge admissible
Erreur de linéarité
Hystérèse
Résolution théorique
Rigidité
Fréquence propre
Alimentation
Couplage
Raccordement

	LC-01	LC-1
Capacité nominale	± 0.1N	± 1N
Surcharge admissible	~ 50%	~ 50%
Erreur de linéarité	0.5%	0.5%
Hystérèse	< 0.2%	< 0.2%
Résolution théorique	< 10 µN	50 µN
Rigidité	0.2mm/0.1N	0.17mm/N
Fréquence propre	100 Hz	200 Hz
Alimentation	5 V/5 kHz	5 V/5 kHz
Couplage	½ pont	½ pont
Raccordement	Câble blindé 1.5m avec fiche Tuchel 300	

100% of the time

5. Publications



5.1. Design of a micro-rotative actuator test bed

Design of a micro-rotative actuator test bed

O. Smal, E. Dereine, B. Raucent, B. Dehez

Center for Research in Mechatronics (C.E.R.E.M.)

Université Catholique de Louvain

Place du Levant 2, 1348 Louvain-la-Neuve, Belgium

Abstract

Within the context of miniaturization of mechatronic systems, the development of a powerful micro-rotative actuator is an important topic of research. Such new actuation systems need to be validated on a specific test bed. Due to the dimensions and the very small torque to be measured, special low friction bearings are necessary and very precise alignment procedure needs to be developed.

1 Introduction

The miniaturization and integration of functions (mechanical, sensing, control, etc) within a confined space is becoming increasingly important in modern mechatronic systems ranging from aerospace technology to biotechnology. One interesting application is the development of an implemented micro-pump that may be used to treat chronic diseases, such as diabetes, with regular micro-injections of medicine. In the same way as a pacemaker, the pump and its tank will be placed under the skin in order to increase comfort. Such a project requires the design of a pump from the hydraulic point of view as well as the design of the pump actuator.

Within this context, it has been decided to design a micro-motor capable of developing an important torque (several hundred of μNm).

Over the past decade, different micro-motor operating principles, e.g. electrostatic, piezoelectric, magnetostrictive and electromagnetic have been investigated and discussed by researchers all over the world. As a result, the electrostatic and electromagnetic as well as the piezoelectric principle were identified to be the most promising [1]. An overview of micro-motor principles may be found in [2]. It shows that magnetic

micro-motors and in particular permanent magnet micro-motors seem to be the most capable of providing the necessary torque to ensure operation of the micropump. In fact, such a solution proves to be the least underprivileged of the magnetic micro-motors when miniaturization is involved.

Simultaneously to the micro-motor design a test bed needs to be designed and built in order to validate the performance of the micro-motor. The test bed requirements are presented in table 1.

CEREM	Micro-motor test bed	12/17/02
<u>function:</u>	to measure torque, speed and angular position, current and voltage of rotary actuator.	
<u>performances:</u>	torque : -10 to 10Nmm, accuracy: 0.05 Nmm angular displacement: less than 6° , accuracy: 0.2° current: 0 to 2A, accuracy: 1mA voltage : to 10V, accuracy: 10mV acquisition: 100Hz	
<u>constraints:</u>	friction torque less than 1% of measured torque	

Table 1

2 Test bed description

2.1 Measurement principle

The test bed principle is depicted in figure 1. This principle is similar to that of other test beds developed to calibrate micro-motors, see [3] and [4].

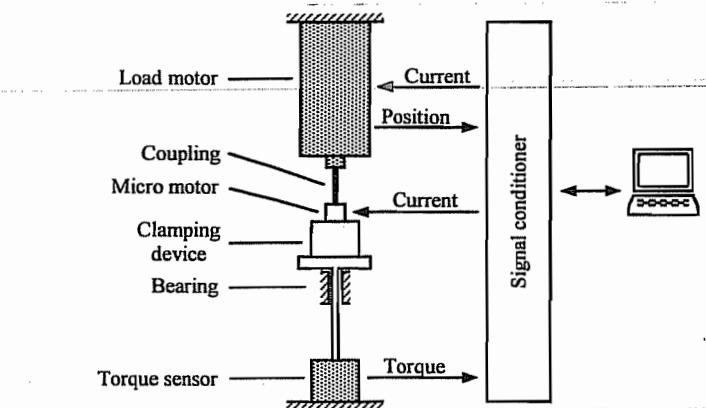


Figure 1

The micro-motor rotor is coupled to a load motor which can impose a resisting torque, a rotational speed or an angular position. The micro-motor stator is held in place by a clamping device which is connected to the torque sensor. The load motor and the torque sensor are rigidly fixed to the support. The clamping device, which is supported by a gas bearing, has one degree of freedom rotational around the vertical axis. The rotation of the micro-motor induces a reaction torque on the clamping device. This torque, equivalent to the torque actually developed by the micro-motor, can be measured thanks to the torque sensor.

2.2 Experimental setup

Figure 2 shows a 3D drawing and table 2 the legend of the experimental setup.

The micro motor to be tested (not illustrated) is held by a 3-jaw chuck (6) mounted on a plate (7) which is supported by a gas bearing (8). The use of an air bearing allows to substantially reduce friction.

$$C = F \cdot r \quad (1)$$

Following the well-known expression (1), a torque C applied to a rotating shaft is equivalent to a force F whose application point is situated at a distance r from the rotating shaft.

The test bed is based on this principle: by knowing the lever arm's length r and by measuring the force F , it is easy to calculate the reaction torque developed by the micro-motor on the clamping device.

In this case, the reaction torque to be measured is converted into a force via a lever arm (10) fixed to the clamping chuck support (7). This force is measured by a

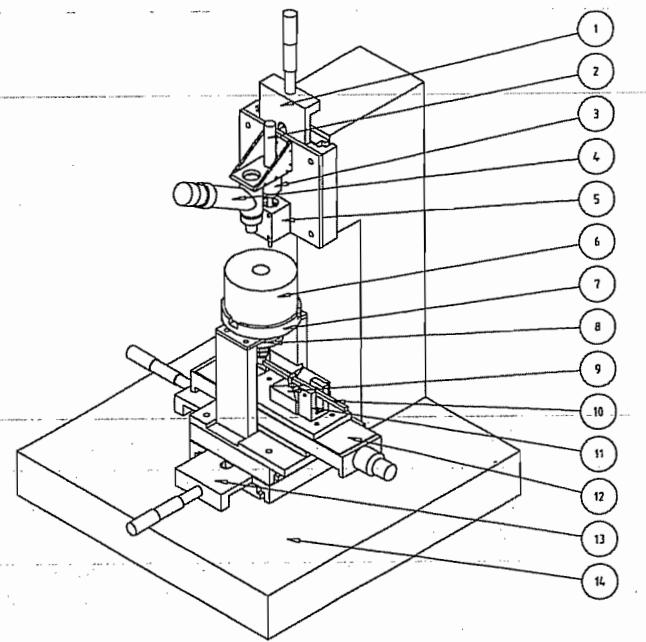


Figure 2

force sensor (9) in contact with the lever arm. Thanks to the Y positioning table (12), it is possible to displace the force sensor (9) along the lever arm in order to modify the torque measuring range. As the lever is 10 cm long and the force sensor measuring range is 0.1 N, the test bed measuring range can be adjusted from 1 Nmm to 10 Nmm using the same force sensor. This latter characteristic constitutes the major advantage of the indirect measurement of the torque developed by the micromotor.

Item	Name
1	Z translation table
2	Load motor
3	Torque limiter
4	Centering microscope
5	Ball bearing
6	3-jaw chuck
7	Chuck support
8	Gas bearing
9	Force sensor
10	Arm lever
11	Sensor security
12	Y micrometer screw
13	XY translation table
14	Granite surface plate

Table 2

Note that to avoid any damage to the force sensor, an adjustable mechanical safeguard (11) permits to limit the angular displacement of the lever arm. In addition, a

torque limiter (3) is used between the load motor (2) and the micro-motor to prevent any damage to the micro-motor.

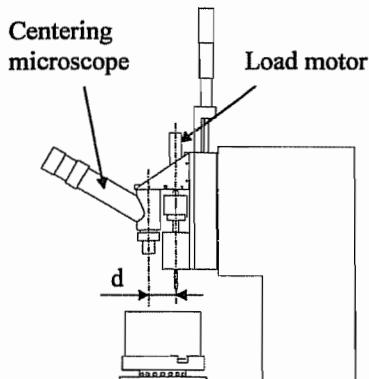


Figure 3

2.3 Shaft alignment

A ball bearing (5) permits to ensure the perpendicularity of the load motor shaft to the granite surface plate (14). The problem is thus to carefully align the micro-motor and load motor shafts. When using a flexible coupling, a misalignment would risk producing important constraints in the micro-motor internal bearings, therefore causing possible damage. As a consequence a specific method using a centering microscope (4) has been developed.

The entire setup is fixed on an XY table (13) equipped with 2 micrometer screws to adjust the micro-motor and load motor shaft alignment. The load motor shaft axis and the microscope optical axis are assumed to be in a same plane at a distance d from each other (cfr figure 3). The first step of the alignment procedure consists, by looking through the reticule of the microscope (cfr figure 4 a and b), in ensuring the colinearity of the micro-motor shaft and microscope axis thanks to the XY table (13). Then, the colinearity between the load motor and micro-motor shafts is achieved by displacing the XY table at distance d in the right direction. The two shafts are then brought closer thanks to the Z table (1) and connected via a rigid coupling (not illustrated).

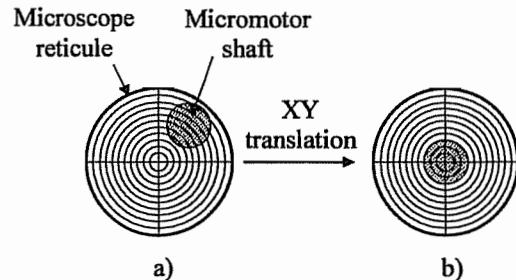


Figure 4

2.4 Gas bearing design

The gas bearing, see Figure 5, is one of the sensitive parts of this test bed.

Its role is to support the axial load due to the chuck support (constituted by a shaft ended by a cylindrical plate), the chuck and the micro-motor while allowing the rotation of the chuck support. Since the measured torque

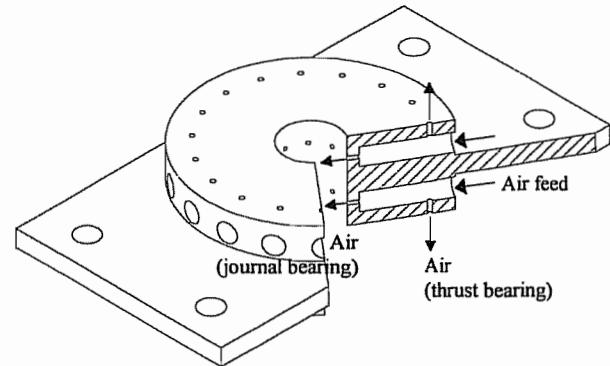


Figure 5

depends directly on this rotation, friction in the bearing must be minimized. This is the reason why a gas bearing was chosen.

This bearing consists of the combination of two types of gas bearing : one double-acting thrust bearing to sustain the chuck support and one journal bearing to guide the rotation. In order to ensure the stability and the positioning of the chuck support, a double-acting thrust bearing was preferred to a single-acting thrust bearing.

As shown in Figure 5, pressurized air is routed through radial channels toward the axial holes (thrust bearing) and the radial holes (journal bearing). The dimensioning of such a bearing essentially consists in determining the dimensions of the holes and their number. This section

presents the main stages of the thrust bearing dimensioning, which is similar to the journal bearing dimensioning. The reader wishing to learn more on this subject should refer to the book by Wilcock et al. [5].

Before beginning the thrust bearing dimensioning, it is necessary to fix some parameters such as :

- maximum load : $W = 35$ lbs
- bearing outer radius : $R_o = 1$ inch
- bearing inner radius : $R_i = 2/3 \times R_o$
- maximum available supply pressure : $p_{s \max} = 150$ psia
- ambient pressure : $p_a = 14.7$ psia
- gas : air at 120°F
- ...

The operating air film thickness C between the thrust bearing and the chuck support should be chosen between $0.5\text{e-}3$ and $2\text{e-}3$ inch. Note that bearing stiffness is inversely proportional to C .

The supply pressure p_s for maximum stiffness can be calculated from :

$$p_s - p_a = \frac{4 \cdot W}{\pi R_o^2 \left[1 - \left(\frac{R_i}{R_o} \right)^2 \right]} \quad (2)$$

The optimal value of the restrictor coefficient Λ_s is given by :

$$\Lambda_s \cdot 0.5 \log_e \left(\frac{R_o}{R_i} \right) = 0.4 \text{ to } 0.5 \quad (3)$$

This factor characterizes the flow restriction between the supply pressure source and the load carrying bearing film.

Finally, equation (4) gives the required number of holes n and their diameter d .

$$n \cdot d = \frac{p_s \cdot C^3}{6 \cdot \mu \cdot \sqrt{\mathfrak{R} \cdot T}} \quad (4)$$

where

- $\mathfrak{R}T$ is the product of the gas constant and the temperature. For air at 70°F , $\sqrt{\mathfrak{R}T} = 1.15\text{e}4$ in/sec

- gas viscosity $\mu = 2.63\text{e-}9$ lbs.sec/in²

In this case, the thrust bearing contains 18 holes with 0.85 mm diameter on each bearing face, see Figure 5.

3 Signal conditioner

The Signal conditioner will control the load motor, micro-motor to be tested and capture and record all data from the motors and the torque sensor.

This will be performed using dSpace®, DS1102 DSP Controller Board. Such a system provides complete solutions for electronic control unit (ECU) software development. It also provides a connection to modelling tools such as MATLAB®/Simulink®/Stateflow®.

A hardware interface, see Figure 6, had to be set up :

- transform the PWM signal generated by dSpace® to an appropriate tension level to "feed" the DC load motor.
- measure the current flowing through the motor
- read information from the digital encoder of the DC-motor and from the torque sensor.

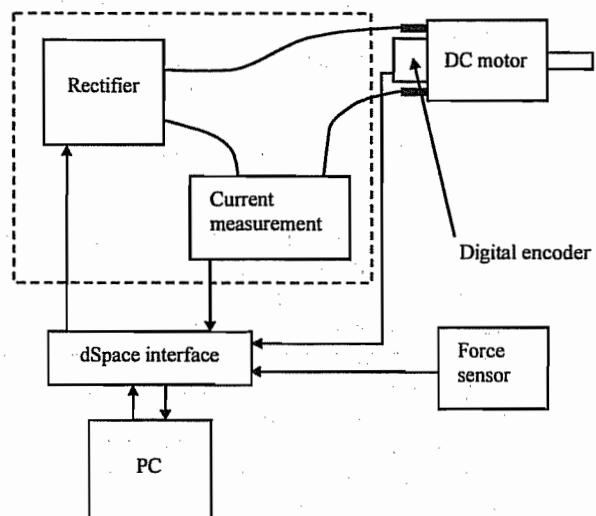


Figure 6

The principle of the test bed is to measure a constant torque provided by the micro-motor. The load torque provided by the load DC-motor must thus remain constant. The load motor control is performed via current regulation and using the torque value measured by the torque sensor. The regulation scheme is implemented in

Simulink® and then transferred to dSpace®. Figure 7 presents the current measurement principle. A LEM current transducer LA 55-P is used to measure the current flowing through the DC-motor (primary current) and to generate a secondary current proportional to the primary one. This secondary current is then transformed in a tension level and amplified. The main advantage of such a system is that the current measurement does not modify or influence the very small current flowing through the DC-motor.

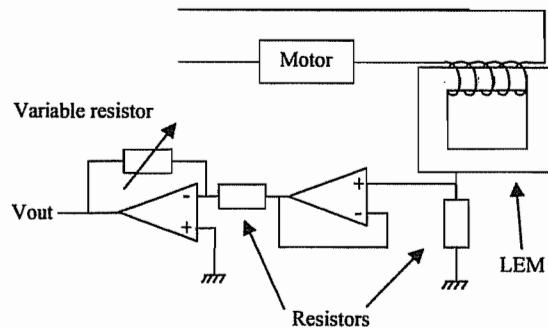


Figure 7

The engineer will control the complete system via a control panel (on the PC). This panel allows one to modify in real time the different parameters of the system. There are three main types of "buttons" in this kind of control panel, allowing one :

- to modify value of parameters
- to see the value of signals in real time
- to plot evolution of signals versus time.

4 Conclusions

A test bed able to validate the performance of micro-motors was designed and built. It can measure the torque, angular position and velocity of a rotary actuator.

Many difficulties were encountered during the design of this test bed.

First, due to the very low torques that we wished to measure, there is a need for bearings with as low friction as possible. This is the reason why an air bearing was chosen to support the micro-motor and its clamping device.

Secondly, the micro-motor and load motor shafts must be perfectly aligned. A specific method using a centering microscope was developed.

Finally, the micromotor shaft and the chuck axis need to be concentric as the test bed measures the torque exerted by the micro-motor on the clamping device. To reach this goal, the chuck contains a micro adjustment device which enables concentricity to be adjusted within 0.005 mm.

Until now, no experiences have been performed on this test bed. A PEC002/202 Penny-Motor will be used in the first validation of the systems. Then tests with "home-made" brushless permanent magnet and shape memory alloy (SMA) actuators will be performed.

Acknowledgments

This work was sponsored by the Belgian Programme on Interuniversity Attraction Poles initiated by the Belgian State – Prime Minister's Office – Science Policy Programme (IUAP-24) and the *Région Wallonne*.

References

- [1] Nienhaus, M., Ehrfeld, W., Stoelting, H.D., Michel, F., Kleen, S., Hardt, S., Schmitz, F., & Stange, T. (1999). *Design and realization of a penny-shaped micromotor*. Proceedings of the SPIE, 3680, 592-600.
- [2] E. Dereine, B. Raucent, B. Dehez and D. Grenier, *Electromagnetic micromotors*, to appear in Int. Precision Assembly Seminar (IPAS'2003).
- [3] P. Wurmsdobler, R. Duffait, T. Messaoudi, W. Brenner, "A torque testing stage for rotating micro-electro-mechanical devices", *The 9th of International Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery*, Honolulu (Hawaii), February 10-14, 2002. Retrieved December 12, 2002 from <http://www.wurmsdobler.org/MCM/isoromac-2002.pdf>.
- [4] CSM Variocouple®, from CSM Instruments SA (www.csm-instruments.com), Switzerland.
- [5] D.F. Wilcock, G.N. Sandor, *Design of gas bearings*, Rensselaer Polytechnic Institute (RTI) – Mechanical Technology Incorporated (MTI) course on gas bearing design, 1967

5.2. Le col circulaire comme articulation flexible

Le col circulaire comme articulation flexible

P. Merken¹, J.F. Debongnie¹

¹Université de Liège, Dept. ASMA – Méthodes de fabrication
Chemin des Chevreuils 1 Bât. 52/3, 4000 Liège
email: P.Merken@ulg.ac.be, JF.debongnie@ulg.ac.be

Résumé: Nous présentons un modèle permettant de déterminer les dimensions du col, R et h_0 , en fonction du matériau, de l'angle de rotation désiré et du nombre de cycles envisagé. Dans le cas du col circulaire, les équations de base de la résistance des matériaux appliquées aux poutres à section variable admettent une solution analytique grâce à un changement de variable judicieux inspiré de la théorie de la lubrification. Pour un rapport entre l'épaisseur de col et son rayon tendant vers zéro, nous pouvons également dériver des formes asymptotiques des équations obtenues. Dans le cas de rapports h_0/R moyens, ces résultats doivent être affectés de coefficients correcteurs qui dépendent eux-mêmes du rapport h_0/R et que l'on détermine à partir des résultats numériques obtenus par la théorie complète. Ainsi, toutes les propriétés du col peuvent déduites grâce aux équations aux limites et à ces coefficients simples.

Mots clefs: col circulaire, articulation élastique, modèle

I. INTRODUCTION

Dans un environnement technologique où les machines remplissent de plus en plus de fonctions dans un espace de plus en plus réduit, où le besoin de miniaturisation se fait sentir sans cesse davantage, où les contraintes imposées sont de plus en plus sévères, il devient essentiel de concentrer les fonctions et de leur donner un plus large champ d'application.

En micromécanique en particulier, la recherche d'une articulation sans frottement, d'un encombrement faible, incluant le moins de pièces possible, pour des rotations limitées et travaillant dans un milieu non-lubrifié, amène à écarter les solutions classiques telles que roulements, paliers lisses et autres pivots qui ne possèdent pas toutes ces qualités.

Un système particulier déjà connu [1] et travaillant par déformation, présente ces différentes caractéristiques : il s'agit du col circulaire. La figure 1 montre la géométrie générale de ce type d'articulation. Le col est défini par son rayon, R , et par l'épaisseur minimale de matière, h_0 .

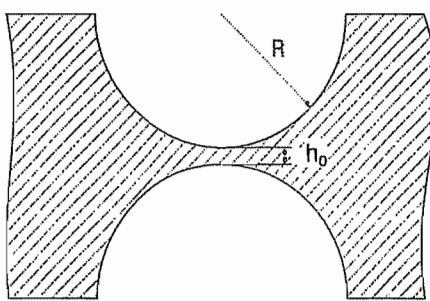


Fig. 1. Géométrie du col circulaire

II. FORMES ASYMPTOTIQUES

A. Variables géométriques

Afin d'étudier le col, nous fixerons des axes de référence : l'axe x correspond à l'axe de symétrie du col et l'axe y relie les centres des arcs de cercle définissant le col.

En plus des deux variables définies précédemment, nous en introduirons 2 autres : l'angle de balancement φ et l'épaisseur du col b , perpendiculairement au plan xy .

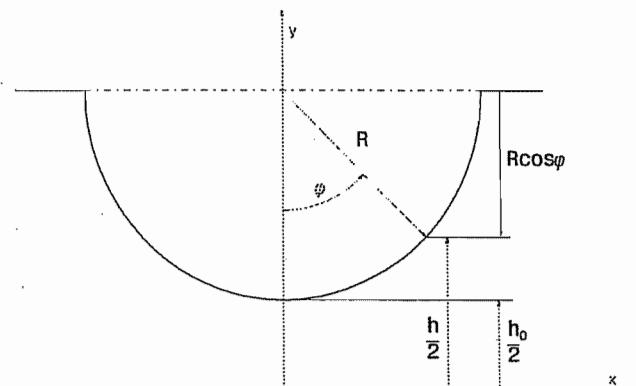


Fig. 2. Variables géométriques

B. Rigidité en flexion

L'angle de flexion total se calcule par la formule classique,

$$\alpha = \int_{-R}^R \frac{12M}{Ebh^3} dx = \frac{12M}{Eb} \int_{-R}^R \frac{dx}{h^3} \quad (1)$$

On considère que seule la zone du col (qui s'étend de $-R$ à R) est soumise à l'action du moment de flexion et que le reste de la poutre est infiniment rigide.

Calculons cette dernière intégrale. La géométrie du col nous donne,

$$\begin{aligned} h &= h_0 + 2R(1 - \cos\varphi) = 2R \left[\left(1 + \frac{h_0}{2R}\right) - \cos\varphi \right] \\ &= 2R \left(1 + \frac{h_0}{2R}\right) (1 - \varepsilon \cos\varphi) \\ &= \frac{2R}{\varepsilon} (1 - \varepsilon \cos\varphi) \end{aligned} \quad (2)$$

en posant,

$$\varepsilon = \frac{1}{1 + \frac{h_0}{2R}} \quad (3)$$

Sachant que,

$$x = R \sin \varphi, dx = R \cos \varphi d\varphi \quad (4)$$

on transforme l'intégrale (1) sous la forme,

$$\int_{-R}^R \frac{dx}{h^3} = \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \frac{\varepsilon^3 R \cos \varphi d\varphi}{8R^3 (1 - \varepsilon \cos \varphi)^3} = \frac{\varepsilon^3}{4R^2} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{\cos \varphi d\varphi}{(1 - \varepsilon \cos \varphi)^3} = \frac{\varepsilon^3}{4R^2} I \quad (5)$$

L'intégrale à évaluer ne diffère des intégrales apparaissant en théorie de la lubrification [2] que par le signe de la variable ε et peut donc être résolue par le célèbre changement de variables de Sommerfeld [3] qui devient ici,

$$\cos \varphi = \frac{\cos \alpha + \varepsilon}{1 + \varepsilon \cos \alpha} \quad (6)$$

On en déduit successivement,

$$\begin{aligned} \bullet \quad 1 - \varepsilon \cos \varphi &= \frac{1 - \varepsilon^2}{1 + \varepsilon \cos \alpha} \\ \bullet \quad \sin^2 \varphi &= \frac{(1 - \varepsilon^2) \sin^2 \alpha}{(1 + \varepsilon \cos \alpha)^2} \\ \bullet \quad \sin \varphi &= \frac{\sqrt{1 - \varepsilon^2} \sin \alpha}{1 + \varepsilon \cos \alpha} \\ \bullet \quad d(\cos \varphi) &= -\sin \varphi d\varphi = -\frac{(1 - \varepsilon^2) \sin \alpha}{(1 + \varepsilon \cos \alpha)^2} d\alpha \end{aligned} \quad (7)$$

ce qui donne,

$$d\varphi = \frac{\sqrt{1 - \varepsilon^2}}{(1 + \varepsilon \cos \alpha)} d\alpha \quad (8)$$

En ce qui concerne les bornes d'intégration,

$$\begin{cases} \varphi = 0, \cos \varphi = 1 \Leftrightarrow \cos \alpha = 1 \quad \alpha = 0 \\ \varphi = \frac{\pi}{2}, \cos \varphi = 0 \Leftrightarrow \cos \alpha = -\varepsilon \quad \alpha^* = \arccos(-\varepsilon) \end{cases} \quad (9)$$

L'intégrale I se ramène ainsi à

$$\begin{aligned} I &= \frac{1}{(1 - \varepsilon^2)^{5/2}} \int_0^{\alpha^*} \left[(1 + \varepsilon^2) \cos \alpha + \frac{\varepsilon}{2} (1 + \cos 2\alpha) + \varepsilon \right] d\alpha \\ &= \frac{1}{(1 - \varepsilon^2)^{5/2}} \left\{ (1 + \varepsilon^2) \sin \alpha^* + \frac{3\varepsilon}{2} \alpha^* + \frac{\varepsilon}{4} \sin 2\alpha^* \right\} \end{aligned} \quad (10)$$

Tenant compte de la valeur ci-dessus de la limite α^* (9), on a,

$$\begin{aligned} \sin \alpha^* &= \sqrt{1 - \cos^2 \alpha^*} = \sqrt{1 - \varepsilon^2} \\ \sin 2\alpha^* &= 2 \sin \alpha^* \cos \alpha^* = -2\varepsilon \sqrt{1 - \varepsilon^2} \end{aligned} \quad (11)$$

ce qui ramène finalement l'équation cherchée à

$$I = \frac{1}{(1 - \varepsilon^2)^{5/2}} \left\{ (1 + \varepsilon^2) \sqrt{1 - \varepsilon^2} + \frac{3\varepsilon}{2} \arccos(-\varepsilon) - \frac{\varepsilon^2}{2} \sqrt{1 - \varepsilon^2} \right\} \quad (12)$$

Nous nous limiterons au cas où $\frac{h_0}{R}$ est petit devant 1. Nous obtenons alors,

- $\varepsilon \approx 1$

- $1 - \varepsilon^2 \approx \frac{h_0}{R}$

- $\alpha^* \approx \pi$

- $\sqrt{1 - \varepsilon^2} (1 + \varepsilon^2) \approx 2 \frac{h_0}{R}$

- $\frac{3\varepsilon}{2} \arccos(-\varepsilon) \approx \frac{3}{2}\pi$

- $\frac{\varepsilon^2}{2} \sqrt{1 - \varepsilon^2} \approx \frac{h_0}{R}$

En remplaçant les différents termes dans l'intégrale, nous obtenons,

$$I = \left(\frac{R}{h_0} \right)^{5/2} \left[\frac{3}{2}\pi + O\left(\frac{h_0}{R} \right) \right] \approx \frac{3}{2}\pi \left(\frac{R}{h_0} \right)^{5/2} \quad (14)$$

et

$$\int_{-R}^R \frac{dx}{h^3} = \frac{\varepsilon^3}{4R^2} \frac{3}{2}\pi \left(\frac{R}{h_0} \right)^{5/2} \approx \frac{3}{8}\pi \frac{\sqrt{R}}{h_0^{5/2}} \quad (15)$$

L'angle de flexion s'écrit finalement,

$$\alpha = \int_{-R}^R \frac{12M}{Ebh^3} dx = \frac{9\pi}{2Eb} M \frac{\sqrt{R}}{h_0^{5/2}} \quad (16)$$

Ce qui revient à dire,

$$\frac{M}{\alpha} = \frac{2}{9\pi} Eb \frac{h_0^{5/2}}{\sqrt{R}} \quad (17)$$

Cette expression mesure la raideur en flexion.

En ce qui concerne la contrainte maximum au niveau du col,

$$\sigma = \frac{6M}{bh_0^2} = \frac{6}{bh_0^2} \frac{2Eb}{9\pi} \frac{h_0^{5/2}}{\sqrt{R}} \alpha = \frac{4}{3\pi} E\alpha \sqrt{\frac{h_0}{R}} \quad (18)$$

soit,

$$\alpha = \frac{3\pi}{4} \frac{\sigma}{E} \sqrt{\frac{R}{h_0}} \quad (19)$$

C. Rigidité en torsion

L'angle de torsion varie avec la coordonnée x car la section n'est pas constante, nous avons alors,

$$\frac{d\alpha}{dx} = \frac{M_t}{Gc_1bh^3} = \frac{M_t}{G \frac{bh^3}{3}} = \frac{3M_t}{Gb^3h^3} \quad (20)$$

Le coefficient c_1 est donné dans des tables, il dépend du rapport b/h . Lorsque ce rapport est supérieur à 4, le coefficient tend vers 1/3. Ce rapport est, dans notre cas, toujours beaucoup plus grand que 4.

Calculons l'angle de torsion total, en considérant que la partie de la poutre non entamée est toujours infiniment rigide,

$$\alpha = \frac{3M_t}{Gb} \int_{-R}^R \frac{dx}{h^3} = \frac{9}{8}\pi \frac{M_t}{Gb} \frac{\sqrt{R}}{h_0^{5/2}} \quad (21)$$

La raideur en torsion vaut, quant à elle,

$$\frac{M_t}{\alpha} = \frac{8}{9\pi} Gb \frac{h_0^{5/2}}{\sqrt{R}} \quad (22)$$

D. Rigidité en extension

Le déplacement d'une section infinitésimale de la poutre soumise à un effort de traction vaut,

$$\frac{du}{dx} = \frac{N}{Ebh} \Leftrightarrow u = \frac{N}{Eb} \int_{-R}^R \frac{dx}{h} \quad (23)$$

Remplaçons h par sa valeur calculée dans la partie flexion,

$$\int_{-R}^R \frac{dx}{h} = \frac{\varepsilon}{2} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \frac{\cos \varphi}{(1-\varepsilon \cos \varphi)} d\varphi = \varepsilon \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{\cos \varphi}{(1-\varepsilon \cos \varphi)} d\varphi = I \quad (24)$$

On a,

$$\frac{\varepsilon \cos \varphi}{1-\varepsilon \cos \varphi} = -1 + \frac{1}{1-\varepsilon \cos \varphi} \quad (25)$$

et

$$I = -\frac{\pi}{2} + \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{d\varphi}{1-\varepsilon \cos \varphi} = -\frac{\pi}{2} + \Gamma \quad (26)$$

En utilisant encore le même changement de variable,

$$\Gamma = \int_0^{\alpha^*} \frac{1+\varepsilon \cos \alpha}{1-\varepsilon^2} \frac{\sqrt{1-\varepsilon^2}}{(1+\varepsilon \cos \alpha)} d\alpha = \frac{1}{\sqrt{1-\varepsilon^2}} \alpha^* \quad (27)$$

On a donc,

$$I = -\frac{\pi}{2} + \frac{\alpha^*}{\sqrt{1-\varepsilon^2}} = -\frac{\pi}{2} + \pi \sqrt{\frac{R}{h_0}} = \pi \sqrt{\frac{R}{h_0}} \quad (28)$$

Il vient ainsi,

$$u = \frac{N}{Eb} \pi \sqrt{\frac{R}{h_0}} \quad (29)$$

et la rigidité en extension est représentée par

$$\boxed{\frac{N}{u} = \frac{1}{\pi} Eb \sqrt{\frac{h_0}{R}}} \quad (30)$$

E. Rigidité en flexion transverse

Voyons ce qu'il se passe lorsque le col est soumis à un moment de flexion transverse,

$$\frac{d\alpha}{dx} = \frac{12M}{Ebh^3} \quad (31)$$

$$\alpha = \frac{12M}{Eb^3} \int_{-R}^R \frac{dx}{h} = \frac{12M}{Eb^3} \pi \sqrt{\frac{R}{h_0}} \quad (32)$$

La raideur angulaire transverse vaut,

$$\boxed{\frac{M}{\alpha} = \frac{1}{12\pi} Eb^3 \sqrt{\frac{h_0}{R}}} \quad (33)$$

F. Rigidité en translation ou cisaillement technologique

Par translation, on entend la translation de l'un des côtés de la poutre par rapport à l'autre côté, le col circulaire délimitant les côtés. Afin de pouvoir effectuer une translation, on doit appliquer une charge au droit du col. Cela sera réalisé grâce à l'artifice montré sur la figure 3.

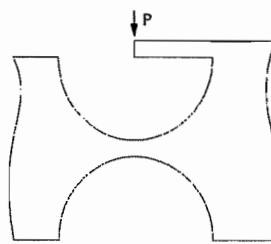


Fig. 3. Application de la charge

1) Contribution de la flexion

Le moment vaut Px , la rotation vérifiant,

$$\frac{d\alpha}{dx} = \frac{12M}{Ebh^3} = \frac{12Px}{Ebh^3} \quad (34)$$

le déplacement vaut,

$$w = \int_{-R}^R \alpha dx \quad (35)$$

Intégrons par parties,

$$\begin{cases} u = \alpha & dv = dx \\ du = \frac{d\alpha}{dx} dx & v = x \end{cases} \quad (36)$$

$$w = [x\alpha]_{-R}^R - \int_{-R}^R x \frac{d\alpha}{dx} dx \quad (37)$$

Il est clair que,

$$-\alpha(R) = \int_{-R}^R \frac{12Px}{Ebh^3} dx = 0 \quad (38)$$

car l'intégrand est impair. Donc $\alpha(0)=0$.

Reste donc à calculer

$$w = \frac{12P}{Eb} \int_{-R}^R \frac{x^2}{h^3} dx = \frac{12P}{Eb} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \frac{R^2 \sin^2 \varphi}{\frac{8R^3}{\varepsilon^3} (1-\varepsilon \cos \varphi)^3} R \cos \varphi d\varphi \quad (39)$$

$$= \frac{3Pe^3}{Eb} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{\sin^2 \varphi \cos \varphi}{(1-\varepsilon \cos \varphi)^3} d\varphi = \frac{3Pe^3}{Eb} I$$

En utilisant toujours le même changement de variable, nous obtenons

$$I = \int_0^{\alpha^*} \frac{(1-\varepsilon^2) \sin^2 \alpha \cos \alpha + \varepsilon (1+\varepsilon \cos \alpha)^3}{(1+\varepsilon \cos \alpha)^2 (1+\varepsilon \cos \alpha) \left(\frac{1-\varepsilon^2}{1-\varepsilon^2}\right)^3} \frac{\sqrt{1-\varepsilon^2}}{(1+\varepsilon \cos \alpha)} d\alpha \quad (40)$$

$$= \frac{1}{(1-\varepsilon^2)^{3/2}} \int_0^{\alpha^*} \frac{\sin^2 \alpha (\cos \alpha + \varepsilon)}{1+\varepsilon \cos \alpha} d\alpha = \frac{1}{(1-\varepsilon^2)^{3/2}} \Gamma$$

Transformons ce dernier intégrand. On a successivement

$$\begin{aligned} \bullet \quad & \frac{\sin^2 \alpha (\cos \alpha + \varepsilon)}{1+\varepsilon \cos \alpha} = \frac{1}{\varepsilon} \sin^2 \alpha + \left(\varepsilon - \frac{1}{\varepsilon}\right) \frac{\sin^2 \alpha}{1+\varepsilon \cos \alpha} \\ \bullet \quad & \frac{\sin^2 \alpha}{1+\varepsilon \cos \alpha} = \frac{1-\cos^2 \alpha}{1+\varepsilon \cos \alpha} = 1-\cos \alpha \frac{\varepsilon + \cos \alpha}{1+\varepsilon \cos \alpha} \\ \bullet \quad & \frac{\cos \alpha (\varepsilon + \cos \alpha)}{1+\varepsilon \cos \alpha} = \frac{1}{\varepsilon} \cos \alpha + \left(\varepsilon - \frac{1}{\varepsilon}\right) \frac{\cos \alpha}{1+\varepsilon \cos \alpha} \end{aligned} \quad (41)$$

$$\bullet \frac{\cos\alpha}{1+\varepsilon\cos\alpha} = \frac{\left(\cos\alpha + \frac{1}{\varepsilon}\right) - \frac{1}{\varepsilon}}{1+\varepsilon\cos\alpha} = \frac{1}{\varepsilon} - \frac{1}{\varepsilon} \left(\frac{1}{1+\varepsilon\cos\alpha} \right)$$

Intégrons chacun des termes ; nous obtenons,

$$\int_0^{\alpha^*} \frac{1}{\varepsilon} \sin^2 \alpha d\alpha = \frac{1}{2\varepsilon} \left(\alpha^* - \frac{\sin 2\alpha^*}{2} \right) \quad (42)$$

$$\int_0^{\alpha^*} \frac{1}{\varepsilon} \cos\alpha d\alpha = \frac{1}{\varepsilon} \sin\alpha^*$$

Pour calculer la dernière intégrale, effectuons le changement de variable de Sommerfeld classique,

$$\cos\alpha = \frac{\cos\beta - \varepsilon}{1 - \varepsilon\cos\beta}$$

$$d\alpha = \frac{\sqrt{1-\varepsilon^2}}{1-\varepsilon\cos\beta} d\beta \quad (43)$$

$$1 + \varepsilon\cos\alpha = \frac{1-\varepsilon^2}{1-\varepsilon\cos\beta}$$

$$\begin{cases} \alpha=0, \cos\alpha=1 \Leftrightarrow \cos\beta=1 \beta=0 \\ \alpha^*=\arccos(-\varepsilon) \Leftrightarrow \cos\beta=0 \beta=\frac{\pi}{2} \end{cases} \quad (44)$$

$$\int_0^{\alpha^*} \frac{d\alpha}{1+\varepsilon\cos\alpha} = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{1-\varepsilon\cos\beta}{1-\varepsilon^2} \frac{\sqrt{1-\varepsilon^2}}{1-\varepsilon\cos\beta} d\beta = \frac{\pi}{2\sqrt{1-\varepsilon^2}} \quad (45)$$

Rassemblons chacun des termes, nous obtenons,

$$\begin{aligned} \Gamma &= \frac{1}{2\varepsilon} \left(\pi + \varepsilon\sqrt{1-\varepsilon^2} \right) + \frac{1}{\varepsilon^2} (1-\varepsilon^2) \left[\sqrt{1-\varepsilon^2} \left(1 + \frac{\pi}{2\varepsilon} \right) - \frac{\pi}{\varepsilon} \right] \\ &= \frac{1}{2} \left(\pi + \sqrt{\frac{h_0}{R}} \right) + \frac{h_0}{R} \left(\sqrt{\frac{h_0}{R}} \left(1 + \frac{\pi}{2} \right) - \pi \right) \\ &\approx \frac{\pi}{2} \end{aligned} \quad (46)$$

Finalement,

$$I = \frac{\pi}{2} \left(\frac{R}{h_0} \right)^{3/2} \quad (47)$$

et

$$w = \frac{3\pi}{2} \frac{P}{Eb} \left(\frac{R}{h_0} \right)^{3/2} \quad (48)$$

Cette dernière expression mesure la contribution de la flexion.

2) Contribution de l'effort tranchant

Le déplacement localisé vaut,

$$\frac{dw}{dx} = \frac{P}{\frac{5}{6}Eb h} = \frac{6P}{5Eb h} \quad (49)$$

Le déplacement,

$$w = \frac{6P}{5Eb} \int_{-R}^R \frac{dx}{h} = \frac{6\pi}{5} \frac{P}{Eb} \sqrt{\frac{R}{h_0}} \quad (50)$$

Ce déplacement est équivalent à la contribution de l'effort tranchant.

La flexion est largement prépondérante. Nous négligerons l'effet de l'effort tranchant. La rigidité en cisaillement technologique se ramène à

$$\boxed{\frac{P}{w} \approx \frac{2}{3\pi} Eb \left(\frac{h_0}{R} \right)^{3/2}} \quad (51)$$

G. Déplacement de l'extrémité du col

On se propose, ici, de calculer le déplacement de l'extrémité du col sous l'influence d'un moment de flexion. Ceci permettra d'obtenir des informations sur la position du centre de rotation du col.

On a le gradient de l'angle de rotation dans la direction x,

$$\frac{d\alpha}{dx} = \frac{12M}{Eb h^3} \quad (52)$$

et le déplacement global,

$$w = \int_{-R}^R \alpha dx = [\alpha x]_{-R}^R - \int_{-R}^R x \frac{d\alpha}{dx} dx = \alpha(R) \cdot R - \int_{-R}^R x \frac{d\alpha}{dx} dx \quad (53)$$

Résolvons cette équation. On connaît (16),

$$\alpha(R) \cdot R = \frac{9\pi}{2Eb} M \frac{R^{3/2}}{h_0^{5/2}} \quad (54)$$

Calculons,

$$\int_{-R}^R x \frac{d\alpha}{dx} dx = \frac{3M\varepsilon^3}{EbR} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{\sin\varphi \cos\varphi}{(1-\varepsilon\cos\varphi)^3} d\varphi = \frac{3M\varepsilon^3}{EbR} \cdot I \quad (55)$$

$$I = \int_0^{\alpha^*} \frac{\sqrt{1-\varepsilon^2} \sin\alpha \cos\alpha + \varepsilon (1+\varepsilon\cos\alpha)^3}{1+\varepsilon\cos\alpha} \frac{\sqrt{1-\varepsilon^2}}{(1-\varepsilon^2)^3} d\alpha \quad (56)$$

$$= \frac{1}{(1-\varepsilon^2)^2} \int_0^{\alpha^*} \sin\alpha (\cos\alpha + \varepsilon) d\alpha$$

$$= \frac{1}{(1-\varepsilon^2)^2} \left[\frac{\sin^2 \alpha^*}{2} + \varepsilon (1 - \cos\alpha^*) \right]$$

$$= \frac{1}{(1-\varepsilon^2)^2} \left[\frac{1}{2} (1 + \varepsilon^2) + \varepsilon \right]$$

$$= 2 \frac{R^2}{h_0^2}$$

On a donc,

$$\int_{-R}^R \alpha \frac{d\alpha}{dx} dx = \frac{6M\varepsilon^3 R^2}{EbR h_0^2} = \frac{6M}{Eb} \frac{R}{h_0^2} \quad (57)$$

Au total,

$$\boxed{w = \frac{M}{Eb} \frac{R^{3/2}}{h_0^{5/2}} \left[\frac{9\pi}{2} - 6 \sqrt{\frac{h_0}{R}} \right]} \quad (58)$$

On constate que le grand terme est $\alpha(R) \cdot R$ dans l'expression (53), c'est-à-dire que la rotation se fait à $O\left(\sqrt{\frac{h_0}{R}}\right)$ près autour du centre du col.

III. COEFFICIENTS CORRECTEURS

Les équations obtenues précédemment sont valables tant que le rapport h_0/R reste proche de zéro. Ce qui signifie que, soit l'épaisseur h_0 doit être très petite, soit le rayon R doit être très grand. En pratique, cependant, l'épaisseur h_0 peut atteindre des valeurs significatives par rapport au rayon. Ceci peut arriver pour des questions de fabrication (h_0 sera alors limité inférieurement) ou d'encombrement (R sera, lui, limité supérieurement), lorsque la fonction du col le permet. Ainsi, le rapport h_0/R pourrait atteindre des valeurs telles que 0,5.

Nous sommes alors devant un cas pour lequel les équations asymptotiques ne sont plus valables rigoureusement. Nous allons montrer que nous pouvons aisément les conserver, par l'application de coefficients correcteurs uniquement fonctions du rapport h_0/R .

Ces coefficient correcteurs seront déduits des équations de la théorie complète, avant leurs simplifications pour obtenir les formes asymptotiques. Il est bien entendu que ces coefficients doivent tendre vers un lorsque le rapport h_0/R tend vers zéro.

A. Rigidité en flexion

Rappelons l'équation complète en flexion,

$$\alpha = \frac{12M}{Eb} \frac{\varepsilon^3}{4R^2} I \quad (59)$$

avec $I = f\left(\frac{h_0}{R}\right)$, donnée par l'équation (10).

La raideur en flexion est alors mesurée par

$$\frac{M}{\alpha} = \frac{Eb}{3} \frac{R^2}{\varepsilon^3 I} \quad (60)$$

Le coefficient correcteur se mesure alors par le rapport entre les raideurs complète et asymptotique,

$$K_1 = \frac{3\pi}{2} \frac{1}{\varepsilon^3 I} \left(\frac{R}{h_0} \right)^{5/2} \quad (61)$$

Evaluons numériquement chacun des termes intervenant dans l'expression I , pour obtenir la valeur du coefficient correcteur.

TABLEAU I
COEFFICIENT CORRECTEUR K_1

h_0/R	10^{-2}	$2 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-2}$	10^{-1}	$2 \cdot 10^{-1}$	$5 \cdot 10^{-1}$
K_1	1,0013	1,0025	1,0064	1,0129	1,0264	1,0683

Il reste à trouver une expression simple, faisant apparaître le rapport h_0/R uniquement. La figure 4 nous montre que l'évolution du coefficient est sensiblement linéaire. La recherche d'une droite de coefficient de corrélation le meilleur possible nous amène à l'expression simple suivante,

$$K_1 = 0,137 \frac{h_0}{R} + 1 \quad (62)$$

La figure 4 nous montre également cette droite.

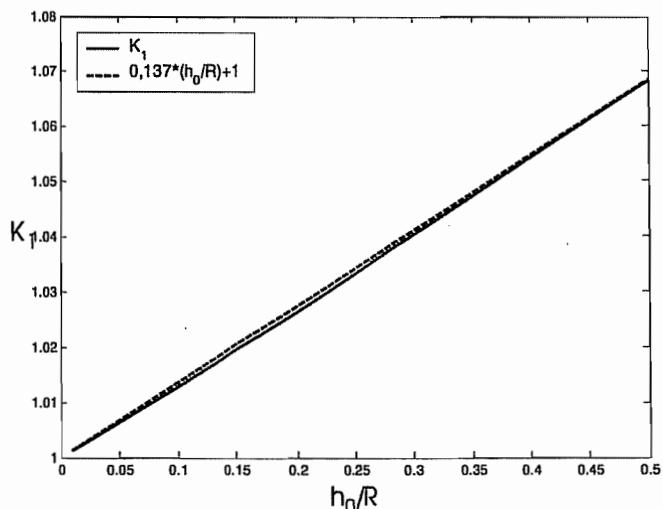


Fig. 4. Coefficient correcteur K_1

L'approximation nous donne une erreur maximale de 0,1%, comme le montre le tableau suivant.

TABLEAU II
ERREUR SUR K_1

h_0/R	10^{-2}	$2 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-2}$	10^{-1}	$2 \cdot 10^{-1}$	$5 \cdot 10^{-1}$
K_1	1,0014	1,0027	1,0069	1,0137	1,0274	1,0685
Err (%)	0,01	0,02	0,05	0,08	0,1	0,02

Nous obtenons finalement l'équation corrigée suivante,

$$\frac{M}{\alpha} = K_1 \frac{2}{9\pi} Eb \frac{h_0^{5/2}}{\sqrt{R}} \quad (63)$$

$$K_1 = 1 - \frac{1}{8} \frac{h_0}{R}$$

De même, pour calculer un angle limite,

$$\alpha = \frac{1}{K_1} \frac{3\pi}{4} \frac{\sigma}{E} \sqrt{\frac{R}{h_0}} \quad (64)$$

B. Rigidité en torsion

Il est clair que le coefficient correcteur K_1 est également valable dans le cas de la torsion.

C. Rigidité en extension

Nous avons obtenu L'équation complète suivante, en extension,

$$u = \frac{N}{Eb} \left(\frac{\alpha^*}{\sqrt{1-\varepsilon^2}} - \frac{\pi}{2} \right) \quad (65)$$

Le coefficient correcteur s'exprime par,

$$K_2^{-1} = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{h_0}{R}} \left(\frac{\alpha^*}{\sqrt{1-\varepsilon^2}} - \frac{\pi}{2} \right) \quad (66)$$

Le tableau III nous donne la valeur de ce coefficient correcteur. La figure 5 en donne la représentation graphique.

TABLEAU III
COEFFICIENT CORRECTEUR K_2

h_0/R	10^{-2}	$2 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-2}$	10^{-1}	$2 \cdot 10^{-1}$	$5 \cdot 10^{-1}$
K_2	1,085	1,122	1,198	1,287	1,422	1,714

L'équation trouvée, qui représente ce coefficient correcteur est la suivante,

$$K_2 = 1 + 0,97 \sqrt{\frac{h_0}{R}} \quad (67)$$

Cette équation est également représentée sur la figure 5.

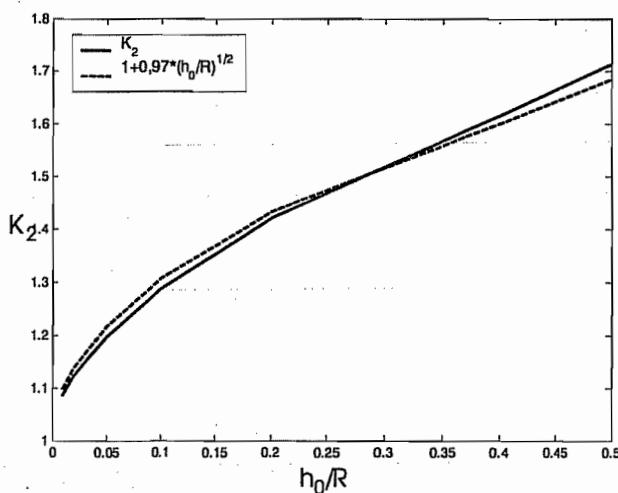


Fig. 5. Coefficient correcteur K_2

L'erreur maximale est de 1,6 %, comme le montre le tableau IV.

TABLEAU IV
ERREUR SUR K_2

h_0/R	10^{-2}	$2 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-2}$	10^{-1}	$2 \cdot 10^{-1}$	$5 \cdot 10^{-1}$
K_2	1,097	1,137	1,217	1,307	1,434	1,686
Err (%)	1,1	1,4	1,6	1,5	0,8	1,6

L'expression finale de la rigidité en extension est la suivante,

$$\frac{N}{u} = K_2 \frac{1}{\pi} E b \sqrt{\frac{h_0}{R}} \quad (68)$$

$$K_2 = 1 + 0,97 \sqrt{\frac{h_0}{R}}$$

D. Rigidité en flexion transverse

De nouveau, ici, le coefficient correcteur K_2 reste valable en flexion transverse.

E. Rigidité en cisaillement technologique

Il a été démontré que la flexion est largement prépondérante. Nous négligerons encore la contribution de l'effort tranchant.

L'équation complète en cisaillement technologique s'écrit,

$$w = \frac{3P}{Eb} \frac{\varepsilon^3}{(1-\varepsilon^2)^{3/2}} \Gamma \quad (69)$$

L'expression complète du coefficient correcteur est la suivante,

$$K_3 = \frac{\pi}{2} \frac{(1-\varepsilon^2)^{3/2}}{\varepsilon^3 \Gamma} \left(\frac{R}{h_0} \right)^{3/2} \quad (70)$$

Le tableau V nous donne la valeur de ce coefficient correcteur. La figure 6 en donne la représentation graphique.

TABLEAU V
COEFFICIENT CORRECTEUR K_3

h_0/R	10^{-2}	$2 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-2}$	10^{-1}	$2 \cdot 10^{-1}$	$5 \cdot 10^{-1}$
K_3	0,9829	0,9683	0,9250	0,8696	0,7760	0,5895

La meilleure équation trouvée pour coller à ces points est la suivante,

$$K_3 = \frac{1 + 0,5 \frac{h_0}{R}}{1 + 2,2 \frac{h_0}{R}} \quad (71)$$

également représentée sur la figure 6.

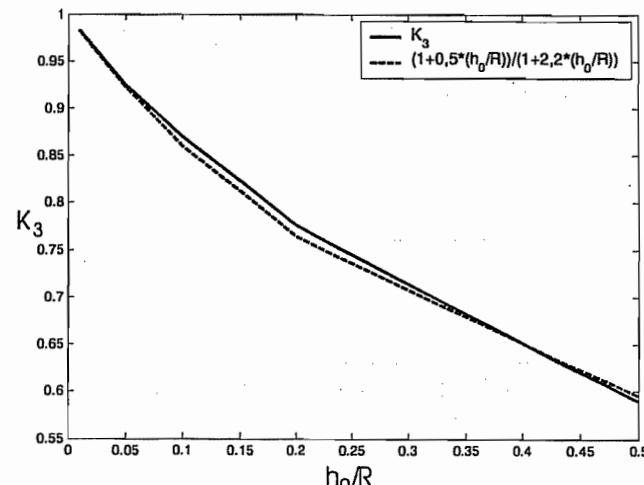


Fig. 6. Coefficient correcteur K_3

L'erreur maximale est de 1,6 %, comme le montre le tableau VI.

TABLEAU VI
ERREUR SUR K_3

h_0/R	10^{-2}	$2 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-2}$	10^{-1}	$2 \cdot 10^{-1}$	$5 \cdot 10^{-1}$
K_3	0,9834	0,9674	0,9234	0,8607	0,7639	0,5952
Err (%)	0,05	0,09	0,17	1,03	1,56	0,97

L'équation est donc,

$$\frac{P}{w} = K_3 \frac{2}{3\pi} Eb \left(\frac{h_0}{R} \right)^{3/2}$$

$$K_3 = \frac{1+0,5 \frac{h_0}{R}}{1+2,2 \frac{h_0}{R}} \quad (72)$$

F. Déplacement de l'extrémité du col

Nous avons vu qu'à $O\left(\sqrt{\frac{h_0}{R}}\right)$ près, la rotation du système se

fait autour du col. Ici, nous ne pouvons plus négliger le second terme de l'équation (58). Celui-ci représente, lorsque le rapport h_0/R atteint des valeurs telles que 0,5, jusqu'à 25% du premier terme, ce qui n'est plus négligeable.

Nous devons par conséquent, calculer un coefficient correcteur pour chaque termes de la relation (58).

Nous connaissons le premier coefficient grâce aux relations (16) et (63).

Le second terme de l'expression nous a donné,

$$w_2 = \frac{3M\varepsilon^3}{EbR} \cdot I \quad (73)$$

où I est donné par l'expression (56).

Le second coefficient se calcule donc par,

$$K_4 = \frac{\varepsilon^3}{2} \left(\frac{h_0}{R} \right)^2 I \quad (74)$$

Le tableau VII nous donne la valeur de ce coefficient correcteur. La figure 7 en donne la représentation graphique.

TABLEAU VII

COEFFICIENT CORRECTEUR K_4

h_0/R	10^{-2}	$2 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-2}$	10^{-1}	$2 \cdot 10^{-1}$	$5 \cdot 10^{-1}$
K_4	0,9950	0,9901	0,9756	0,9524	0,9091	0,8000

La meilleure équation trouvée pour coller à ces points est la suivante,

$$K_4 = \frac{1}{1+0,5 \frac{h_0}{R}} \quad (75)$$

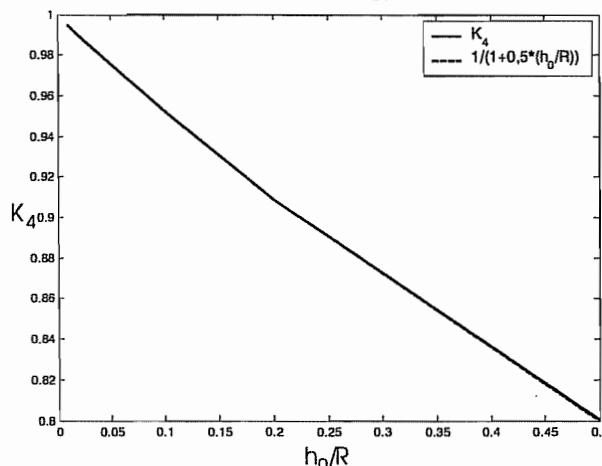


Fig. 7. Coefficient correcteur K_4

L'erreur maximale est de l'ordre de $10^{-11}\%$, comme le montre le tableau VIII.

TABLEAU VIII
ERREUR SUR K_4

h_0/R	10^{-2}	$2 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-2}$	10^{-1}	$2 \cdot 10^{-1}$	$5 \cdot 10^{-1}$
K_4	0,9950	0,9901	0,9756	0,9524	0,9091	0,8000
Err (%)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

L'équation est donc,

$$w = \frac{M R^{3/2}}{Eb h_0^{5/2}} \left[\frac{1}{K_1} \frac{9\pi}{2} - K_4 6 \sqrt{\frac{h_0}{R}} \right] \quad (76)$$

$$K_1 = 1 - \frac{1}{8} \frac{h_0}{R}, \quad K_4 = \frac{1}{1+0,5 \frac{h_0}{R}}$$

IV. CONCLUSION

Nous avons montré qu'il était possible d'obtenir, dans le cas du col circulaire, des expressions analytiques décrivant leur comportement en tant que système élastique. Ceci grâce au célèbre changement de variable de Sommerfeld.

Ces expressions analytiques ne sont cependant pas commodes pour une étude de mécanisme comportant un certain nombre de ces cols. Nous avons donc dérivé des expressions asymptotiques simples permettant ce genre d'étude.

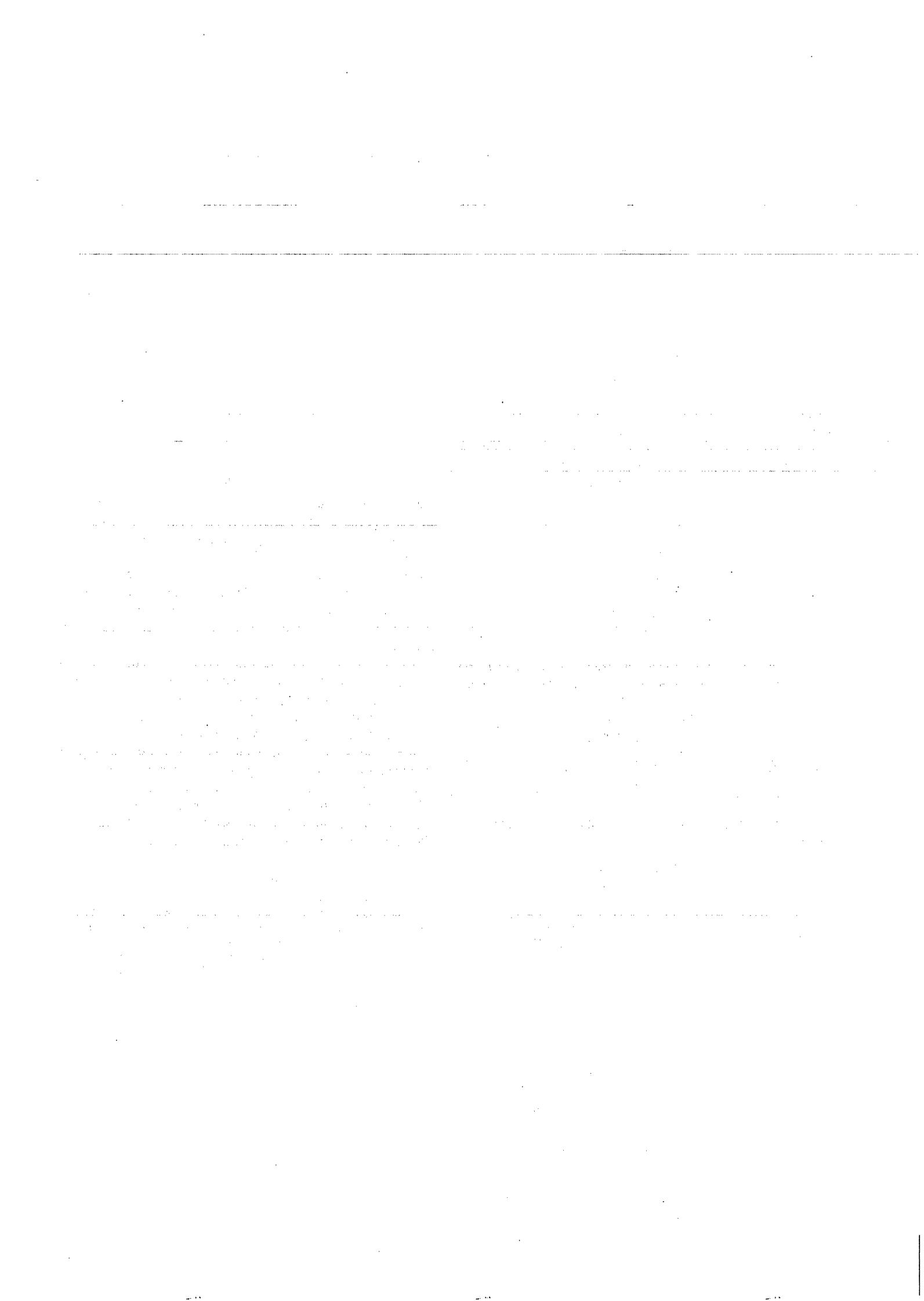
Les expressions asymptotiques obtenues ne sont pas encore suffisantes dans certains cas. Nous les avons corrigées pour tenir compte de leurs imperfections. Nous avons montré que les expressions déduites pour les coefficients correcteurs approchent de façon précise la correction idéale à apporter.

Ainsi, dans tout le domaine de variation du rapport épaisseur sur rayon, nous disposons maintenant d'un modèle simple du col circulaire, déduit analytiquement.

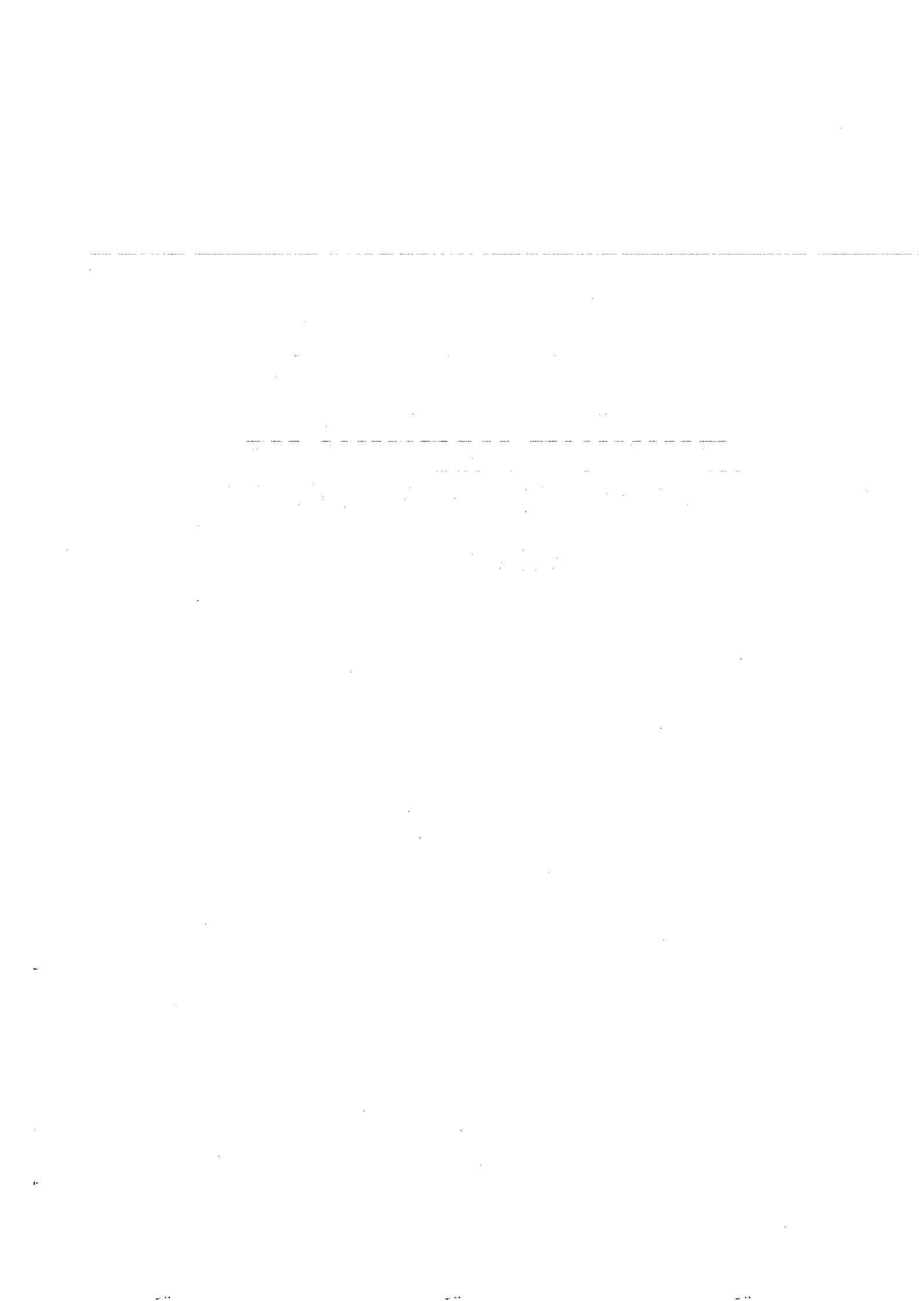
Nous pensons, par toutes ces considérations, que nous avons apporté une contribution intéressante à l'étude des cols circulaires employés comme articulation flexible.

RÉFÉRENCES

- [1] Simon Henein, *Conception des guidages flexibles*, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Collection META, 2001.
- [2] L. Leloup, *Etude de la lubrification et calcul des paliers*, 2^{me} édition, Sciences et Lettres, Liège, 1961
- [3] A. Sommerfeld, *Zur hydrodynamische Theorie des Schmiermittelreibung*, Zeitschrift für Math. und Physik, vol. 50, 1904



5.3. Manufacturing of a circular notch hinge as guiding system by Electrical Discharge Machining



Croquet Vincent¹ (vcroquet@ulb.ac.be), Merken Patrick² (p.merken@ulg.ac.be),
Delchambre Alain¹ (adelch@ulb.ac.be), Debongnie Jean François² (jf.debongnie@ulg.ac.be)

¹Université Libre de Bruxelles, CAD/CAM Department, CPI 165/14, av. F.D.Roosevelt 50, 1050 Bruxelles, Belgium

²Université de Liège, ASMA Department-Manufacturing Laboratory, chemin des Chevreuils 1, 4000 Liège, Belgium

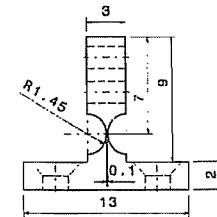
The notch hinge guiding system

Aim of the work

Elaboration of an implantable pump guiding system

Advantages

- absence of relative movement between parts
- possibility of having low speed
- small displacement
- no lubrication need
- high compact resulting system

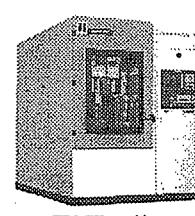


Notch hinge guiding system

The Electrical Discharge Machining by wire (EDMW)

Principle

- based on the different voltage between a metallic piece and the wire
- piece placed in a dielectric solution
- the electrical arc formed burns locally the material



The notch hinge parameters

The deflection angle is function of three parameters

- the radius R
- the thickness h_0
- the material used

Maximum deflection angle

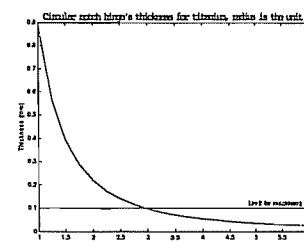
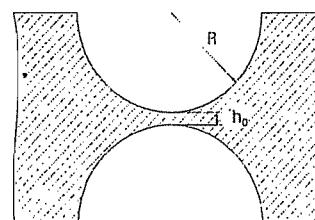
$$\alpha = \frac{3\pi}{4} \frac{\sigma}{E} \sqrt{\frac{R}{h_0}}$$

Bending stiffness

$$M = \frac{2Eb}{\alpha} h_0^{5/2}$$

Torsionnal stiffness

$$\frac{M_t}{\alpha} = \frac{8}{9\pi} Gb \frac{h_0^{5/2}}{\sqrt{R}}$$



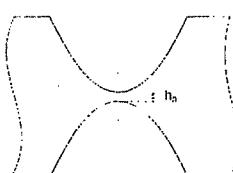
Future work

New profiles

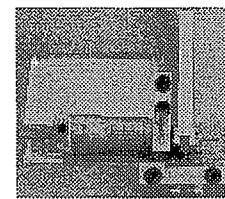
- ellipse
- parabola
- hyperbola
- spline

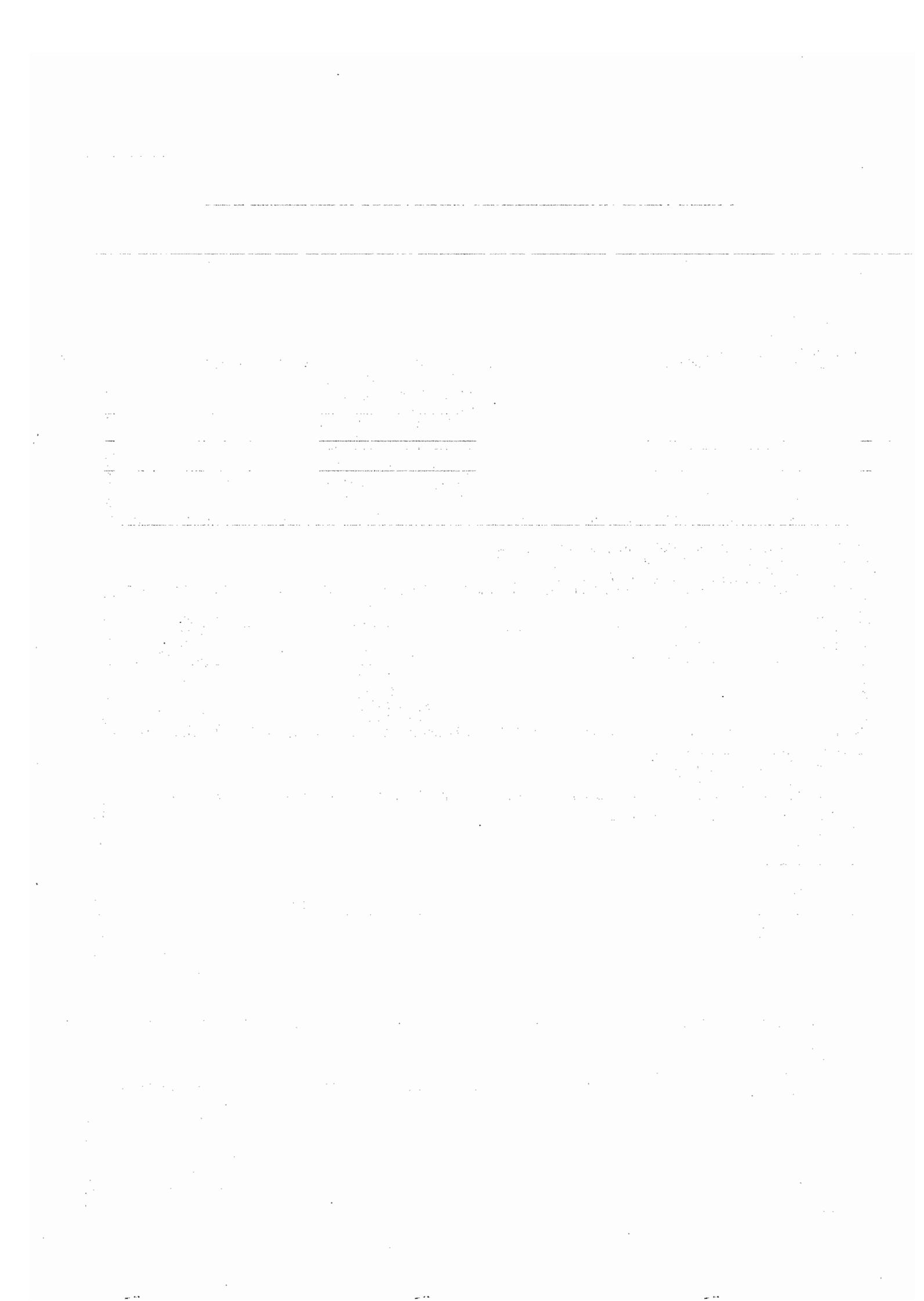
Test bench

- comparison between mathematical modelling and experimental results
- show the accuracy of the manufacturing process
- show the problems inherent in the manufacturing process



Parabolic profile





5.4. A Survey of Electromagnetic Micromotors (IPAS 2003)

A SURVEY OF ELECTROMAGNETIC MICROMOTORS

E. Dereine, B. Dehez, D. Grenier and B. Raucent

Center for Research in Mecatronics (C.E.R.E.M.)

Catholic University of Louvain

Place du Levant 2, 1348 Louvain-la-Neuve, Belgium

ABSTRACT

Miniaturization and function integration within a confined space is becoming increasingly important, for example in space and in medical applications. However, there is an obvious gap between the dimensions of MEMS and mechanical devices : MEMS are not able to produce significant efforts. There is therefore a need for new microactuators to fill this void. Among the various possibilities, magnetic microactuators and systems seem the most able to provide the high forces and torques required. This paper presents and illustrates via examples the main types of electromagnetic micromotors.

INTRODUCTION

Within the context of the *4M- μ pump* project (design of a micropump dedicated to medical applications), we decided to design a micromotor capable of developing an important torque (several hundreds of μ Nm). This pump will be used to treat chronic diseases such as diabetes, via regular micro-injections of medicine. In the same way as a pacemaker, the pump and its tank will be placed under the skin in order to increase comfort. Such a system should be small and reliable.

MEMS (microelectromechanical systems) encompasses the design and manufacture of miniature structures and systems such as sensors, actuators, controllers and pumps in applications ranging from aerospace technology to biotechnology [1].

At the beginning of the 1990's, MEMS emerged thanks to the development of integrated circuit (IC) design processes. Since then, remarkable research advances have been achieved. The concepts and feasibility of more complex MEMS devices have been proposed and demonstrated for applications in such varied fields as microfluidics, aerospace, biomedical, wireless communications, data storage, etc.

As of the end of the 1990's, most MEMS devices with various sensing or actuating mechanisms were manufactured using silicon bulk micromachining, surface micromaching and lithography, electroplating, moulding (LIGA) processes [2].

Parallel to the development of power tools for the fabrication of microdevices, research activities around powerful microactuators have increased continuously. Such actuators are needed for many applications in the rapidly growing markets of microproducts, e.g. miniaturized hard disk drives in personal computers, mobile optical scanners, etc [3].

Over the past decade, different micromotor operating principles, e.g. electrostatic, piezoelectric, magnetostrictive and electromagnetic have been investigated and discussed by researchers all over the world. As a result mainly the electrostatic and the electromagnetic, along with the piezoelectric principle were identified as being the most promising [3].

Electrostatical actuation has been widely used in microactuator developments. It needs neither additional element like coils or cores, nor special materials like shape-memory alloys or piezoelectric ceramics [4]. Generally speaking, electrostatic actuation is more suitable in in-chip actuations (e.g. light deflection and modulation, positioning of heads, etc) since it is easily integrated on a chip, easily controlled, and consumes little power. On the other hand,

other actuation principles may be considered when a high actuation force or power is required by the application [2,4].

Piezoelectric actuation is based on the inverse piezoelectric effect, meaning that when the electric voltage is applied to an asymmetric crystal lattice, the material will be deformed in a certain direction [2]. This type of actuation can be used to produce a very high force at low speed (without gearhead). Biwersi and al. have developed a $20 \times 20 \times 3 \text{ mm}^3$ piezoelectric micromotor whose maximal torque can reach 2 mNm [5].

However, such actuators are not suited for operation in environments where high driving voltages are unacceptable or unattainable. In addition, the fabrication processes for piezo materials and the deposition of thin and thick piezo films on a silicon substrate need to be further developed [2].

Lastly, the electromagnetic force, which is predominant in the macro world, has been considered to be unsuitable for microactuators because it is proportional to the volume of the magnetic material used. However, this theory wrongly assumed that the current densities achievable in micro-coils were of the same order as in the macro-world. So, some planar electromagnetic motors with mm size have been fabricated. It is now generally agreed that even on a submillimeter scale they offer a performance which is difficult for the electrostatic motors to reach [6].

Magnetic actuation is thus used in applications requiring high force or torque, but the materials and the processes need to be further developed. How to efficiently bond or deposit permanent magnet onto the substrate and fabricate electric coils are questions to be answered in the future [2].

The magnetic micromotor seems therefore to be the most able to provide the torque required to ensure the operation of our micropump.

This paper aims to present and to illustrate via examples the main types of electromagnetic micromotors, in particular permanent magnet micromotors. Further it will be shown that the latter prove to be the most advantaged amongst magnetic micromotors when miniaturization is involved.

ELECTROMAGNETIC MICROMOTORS

Variable reluctance micromotors

It is not possible to create a variable reluctance micromotor with a good output. Indeed, if the relative losses in iron stay constant (or even decrease) with miniaturization, the relative ohmic losses increase considerably. Reducing the dimensions therefore has the effect of reducing the available power more rapidly than the losses [7]. In spite of this disadvantage, a certain number of variable reluctance micromotors have been reported in the literature.

A variable reluctance micromotor was developed by Ahn et al. [8]. This micromotor is composed of a $40 \mu\text{m}$ thick $500 \mu\text{m}$ diameter nickel-iron rotor microassembled onto a nickel-iron stator with $120 \mu\text{m}$ thickness and $1400 \mu\text{m}$ diameter.

A toroidal-meander type integrated inductor as shown in Figure 1 is used for flux generations. This particularity allows this micromotor to be manufactured in a fully integrated fashion, mainly using electroplating and lithography techniques.

The motor's geometry, illustrated in Figure 2(b), differs from that of conventional variable reluctance motors. In many micromagnetic actuators, the reluctances of the core and air gap are comparable. So, if the permeability cannot be increased, the geometry must be modified to minimize core reluctance. In this case, the magnetic circuit has been reduced. This allows an increase in the performances of the motor.

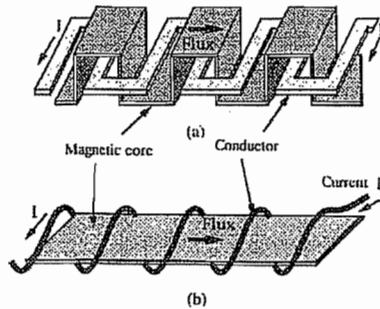


Figure 1. Schematic diagrams of the integrated (a) meander-type inductor and the conventional (b) toroidal-type inductor. (© 1993 IEEE)

The structure of the micromotor consists of 12 stator poles and 10 rotor poles in 3 phases. Each stator pole pair contains 7 turns of toroidal-meander coil. The motor can reach a speed of 500 rpm. This speed limit is due to the limitation of the maximum frequency of the controller used. The predicted torque at 500 mA drive current is approximatively 3.3 nNm.

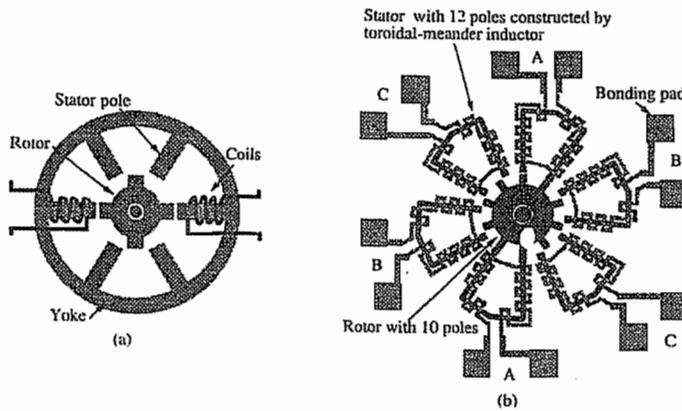


Figure 2. Structure of conventional and modified variable reluctance motors. (© 1993 IEEE)

Based on the same geometry, a 17 mm diameter micromotor was developed by O'Sullivan et al. from IBM [1] (Figure 3). The stator consists of six electroplated Permalloy "horseshoe-shaped" cores with integrated conventional copper windings. Each core has 108 coil turns. The 6 mm diameter rotor was fabricated using electroplating techniques.

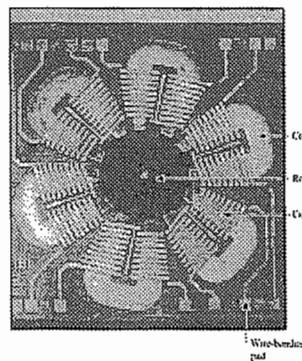


Figure 3. IBM variable-reluctance micromotor.
(reproduced by permission of IBM Technical Journal)

Similarly to the micromotor of Ahn et al., there are 12 stator poles and 10 rotor poles in 3 phases.

The measured torque at 100 mA drive current is 230 nNm. This modest torque is the result of using optical lithography to fabricate the stator. The less-than-90° sidewall angle exhibited by the manufacturing process used causes large clearances between the stator and rotor pole tips and between the shaft and rotor. The friction caused by the few microns of eccentricity in the rotor-shaft interface accentuates the loss of output.

A second micromotor was fabricated using X-ray lithography but no experimental result has been given.

Induction micromotors

The magnetic induction micromotor has not been explored very intensively. This micromotor does indeed exhibit some drawbacks linked to its output and its manufacture. The output of these motors, similarly to the variable reluctance motors, is inversely proportional to their dimensions. Besides, the asynchronous machine is considered as an essentially three-dimensional device, that does not satisfy the requirements of planar technologies [7]. In spite of these disadvantages, some realizations have been reported in the literature.

Williams et al. developed a frictionless induction micromotor [9,10] (Figure 4). The first application for this micromotor was a rotating yaw-rate sensor (microgyroscope), by combining the high rotation speeds of the motor with the high-resolution displacement sensing that micromechanical sensors can achieve. This type of application requires high rotational speeds without the need for high driving torque.

To reach this goal, the motor eliminates friction by levitating the rotor using electromagnetic induction. The application of a high-frequency alternating current to the stator coils induces a current in the rotor, which interacts with the excitation current to produce a repulsive force that levitates the rotor. Rotation is induced in the same manner as in an induction motor, by applying temporally and spatially phase-distributed currents to the stator. This second waveform is superimposed onto the levitation signal.

The 1.3 μm thick planar gold stator coils and the 500 μm diameter 12 μm thick aluminium rotor were fabricated by standard microelectronic patterning techniques.

The predicted torque at 700 mA driving current is 3 pNm. The micromotor achieves a maximum speed of 1050 rpm with controlled levitation heights of 5 to 35 μm . This modest speed is due to three factors : the limited output torque, viscous drag of the surrounding air, and the stiffness of the magnetic suspension.

Fernandez developed a comparable motor with 18 mm diameter and 2 mm thickness [7].

Like the motor by Williams et al., magnetic levitation ensures operation without mechanical friction. The principle is however different since it is achieved by concentric rings of permanent magnet.

In the rotor, the electric and magnetic circuits made up of different materials. A layer of nickel optimizes the trajectory of the magnetic flux while a layer of copper drives the induced currents. These layers, respectively 40 and 60 μm thick, are deposited by electroplating on an aluminium substrate.

The production of the statoric coils is borrowed from IC manufacturing techniques. It is a diphasic winding with a single pair of poles. Its copper conductors have a thickness of 35 μm . The prototype reached a maximal speed of 4500 rpm and developed a torque of 1.2 μNm .

Permanent magnet micromotors

Introduction

Permanent magnet micromotors prove to be the least underprivileged of the magnetic micromotors when miniaturization is involved. The use of micromagnets constitutes their main asset. However, even though they have been the object of numerous studies, the geometry and performances of these miniature magnets remain limited.

The permanent magnet micromotor is currently the only operational micromotor which is the subject of a big scale commercial exploitation. Indeed, to this day, almost all watch motors are Lavet type micromotors [7]. They provide a few hundred nNm while consuming a current of the order of 1 μ A.

Examples of realizations

A permanent magnet micromotor with 1.9 mm diameter and 5.5 mm length is marketed by the Faulhaber society (Figure 5).

It is composed of a three phase winding inserted in a case, making up the stator and of a bipolar NdFeB magnet mounted on the shaft and serving as rotor.

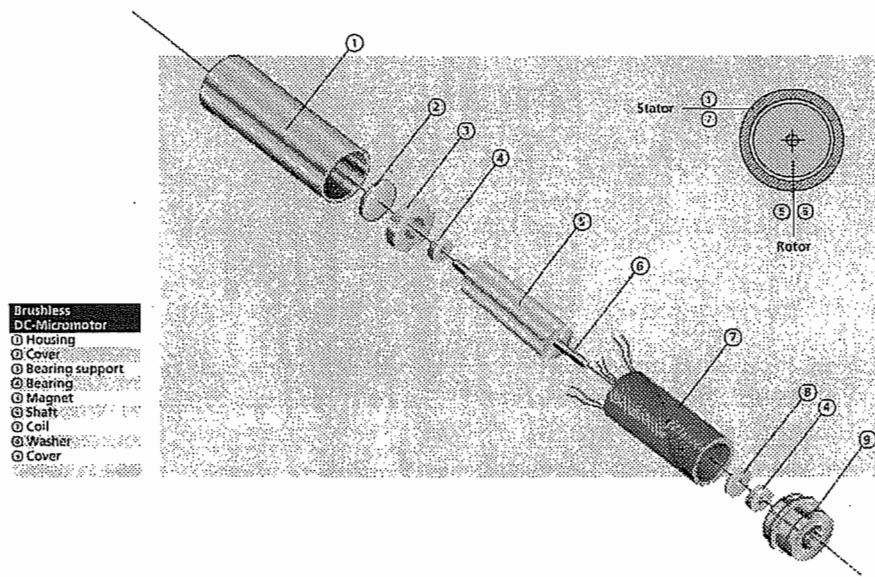


Figure 5. Exploded view of the Faulhaber micromotor. (courtesy of Minimotor S.A.)

Instead of being supported by an iron core, the copper windings are held together in a rigid structure by a thermosetting plastic. As a result, the armature is hollow, and the permanent magnet can be mounted inside the coil. This particular geometry allows a high degree of miniaturization [11].

This brushless micromotor requires an external electric control for current commutation. Thanks to this absence of brushes, only the bearings, smooth in this case, have an influence on the life span of the micromotor.

This micromotor can reach a speed of 100.000 rpm and can develop a torque of 7.5 μ Nm. A 3-stage planetary gearbox manufactured using LIGA technology can be adapted to the micromotor. It exhibits a 47 : 1 reduction ratio and produces a 150 μ Nm torque. A similar brushless micromotor, 3 mm diameter and 8.3 mm length, is marketed by the RMB society [12].

The stator consists of three copper coils mounted inside a nickel-iron stator yoke. Like in the Faulhaber micromotor, the rotor is composed of a bipolar NdFeB magnet mounted on a steel shaft. Both ends of the shaft are supported by bearings, the back-end in most cases by a sleeve bearing and the front (load) end by a miniature ball bearing or sleeve bearing, depending on the type of micromotor.

This motor, which requires electronic commutation, can develop a 24 μNm torque and can reach a maximum speed of 100.000 rpm.

A planetary gearbox, with a maximum reduction ratio 125 :1, can be adapted to the micromotor.

Nienhaus et al. have developed a much broader but thinner micromotor [3] (Figure 6). This motor, commercialized by mymotors & actuators GmbH, is designed for flat applications such as miniaturized disk storage devices. The Penny-Motor – so called because the geometrical dimensions of a German penny served as the design requirements – measures 12.8 mm in diameter and 1.8 mm in length.

Conventional manufacturing methods are applied to all components parts with the exception of the magnetic segments and the coils. The rotor of the Penny-Motor consists of 300 μm thick permanent magnet ring comprising eight segments which correspond to four pair of poles. This component is obtained by injection and compression moulding techniques of plastic-bound NdFeB powder.

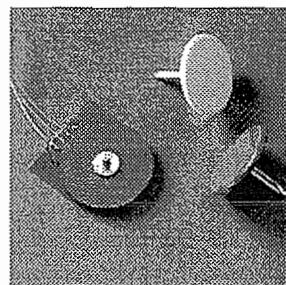


Figure 6. Penny-Motor. (courtesy of Mymotors & actuators GmbH)

Six planar coils are used which are switched together in three strands, corresponding to the three-phase driving current. The coil production is based on deep UV lithography and electroplating, a variant of the LIGA process.

This brushless micromotor develops a 80 μNm torque. A standard deep groove ball bearing is used to reach speeds of up to 20.000 rpm.

A comparable planar micromotor, with 8 mm diameter, has been developed by Gilles and al. [13, 14]. The rotor is sandwiched between two identical stators in order to obtain a more important torque. Each consists of a double-layer 3-phase coil which is obtained by IC manufacturing techniques. The rotor, machined by electrodischarge, is a 500 μm thick SmCo disk with 15 pairs of poles. SmCo type magnets were preferred to NdFeB type because of corrosion which is an important problem with such thin magnets. This motor uses a packaging and jewel bearings from the watch-industry.

It can reach a speed of 85.000 rpm and can develop a torque of up to 100 μNm .

Manufacturing problems

The micro-coil is very useful in micro-system applications such as magnetic sensors [15, 16], actuating devices and many others with or without a magnetic core. But, to this day, it remains one of the most difficult devices to integrate due to technological limitations [17].

Some bidimensional coils can be manufactured in a classical way on a silicon substrate by standard IC processing using, for example, photolithography or evaporated metal deposition techniques [7]. The main disadvantage of these structures is their high electrical resistance due to the low achievable thickness (a few micrometers), which means more ohmic losses to be evacuated and a higher power consumption.

Another recent research field concerns design and realization of 3-D micro-coils. For example, Ahn et al. have been studying different type of thick planar micro-coils (spiral, solenoid and toroidal meander type) realized on silicon wafers using micromachining, electroplating and multilevel fabrications techniques [18]. Spiral inductors fabricated by the UV-LIGA method were described by Sadler et al. [19]. An original method was proposed by Gel et al. to create an out-of-plane micro-coil via a combination of standard planar IC processing technology and post release folding [20].

As we can see, the realization and integration of 3D micro-coils using planar IC processing and/or new fabrication methods remains a challenging task.

Along with the coils, the micro magnet constitutes an essential element of the permanent magnet micromotor. Several manufacturing methods for these micro magnets have already been considered.

The magnets currently used in the industry are generally obtained by mixing magnet powder and a binder. This technique, which can be applied in the production of micro-magnets, presents the advantage of allowing the manufacturing of some magnets with complicated geometries.

Another method, used by Gilles and al. [13] for the manufacturing of their rotor, consist in machining a massive magnet by eletrodischarge. This technique, which is efficient for prototypes, is not adapted to the collective manufacturing of microsystems.

Being aware of this problem, Liakopoulos et al. developed a technique to electroplate thick CoNiMnP-based permanent magnet arrays [21]. The resulting magnet arrays contained 1.500 $40 \mu\text{m} \times 40 \mu\text{m} \times 50 \mu\text{m}$ magnets in a cubic pattern on a $2.5 \text{ mm} \times 2.5 \text{ mm}$ silicon substrate. Cho et al. have shown that the magnetic properties of these electroplated micro-magnets are improved by applying external magnetic fields during electroplating [22]. The energy density of these micro-magnets is comparable to that of commercially available plastic-bonded ferrite magnets.

Lastly, friction, which dominates inertia in the microworld, constitutes a very delicate problem common to all micromotors.

In micro-electromechanical systems, the frictional properties of micro-bearings have a strong influence on the performance of the whole system. Higher friction within micro bearings will result in a lower startup rotation torque and smaller effective output of MEMS. Because of a far lower running power than usual in MEMS, it is very important to reduce the friction between rubbing elements [23].

Micromotors that are in commercial operation use friction bearings or ball-bearings. Friction bearings use the properties of some hard materials, such as nitrides, to obtain a sort of dry lubrication and good resistance to deterioration. Research for new materials as well as surface micromachining technologies are necessary to improve the performances of these bearings.

Other types of bearings, such as those used by Gilles and al. [13], manage to suppress all friction within the micromotor. These magnetic, electric or gas suspensions ensure a steady levitation of the micromotor's mobile parts. This characteristic is especially interesting when the micromotor must operate in a non filtered atmosphere, where dust constitutes a dangerous enemy. The steady levitation of the rotor is however difficult to achieve.

COMPARISON

Several types of electromagnetic micromotors have been described. Their features are summarized in Table 1.

Source	Type	Dimensions $\varnothing \times$ length (mm)	Speed (rpm)	Torque (μNm)	Torque density ($\mu\text{Nm/mm}^3$)
1 Ahn et al.	Var. reluctance	1.4 x 0.12	500	3.3×10^{-3}	1.8×10^{-2}
2 IBM	Var. reluctance	17 x ~0.15	-	0.23	6.7×10^{-3}
3 Williams et al.	Induction	0.5 x ~0.05	1,050	3×10^{-6}	3.1×10^{-4}
4 Fernandez	Induction	18 x 2	4,500	1.2	2.4×10^{-3}
5 Minimotor S.A.	Perm. magnets	1.9 x 5.5	100,000	7.5	0.48
6 RMB S.A.	Perm. magnets	3 x 8.3	100,000	24	0.41
7 Mymotors & actuators GmbH	Perm. magnets	12.8 x 1.8	20,000	80	0.34
8 Gilles et al.	Perm. magnets	8 x ~2	85,000	100	0.99

Table 1. Electromagnetic micromotor characteristics

Seventh column of Table 1 reports the torque density. It shows that the torque developed by permanent magnet micromotors is more than one order of magnitude higher than that developed by the other types of magnetic micromotors. However, contrary to variable reluctance or induction micromotors, their miniaturization remains limited for the technical reasons explained previously. Indeed, Figure 7 clearly shows that the permanent magnet micromotors examined are nearly all above the 100 mm^3 range.

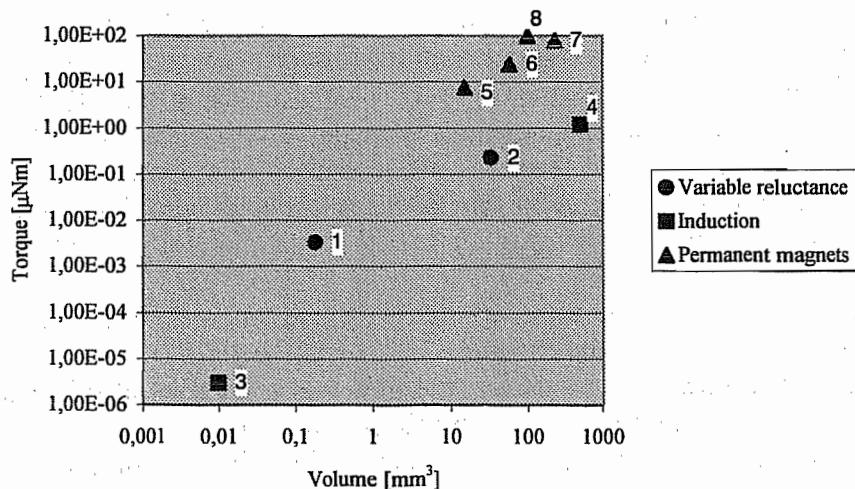


Figure 7. Electromagnetic micromotors torque versus volume

CONCLUSION

Several types of magnetic micromotors, illustrated by some examples, have been described : variable reluctance, induction and permanent magnet micromotors. A comparison of their performances confirms the superiority of permanent magnet micromotors in terms of developed power. These micromotors are particularly well adapted to applications requiring a large torque without needing an extreme miniaturization of the actuator. Indeed, in spite of the qualities of the permanent magnets microsystems, much progress still need to be achieved, notably in the manufacture of the magnets and windings.

ACKNOWLEDGMENT

This work was sponsored by the Belgian Program on Interuniversity Attraction Poles initiated by the Belgian State – Prime Minister's Office – Science Policy Program (IUAP-24) and the *Région Wallonne*. The authors would like to thank O. Cugat from the *Laboratoire d'Electrotechnique de Grenoble (LEG)* for his technical support.

REFERENCES

- [1] O'Sullivan, E. J., Cooper, E. I., Romankiw, L. T., Kwietniak, K. T., Trouilloud, P. L., Horkans, J., Jahnes, C. V., Babich, I. V., Krongelb, S., Hegde, S. G., Tornello, J. A., LaBianca, N. C., Cotte, J. M., & Chainer, T. J. (1998). Integrated, variable-reluctance magnetic micromotor. IBM Journal of Research and Development, 42 (5). Retrieved April 24, 2002, from <http://www.research.ibm.com/journal/rd/425/cooper.html>
- [2] Varadan, V. K., Jiang, X., & Varadan, V. V. (2001). Microstereolithography and other Fabrication Techniques for 3D MEMS. WileyEurope.
- [3] Nienhaus, M., Ehrfeld, W., Stoelting, H.D., Michel, F., Kleen, S., Hardt, S., Schmitz, F., & Stange, T. (1999). Design and realization of a penny-shaped micromotor. Proceedings of the SPIE, 3680, 592-600.
- [4] Fujita, H. (1998). Microactuators and Micromachines. Proceedings of the IEEE, 86, 1721-1732.
- [5] Biwersi, S., Manceau, J.F., & Bastien, F. (1999). Conception et réalisation de micro-moteurs piézoélectriques plats. Bulletin SSC, 30. Retrieved December 17, 2001, from http://www.centredoc.ch/ssc/articlesPDF/cec'98_3.pdf
- [6] Arai, K.I., & Honda, T. (1996). « Micromagnetic actuators ». Robotica, 14, 477-481.
- [7] Fernández Gómez Del Campo, V.M. (1999). Thèse : Contribution aux microsystèmes magnétiques : Micromoteur asynchrone à palier magnétique. Institut national polytechnique de Grenoble.
- [8] Ahn, C.H., Kim, Y.J., & Allen, M.G. (1993). A Planar Variable Reluctance Magnetic Micromotor with Fully Integrated Stator and Coils. Journal of MEMS, 2 (4), 165-173.
- [9] Williams, C.B., Shearwood, C., Mellor, P.H., & Yates, R.B. (1997). Modelling and testing of a frictionless levitated micromotor. Sensors and Actuators A, 61, 469-473.
- [10] Shearwood, C., Ho, K.Y., Williams, C.B., Gong, H. (2000). Development of a levitated micromotor for application as a gyroscope. Sensors and Actuators, 83, 85-92.
- [11] Lopez Torres, E. (2000). Miniaturized electronic motors. Retrieved December 17, 2001, from http://www.ad.tut.fi/aci/courses/76527/Seminars2000/Miniaturized_motors.pdf
- [12] RMB S.A. Website (Smoovy micro drive system). Retrieved December 15, 2001, from <http://www.smoovy.com/>
- [13] Gilles, P.A., Delamare, J., Cugat, O., & Schanen, J.L. (2000). Design of a permanent magnet planar synchronous micromotor. Proceedings of the IEE-IAS (Rome), 1, 223-227.
- [14] Gilles, P.A., Delamare, J., & Cugat, O. Rotor for a brushless micromotor. Retrieved February 22, 2002, from <http://www.sciencedirect.com>
- [15] Liakopoulos, T.M., & Ahn, C.H. (1999). A micro-fluxgate magnetic sensor using micromachined planar solenoid coils. Sensor and Actuators, 77, 66-72.
- [16] Berry, L., Renaud, L., Kleimann, P., Morin, P., Armenean, M., & Saint-Jalmes, H. (2001). Development of implantable detection microcoils for minimally invasive NMR spectroscopy. Sensors and Actuators A, 93, 214-218.

- [17] Coutrot, A.-L., Dufour-Gergam, E., Martincie, E., Gilles, J.-P., Grandchamp, J.-P., Quemper, J.-M., Bosseboeuf, A., Alves, F., & Ahamada, B. (2001). Electromagnetic micro-device realized by electrochemical way. *Sensors and Actuators A*, 91, 80-84.
- [18] Ahn, C.H., & Allen, M.G. (1998). Micromachined Planar Inductors on Silicon Wafers for MEMS Applications. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 45 (6), 866-876.
- [19] Sadler, D.J., Gupta, S., & Ahn, C.H. (2001). Micromachined Spiral Inductors Using UV-LIGA Techniques. *IEEE Transactions on Magnetics*, 37 (4), 2897-2899.
- [20] Gel, M., Takeuchi, S., & Shimoyama, I. (2002). Fabrication method for out-of-plane, microcoil by surface micromachining. *Sensors and Actuators A*, 3301, 1-7.
- [21] Liakopoulos, T.M., Zhang, W., & Ahn, C.H. (1996). Micromachined Thick Permanent Magnet Arrays on Silicon Wafers. *IEEE Transactions on Magnetics*, 32 (5), 5154-5156.
- [22] Cho, H.J., Bhansali, S., & Ahn, C.H. (2000). Electroplated thick permanent magnet arrays with controlled direction of magnetization for MEMS application. *Journal of Applied Physics*, 87 (9), 6340-6342.
- [23] Yao, Z., Zhang, Q., Tao, Y., Zhang, X. (2000). A new approach to measure the friction coefficient of micro journal bearings. *Tribology International*, 33, 485-489.

5.5. Design and test of a circular notch hinge (IPAS 2004)



DESIGN AND TEST OF A CIRCULAR NOTCH HINGE

P. Merken¹, O. Smal², J.F. Debongnie¹, B. Raucent²

¹Université de Liège, Dept. ASMA – Méthodes de fabrication
Chemin des Chevreuils 1 Bât. B52/3, 4000 Liège

²Université Catholique de Louvain, Unité PRM
Place du Levant 2, Bât. Stévin, 1348 Louvain-La-Neuve

ABSTRACT

At the microscale, classical bearings such as ball bearings, sliding bearings and other pivots may be difficult to manufacture. Among all possible solutions to replace them, the notch hinge seems to be very attractive through its many advantages. The major limitation is on the rotation angle. This paper presents a new simplified analytical model for the prediction of the maximum angular displacement and the angular stiffness of a notch hinge. To validate our model, an experimental set-up has been developed.

INTRODUCTION

Miniaturization and integration of functions (mechanical, sensing, control, computing) within confined spaces is becoming increasingly important in modern systems. Examples are mobile phones, wearable sound and video systems, digital organizers, robot endoscopes, micro-pumps for medical application, aerospace equipment, etc. In a micro-system, many functions need to be fundamentally reconsidered. Scale laws make some physical principles useless for microsystems, while other principles, although without interest in macrosystems, may be extremely useful for miniaturized systems.

This is the case of the hinge function. Classical bearings such as ball bearings, sliding bearings and other pivots may be difficult to manufacture at the micro scale. As it is very difficult to manufacture small parts with good tolerances, the guiding precision may be insufficient for a particular application. In micromachines, friction may become very important compared to other forces and torque. In some applications, e.g. in medical devices, cleanliness exigencies practically prohibit the use of greasy lubricants. Consequently, there is an important need to develop frictionless micro bearings. Finally, the assembly of small components may become very difficult, and a device composed of the minimal number of components becomes paramount.

Among all possible solutions, the notch hinge, see fig. 1, seems to be very attractive: no friction, no lubricant required, minimum space required, only one part to manufacture, no assembly, etc.

This last advantage is decisive. Indeed, the best way to simplify the assembly is to avoid, or better, to eliminate any assembly. Of course the major limitation of the presented solution concerns the rotation angle.

The circular notch hinge has been known for some years. It was already used in a profile control mounting, see fig. 2 by R. Pazot [3]. This mounting is called an indicating pointer mounting and Pazot adds that this joint avoids any axis or return spring and so removes any clearance and simplifies the mounting.

Many other applications can be found in the literature as to the use of such hinges. Among other examples, Xu and King have used them in their piezoactuator displacement amplifiers [10], Ryu and al. have designed a XYθ wafer stage based on a flexure hinge [12]. The reader can find many other examples of applications in [6] and [11]. The description of the notch

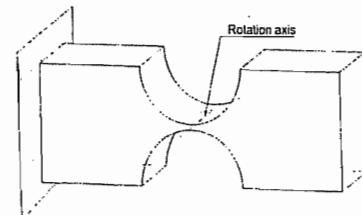


Fig. 1. Geometry of the circular notch hinge

hinge and its modelling was described in early year 1965 by Paros and Weisbord [5]. The notch hinge plays a very important role in a part which includes many other functions. Thus, the modelling of the notch hinge is necessary in order to understand how it works. This paper first presents a new simplified analytical model for the prediction of the maximum angular displacement and the angular stiffness of a notch hinge. This model is then compared to the results of an experimental setup.

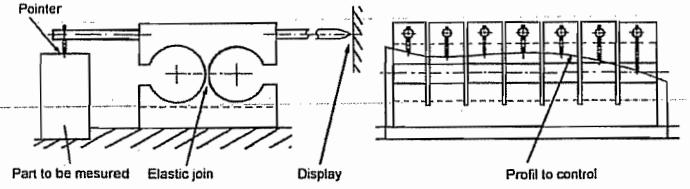


Fig. 2. Profile control mounting

ASYMPTOTIC FORMS

A first step will be to develop formulae for the case where the thickness h_0 (figure 3) is very small compared to the radius R . This gives a valuable insight to the behaviour of notch hinges.

Figure 3 presents the main geometry of the joint. The notch hinge is defined by its radius, R , minimal thickness h_0 , and the thickness in the direction perpendicular to the section b . The X-axis is the axis of symmetry and the Y-axis connects the centres of the two circular arcs, ϕ is the direction angle of a particular point.

The movement of interest is the rotation about the Z-axis. We therefore basically want to determine the total deflection angle α_f of the beam under a given load, M_f . This is calculated by a classical expression of strength of materials [4]. Only the notch hinge zone (which extends from $-R$ to R along the X-axis) is considered to deflect under the action of the bending moment and so, the rest of the beam is assumed to have infinite stiffness. The integral expression is similar to known integrals of lubrication theory [2] and so, Sommerfeld's change of variables [1] is used to solve this expression. After some simple developments, the notch stiffness is found to be

$$\frac{M_f}{\alpha_f} = \frac{2}{9\pi} Eb \frac{h_0^{5/2}}{\sqrt{R}}, \text{ where } E \text{ is the elastic modulus.} \quad (1)$$

$$\text{The maximum stress in the notch is given by } \sigma_{\max} = \frac{6M_f}{bh_0^2} = \frac{4}{3\pi} E \alpha_f \sqrt{\frac{h_0}{R}}. \quad (2)$$

$$\text{Thus, a maximum bending angle can be calculated, depending on the material and on the requested geometry } \alpha_f = \frac{3\pi \sigma}{4 E \sqrt{h_0}} \sqrt{\frac{R}{h_0}}. \quad (3)$$

The other stiffnesses are obtained in the same manner, as fully described in [7].

$$\text{For torsional stiffness (X axis), we obtain } \frac{M_t}{\alpha_t} = \frac{8}{9\pi} Gb \frac{h_0^{5/2}}{\sqrt{R}}, G \text{ being the torsion modulus.} \quad (4)$$

$$\text{Calculation of the stretching stiffness (X axis) leads to } \frac{N}{u} = \frac{1}{\pi} Eb \sqrt{\frac{h_0}{R}} \quad (5)$$

where N is the applied load (stretching load) and u the corresponding displacement.

$$\text{The bending stiffness in the transverse direction (Y axis) is given by } \frac{M_{ft}}{\alpha_{ft}} = \frac{1}{12\pi} Eb^3 \sqrt{\frac{h_0}{R}} \quad (6)$$

where the hinge bends through an angle α_{ft} under the load M_{ft} along the Y-axis.

A shearing effect appears when a load is applied in the Y-axis direction. Figure 4 presents a theoretical case where shear appears, causing the translation of one side of the beam along the

Y-axis, without rotation of the extremities.

The load leads to two effects: bending and shear. Nevertheless, flexion is predominant, i.e., the shear effect may be neglected. After a few developments described in [7], the displacement at the midpoint of the hinge, in the Y-direction, under a load P , being denoted by w , the technological shear stiffness is

$$\text{found to be } \frac{P}{w} \approx \frac{2}{3\pi} Eb \left(\frac{h_0}{R} \right)^{3/2}. \quad (7)$$

Finally, we calculate the displacement for an in-plane bending moment. After some calculations, the following result is obtained

$$w = \frac{M_f}{Eb} \frac{R^{3/2}}{h_0^{5/2}} \left[\frac{9\pi}{2} - 6\sqrt{\frac{h_0}{R}} \right]. \quad (8)$$

The largest term in equation (8) is $\alpha(R).R$ (the first term). This means that the rotation centre is, with $O(\sqrt{h_0/R})$ precision, the centre of the notch hinge.

CORRECTION COEFFICIENTS

The preceding results were established under the hypothesis that the ratio h_0/R remains very small. But, due to machining considerations, there is a lower bound of obtainable hinge thicknesses, so that in actual applications, higher values of h_0/R may prevail, up to 0,5.

The preceding asymptotic expressions are then no longer valid. However, a system of correction factors, depending only on the ratio h_0/R , has been developed by two of the authors [7], in the following way. First, the exact values of the integrals involved in the preceding computations are developed in closed form. The correction factors are then obtained via a numerical approximation scheme.

$$\text{The corrected formula for the bending stiffness is } \frac{M_f}{\alpha_f} = K_1 \frac{2}{9\pi} Eb \frac{h_0^{5/2}}{\sqrt{R}}, \quad K_1 = 1 + 0,137 \frac{h_0}{R}. \quad (9)$$

$$\text{Conversely, expression (3) must be replaced by } \alpha_f = \frac{1}{K_1} \frac{3\pi}{4} \frac{\sigma}{E} \sqrt{\frac{R}{h_0}}. \quad (10)$$

The torsional stiffness correction factor is the same as for the bending stiffness because the same integral is involved. In the same way, a factor K_2 was found for the stretching stiffness $\frac{N}{u} = K_2 \frac{1}{\pi} Eb \sqrt{\frac{h_0}{R}}$, $K_2 = 1 + 0,97 \sqrt{\frac{h_0}{R}}$.

The same factor K_2 holds in the case of transverse bending stiffness. Formula (7) becomes

$$\frac{P}{w} = K_3 \frac{2}{3\pi} Eb \left(\frac{h_0}{R} \right)^{3/2}, \quad K_3 = \frac{1 + 0,5 h_0/R}{1 + 2,2 h_0/R}. \quad (12)$$

$$\text{Finally, relation (8) becomes } w = \frac{M_f}{Eb} \frac{R^{3/2}}{h_0^{5/2}} \left[\frac{1}{K_1} \frac{9\pi}{2} - K_4 6\sqrt{\frac{h_0}{R}} \right], \quad K_4 = \frac{1}{1 + 0,5 h_0/R}. \quad (13)$$

The maximal error, compared to the exact solution, remains below 1,6 % for all the correction coefficients [7].

The manufacturing method influences the roughness of the surface defining the hinge. Although small, this peak to valley height (R_p) corresponds to a non-negligible decrease of the minimal thickness, h_0 (for example, if $h_0=0,1$ mm and $R_p=2,75$ μm , on each face, the difference is about 5,5%). The difference is taken in account as follows:

$$\frac{M_f}{\alpha_f} = K_1 K_r \frac{2}{9\pi} Eb \frac{h_0^{5/2}}{\sqrt{R}}, \quad K_r = \left(1 - 5 \frac{R_p}{h_0} \right). \quad (14)$$

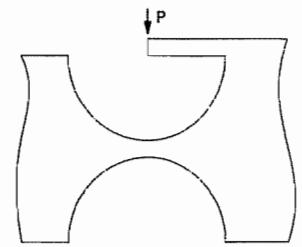


Fig. 4. Shear loading of the beam

EXPERIMENTAL SETUP

Stainless steel hinges with thicknesses ranging from 66 to 175 μm were manufactured using Wire Electrical Discharge Machining (WEDM). The part to be manufactured is placed in a dielectric solution and a voltage difference between a conductive part and the wire produces an electrical arc forming smelts and vaporizing the material locally. As Ryu and al. [9] have explained, WEDM is the best process to machine notch hinges without any serious impact on motion-induced by machining error. The sole error is a body shape error. Tosun and al. [10] have determined a relation between the CLA roughness obtained and the two important parameters in the WEDM : the pulse duration, $t_i(\text{ns})$, and the open circuit voltage, $u_i(\text{V})$. The relation is $R_a = 0,048 t_i^{0,3613} u_i^{0,3213} (\mu\text{m})$. (15)

From measurements, the ratio between R_a and R_p is found to be $R_a/R_p = 0,43$. (16)

Finally, the parameters used in machining the notch hinge, $t_i=0,7 \mu\text{s}$ and $u_i=80\text{V}$, lead to $R_p=4,86 \mu\text{m}$. After the WEDM machining, a shot-peening treatment is applied to the surface, which decreases R_p to about 2,75 μm .

The experimental setup is depicted in figures 5 and 7. The hinge is fixed at one end. A beam (3) is fixed to the other end and the force is applied by a micrometer screw (1). A sensor (2) manufactured by CSEM is used to measure the applied force. The main characteristics of this sensor are described in table I.

Type	LC-01
Nominal Capacitance	$\pm 0,1\text{N}$
Theoretical resolution	<10 μN
Linearity error	0,5 %
Hysteresis	<0,2 %
Rigidity	0,2 mm / 0,1 N
Supply	5 V / 5 kHz

Tab. I. Sensor characteristics

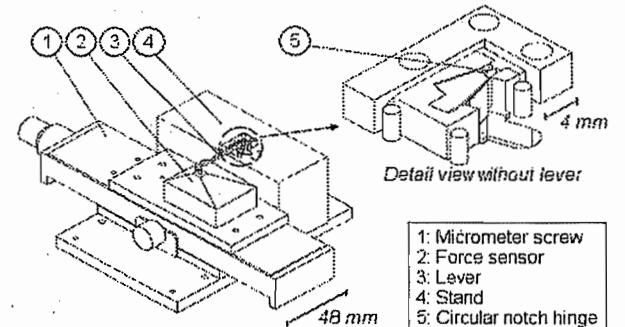


Fig. 5. 3D view of the test bed

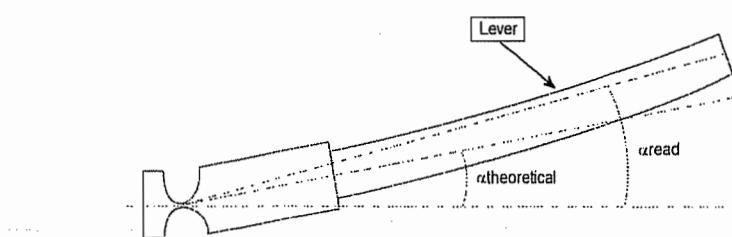


Fig. 6. bending of the lever

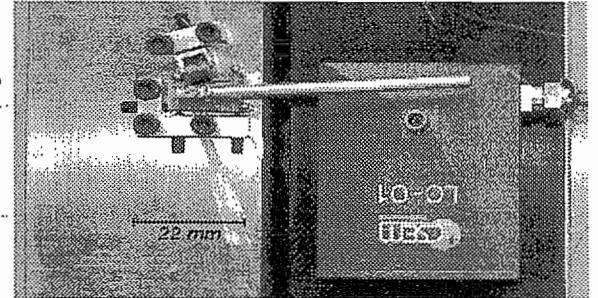


Fig. 7. top view of the test bed

Figure 8 presents the results of the experiment conducted for one particular hinge (0,066 mm thickness). For each angular position of the hinge, three measurements of the return torque were made. The graphs present only the mean values for each position, the standard deviance being below 0,01 Nmm. This is then compared to the torque evaluated using the corrected model (9) ("model 1").

One can easily see that the agreement between measurements and model is good for small angle displacements, smaller than 0,2°. However for large displacements, the model overestimates the experimental data. Three reasons may explain the difference.

The beam used to apply the force to the hinge may bend. The maximum deflection for a straight beam fixed at one end and free at the other is, with P the applied load, l the length of the beam and I the area moment of inertia, $\text{Max } y = -Pl^3/3EI$. (17)

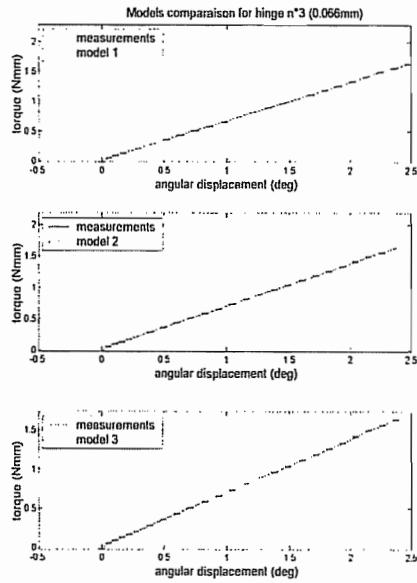


Fig. 8. Model evolution

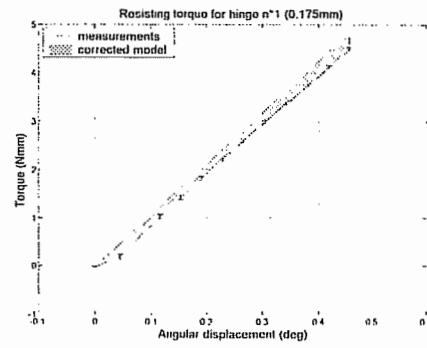


Fig. 9.

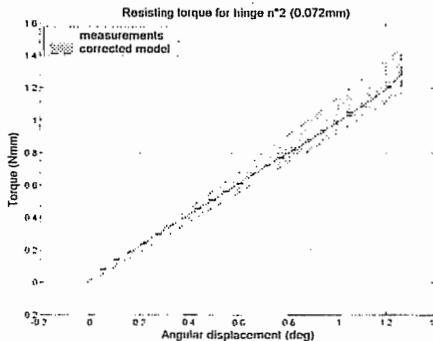


Fig. 10.

The force is not applied at the hinge axis, so this may introduce a torsional moment and thus a displacement which can be modelled as $u_t = \frac{\theta_r(b+d)(l_1+l_2)}{2l_2}$. (18)

with $\theta_r = M_t/R_t$, $M_t = F(b+d)/2$, d the rod diameter, R_t the torsional stiffness of the hinge, l_1 the rod length and l_2 the distance between the centre of the hinge and the attachment point of the rod.

As a consequence, the displacement has three components: one resulting from deformation of the hinge (this one is interesting), a second one from the bending of the lever and the third from the torsion of the hinge. The actual displacement is now $u_{read} = u_t + u_f + u_{theoretical}$. (19)

The last step is now to transform this linear displacement into an angular displacement using the formula $\theta = a \tan(u/(l_1+l_2))$. (20)

In order to compare the measurements with the model, the measured torque must be plotted against the hinge displacement which is $u_{theoretical} = u_{read} - u_t - u_f$. The same procedure can be used for angular displacements. Figure 6 shows the difference between the angular displacement measured at the end of the lever and the effective angular displacement of the hinge.

"model 2" (figure 8) considers these two modifications (bending of the lever and torsion of the hinge).

The hinge surface finish is not perfect. Roughness should be taken into account (it is not negligible compared to the thickness of the hinge). So the theoretical formula can be modified and yields a different boundary for the measurements. Returning to formula (14), another correction coefficient has been introduced, K_r , with $R_p=2,75 \mu\text{m}$.

In "model 3", the complete expression of the torque (14) is considered. The results of this global method are illustrated on figure 8. The influence of the roughness is particularly interesting. The smaller the thickness of the hinge, the more important the influence of the roughness.

This influence can be seen as a reduction of the thickness of the hinge thus inducing a reduction of the return torque. But it is very difficult to determine the actual value of the hinge roughness. We therefore preferred to consider the following scheme : the actual return torque lies between the modelled torque without taking into account the roughness and the torque calculated using the corrector coefficient K_r .

Figures 9 to 12 present the torque comparisons (model versus experiments) for the four different hinges that were manufactured. As explained before, to fulfil the requirements, the measurements should lie in the range defined by the model. This range is smaller for the hinge with a larger thickness. In this case, h_0 has a larger value compared to R_p and so the influence of roughness is less important.

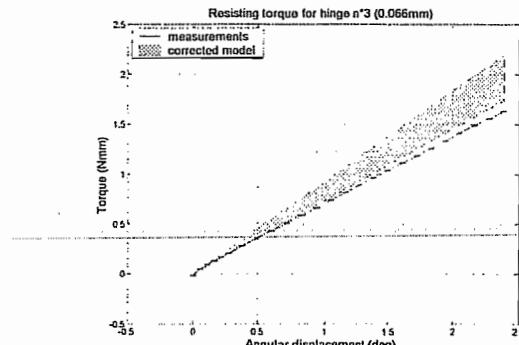


Fig. 11.

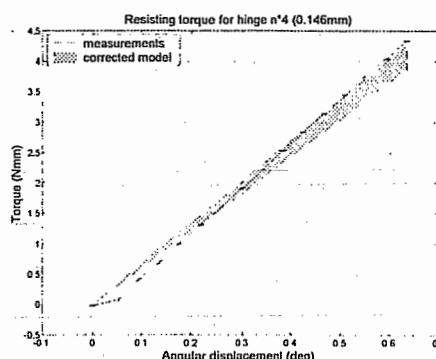


Fig. 12.

CONCLUSIONS

An asymptotic model for the prediction of the maximum angular displacement and the angular stiffness of a notch hinge has been developed. This model is valid for very small h_0/R ratios. However, due to machining considerations, classical ratios could reach 0,5. For this value, asymptotic expressions are not valid and correction factors have been evaluated. Four hinges, manufactured using the Wire Electrical Discharge Machining (WEDM) technique, were used to validate our model. A comparison between experimental results and simulation shows good agreement for small angle deviations but not for angular deviation greater than 0,5 degrees. In addition, agreement for small thicknesses was worse than for higher thicknesses. Three reasons may explain this error: the bending of the rod used to apply the torque to the hinge, the fact that the force is not applied to the hinge axis which introduces torsion, and the hinge roughness. These three factors were modelled and taken into account to correct the model.

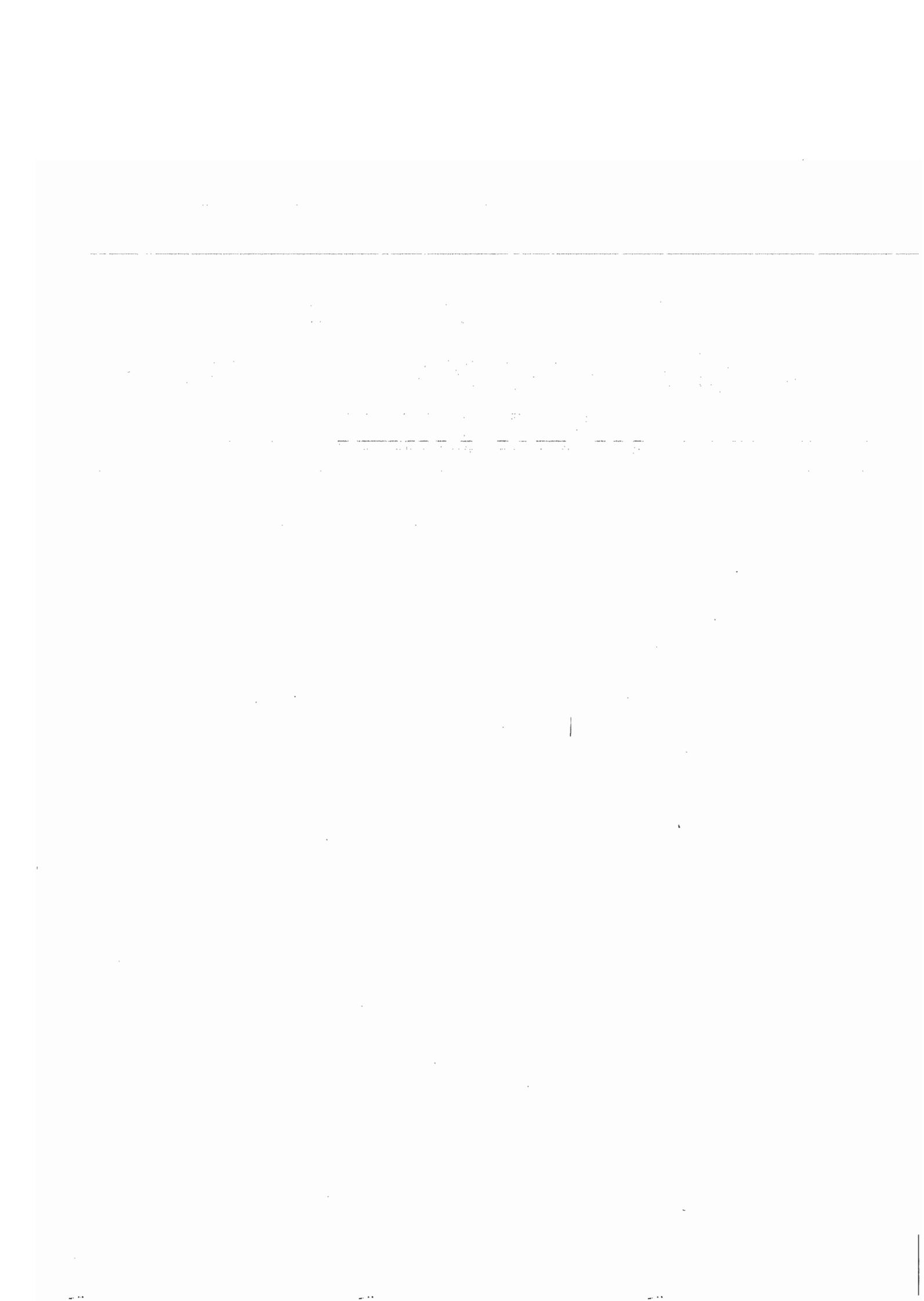
ACKNOWLEDGEMENTS

This work was sponsored by the Région Wallonne within the framework of the 4M- μ pump project and the Belgian Programme on Interuniversity Attraction Poles initiated by the Belgian State – Prime Minister's Office – Science Policy Program (IUAP-24).

REFERENCES

- [1] A. Sommerfeld (1904) "Zur hydrodynamische Theorie des Schmiermittelreibung", in Zeitschrift für Math. und Physik, vol. 50.
- [2] L. Leloup (1961) "Etude de la lubrification et calcul des paliers", 2^{ème} éd., Sciences et Lettres, Liège.
- [3] R. Pazot (1978) "Montages d'usinage. Eléments d'étude", 4^{ème} éd., Desforges, Paris.
- [4] Ch. Massonnet, S. Cescotto (1994) "Mécanique des matériaux", 2^{ème} éd., De Boek, Bruxelles.
- [5] J.M. Paros, L. Weisbord (nov. 1965) "How to design flexure hinges", in Mach. Des., 151-156.
- [6] Simon Henein (2001) "Conception des guidages flexibles", Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Collection META.
- [7] P. Merken, J.F. Debongnie (2003) "Le col circulaire comme articulation flexible", 6^{ème} congrès national de mécanique théorique et appliquée, Gent.
- [8] J.W. Ryu, D.G. Gweon (1997) "Error analysis of a flexure hinge mechanism induced by machining imperfection", in Prec. Eng., vol. 21, 83-89.
- [9] N. Tosun, C. Cogun, A. Inan (2003) "The effect of cutting parameters on workpiece surface roughness in wire EDM", in Mach. Sc. & Tech., 7(2), 209-219.
- [10] W. Xu, T. King (1996) "Flexures hinges for piezoactuator displacement amplifiers: flexibility, accuracy and stress considerations", in Prec. Eng., vol. 19, 4-10.
- [11] N. Lobontiu (2003) "Compliant mechanisms. Design of flexures hinges", CRC Press.
- [12] J.W. Ryu, D.G. Gweon, K.S. Moon (1997) "Optimal design of a flexure hinge based XYθ wafer stage", in Prec. Eng., vol. 21, 18-28.

5.6. Design of an implantable micropump (IPAS 2004)



DESIGN OF AN IMPLANTABLE MICROPUMP

O. Smal¹, P. Merken², V. Croquet³, E. Dereine¹,
B. Raucent¹, J.F. Debongnie², A. Delchambre³

¹Université Catholique de Louvain, Unité PRM

Place du Levant 2, Bât. Stévin, 1348 Louvain-La-Neuve

²Université de Liège, Dept. ASMA – Méthodes de fabrication

Chemin des Chevreuils 1 Bât. B52/3, 4000 Liège

³Université libre de Bruxelles, Service de mécanique analytique et CFAO

av. Franklin Roosevelt 50 - CP165/14, 1050 Bruxelles

ABSTRACT

The implantable programmable micropump is an interesting solution to treat chronic diseases such as diabetes with regular micro-injections of medicine. However, current applications of micropumps are limited by their rather expensive cost. The challenge is therefore to develop a low cost alternative by reducing the number of parts and by simplifying the assembly. As the pump and its tank will be placed under the skin in order to increase comfort, such a system should be small and reliable. In this paper, we present the micropump we developed within the framework of the 4M-μ pump interuniversity project (*Methods and Means for the Miniaturization of Machines*).

INTRODUCTION

The explosion of new technologies and particularly recent innovations in the micro-mechanical and medical areas open up new paths and opportunities to relieve patients' illnesses. Recent studies have shown that there is a steadily growing market for Microsystems, and in particular for drug delivery systems. According to [5] the drug delivery market is estimated at US \$20 billion and is segmented into four categories: oral (53%), inhalation (27%), transdermal (10%) and implanted (8%). The implanted market is growing rapidly. Recently Richard Park [6] reported that the FDA had granted marketing clearance to the first device for diabetics that integrated an insulin Medtronic pump and a Becton dose calculator. These systems constitute a new step in diabetes management which automatically measures the blood sugar concentration then transmits the insulin dosing to the pump. Implanted micro pumps can also be used for the control of refractory cancer pain [7]. An implanted pump permits to reduce the dose and thus to minimize toxicity and "opium" side-effects. However a study performed by ALCIMED [8] clearly showed the lack of medical implanted programmable pump devices that can be used for specific cancer pain treatment. The only programmable pump available on the market is the SynchroMed® from Medtronic based on US patent 6485464 and following. Other uncertainties upon the use of micro-pumps are lack in medical knowledge in pump implantation and maintenance implanted pump.

In the design of the new implanted pump presented in this paper, we try to focus on the cost and in particular on the assembly cost by reducing the number of parts.

PUMP SPECIFICATIONS

The implanted pump should have a streamlined, flat, small and lightweight shape. A flat ellipsoid for example, affords minimal constraints and maximal comfort to the patient. Adaptable medication flow with flow rates around 0.3 ml per hour and injection unit around 0.2μl covers the demands of the patient and the medical profession. A three-day to three month period between two refilling processes affords sufficient mobility to the patient while

three years is the minimum battery life time. Sterilizable biomaterials compatible with body temperature (between 37°C and 42°C), EN-10993 class VI norm [10] and medication are chosen. A negative pressure reservoir and watertightness of the active pump guarantee the safety of the device.

CONCEPTUAL DESIGN

In a micro-system, many functions need to be fundamentally reconsidered. Scale laws make some physical principles useless for microsystems, while other principles, although without interest in macrosystems, may be extremely useful for miniaturized systems. Pump functions have thus to be carefully analysed during the conceptual design. This analysis is reported in [2]. For example, the hinge function requires particular attention:

- classical bearings such as ball bearings, sliding bearings and other pivots may be difficult to realize at the micro scale. As it is very difficult to manufacture small parts with good tolerances, the guiding precision may be insufficient for a particular application.
- Assembly of small components may become very difficult, there is therefore a need for a device composed of a minimal number of components
- In micromachines, friction may become very important compared to other forces and torques.
- In some applications, e.g. in medical devices, cleanliness exigencies practically prohibit the use of greasy lubricants.

Consequently, we chose a notch hinge described and analysed in [1].

DESIGN

The micropump schematic view is illustrated on Figure 1. The rotating piston is actuated by an electromagnet. A circular notch hinge is used as piston bearing and guiding system. Two globe valves (one inside the piston and one inside the casing) are used to control fluid displacement during piston rotation. It is important to mention that the piston and electromagnet core are made of magnetic stainless steel whereas the casing is made of titanium alloy (EN-TiAl6V4).

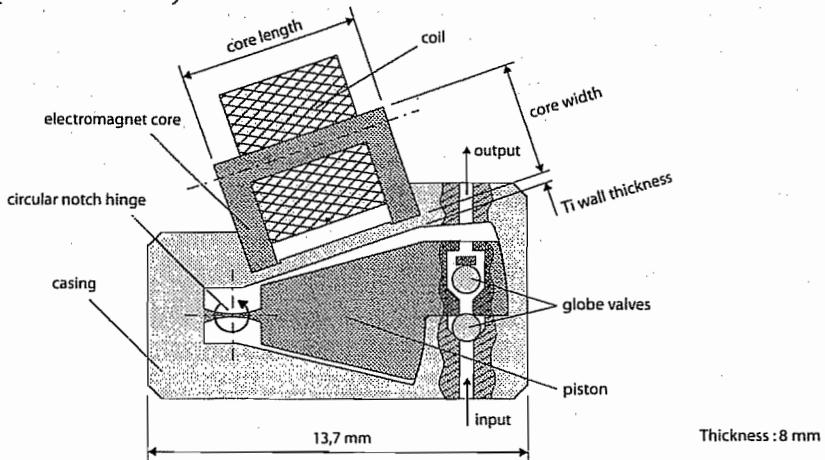


Figure 1 Pump principle.

The micro-pump working principle is illustrated on Figure 2. At the rest position (Figure 2.a.), the piston pushes the input valve ball onto its seat thereby ensuring input valve tightness. This piston thrust is due to the elastic return force of the circular notch. The electromagnet is then powered on to trigger piston rotation (Figure 2.b.). The piston valve ball is pressed onto

its seat and a depression occurs in admission chamber. This depression causes the input valve ball to leave its seat and fluid to fill the admission chamber through the input channel. At the other side of the piston, fluid is constrained to leave the ejection chamber through the output channel. This pumping phase ends when the piston reaches its extreme position (Figure 2.c.). The electromagnet is then powered off and, thanks to the elastic return force of the circular notch hinge, the piston returns to its rest position (Figure 2.d.). The overpressure which occurs in the admission chamber causes the input valve ball to be pressed onto its seat. Fluid is transferred from the admission chamber to the ejection chamber through the piston valve. The piston valve ball is no longer maintained on its seat and fluid is free to flow through the piston valve. This pumping phase continues until the piston reaches its rest position (Figure 2.a.). The full pumping cycle is then ready to start over again.

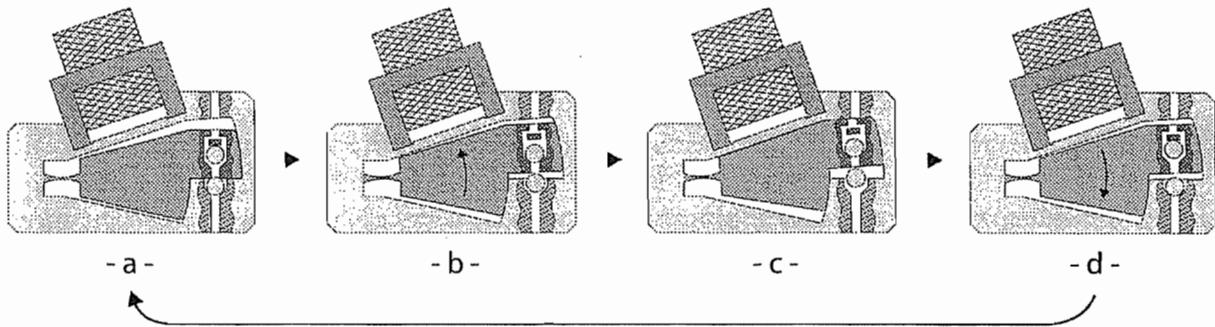


Figure 2. Pump principle

CONSTITUTIVE PARTS

Circular notch hinge

Titanium alloy (TiAl6V4) hinges with thicknesses between 66 and 175 μm were manufactured using Wire Electro-Discharge Machining (WEDM) [9]. The part to be manufactured is placed in a dielectric solution and a voltage difference between the conductive part and the wire produces an electrical arc forming smelts and vaporizing the material locally.

The first step was to determine the geometry of the hinge (mainly the diameter and the thickness) to achieve a good agreement between two exigencies: the hinge has to be sufficiently stiff to produce an elastic return to its original rest position, but not too stiff because it will be actuated via an electro magnet. It has also to use as little energy as possible (the battery has a fixed autonomy). The calculation procedure is described in [3] and [1]. There is also an additional constraint: the technical limitation fixed by the manufacturing process and by the machine in use [9].

Electromagnet

The piston alternating angular displacement is 2 degrees wide and the maximum working frequency is only 1 Hz which is enough to meet medical requirements regarding the flow rate. The main difficulty was to design a micro-actuator able to develop a torque of 2 mNm which is very high for such small systems. This is the torque required to deform the circular notch hinge with maximum deflection and to overcome the pressure. Magnetic actuation seemed therefore to be the most suitable for our micropump [4]. Indeed, it yields a higher force than most other-type actuation principles such as, for instance, electrostatical actuation. In addition, although piezoelectric actuation also develops high forces, magnetic actuation does not require high driving voltages which are unacceptable in implantable systems. Several

types of electromagnetic micromotors were described in [4]. This study shows that the torque developed by permanent magnet micromotors is more than one order of magnitude higher than that developed by the other types of usual magnetic micromotors. However, contrary to variable reluctance or induction micromotors, their miniaturization remains limited for technical reasons explained in [4]. Indeed the permanent magnet micromotors examined are nearly all above the 100 mm³ range.

In spite of the high force developed by permanent magnet motors, the electromagnet was finally preferred to the latter for the following reasons : its very simple structure makes it convenient to miniaturize and the produced force can be easily calculated with some accuracy. In addition, the force developed by the electromagnet can be very high using a small airgap between moving and non-moving parts. In this micropump, the airgap can be limited to very small values as it is related to the piston angular displacement which is only two degrees wide. Finally, the brushless permanent magnet micromotor is more suitable for applications requiring continuous rotation which is not the case here.

Finite element simulations were performed in order to optimise the force developed by the electromagnet and its size. These were done using the finite element software Flux3D® from Cedrat Corporation. The system model (with flux lines and magnetic induction) is illustrated on Figure 3 (non-magnetic elements are not represented as they have no influence on the magnetic flux).

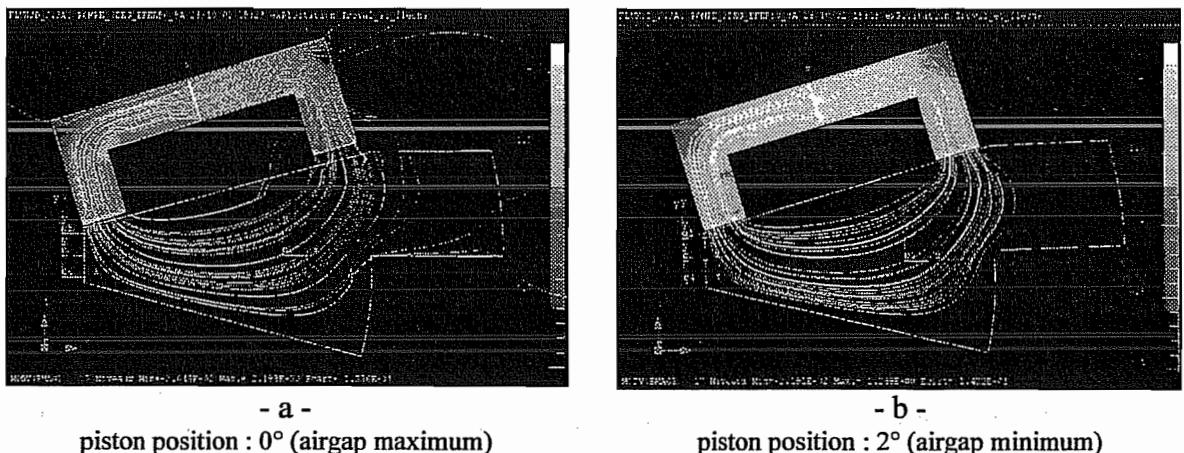


Figure 3. FE simulation

Figure 4 shows a comparison between FE simulation and a simple analytical model for the following parameters: core length: 4.5 mm, core width: 1.0 mm, core thickness: 3.5mm, titanium wall thickness: 0.05mm, current: 335 mA and coil windings number: 400. The torque developed by the electromagnet can be expressed as :

$$\text{Torque} = \frac{\mu_0 A n^2 I^2}{2} \frac{da(\theta)}{a(\theta) d\theta}$$

where :

- μ_0 is the airgap permeability
- A is the surface of the airgap section
- n is the number of coil windings
- I is the coil current
- θ is the piston angular displacement
- $a(\theta)$ is the airgap length

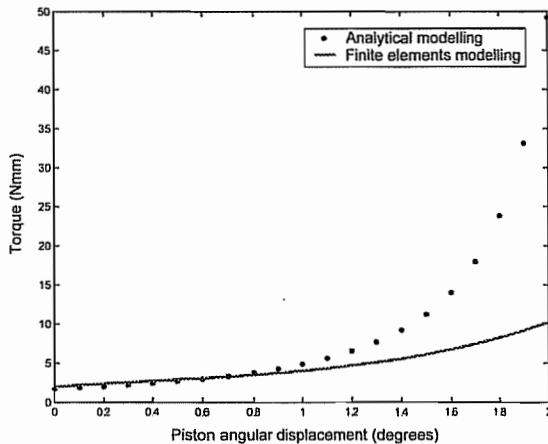


Figure 4. Comparison between FE simulation and analytical model

This shows that analytical and finite element model agree for low piston angular displacement. Differences between the two models for high θ values are due to magnetic saturation which is not taken into account in the analytical model.

It plainly appears that finite element models are necessary to accurately foresee the electromagnet behaviour.

CONCLUSIONS

Figure 5 presents the pump prototype without tank and battery. Materials should satisfy class VI certification from the 10993 European norm which cover medical devices. The choice was made to use a well known titanium alloy (EN-TiAl6V4) for all non magnetic parts and EN-X20Cr17 stainless steel for the magnetic parts. The valve balls are made from ruby so as to obtain the most perfect possible surface state, and thereby ensure an optimal watertightness. The titanium casing was milled using a classical 5 axis milling machine. The notch hinge guiding system, piston and electromagnet core were manufactured using Wire Electrical Discharge Machining (WEDM). Among all the parts, the notch hinge was the most difficult to manufacture because of the hinge dimensions and tolerances.

The main disadvantage of this pump is the peripheral leakage which still remains between the moving part and the housing. Nevertheless, the pump is compact, does not require lubrication nor release particles, provides a precise guiding and is composed of a small number of parts. Reduction of part number is very important because it simplify assembly process and increase system security.

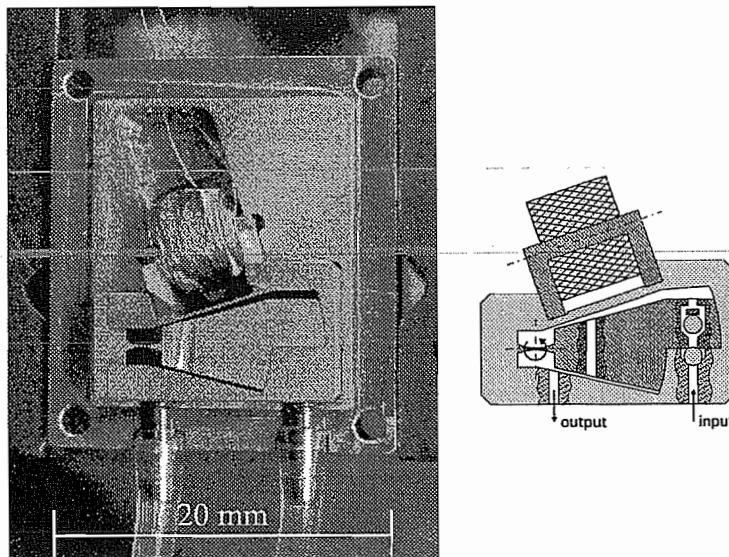


Figure 5. Prototype

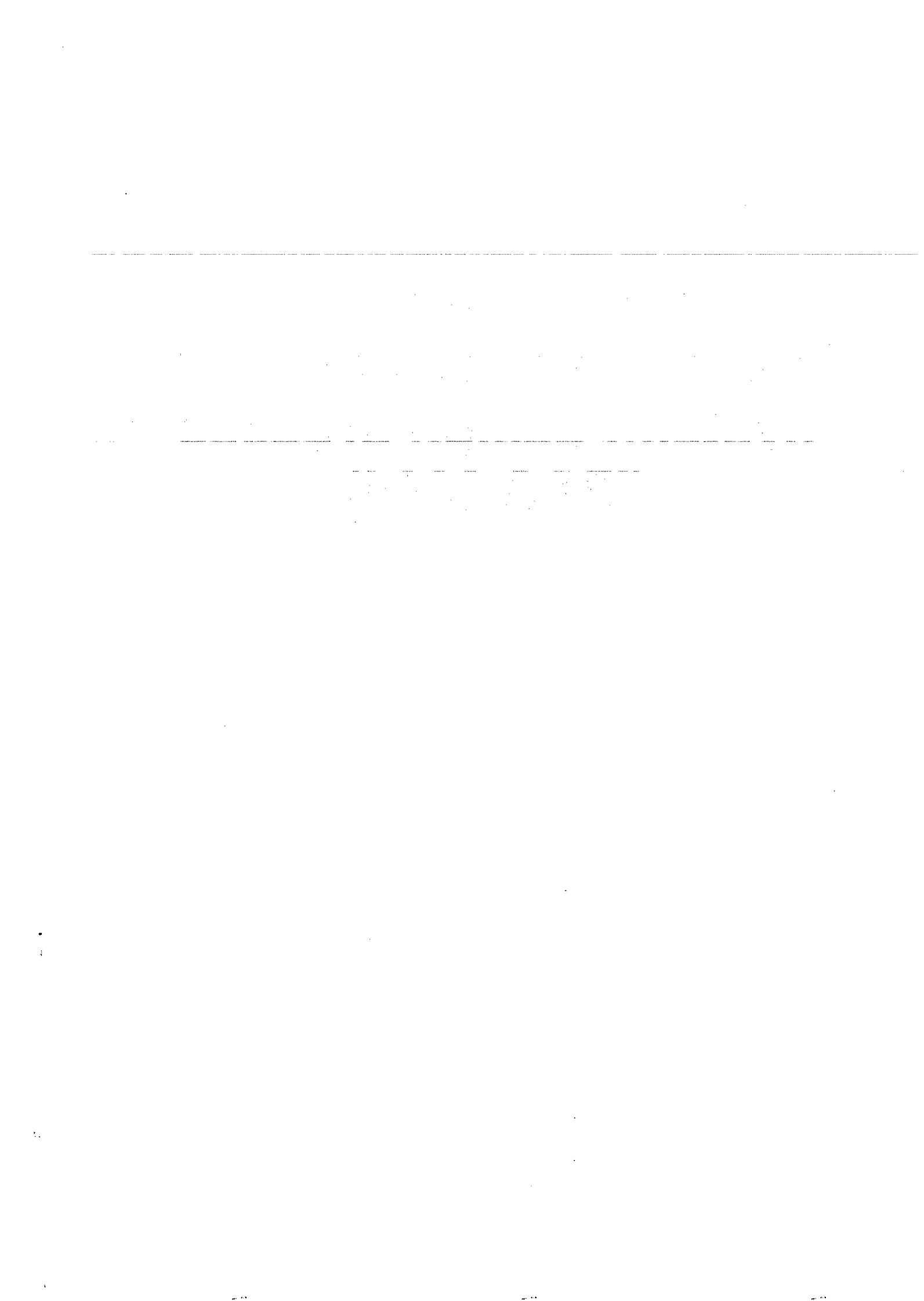
ACKNOWLEDGEMENTS

This work was sponsored by the Région Wallonne in the frame of the 4M- μ pump project and the Belgian Program on Interuniversity Attraction Poles initiated by the Belgian State – Prime Minister's Office – Science Policy Program (IUAP-24).

REFERENCES

- [1] P. Merken, O. Smal, J.F. Debongnie, B. Raucent, "Design and test of a circular notch hinge", Proc. of the International Precision Assembly Seminar (IPAS'2004), Bad Hofgastein, Austria, 12-13 February 2004
- [2] V. Croquet, A. Delchambre, "Innovative implantable drug delivery system: design process", Proc. of the International Precision Assembly Seminar (IPAS'2004), Bad Hofgastein, Austria, 12-13 February 2004
- [3] P. Merken, J.F. Debongnie, "Le col circulaire comme articulation flexible", 6^{ème} congrès national de mécanique théorique et appliquée, Gent, 26-27/05/2003
- [4] E. Dereine, B. Dehez, D. Grenier, B. Raucent, "A survey of electromagnetic micromotors", Proc. of the International Precision Assembly Seminar (IPAS'2003) Bad Hofgastein, Austria, March 2003
- [5] J. Malcolm Wilkinson, "Medical market for Microsystems", MSTnews, n4 4, 2002
- [6] R. Park, "FDA approves integrated glucose monitor-insulin pump", IVD Technology, September 2003
- [7] F. Reidenbach, "The lancet Oncology", vol3, July 2002
- [8] Alcimed, "Première analyse du potentiel de valorisation des micropompes développées par le Consortium représenté par Benoît Raucent pour la délivrance d'analgésiques", 18 Juin 2003
- [9] V. Croquet, P. Merken, A. Delchambre, J.F. Debongnie, "Manufacturing of a circular Notch Hinge as Guiding System by Electrical Discharge Machining", First Symposium on nanomanufacturing, Boston, USA, - April 2003
- [10] NBN EN ISO 10993 : Evaluation biologique des dispositifs médicaux, 1997

5.7. Innovative implantable drug delivery system: design process (IPAS 2004)



INNOVATIVE IMPLANTABLE DRUG DELIVERY SYSTEM: DESIGN PROCESS

V. Croquet, A. Delchambre

Service de mécanique analytique et CFAO
Université libre de Bruxelles
Avenue F.D. Roosevelt 50 (CPI 165/144), 1050 Bruxelles

ABSTRACT

This paper presents the procedure followed to design an innovative implantable drug delivery system. This drug delivery system consists in a low flow pump which shall be implanted in the human body to relieve pain. In comparison to classical known solutions, this pump presents many advantages of high interest in both medical and mechanical angles. In a first section, are described the specifications which would characterize a perfect delivery system from every points of view. This concerns shape, medication, flow, autonomy, biocompatibility, security and sterilization ability. Afterwards, an overview of existing systems is proposed as a decisional tree. Positive displacement motorized pumps are classified into three main groups: the continuous movement group, the fractionated translation group and the alternative movement group. Most systems are described and the different problems which are specific to these mechanisms are presented. Since none of them fully satisfy the specifications, an innovation is justified. In order to successfully achieve this, a particularly creative process was implemented. The decisional tree is therefore extended by adding new principles: fractionated refilling and fractionated injection within the fractionated translation movement group, spider guiding system within the alternative translation movement group, rotational bearing guided device and notch hinge guides device in the alternative rotation movement group. The paper disclaims the most relevant design phases of each system. The advantages and drawbacks of the new proposed systems are highlighted and discussed on the basis of several points of view: design, actuation, assembly...

INTRODUCTION

The explosion of new technologies, and particularly recent innovations in micro-mechanical and medical areas, opens new ways and offers new advisability of relieving patient's disease. Nevertheless, recent surveys made in collaboration with medical scientists have clearly shown the lack of medical implantable pumping devices. The analysis displayed in this paper introduces a recent specification sheet drawn up owing to the collaboration of medical scientists, which proves the medical profession share for such devices. State of the art of the different existing devices points out the gap between those and patient's needs. Thought having been developed in the aim of satisfying these needs, innovative designs are presented and classified in the aforementioned decisional tree. Detailed advantages of the various systems are presented and listed in a way to determine the most suitable device. Devices are detailed from the mechanical, electrical and medical point of view. Moreover a 10:1-scale mock up and a 1:1-scale prototype have been build and tested.

SPECIFICATION SHEET

Collaboration between medical practitioners and engineers has allowed precisely pointing out the optimal way to satisfy patient's requirements regarding implantable drug delivery devices. Table 1 presents a typical specification sheet which could be inferred from this analysis.

Shape, dimensions, weight	Medication flow	Autonomy	Implantation and compatibility	Security
No sharp edges e.g. flat ellipsoid	Reference ² : 0.3ml/h – 7.5 ml/day Minimum ² : 0.1ml/day	Refilling ² delay : 3 days to 3 month (depending on applications) Battery life time : more than 3 years	Working temperature: 35-42°C Pump housing materials ³ : class VI (>29 days) Inner parts of the pump ³ :medication compatibility Complete sterilization ability	Negative pressure reservoir Active pump
Maximum dimensions: 40mm*25mm*15mm	Injection unit ² : 0.2 µl			No leak at rest
Weight : less than 150g				

²Alcimed (French healthcare group – 57, Bd de Montmorency 75016 Paris)

³ EN-10993 norm

Table 1 Specification sheet

Streamlined, flat, small shape, flat ellipsoid for example, and light weight, induce minimal constraints and bring maximal comfort to the patient. Flexible medication delivery allowing flow rates of about 0.3 ml per hour and injection unit roughly of 0.2 µl, covers patient's needs and medical practitioner's requirements. Three days to three month a delay between two refilling actions allows enough mobility of the patient, whereas 3 years timespan must be regarded as being the minimum battery life. Biomaterials admitting sterilization, satisfying EU-10993 class VI standard and compatible with medication are selected. Body temperature (between 37°C and 42°C) does not raise any problem. A negative pressure reservoir and appropriate non return valves insure the security of the device, especially if a peculiar layout completely avoids any leak at rest.

STATE OF THE ART

Known implantable pumping systems always consist in a medication storage device, a pumping system and a perfusion system. The paper presented here, focuses on the pumping systems only, leaving other systems for later analysis. Pumping system can be separated into hydraulics, guiding and actuating, as shown on figure 1. Hydraulics itself can be split into a mechanical principle, a distribution system and a sealing system.

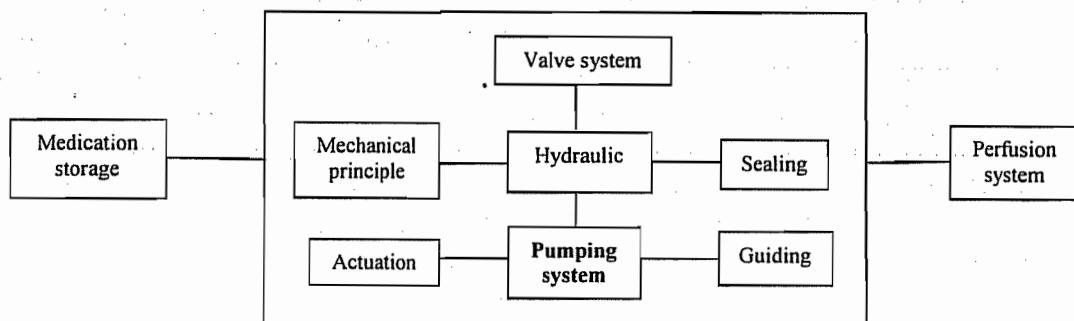


Fig. 1 Different parts of an implantable drug delivery device

A classification chart which summarizes existing *implantable drug delivery systems* is presented in figure 2. Because of lethal risk, simple *accumulators (under pressure systems)* are ruled out with regard to actually *motorized pumps*. *Non volumetric devices* are equally excluded because no metering of drug dispensed volume is provided. Finally, *positive*

displacement devices are separated into a *continuous motion group* and an *alternative motion group*.

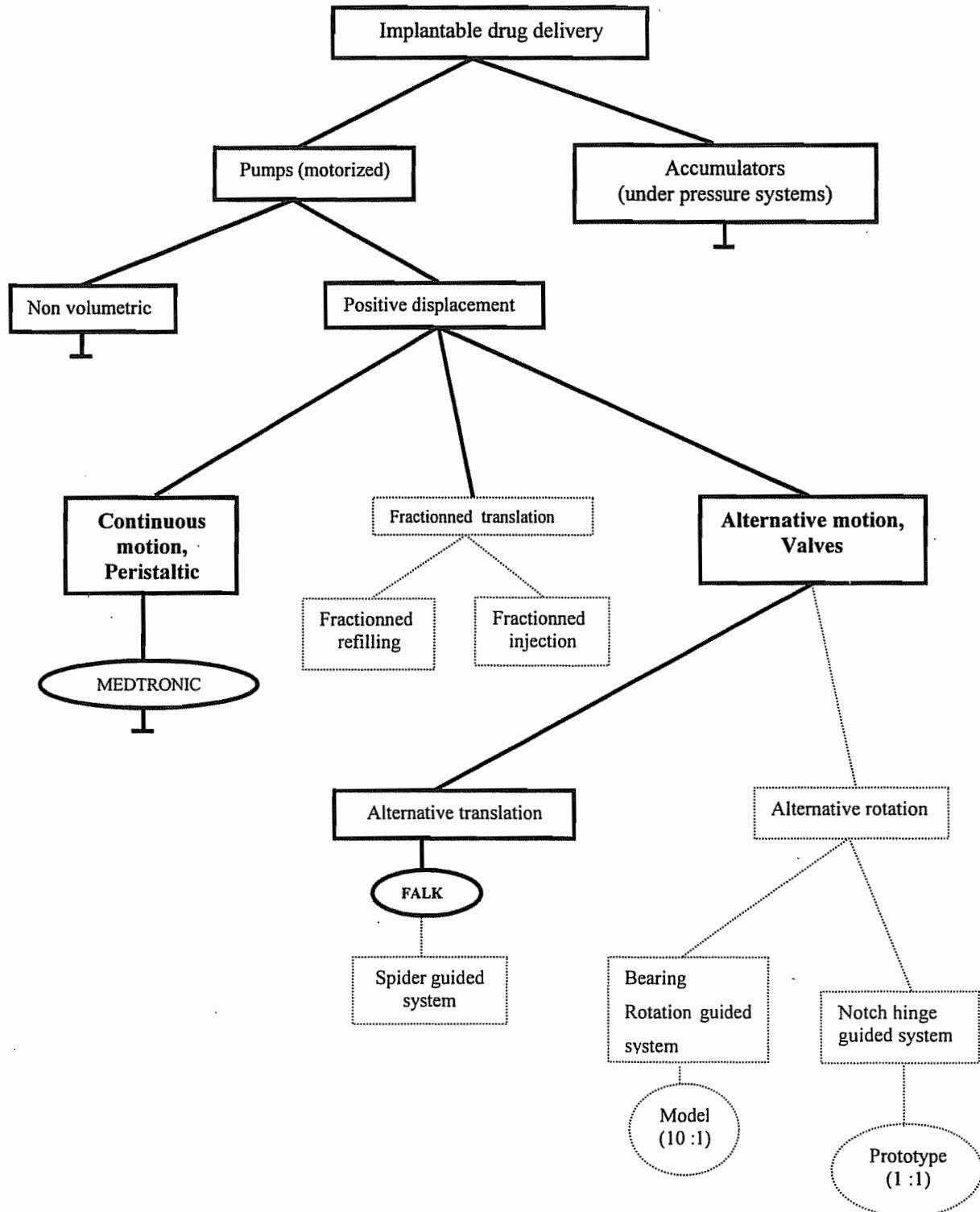


Fig. 2 State of the art of pumping devices

The *Peristaltic principle* is represented by the *Medtronic's Synchromed pump* which is the only programmable pump on the market. In such a pump, rollers revolving motion (figure 3) induced by a rotary actuator crushes a tube containing the medication agent; this tube is

connected to the negative pressure tank and the rollers motion promotes medication flow from the tank to the perfusion system.

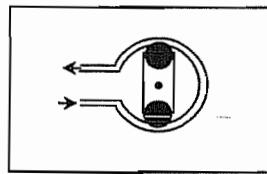


Fig. 3 Peristaltic pump principle

The main advantages of this peristaltic principle lie in an absence of valves, an absence of any potential leakage problems from the tank to the perfusion system. On the other hand, problems result from the energy consumption peak required each time a roller begins squeezing the tube after a revolution. This considerably reduces the battery life. Moreover, the high number of components needed due to the high reduction ratio between the high speed electric motor and the rollers pair, involves tremendous manufacturing and assembly problems. The overall dimensions and the total cost of the device is thus unaffordable for most patients.

The Alternative translation motion group is well represented by the US 4,568,250 and the US 6,193,497 Falk patent. The simplest principle to inject a small amount of liquid, namely the “syringe principle” has to be improved to avoid contamination risks arising owing to the piston movement in an open chamber (1) as shown in figure 4.

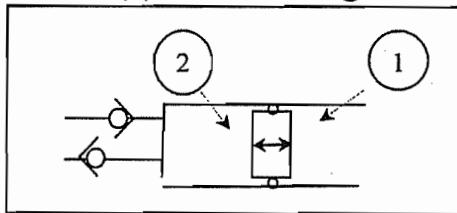


Fig. 4 Principle of a syringe

The twin chamber concept introduced by Falk and presented in figure 5 allows avoiding such contamination problems and offers many other advantages.

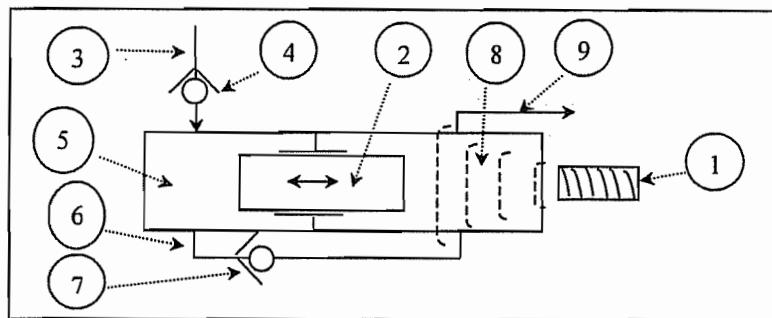


Fig. 5 Alternative translation movement (Falk)

The simultaneous suction and delivery phases occur when the actuator (1) causes the displacement of the mobile part (2) toward the right. The admission valve (4) then opens and the transfer valve (7) then closes. The admission chamber volume (5) increases and the backflow chamber volume (8) decreases. This causes a fluid flow through the exit tubing (9). The transfer phase occurs when the actuator is released and a return spring causes the movement of the mobile part toward the left. The admission valve is then closed and the

transfer valve opened: the admission chamber volume is decreasing and the backflow chamber volume increasing: fluid flow occurs through the transfer channel (6). Main Falk's pump advantages are the absence of contamination risks from the outside and the hermetically sealed pumping system, the electromagnet acts on the piston through the container wall. On the other hand, problems result from friction between the moving part and the housing which can induce fluid contamination by particle release and wear, decreasing the device autonomy; unavoidable and variable leakage between the moving part and the housing impairs metering precision, the presence valves decreases security and the high parts count which increases the total cost of the system. In conclusion, a peristaltic pump uses an interesting principle which has already widely proved itself outside the human body, through a lot of medical applications and also inside the human body, through the Medtronic's Syncromed pump. This device however displays the drawbacks of its high energy consumption and its high number of components which drastically increase the total cost of the device. On the other hand, the Falk's pump is an interesting device also avoiding contamination from the outside by the use of two variable volume chambers, but it remains harmed by major friction and leakage problems. These different problems clearly show the gap between known devices and medical practitioners' and surgeons' needs.

INNOVATIVE DESIGNS

Innovative design phases have been undertaken with the aim of decreasing this gap. As and when the work proceeds, values and limits of various concepts have been grasped through analysis, simulations or tests , which allowed going each time a bit further. Successive suggested innovations are described here below.

The Spider Guided System shown in figure 6, takes advantage from Falk's principle but is on the way of canceling its major drawbacks.

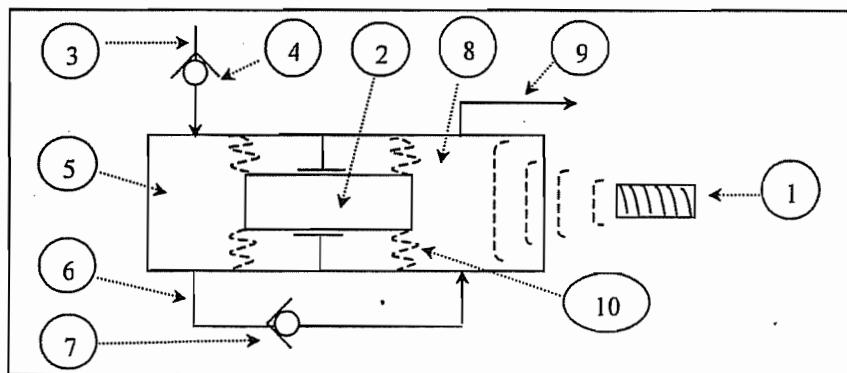


Fig. 6 Spider guiding system

The suction and delivery phase as well as the transfer phase are similar to those met in Falk's pump. Spider guiding systems avoids friction between the moving piston and its housing, removes contamination problems by particle release and specially wear, thus improving the metering precision. Moreover, spider guiding system could to advantage be used as one way valves. On the other hand, thou better controlled, leakage remains, and, spider stiffness increases energy consumption and decrease the device autonomy; parts count is still high and spiders manufacture, manipulation and assembly aren't easy at such small dimensions.

The Bearing Rotation Guided System, schematically displayed in figure 7 is a rotational motion adaptation of the Falk's system thought to improve the moving part guiding quality.

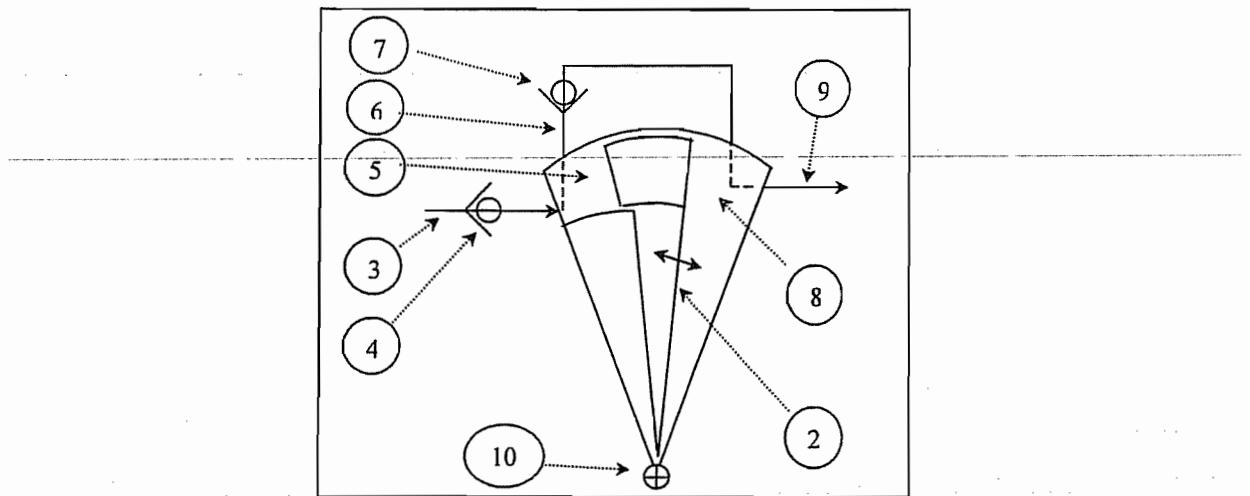


Fig. 7 Rotation Guided Bearing System

Rotational motion of the moving part (2) again induces suction/delivery phase and transfer phase similar to these of Falk and Spider Guided System pumps.

The Vane System, schematically described in the left part of figure 8, though quit similar to the previous one, offers some improvements.

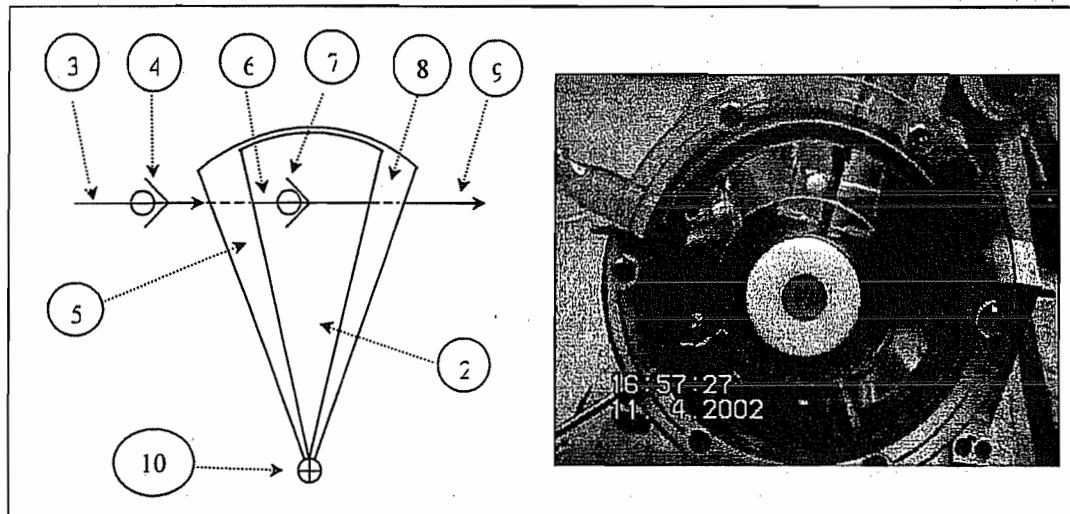


Fig. 8 Vane System

Contamination from outside remains avoided, manipulation and assembly of very small parts like spiders disappears, medication fluid procures lubrication, parts count is reduced, and absence of spider deformation forces, reduces power consumption and thus increases autonomy. However, leakage problems between moving part and housing still remain; moreover, bearing precision and dimensions lead to new difficulties. Effective pumping steps, correct valve work and some interesting phenomenon have been observed on a 10:1-scale Plexiglas mock-up, which can be seen in the right part of figure 8. Security of the device is increased by the opportunity of locking the suction valve at rest position; parts count is

reduced. However, no 1:1-scale prototype has been built because of the problems involved by the tiny bearing: handling, assembly and insertion of shaft and bearings, their accuracy and unavoidable local wear risks of the housing due to small vane angular displacements (about 2°) led to a last development.

Notch Hinge Guided System, a scheme of which appears in the left part of figure 9, keeps the improvements of the Vane System but removes the bearings problems.

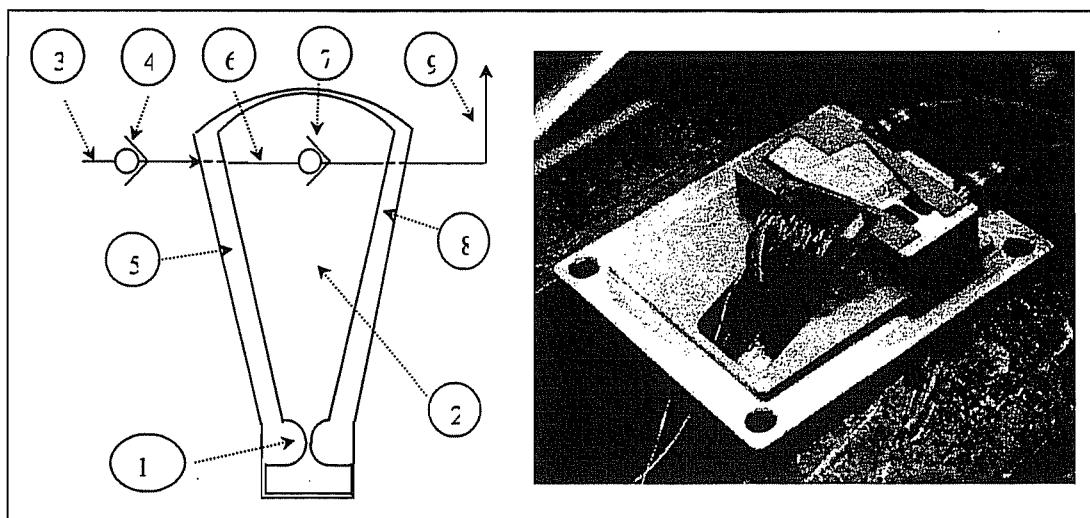


Fig. 9 Notch Hinge Guided System

Location accuracy is now gained even for small angular displacements, lubrication problem totally disappears and a still more reduced number of parts, lead to a highly compact, secure and cheap system. Pumping steps, valves work and a number of interesting features, could be analysed on a 1:1-scale titanium prototype which has been built and can be seen on the photograph of the right part of figure 8. Machining, handling parts and assembly become quite easy. Unfortunately, leakage problems however still remain, making flow metering still inaccurate.

CONCLUSIONS

One can state that:

- The Peristaltic Principle, used by the only programmable implantable pump now on the market doesn't satisfy medical practitioner's needs;
- Improvements brought by US 4,568,250 and US 6,193,477 Falk patents could allow new designs and reduce the gap between peristaltic pump and these needs;
- The spider Guided System avoids friction between piston and bore but is hindered by spiders stiffness;
- The Bearings Rotation Guided System avoids energy consumption due to spiders stiffness and drastically reduces the number of parts;
- The Notch Hinge Guided System avoids bearings problems, increases positioning accuracy and offers a highly compact pumping device.

Design developments are displayed by dotted lines in the figure 2 and a comparison of the different systems is given in table 2.

Finally, an additional step in the design process is required because of remaining leakage problems.

	<i>Synchronized Peristaltic Pump (Medtronic)</i>	<i>Falk's pump</i>	<i>Spider Guided System</i>	<i>Rotation Guided Systems</i>	<i>Notch Hinge Guided System</i>
No contamination	++	-	+	-	0
No leakage problems	++	-	-	--	--
No guiding problems	0	0	+	0	+
Security	++	0	0	+	+
Flow metering accuracy	+	0	0	--	-
No lubrication need	+	++	++	+	++
Reduced parts count	--	0	-	0	++
Autonomy	--	-	--	0	-
Cost	--	0	-	-	+
Total	2	-1	-1	-4	3

Table 2 Comparison of all systems

ACKNOWLEDGMENT

The authors would like to thank 'La Region Wallonne' and Baxter S.A. for the funding of the 4M μ pump project, A.Leroy, J.Ledocq, B.Raucent, J.F.Debongnie, O.Smal, P.Merken acting partners in the 4M μ pump consortium and, finally, P.Lambert for initiating this project.

REFERENCES

- [1] V. Croquet, P. Merken, A. Delchambre, J.F. Debongnie, "Manufacturing of a circular Notch Hinge as Guiding System by Electrical Discharge Machining", First International Symposium on nanomanufacturing, Boston, USA, 24-2 April 2003
- [2] O. Smal, P. Merken, V. Croquet, B. Raudent, J.F. Debongnie, A. Delchambre, "Design of an implantable micropump", Proc. of the International Precision Assembly Seminar (IPAS'2004), Bad Hofgastein, Austria, 12-13 February 2004
- [3] P. Merken, O. Smal, J.F. Debongnie, B. Raudent, "Design and test of a circular notch hinge", Proc. of the International Precision Assembly Seminar (IPAS'2004), Bad Hofgastein, Austria, 12-13 February 2004
- [4] P. Merken, J.F. Debongnie, "Le col circulaire comme articulation flexible", 6^{ème} congrès national de mécanique théorique et appliquée, Gent, 26-27/05/2003
- [5] E. Dereine, B. Dehez, D. Grenier, B. Raudent, "A survey of electromagnetic micromotors", Proc. of the International Precision Assembly Seminar (IPAS'2003) Bad Hofgastein, Austria, March 2003
- [6] A.Chau, P.Lambert, P. Bouillard, A.Delchambre, "Behaviour of Flexure Hinge for use as articulation", International Forum on MicroNano Integration, Postdam, Decembre 3,2003

6. Fabrication



6.1. Calcul des tolérances du modèle à l'échelle 10 :1.doc



Modèle 1

Relevé de tolérances

1. Repère_6a et 6b

Pour obtenir le jeu minimal entre les flasques de la pompe et la palette, il paraît nécessaire de fixer la planéité des faces des flasques (repères_6a et 6b) à une valeur raisonnable.

Arbitrairement, nous fixerons cette planéité à 0,01 sur les faces des flasques et de la palette. Nous verrons par la suite en quoi cela intervient dans le jeu.

En réalité, nous avons besoin d'une condition en plus. En effet, la planéité ne donne aucune indication quant à l'orientation des plans de référence. Il faudra donc, en plus, imposer cette orientation, ce qui se traduit par l'adoption d'une tolérance de perpendicularité des faces par rapport à l'axe de l'arbre de la pompe plutôt qu'une tolérance de planéité.

Grâce à cette valeur de la perpendicularité, nous pouvons déduire facilement le jeu minimal qu'il doit exister entre les flasques et la palette pour qu'il n'y ait jamais contact. En effet, plaçons-nous dans le cas le plus défavorable où les limites de planéité sont atteintes au même endroit, comme le montre la figure 1.

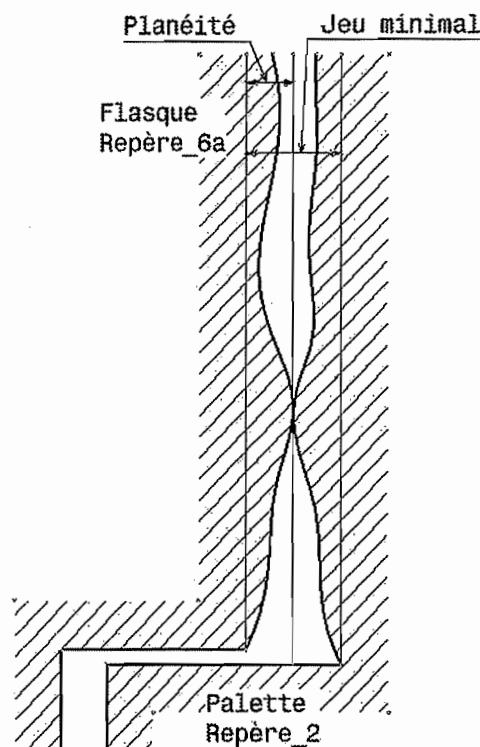


Figure 1 : situation la plus défavorable

Il est évident que, dans ce cas, le jeu minimal doit être de 0,02. Fixons donc celui-ci à : $J_1 = (0,03 \pm 0,01)$.

Nous voyons ici l'importance de fixer une tolérance de planéité la plus serrée possible. Bien que la valeur du jeu semble exagérément petite pour être réalisable, nous rappelons que le principe des tests consisterait à partir d'un jeu minimum, c'est à dire le plus petit que l'on puisse obtenir en fabrication, et ensuite d'augmenter ce jeu afin d'observer l'effet de cette augmentation sur le débit de la pompe.

L'intervalle de tolérance ($l'IT_{J_1}$) de J_1 est large vis-à-vis de la valeur nominale, cela pour 2 raisons : la première est évidente, il faut un IT le plus large possible pour la fabrication ; la seconde est moins évidente, cet IT doit, comme on le verra par la suite, englober les IT de 2 autres cotes.

Sur la figure suivante, qui montre une coupe partielle de la pompe, parallèlement à l'axe de l'arbre, nous pouvons voir toutes les cotes qui vont intervenir dans le calcul de la valeurs des 2 jeux qui existent entre les flasques et la palette et entre les flasques et l'arbre.

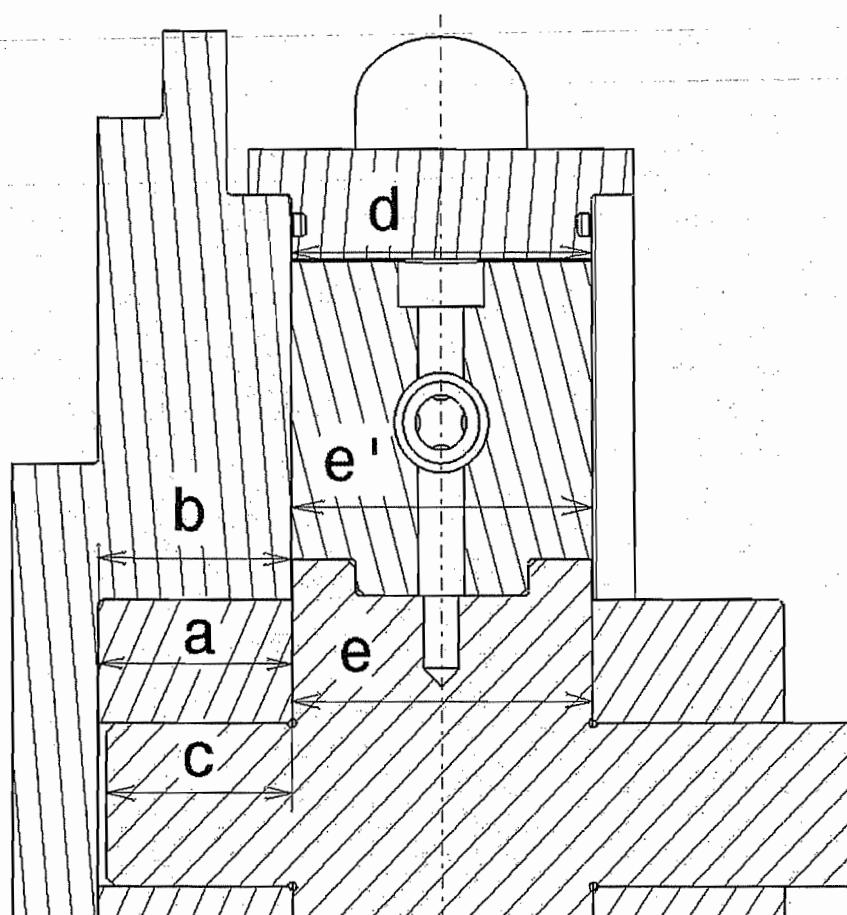


Figure 2 : grandeurs à tolérer

Occupons-nous de la valeur de b . La chaîne de cote de J_1 est la suivante :

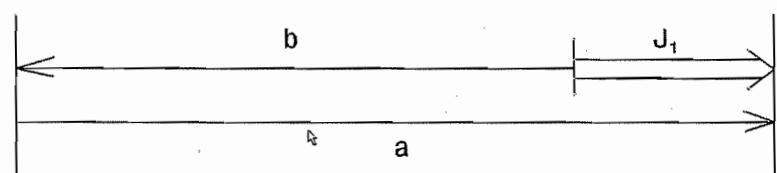


Figure 3 : chaîne de cote de J_1

La condition est évidemment J_1 car c'est ce jeu qu'il faut obtenir.

Nous devons fixer une des cote, a ou b . Fixons a : $a = (22,5 \pm 0,005)$. Le choix de l'intervalle de tolérance de a vient simplement de la constatation suivante : $IT_{J_1} = IT_a + IT_b$. On choisit donc de répartir l' IT_{J_1} symétriquement sur a et sur b .

A partir de la figure 3, nous déduisons : $J_1 = a - b$. De là, $b = a - J_1 = 22,5 - 0,03 = 22,47$.

En ce qui concerne les bornes de b , voici la procédure (M désigne l'écart supérieure et m désigne l'écart inférieur) : $J_{1M} = a_M - b_m \Rightarrow b_m = a_M - J_{1M} = 0,005 - 0,01 = -0,005$

$$b_M = a_m - J_{1m} = -0,005 + 0,01 = +0,005$$

Nous obtenons alors $b = (22,47 \pm 0,005)$. Sur le dessin de fabrication, la cote n'est pas aussi serrée car nous laissons le soin au technicien de s'arranger avec le montage pour obtenir les jeux désirés.

Les autres cotes tolérancées de la pièce repère_6a sont des H6 pour les cotes d'alésages et j5 pour les cotes d'arbre.

2. Repère_2

Si l'on se réfère à la figure 2, les 2 cotes à tolérer sont les cotes c et e .

Commençons par c . La chaîne de cote à prendre en considération ici est celle du jeu J_2 entre l'arbre et les flasques.

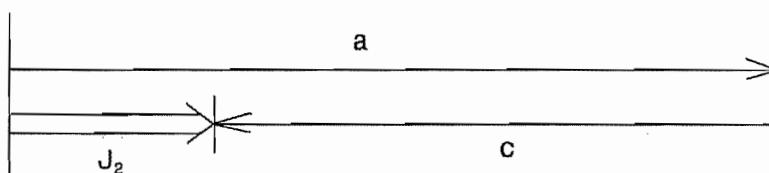


Figure 4 : chaîne de cote de J_2

Le jeu J_2 n'est pas une donnée essentielle au problème, il peut être non négligeable. Pour la facilité de la fabrication, nous le fixerons donc à $J_2 = (1 \pm 0,1)$.

De la chaîne de cote, nous déduisons, $J_2 = a - c$. De là, $c = a - J_2 = 22,5 - 1 = 21,5$.

De même, $J_{2M} = a_M - c_m \Rightarrow c_m = a_M - J_{2M} = 0,005 - 0,1 = -0,095$

$$c_M = a_m - J_{2m} = -0,005 + 0,1 = +0,095$$

Nous obtenons alors $c = (21,5 \pm 0,095)$.

En ce qui concerne la cote e , le problème est plus délicat. Le choix de la condition n'est pas évident : il y a 2 jeux J_1 . La cote d , qui intervient dans la chaîne de cote de e , fixe l'écartement entre les flasques. De cette cote (d) dépend donc le caractère serrant ou non de l'arbre entre les coussinets. La condition est donc la somme des 2 jeux J_1 et J_1^* .

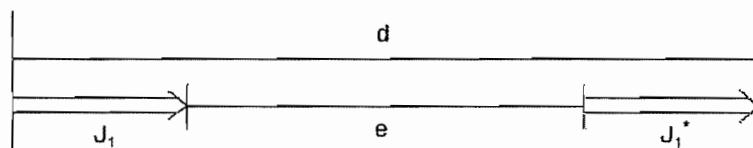


Figure 5 : chaîne de cote de $J_1 + J_1^*$

La cote d est fixée comme suit : $d = (35 \pm 0,01)$. En effet, on a que : $J_1 + J_1^* = d - e$. Donc $IT_{J_1} + IT_{J_1^*} = IT_d + IT_e$, ce qui nous donne une répartition homogène des IT.

Finalement, on a : $e = d - (J_1 + J_1^*) = 35 - (2 * 0,03) = 34,94$

$$e_m = d_M - (J_{1M} + J_{1M}^*) = 0,01 - 0,02 = -0,01$$

$$e_M = d_m - (J_{1m} + J_{1m}^*) = -0,01 + 0,02 = +0,01$$

Au total : $e = (34,94 \pm 0,01)$.

La largeur de l'évidement destiné à recevoir le piston est tolérancé H6.

Les autres tolérances sont des H6 pour les alésages et des g5 pour les cotes d'arbre car l'assemblage de l'arbre ne doit pas être serrant.

La tolérance de perpendicularité reste évidemment la même que celle spécifiée dans le paragraphe consacré à la pièce repère_6a.

3. Repère_3

La longueur du piston est un h6, pour qu'il puisse s'emboîter sans problème dans l'évidement ménagé dans la pièce repère_2 pour le recevoir.

Il a été convenu que le trou qui recevra la bille doit avoir un diamètre minimum de 11. On fixera l'écart supérieur à une valeur raisonnable pour la fabrication : 0,05.

Le trou destiné à recevoir le poussoir (repère_13) sera tolérancé H6, pour avoir un assemblage serrant.

4. Repère_4

L'épaisseur de la bague fendue ne doit pas dépasser la valeur minimum de l'écartement entre les flasques, donc la valeur minimum de la cote a calculée ci-avant. Cette valeur minimum étant de 34,99, nous décidons de fixer l'épaisseur de cette bague à 34,95 au maximum et de permettre un certaine souplesse à la fabrication : 0,05.

5. Repère_5

La distance entre les épaulements déterminant l'écartement entre les flasques (cote $35 \pm 0,01$) a déjà été fixée lors de la détermination de l'épaisseur du piston (repère_2). Les tolérances données pour les gorges destinées à recevoir les o-ring sont prescrites par le fabricant de ces o-rings. Les autres cotes d'arbre et d'alésages sont des H6-j5 pour les assemblages serrant et H6-g5 pour les assemblages libres. Les seuls cotes « serrantes » sont, ici, les trous destinés à recevoir les tubulures (repère_7).

6. Repère_7

Seul le diamètre extérieur des tubulures est tolérancé, il s'agit d'un arbre j5 car il doit être monté serré sur le corps de la pompe.

7. Repère_8

L'épaisseur du coussinet a été fixé dans la partie réservée aux flasques, celle-ci est de $22 \pm 0,005$. Le coussinet doit être serrant dans le flaque, donc le diamètre extérieur est un j5. L'alèsage est toujours un H6.

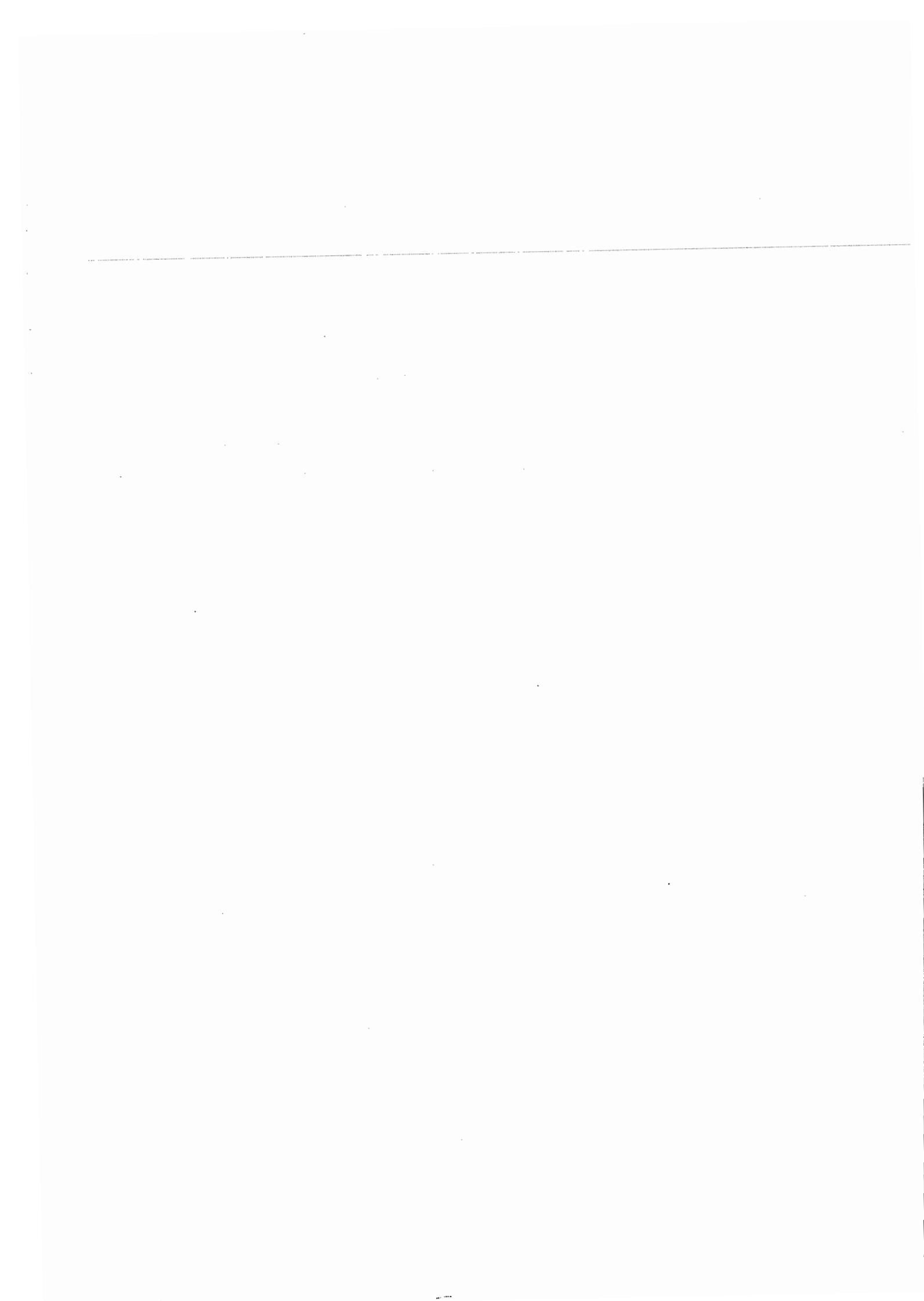
8. Repère_12

De nouveau, l'arrêt doit être monté serrant sur la bague fendue, le diamètre extérieur est donc un j5.

9. Repère_13

Comme le repère_12, le poussoir doit être monté serrant dans le piston. La cote extérieure sera donc un j5.

6.2. Inventaire des pièces réalisées



Numérotation des pièces produites en Microfabrication

Chacune des pièces produites pour essais sont numérotée avec la date, le nom de la pièce (correspondant au plan de définition) et un numéro définissant la version du proto, le producteur de la pièce (l'usineur ou fournisseur) et le procédé de fabrication.

Le numéro porté par une pièce a la forme canonique suivante :

00-00-00

Les 2 premiers chiffres correspondent à la version du prototype.

- **01** pour la version 01 (notée parfois V.01)
- **02** pour la version 02 (notée parfois V.02)
- **03** pour la version 03 (notée parfois V.03)

Les 2 chiffres suivants est le code producteur :

- **01** pour l'UCL (CEREM)
- **02** pour l'IATA
- **03** pour l'Ulg (Méthodes de fabrication)
- **04** pour technifutur

Les 2 derniers chiffres correspondent au procédé de fabrication :

- **01** pour la commande numérique
- **02** pour l'électro-érosion
- **03** pour retouche à la main (lime ou pierre à huile)
- **04** pour le tournage

Une seule et même pièce peut évidemment avoir différents numéro de fabrication.

Technologie d'électro-érosion à fil utilisée à Liège

Machine : Charmilles Robofil 310

Fil : « SW25X », fil de cuivre, revêtu d'un alliage de zinc, 0.25 mm de diamètre extérieur, Rm = 490-570 N/mm²

Technologie : la technologie utilisée est celle de l'acier, en mode d'usinage privilégiant la rapidité. La pièce est toujours, sauf mention contraire, usinée en une seule passe.

Tension électrique d'électrode (Aj): 80 V (fil polarisé négativement)

Valeur du courant pulsé (iAl) : 8A

Durée d'impulsion (A): 0,7 µs

Temps entre 2 impulsions (B): 18,8 µs

Vitesse de déroulement du fil (Ws) : 10 m/min

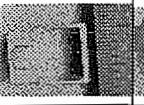
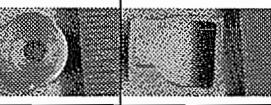
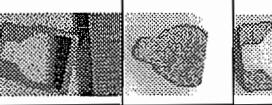
Tension mécanique dans le fil (Wb): 1,2 daN

Vitesse d'usinage : 8,3 mm/min (théoriquement)

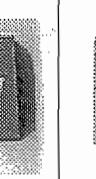
Tension moyenne d'usinage : 48 V

Théoriquement, nous obtenons une surface de rugosité Ra 2,2 µm, Rtmax 17,6 µm (avant microbilleage).

Résumé éprouvettes réalisées

N°	Date	Nom	Matière	Pièce	Mesure	Commentaires	Illustration
1	03/05/2002	01-03-02	Laiton	Corps de pompe	Non mesurée		
2	03/05/2002	01-01-01	Laiton	Palette	Non mesurée		
3	13/05/2002	01-03-02	Inox	Corps de pompe	Non mesurée		
4	19/06/2002	01-03-02	TiAl6V4	Corps de pompe	Projecteur de profil (cf. plan Metro 01)	Voir plans et feuilles annexes 2 prob. : - retouche à la main à éviter - cotes inf. aux cotes nom.	
5	01/08/2002	02-03-02	TiAl6V4	Palette	Projecteur de profil 4 diamètres calculés (cf. plan Metro 02)		
6	05/08/2002	02-03-02	TiAl6V4	Corps de pompe	Projecteur de profil 2 diamètres calculés (cf. plan Metro 03)	Erreur de correction de trajectoire au niveau d'un ligne du contour extérieur	
7	07/08/2002	02-03-02	TiAl6V4	Corps de pompe	Projecteur de profil (cf. plan Metro 03)	On casse les coins afin de ne pas avoir de problèmes au niveau des rayon de raccordement	
8	08/08/2002	02-03-02	TiAl6V4	Palette	Projecteur de profil (cf. plan Metro 02)	Conformité avec 07/08/2002 ok, par examen de la lumière passante (tol : 0.01)	

9	15/10/2002	03-03-0102	TiAl6V4	Corps d'épreuve avec col Container	Non mesurée	Col : h 0.2, R 2.8
10	14/11/2002	03-03-02	TiAl6V4	Corps d'épreuve avec col	4 mesures au micromètre (cf. plan Metro 04)	Col : h 0.01, R 1 Usinage raté : le col est cassé lors de la sortie de l'électro-érosion.
11	25/11/2002	03-03-02	TiAl6V4	Corps d'épreuve avec col	4 mesures au micromètre non-microbillée (cf. plan Metro 04)	Col : h 0.05, R 1 Usinage raté : le col est cassé lors de la sortie de l'électro-érosion.
12	26/11/2002	03-03-0102	TiAl6V4	Corps d'épreuve avec col Container	4 mesures au micromètre non-microbillée et microbillée (cf. plan Metro 04)	Col : h 0.1, R 1
13	04/12/2002	03-03-0102	X20Cr13	Corps d'épreuve avec col	Non mesurée	Col : h 0.08, R2.5 Usinage raté : le col est cassé lors de la sortie de l'électro-érosion.
14	12/12/2002	03-03-01	X20Cr13	Col	NA	Essai d'usinage du col avec l'électrobroche. Col : h 0.08, R 2.5 Diamètre de la fraise : 1. Usinage raté : il ne reste plus de matière à l'endroit où devrait se trouver le col.
15	16/01/2003	03-03-02	X20Cr13	Palette pour tests méca. et élect.	4 mesures au projecteur de profil (cf. plan Metro 05)	Col : h 0.1, R2.5 Percage des trous : ok Taraudage M1 : destruction des tarauds dans les avant-trous

16	16/01/2003	03-03-02	X20Cr13	Corps de pompe pour tests méca. et élect.		Ep. 0,1 Usinage raté : cassure au niveau de l'angle rentrant du logement de l'EA, du peut-être aux vibrations de la masselote sous la pression des jets d'eau.
17	16/01/2003	03-03-02	X20Cr13	Corps de pompe pour tests méca. et élect.		Ep. 0,1 Solidarisation de la masselote flottante avec le reste du corps pour éviter les vibrations. Usinage raté : cassure au niveau de l'angle rentrant du logement de l'EA
18	17/01/2003	03-03-02	X20Cr13	Corps de pompe pour tests méca. et élect.		Ep.0,15 Solidarisation de la masselote flottante avec le reste du corps pour éviter les vibrations. Usinage raté : cassure au niveau de l'angle rentrant du logement de l'EA (même problème qu'auparavant)
19	17/01/2003	03-03-02	TiAl6V4	Corps de pompe pour tests méca. et élect.		Ep. 0,15
20	17/01/2003	03-03-02	TiAl6V4	Corps de pompe pour tests méca. et élect.		Ep. 0,15
21	20/01/2003	03-03-02	TiAl6V4	Corps de pompe pour tests méca. et élect.		Ep. 0,1 Usinage raté : cassure au niveau de l'angle rentrant du logement de l'EA
22	20/01/2003	03-03-02	TiAl6V4	Corps de pompe pour tests méca. et élect.		Ep. 0,1 Usinage raté : cassure au niveau de l'angle rentrant du logement de l'EA

23	20/01/2003	03-03-02	TiAl6V4	Corps de pompe pour tests méca. et élect.	4 mesures au projecteur de profil (cf. plan Metro 06)	Ep. 0,1 Problème de montage du noyau : il faut agrandir les rainures
24	20/01/2003	03-03-02	X20Cr13	Palette pour tests méca. et élect.		Col : h 0,08, R2,5 Usinage raté : destruction du col lors de l'usinage, une épaisseur de 0,1 mm semble donc être la limite de la machine
25	21/01/2003	03-03-02	X20Cr13	Palette pour tests méca. et élect.	4 mesures au projecteur de profil (cf. plan Metro 05)	Col : h 0,1, R2,5 Perçage des trous : ok Taraudage M1 : destruction des tarauds dans un avant-trous 1 taraudage réussi
26	21/01/2003	03-03-02	TiAl6V4	Corps de pompe pour tests méca. et élect.	4 mesures au projecteur de profil (cf. plan Metro 06)	Ep. 0,1 Problème de montage du noyau : il faut agrandir les rainures
27	28/01/2003	03-03-02	TiAl6V4	Corps de pompe pour tests méca. et élect.		Ep. 0,1 Destruction lors du montage
28	28/01/2003	03-03-02	X20Cr13	Palette pour tests méca. et élect.		Col : h 0,1, R2,5 Perçage et taraudage (M1) réussis
30	29/01/2003	03-03-02	X20Cr13	Palette pour tests méca. et élect.	Mesures de 3 grandeurs au micromètre et de l'épaisseur du col (approximatif) au pied à coulisse (voir plan de mesure Metro 07)	5 palette réalisées pour les tests mécaniques et électriques, numérotées de 1 à 5. Taraudage : M1,6 Col : h 0,1, R2,5
31	24/02/2003	03-03-02	TiAl6V4	Corps de pompe pour tests méca. et élect.		Ep. 0,1

Nous considérons que la fin des tests de fabrication se situe ici. La fabrication des pièces de la micropompe, prototype V03, se fera avec ces paramètres définis.

La mesure du col utilisé pour la première pompe d'essai a donné :

Rayon 1	1.7704
Rayon 2	1.1888
Somme	2.9592
Distance entre centres	3.0449
Ep. Du col	0.114

Amélioration du processus d'usinage

Suite à la visite du 16 septembre chez Philips, il apparaît qu'il fallait modifier la façon de procéder ainsi que les paramètres d'usinage.

Une palette a été réusinée pour les besoins de la vérification de l'EA. Il s'agit d'une palette corrigée pour que la face en regard de l'EA soit contre celle du corps de pompe, lorsque la pompe est en position ouverte.

Cette éprouvette s'est faite en changeant uniquement le temps d'impulsion (A) : 0,2 µs. Les résultats quant à l'état de surface ne sont pas convaincants. La géométrie du col obtenue (mesurée à Louvain) est :

Rayon 1	1.0056
Rayon 2	1.2644
Somme	2.27
Distance entre centres	2.3640
Ep. Du col	0.114

Nous avons alors modifié certains paramètres :

Offset	iAL	B	A	Tac	Aj	Ws	Wb	Inj
.150	2	20	0.2	0.4	240	4	1.5	1

L'état de surface est bien meilleur, du point de vue pollution et rugosité. Voici les paramètres géométriques mesurés :

Ep. visée 0.1

Rayon 1	1.3101
Rayon 2	1.4297
Somme	2.740
Distance entre centres	2.852
Ep. Du col	0.112

Ep. visée 0.09 (29/10 0.09)

Rayon 1	1.9450
Rayon 2	1.7477
Somme	3.6927

Distance entre centres	3.7902
Ep. Du col	0.0975

Pour tenir compte de la différence dans l'épaisseur du col, nous avons adapté les paramètres (offset) pour atteindre 0.08 :

Offset	iAL	B	A	Tac	Aj	Ws	Wb	Inj
.154	2	20	0.2	0.2	240	4	2	1

Reste à mesurer (30/10 0.08)

Réalisation d 'une campagne d'essai pour déterminer l'épaisseur minimale usinable avec les paramètres optimum.

Nous partons avec les paramètres machines suivant :

Ep. visée 0.07 (31/10 1) mesure : 0.097

Offset	iAL	B	A	Tac	Aj	Ws	Wb	Inj
.154	2	20	0.2	0.4	240	4	1.8	1

Correction : offset 0.159 (faux mais on s'en apercevra par après !)

⇒ 31/10 2 ; mesure : 0.1

Correction : offset 0.144

⇒ 31/10 3 ; mesure : 0.068 Ok

Ep. visée 0.06

Offset	iAL	B	A	Tac	Aj	Ws	Wb	Inj
.144	2	20	0.2	0.2	240	4	1.8	1

Mesure 31/10 4 : 0.06

2 ème essai : 31/10 5 , mesure : 0.06

Ep. visée 0.05

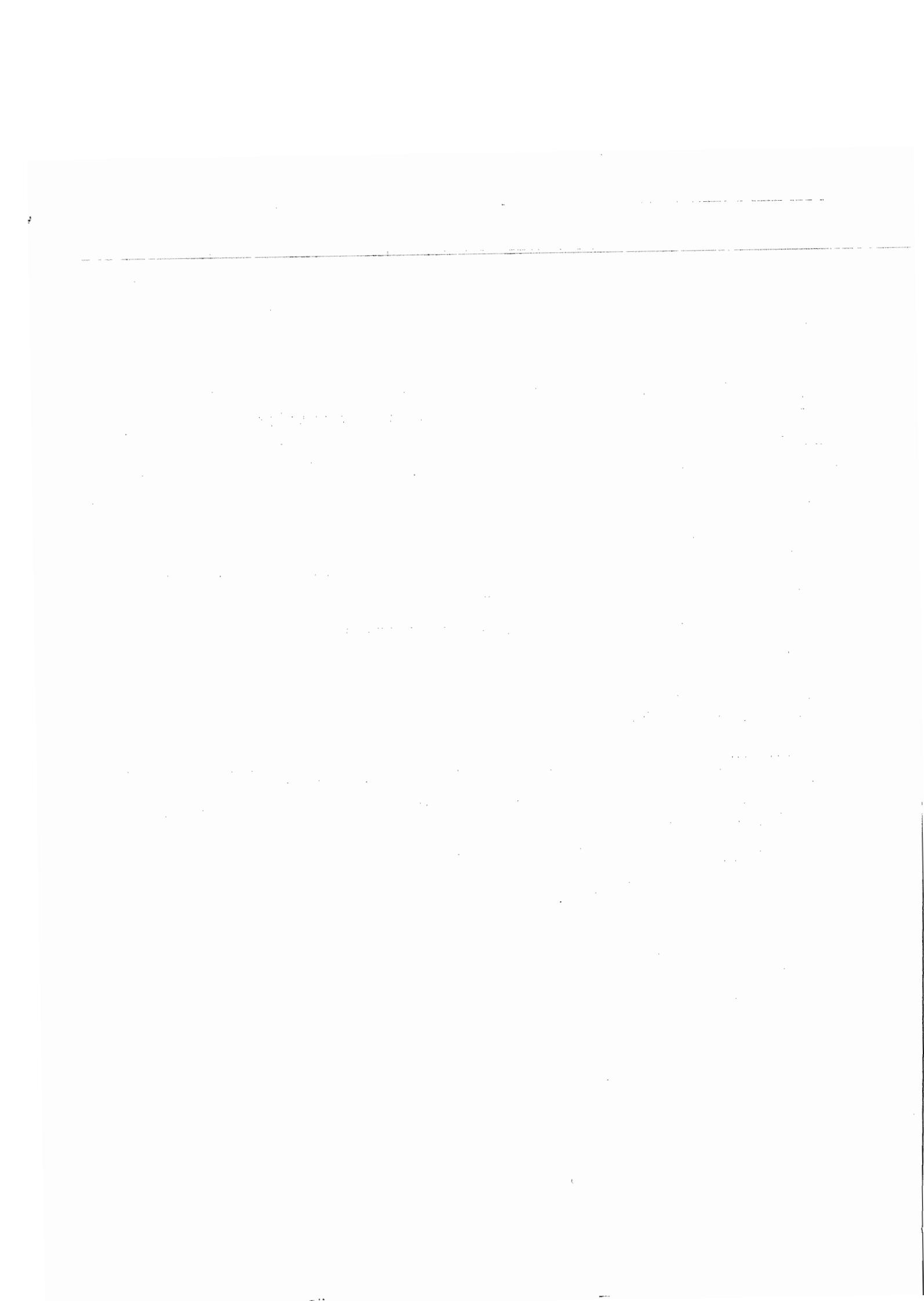
31/10 6, mesure : 0.052 – 0.054

Ep visée : 0.04

5/11 1 , mesure : 0.056-0.058

5/11 2 ratée

5/11 3 , mesure : 0.054-0.048



6.3. Rapport de formation à l'usinage Laser à technofutur les 24-25 mars 2003

.....

.....

Formation usinage laser – Technofutur – les 14 et 15 mars 2003

P. Merken V. Croquet

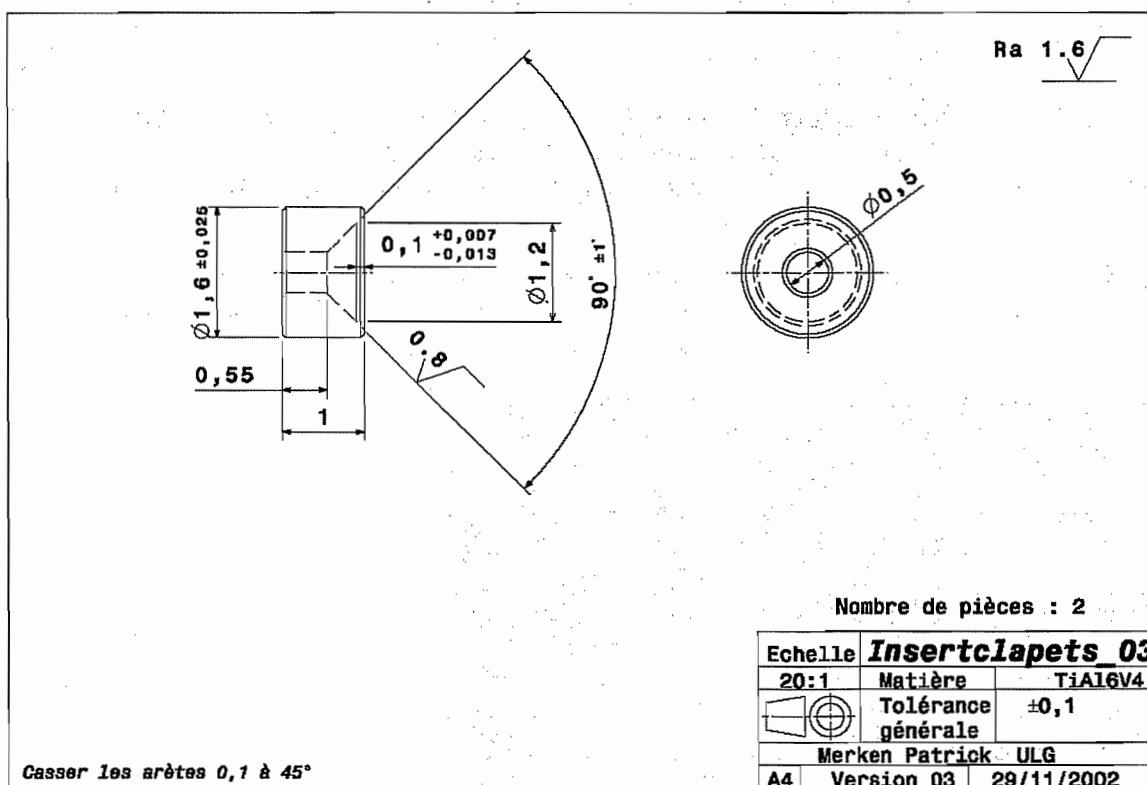
1 Présentation

Technofutur est un centre de formation. Il reçoit des techniciens, ouvriers afin des les former à des techniques particulières d'usinage. C'est un organisme subsidié par la région wallonne. Ils possèdent notamment une machine à usinage laser, un machine UGV, des presses d'injection plastique, de micro-injection plastiques, des tours et fraiseuses classiques et à commande numériques.

Afin de pouvoir usiner nos clapets à bille grâce à l'usinage Laser, nous avons pris contact avec eux. Ils nous ont proposé 2 jours de formation afin de pouvoir réaliser nos pièces nous-même.

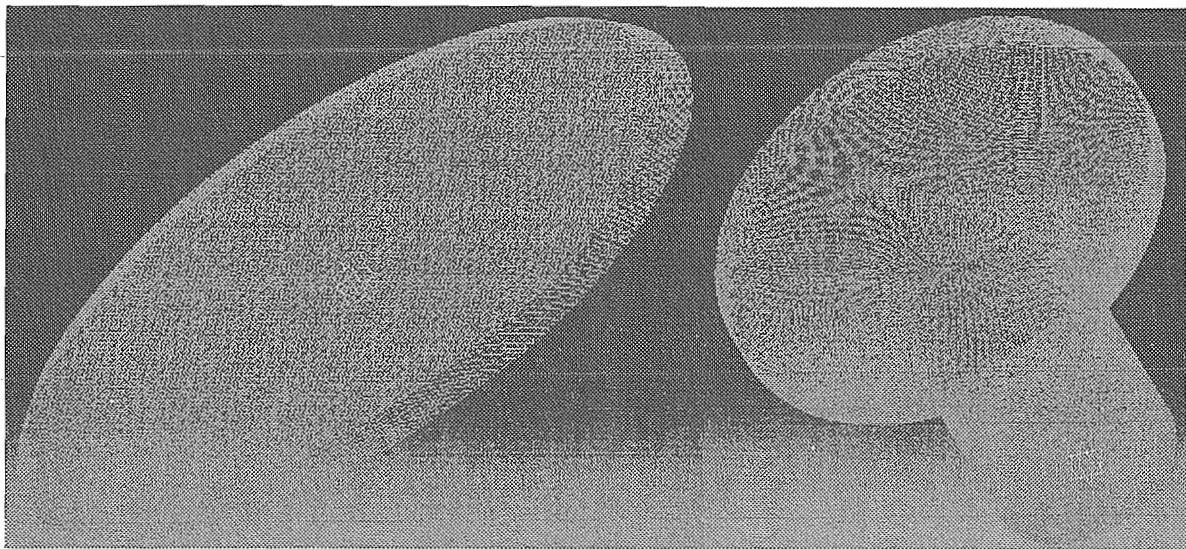
2 Principe.

La pièce à réaliser est la suivante.



Nous avons, auparavant, demandé à M. Martin de l'IATA de nous usiner des petits cylindres de 1,6 mm de diamètre extérieur sur 1 mm de hauteur.

Le mode opératoire de la machine est décrit dans un document séparé.
Mentionnons que nous avons fournis les fichiers STL nécessaires à l'usinage des parties intérieures de ce clapet. Ci dessous, nous pouvons voir une représentation graphique de ces fichiers.

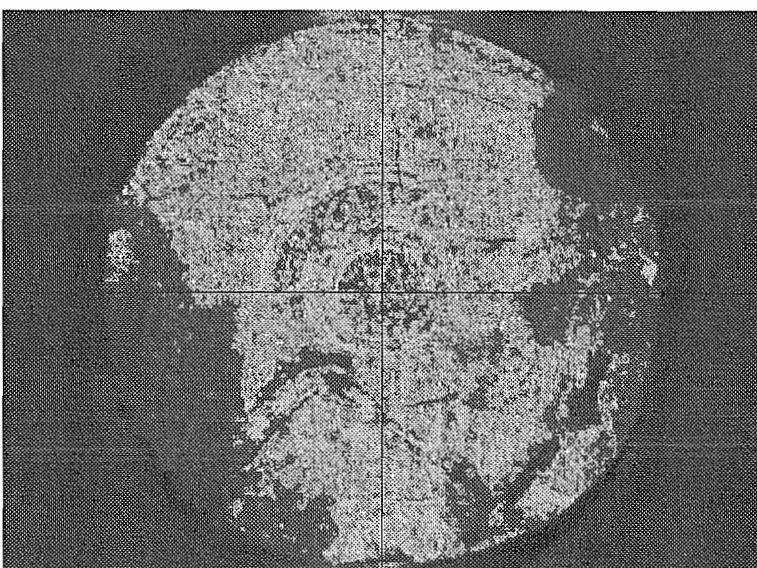


3 Réalisation

Au cours de cette formation, nous avons eu quelques problèmes.
Il s'avère en effet que personnes ne connaissait les paramètres exacts du laser à introduire afin d'obtenir un usinage correct.
Ces paramètres sont essentiellement la fréquence du laser et l'intensité du faisceau.
Il y a en fait 4 paramètres, les 2 derniers ne pouvant être changés.
Nous avons donc perdu un peu de temps, en usinage de clapets réels, qui n'étaient pas bon.

3.1 Pièce brute

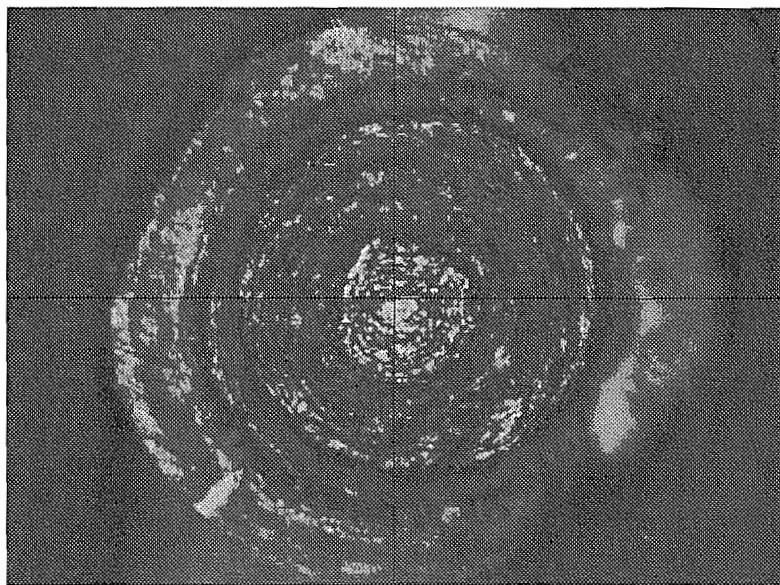
Ci-dessous, un des cylindres non-usiné, clamé sur le plateau de la machine avec de la plasticine.



Le réticule bleu sert à prendre des référence grâce à la caméra. On peut également mesurer une hauteur grâce à un capteur en forme de cône dont l'axe est vertical.

3.2 Usinage sur clapets

A partir de ce brut, nous usinons d'abord le cône. Voici ce que cela a donné.

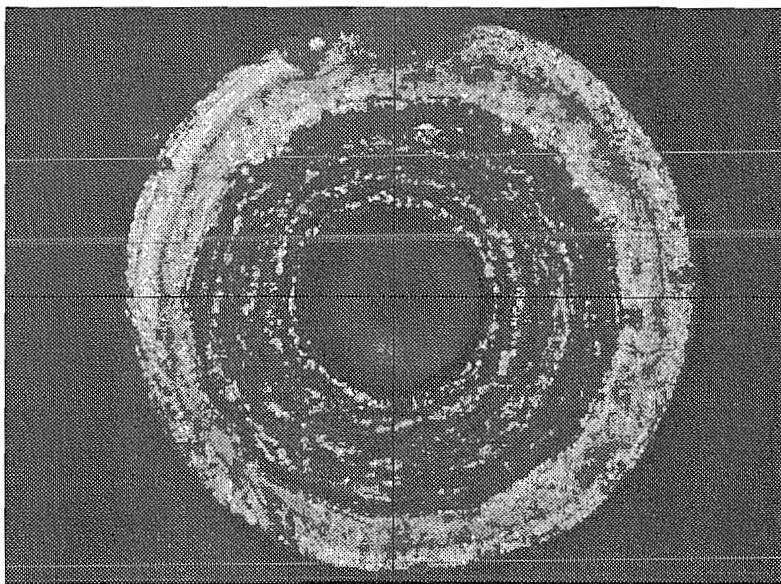


On voit nettement qu'il y a un problème de centrage, du à un mauvais réglage initial de la machine ou à un déplacement de la pièce par l'aspiration ou la prise de référence au palpeur. De plus, une rapide analyse montre que la profondeur désirée n'est pas atteinte. En effet, le cône n'est visiblement pas, par examen visuel de la pièce, à 90°. Ce défaut est du, on le comprendra plus tard, à un mauvais couple de paramètre machine.

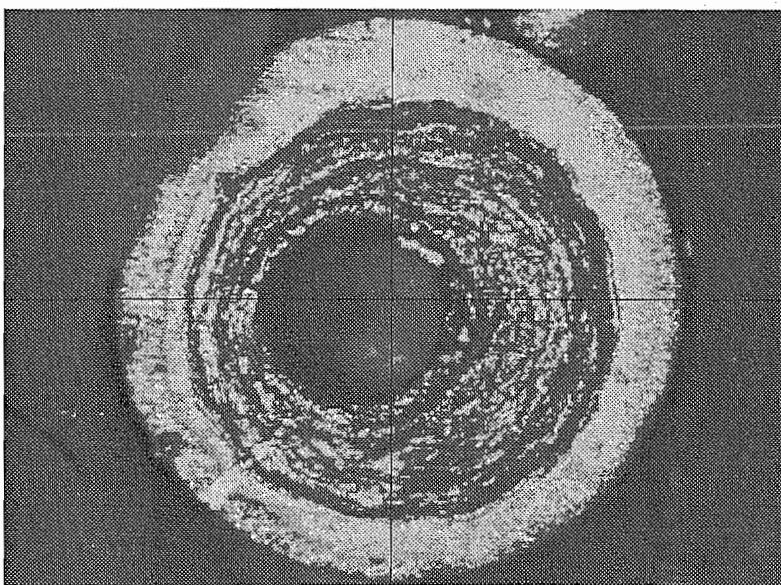
Un fait qui convainc que la profondeur n'est pas atteinte, c'est que le trou n'est pas passant alors qu'il devrait l'être ! On voit que les contours du trou ne sont pas nets. Afin d'obtenir un trou mieux fini, nous avons décidé de le percer grâce à un forêt de 0,5 mm.

On voit également une boursouflure au niveau du rayon extérieur de l'usinage, il y a repoussement de matière ou agglomération de copeau. Un traitement ultérieur de la pièce, par microbillage est nécessaire.

Lorsque cette opération a été réalisée, nous avons retourné la pièce afin d'usiner le chanfrein extérieur. Nous ne possédons malheureusement pas de figure concernant ce chanfrein.



Nous voyons ici un clapet percé au foret. Le cône a été centré sur le trou. L'ensemble est décalé par rapport à la surface extérieure, de 0,05 mm. Ceci est du à la perceuse et à sa tolérance sur le réglage.



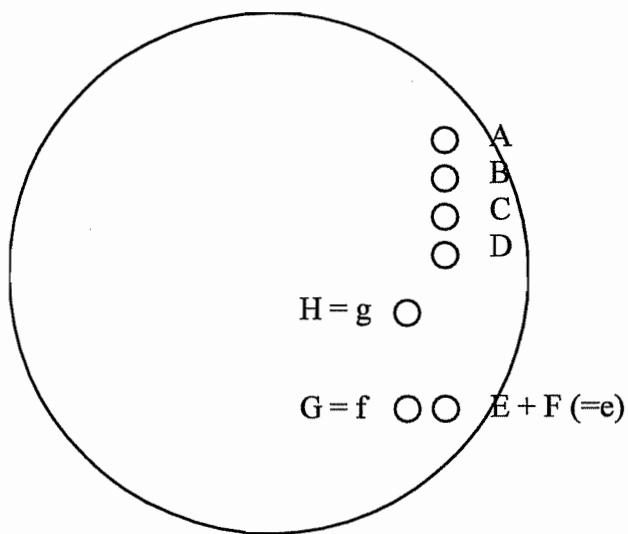
Nous voyons de nouveau un clapet percé et usiné. Le trou est fortement décentré par rapport au cylindre extérieur. Le cône, quant à lui a été centré sur la surface extérieure. On voit que les contours du cône ne sont pas parfaitement circulaire.

3.3 Test sur brut

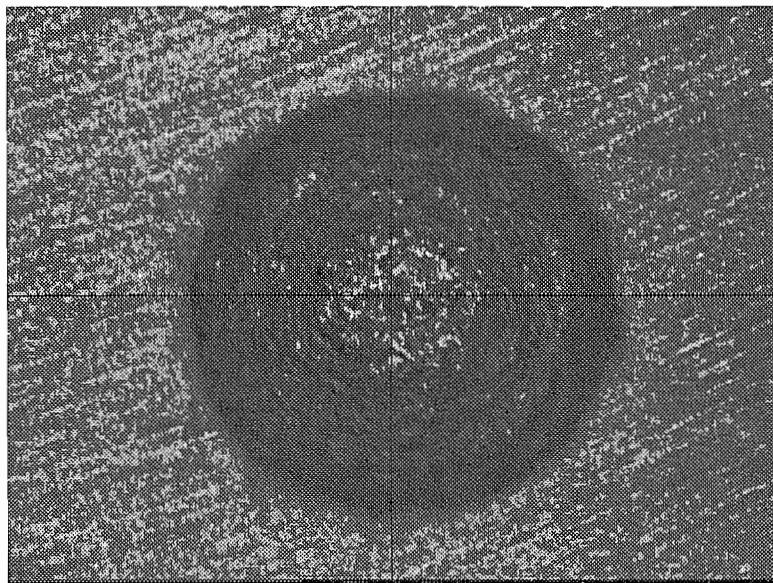
Tous ces essais n'ayant pas donné de résultats satisfaisant, et pour ne plus gâcher les cylindres inutilement, nous avons décidé d'effectuer des tests sur un bout de barre de titane. En faisant varier les paramètres machine, nous espérions trouvé les paramètres idéaux pour l'usinage du titane.

Pour rappel, les paramètres machines sont l'intensité du laser (I) et la fréquence (f). Malheureusement, M. Hilélis s'est avéré incapable de nous donner la répercussion de ces paramètres sur la qualité de l'usinage et de l'état de surface.

La figure ci-dessous nous montre l'ordre dans lequel les essais ont été effectués, sur le brut. Les lettres correspondent aux sous-titres suivants, le trou E + F est remplacé par e, G par f, H par g.

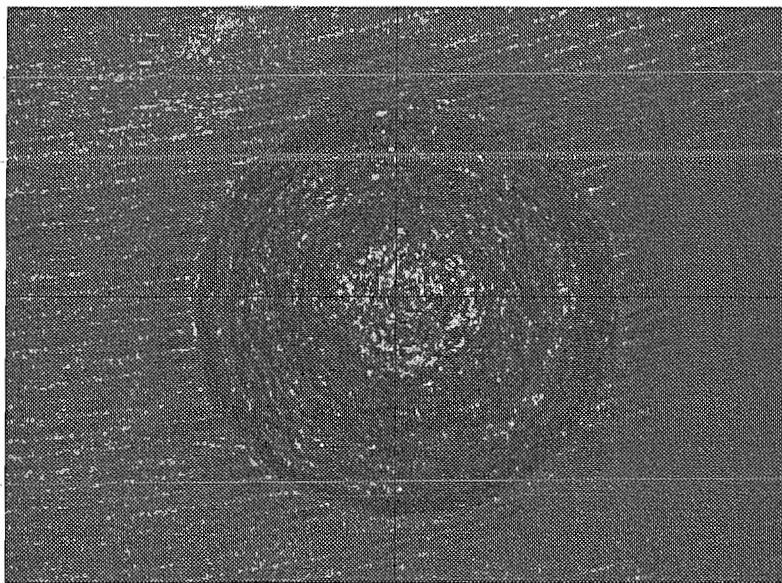


a) $I = 10, f = 40$



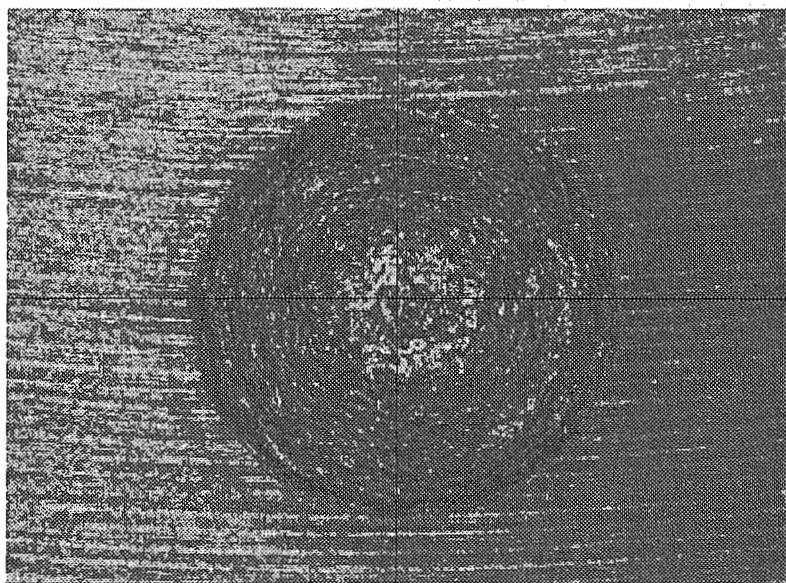
Ici, le cône est complètement raté, la matière n'est pas usinée correctement, il n'y a pas de profondeur. Les paramètres ne sont visiblement pas corrects.
De plus, durant la phase d'usinage, l'opération a été interrompue et redémarrée avec d'autres paramètres, nous avons donc recommencé le test (b).

b) $I = 10, f = 40$



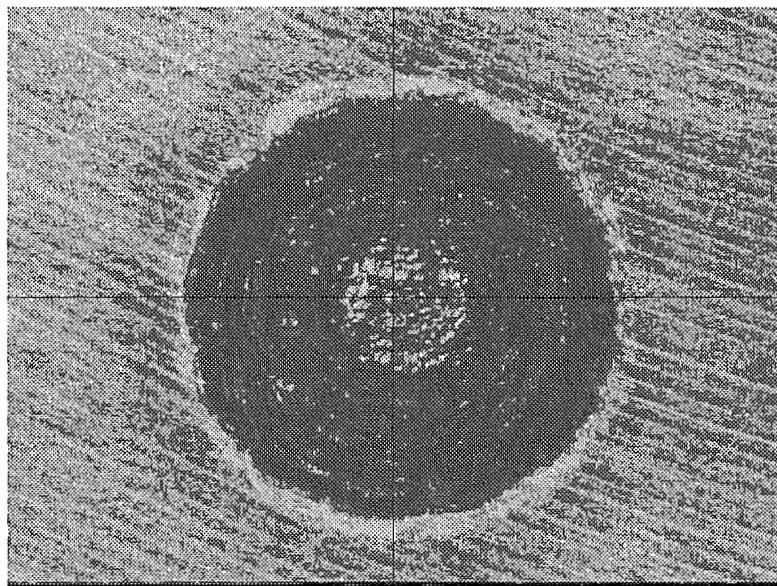
Mêmes remarques qu'en a) en ce qui concerne la profondeur d'usinage.

c) $I = 5, f = 50$



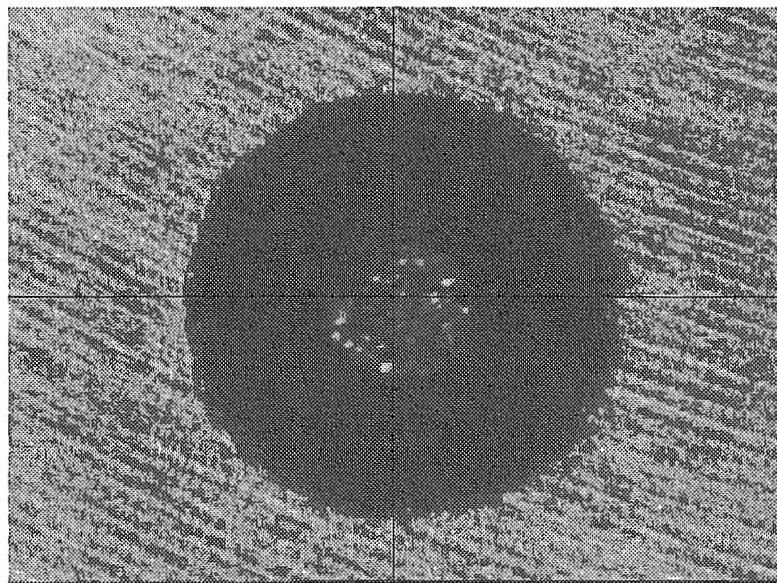
Mêmes remarques qu'en a) en ce qui concerne la profondeur d'usinage.
Il semblerait même que plus on augmente la fréquence et plus la profondeur atteinte est faible.

d) $I = 5, f = 40$



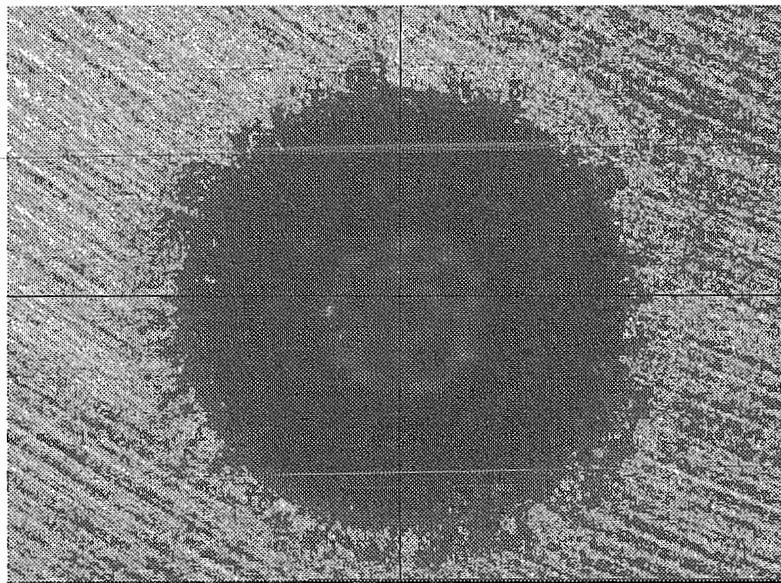
Mêmes remarques qu'en a) en ce qui concerne la profondeur d'usinage.

e) $I = 10, f = 28$



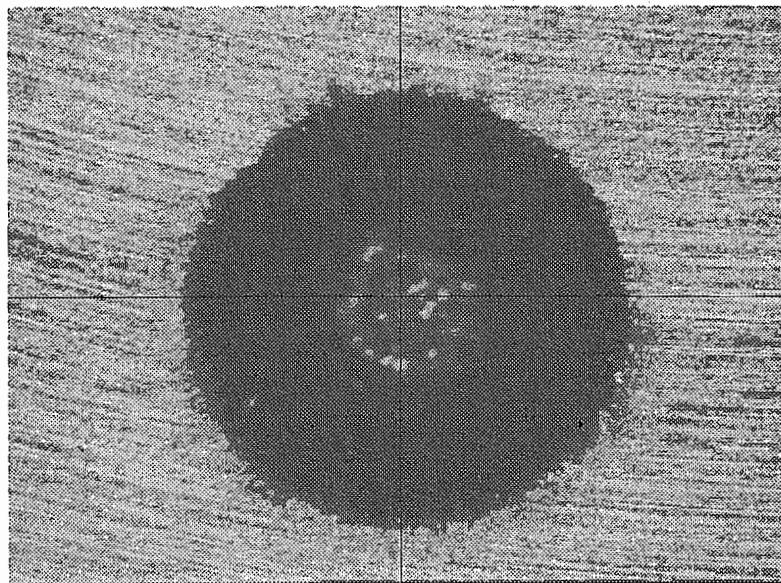
Il semblerait, ici, que la profondeur est atteinte : environ 0,4 contre les 0,45 annoncé, mais comme la mesure est optiques et manuelle - elle dépend de l'habileté de l'opérateur à distinguer une surface nette – nous ne pouvons pas affirmer que la profondeur mesurée est celle effectivement atteinte. Nous pouvons dire que le résultat est correct étant donné que l'erreur est de 0,05 mm environ.

f) $I = 20, f = 10$



Nous avons testé si, en diminuant la fréquence, nous obtenions un meilleur état de surface. Ici, ce n'est pas le cas. Cependant, nous avons augmenté l'intensité, donc nous ne pouvons rien en conclure.

g) $I = 5, f = 10$

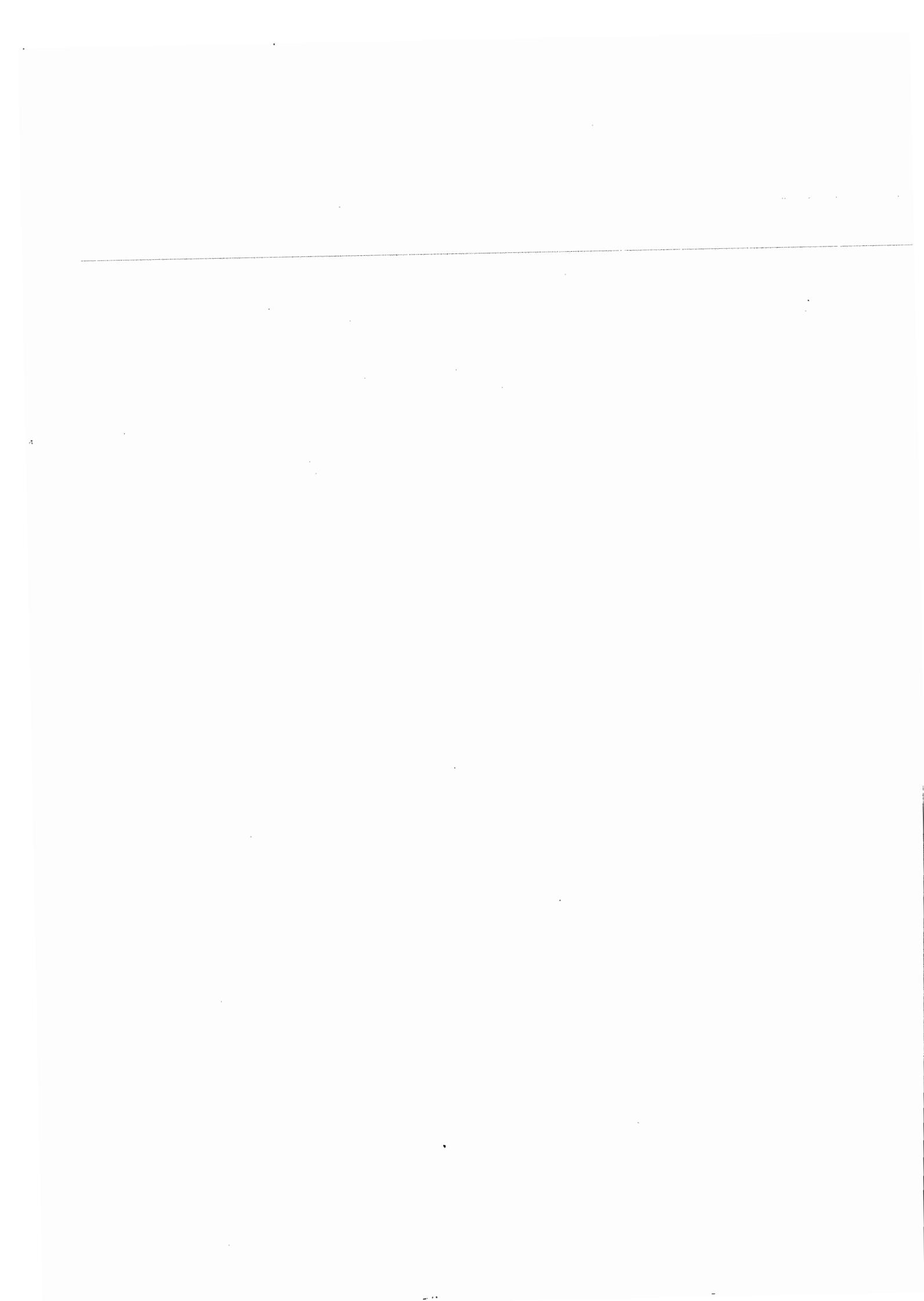


En diminuant l'intensité, il semblerait que le résultats s'améliore un peu, point de vue état de surface et point de vue forme.

Par manque de temps, nous n'avons pu mener plus loin les essais, chacun d'eux nécessitant plus de $\frac{3}{4}$ d'heure d'usinage.

Il faut cependant en conclure que plus on diminue l'intensité et la fréquence, plus les choses s'améliorent.

6.4. Inventaire des outils employés



Outils intervenant dans la fabrication de la pompe

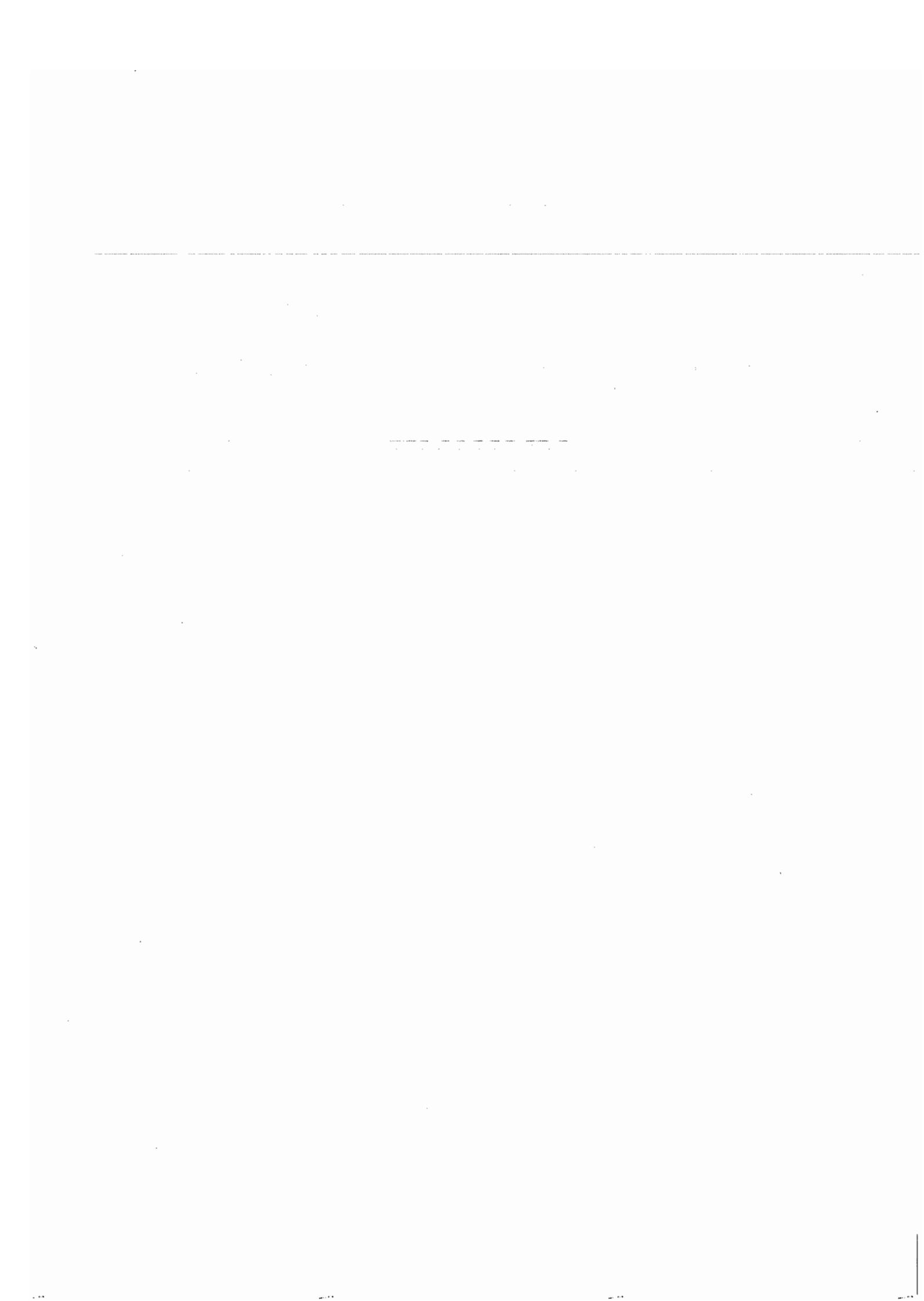
Numéro	Dénomination	Fabriquant/ représentant	Référence	Caractéristiques	Condition de coupe
1	Forêt de précision	DIXI/Vulhopp	DIXI 11135 R	Diamètre de forêt : 0,75 1 -0,004 Diamètre de queue : 1,5 h6 Longueur totale : 30 Longueur utile : 4,5	Dans Titane : Vc : 35 – 55 m/min f = 0,004 – 0,008 mm/tour Dans inox : Vc : 40 – 60 m/min f = 0,005 – 0,010 mm/tour
2	Forêt de précision	DIXI/Vulhopp	DIXI 11135 R	Diamètre de forêt : 1,2 1 -0,004 Diamètre de queue : 1,5 h6 Longueur totale : 30 Longueur utile : 6	Dans Titane : Vc : 35 – 55 m/min f = 0,006 – 0,016 mm/tour Dans inox : Vc : 40 – 60 m/min f = 0,008 – 0,017 mm/tour
3	Forêt de précision	DIXI/Vulhopp	DIXI 11135 R	Diamètre de forêt : 1,6 1 -0,004 Diamètre de queue : 2 h6 Longueur totale : 38 Longueur utile : 7	Dans Titane : Vc : 35 – 55 m/min f = 0,008 – 0,021 mm/tour Dans inox : Vc : 40 – 60 m/min f = 0,011 – 0,022 mm/tour
4	Filière	Prototyp/ELCE	60 006	Filetage : M2 6g HSS Diamètre extérieur : 16 f10 Epaisseur : 5 js12	manuel

5	Fraise	Prototyp/ELCE	H30 45718	Revêtement : TiCN Coupe : 1x1, 2 dents Plongée max : 5 Longueur tot. : 60 Diamètre de queue : 3 h6	Dans Titane : Coupe profondeur x largeur : 1x0,5 Lubrifiant : émulsion 10 % N : 45 000 tour/min Vc : 142 m/min f : 0,005 mm/tour Vf : 415 mm/min Contrainte outil : 92 % Dans inox : Coupe profondeur x largeur : 1x0,5 Lubrifiant : émulsion 5 % N : 33 200 tour/min Vc : 104 m/min f : 0,003 mm/tour Vf : 229 mm/min Contrainte outil : 93 %
6	Fraise	Prototyp/ELCE	H30 27316	Revêtement : TiCN Coupe : 3x7, 3 dents Plongée max : 7 Longueur tot. : 38 Diamètre de queue : 3 h6	Dans Titane : Coupe profondeur x largeur : 3x0,7 Lubrifiant : émulsion 10 % N : 7650 tour/min Vc : 72 m/min f : 0,021 mm/tour Vf : 489 mm/min Contrainte outil : 92 % Dans inox : Coupe profondeur x largeur : 3x0,64 Lubrifiant : émulsion 5 % N : 5300 tour/min Vc : 50 m/min f : 0,022 mm/tour Vf : 348 mm/min Contrainte outil : 93 %

7	Fraise	Prototyp/ELCE	H31 18016	Revêtement : TiCN Coupe : 2 e8x3, 3 dents Plongée max : 3 Longueur tot. : 50 Diamètre de queue : 3 h6	Dans Titan : Coupe profondeur x largeur : 2x0,5 Lubrifiant : émulsion 10 % N : 12150 tour/min Vc : 76 m/min f : 0,013 mm/tour Vf : 477 mm/min Contrainte outil : 88 % Dans inox : Coupe profondeur x largeur : 2x0,5 Lubrifiant : émulsion 5 % N : 8300 tour/min Vc : 52 m/min f : 0,012 mm/tour Vf : 294 mm/min Contrainte outil : 93 %
8	Taraud machine	Prototyp/ELCE	PARADUR TI 20 416	Filetage : M2 6HX HSS non passant Hélice à droite 15°, 3 goujoures Longueur filetage max : 8 Longueur tot. : 45 js16 Diamètre de queue : 2,8 h9 Tenons : 2,1 h12x5	Manuel
9	Taraud machine	Prototyp/ELCE	PROTOTEX TINI 20 2161	Filetage : M2 6HX HSS passant 2 goujoures Longueur filetage max : 8 Longueur tot. : 45 js16 Diamètre de queue : 2,8 h9 Tenons : 2,1 h12x5	Manuel

10	Taraud machine	Prototyp/ELCE	PARADUR TI 20 2161	Filetage : M1,6 6HX HSS passant 2 goujoures Longueur filetage max : 5 Longueur tot. : 40 js16 Diamètre de queue : 2,5 h9 Tenons : 2,1 h12x5	Manuel
11	Taraud main	Prototyp/ELCE	30 060	Filetage : M1 6HX HSS passant 2 goujoures Longueur filetage max : 5,5 Longueur tot. : 32 js16 Diamètre de queue : 2,5 h9 Tenons : 2,1 h12x5	Manuel
12	Plaquette de tournage (cylindrage)	Sumitomo/Précicarb	DCGT 0702003 R ou L ACZ310		
13	Plaquette de tournage (tronçonnage)	Bimu/Précicarb	070 R ou L E =0,5 Bi20		

6.5. Détail de la fabrication du corps de pompe



Fabrication du corps de pompe

Utilisation de l'electro-enfonçage

L'usinage de l'encoche recevant le noyau de l'EA n'étant pas efficace par électro-érosion à fil, il a été décidé d'utiliser l'électro-enfonçage pour usiner cette cavité.

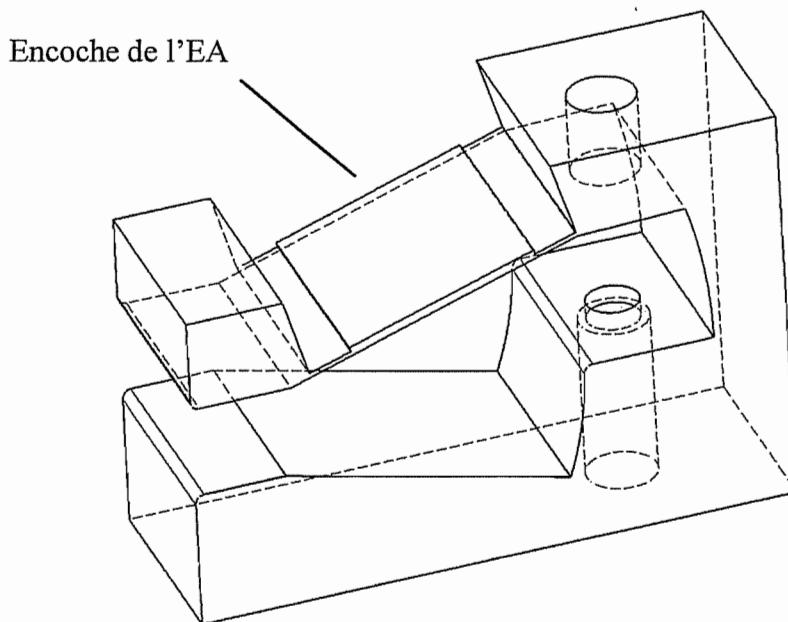


Figure 1 : corps de pompe, avec l'encoche recevant l'EA

En effet, nous constatons que les parties les plus fines de l'encoche fondaient sous l'intense chaleur dégagée par l'étincelle (température atteinte localement de 10000 – 12000 °C). Ces parties fines et élancées emmagasinaient une chaleur telle (l'alliage de titane utilisé ayant un mauvais coefficient de conductibilité) qu'il apparaissait un phénomène de fusion locale qui détruisait la pièce (voir figure 2).

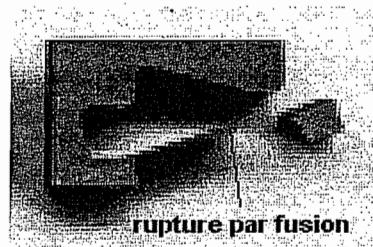
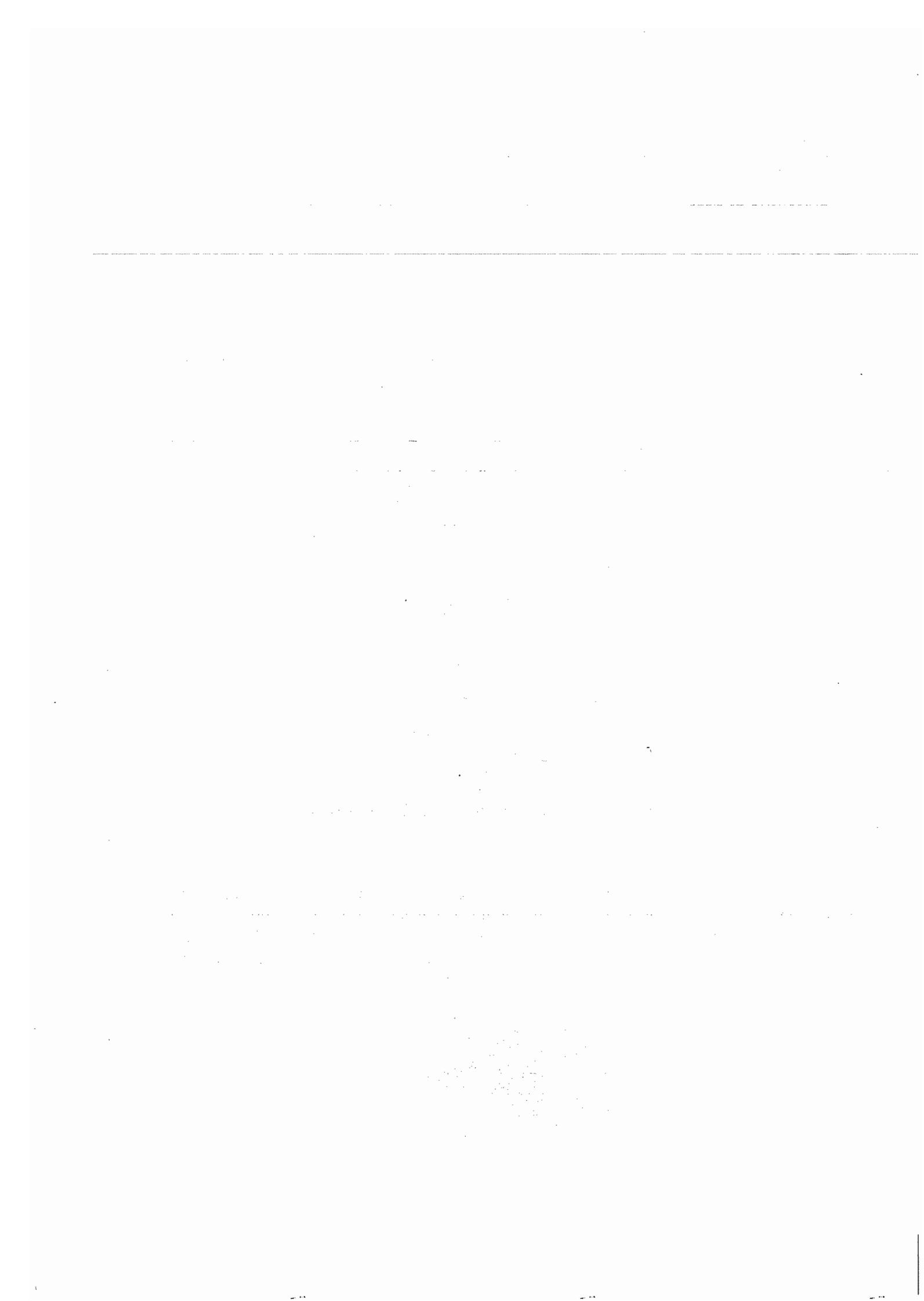


Figure 2 : rupture du corps de pompe



De plus les jets d'eau à une pression non négligeable (entre 2 et 4 bar) sur et sous la pièce avaient tendance à faire vibrer la grosse masselote, qui devenait libre au cours de l'usinage. Cette vibration est indésirable, elle accélère le processus de destruction de la pièce.

Enfin, la fine épaisseur obtenue ne permet pas de garantir l'étanchéité entre l'intérieur de la pompe et la chambre de l'électro-aimant.

Toutes ces considérations nous ont amené à considérer l'usinage de cette encoche par électro-enfonçage et non électro-érosion à fil.

En effet, cette technique permet de s'affranchir des jets d'eau (la pièce est alors plongée dans un bain de diélectrique). De plus, il y a moyen de soutenir la pièce dans un berceau qui évacuera la chaleur de manière plus efficace (d'autant plus qu'il y a brassage du liquide autour de la zone d'usinage).

Enfin, le fait d'usiner dans la 3^{ème} dimension permet d'épaissir localement la fine paroi et d'obtenir ainsi une meilleure étanchéité.

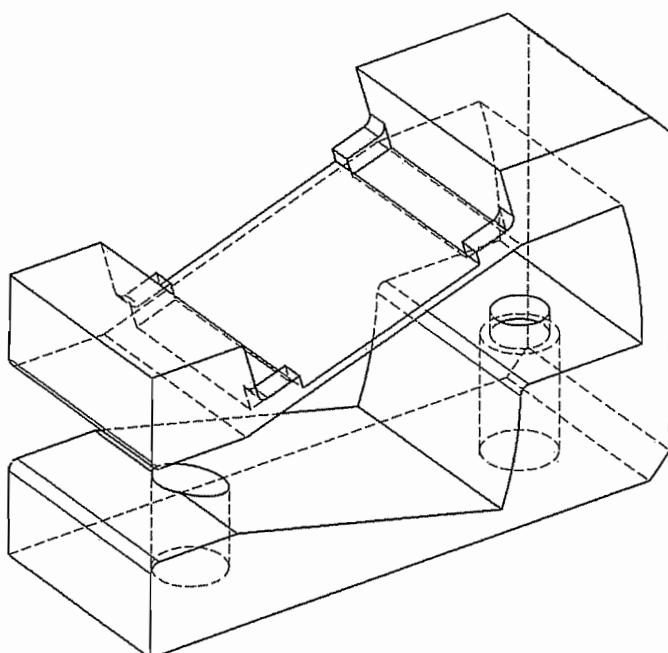


Figure 3 : corps de pompe, avec paroi séparatrices

Cet usinage sera réalisé grâce à une électrode en cuivre entièrement modelée grâce à l'électro-érosion à fil.



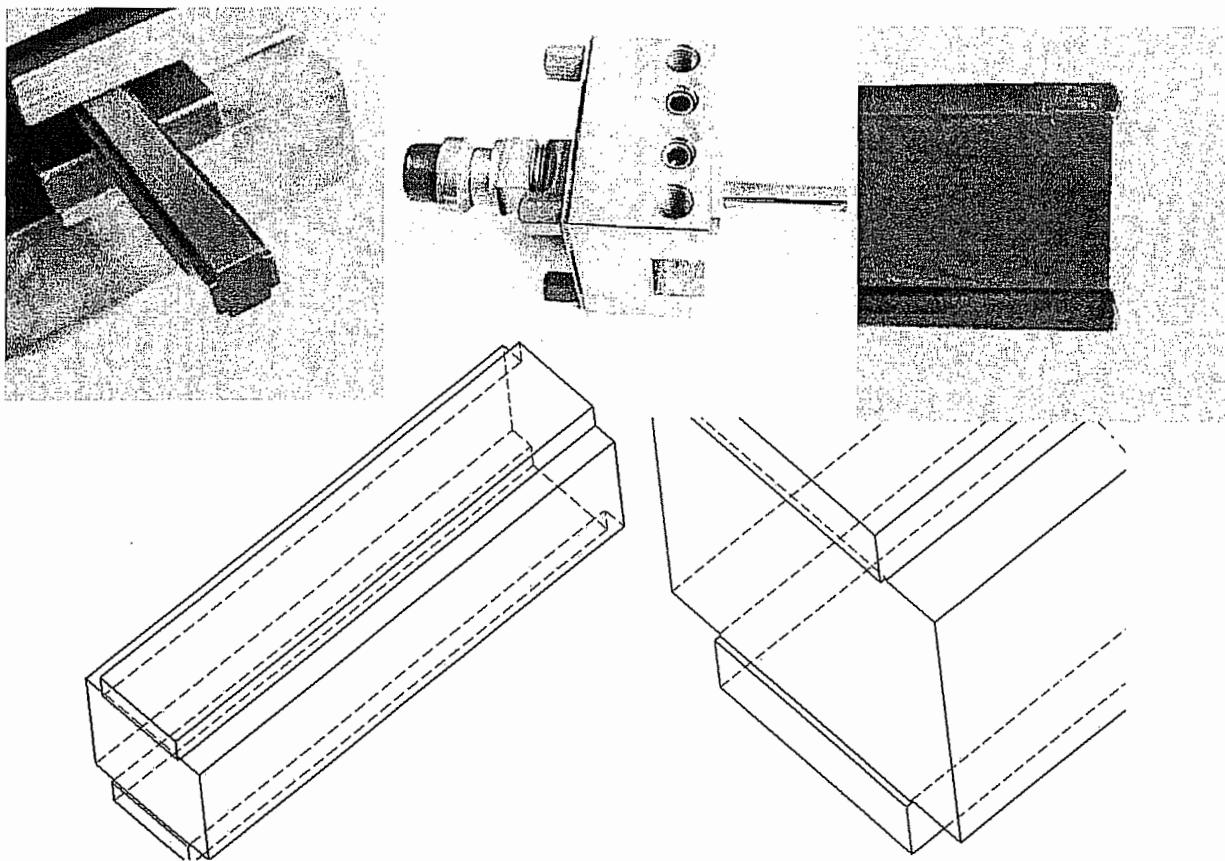


Figure 4 : électrode et son détail

Les dimensions de cette électrode sont fixées par ce que l'on appelle le sous dimensionnement radial. Ce sous dimensionnement est fixé par les matières en présence et les dimensions de la surface d'usinage de l'électrode.

Nous usinerons un premier essai d'électrode car nous brûlons du cuivre avec un fil « SWX-25 », qui n'est pas adapté mais que nous utilisons tout de même pour des questions de facilité (changement de fil non-évident). Ce couple ne donne pas les dimensions désirées, il faut alors corriger la trajectoire du fil afin d'obtenir la géométrie voulue (figure 6).

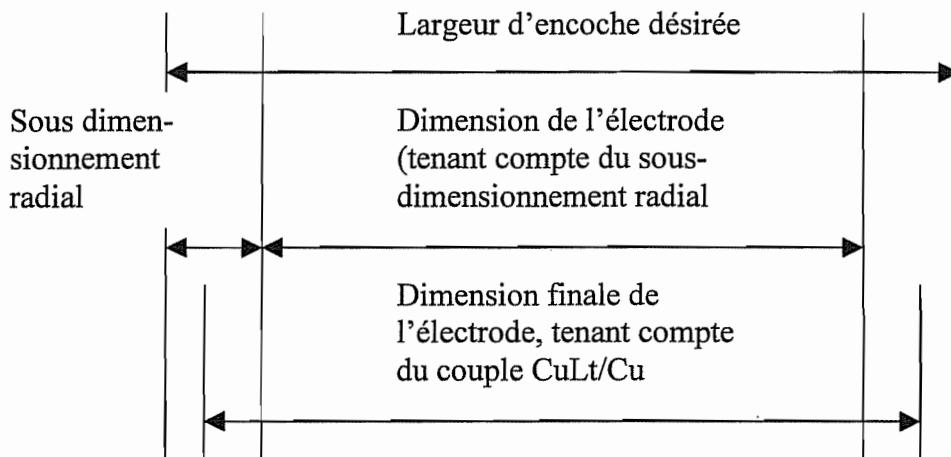
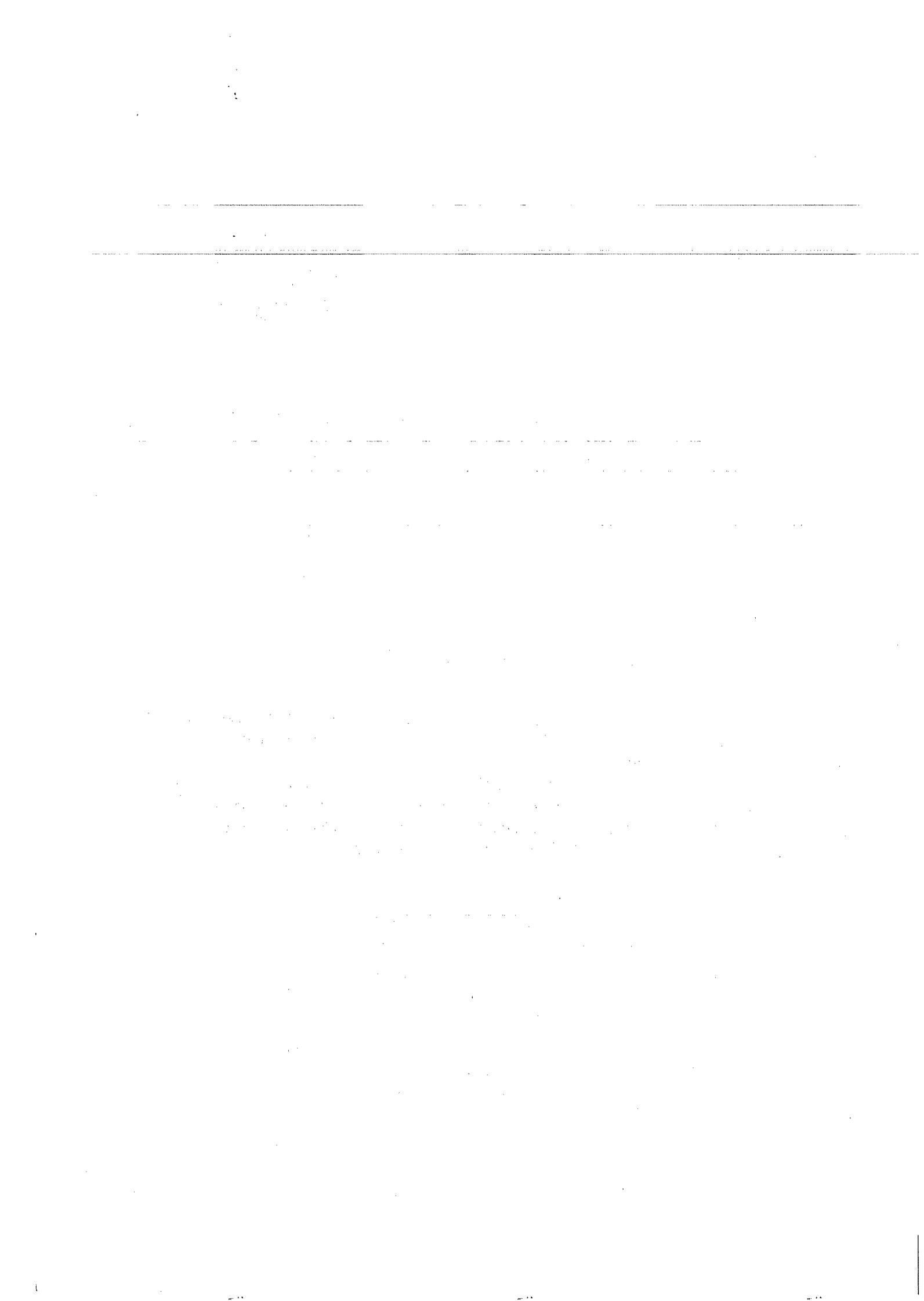


Figure 5 : calcul des dimensions de l'électrode



Comme déjà mentionné auparavant, la pièce sera soutenue dans une berceau. Celui-ci va permettre d'orienter la surface à usiner, d'évacuer plus aisément une partie de la chaleur dégagée par l'usinage et enfin de maintenir la pièce en position grâce au plateau magnétique (la matière à usiner étant du titane, on ne pourrait pas la maintenir, il faut donc un berceau magnétique).

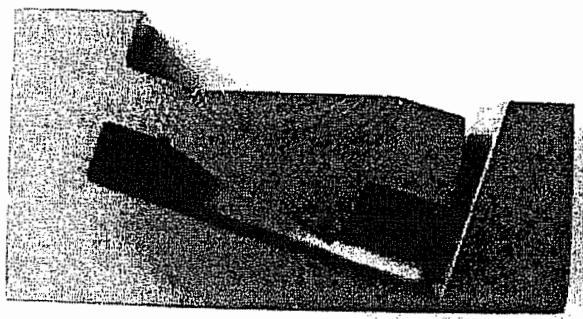


Figure 6 Berceau de maintien

Premier essai d'usinage

Un premier essai d'usinage a été réalisé le 6 août 2003. Cet usinage a duré environ 3h30. Cet essai n'est pas concluant car la matière se déforme sous l'effet de la chaleur dégagée par l'usinage. La masselotte citée plus haut est encore en cause. Elle se déplace vers le haut, entraînant la paroi fine. Celle-ci se retrouve alors transpercée par l'électrode.

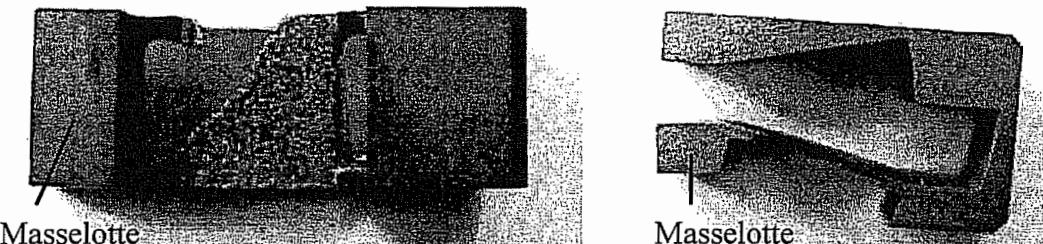


Figure 7 Pièce détruite par soulèvement de la masselotte

Afin de palier à cet inconvénient, on va usiner un autre berceau, qui maintiendra la masselotte en place.

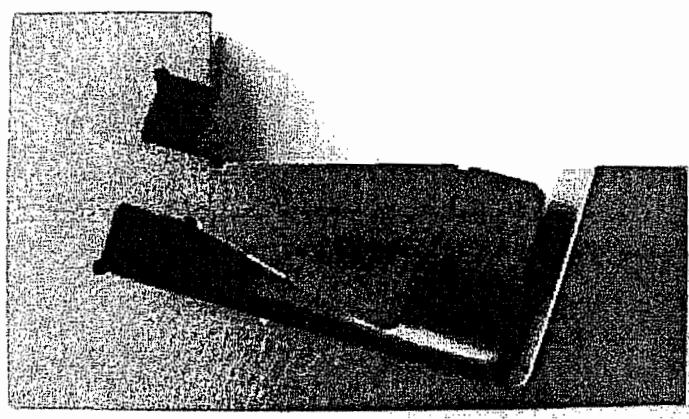


Figure 8 Berceau de maintien

La pièce obtenue alors correspond bien aux besoins.

6.6. Techniques de micro-usinage

Table des matières.

1	<i>Introduction</i>	1
1.1	Objectifs	1
1.2	Quelques précisions	2
1.3	Fabrication	2
1.3.1	Choix du procédé de fabrication	2
1.3.2	Précision dimensionnelle et finition de surface	3
1.3.3	Prix	4
1.4	Matériaux	4
1.5	Classification	5
2	<i>Fonderie en micromécanique</i>	7
2.1	Fonderie métallique	7
2.1.1	Introduction	7
2.1.2	Solidification des métaux	8
2.1.3	Relation entre structure et propriétés	9
2.1.4	Retrait	11
2.1.5	Problèmes	13
2.2	Moulage à ligne perdue	13
2.2.1	Principe	13
2.2.2	Matériaux	15
2.2.3	Limites et précisions	15
2.2.4	Avantages	15
2.2.5	Désavantages	15
2.3	En résumé	16
3	<i>Mise en oeuvre de composants en polymères ou de polymères composites</i>	17
3.1	Le micromoulage des polymères	17
3.2	Liga (Lithographie GalvanoforMung Abformung)	18
3.2.1	Principe	18
3.2.2	Matériaux	19
3.2.3	Limites et précisions	19
3.2.4	Avantages	20
3.2.5	Désavantages	20
3.3	Moulage par injection réactive	21
3.3.1	Principe	21
3.3.2	Problèmes	22
3.3.3	Matériaux	22
3.3.4	Limites et précisions	22
3.3.5	Avantages	22
3.3.6	Désavantages	22
3.4	Micro-injection des polymères et composites	23
3.4.1	Introduction	23
3.4.2	Principe	23
3.4.3	Matériaux	24
3.4.4	Limites et précisions	24
3.4.5	Avantages	24
3.4.6	Désavantages	24
3.5	En résumé	25

4 Techniques à enlèvement de matière	26
4.1 Electro-erosion (electrical discharge machining : EDM)	26
4.1.1 Principe	26
4.1.2 Propriétés	27
4.1.3 Types d'usinage	27
4.1.4 Variante du procédé	28
4.1.5 Matériaux	28
4.1.6 Limites et précisions	28
4.1.7 Avantages	29
4.1.8 Désavantages	29
4.2 Usinage à grande vitesse	30
4.2.1 Principe	30
4.2.2 Propriétés	30
4.2.3 Applications	31
4.2.4 Matériaux	31
4.2.5 Limites et précisions	31
4.2.6 Avantages	32
4.2.7 Désavantages	32
4.3 Usinage laser et le laser femtoseconde	33
4.3.1 Principe	33
4.3.2 Propriétés	34
4.3.3 Matériaux	34
4.3.4 Limites et précisions	34
4.3.5 Avantages	35
4.3.6 Désavantages	35
4.4 Usinage par ultrasons	36
4.4.1 Principe	36
4.4.2 Matériaux	37
4.4.3 Limites et précisions	37
4.4.4 Avantages	37
4.4.5 Désavantages	37
4.5 Usinage par jet d'eau (Hydrodynamique machining : HDM)	38
4.5.1 Principe	38
4.5.2 Matériaux	38
4.5.3 Limites et précisions	38
4.5.4 Avantages	38
4.5.5 Désavantages	38
4.6 En résumé	39
5 Techniques à masques ou à couches successives	40
5.1 Microgravure humide (bulk micromachining ou BMM)	40
5.1.1 Principes	40
5.1.2 Matériaux	41
5.1.3 Limites et précisions	42
5.1.4 Avantages	42
5.1.5 Désavantages	42
5.2 Micro-usinage de surface (Surface micromachining : SMM)	43
5.2.1 Principe	43
5.2.2 Matériaux	44
5.2.3 Limites et précisions, Avantages, Désavantages	44
5.3 Gravure plasma (Reaction ion Etching : RIE)	45
5.3.1 Principe	45

5.3.2 Matériaux	45
5.3.3 Limites et précisions	45
5.3.4 Avantages	46
5.3.5 Désavantages	46
5.4 Gravures ioniques et électroniques (Focused ion beam ou FIB et electron beam machining ou EBM)	47
5.4.1 Principe	47
5.4.2 Matériaux	47
5.4.3 Limites et Précsions	47
5.4.4 Avantages	48
5.4.5 Désavantages	48
5.5 Usinage electrochimique (EleCtrochemical machining : ECM)	50
5.5.1 Principe	50
5.5.2 Matériaux	50
5.5.3 Limites et précisions	50
5.5.4 Avantages	50
5.5.5 Désavantages	51
5.6 En résumé	52
6 Conclusions	53
7 Annexes	55
8 Bibliographie –références	63
<i>Conférence</i>	63
<i>Ouvrages</i>	63
<i>Cours</i>	64
<i>Sites internets</i>	64

Table des illustrations.

<i>Figure 1 : A : dendrite colonnaire ; B : dendritique équi-axe ; C :Structure amorphe équi-axe.</i>	8
<i>Figure 2 : Distribution de la température à l'interface moule-métal liquide lors de la solidification</i>	9
<i>Figure 3 : Illustration schématique des trois types de structures lors de la fonte du métal. A : Dendrite colonnaire ; B : dendrite équi-axe ; C : grains amorphes équi-axes</i>	9
<i>Figure 4 : Etapes de moulage à ligne perdue.</i>	14
<i>Figure 5 : Les étapes du LIGA.</i>	18
<i>Figure 6 : Micro-échangeur de chaleur réalisé par LIGA.</i>	19
<i>Figure 7 : Capteur d'accélération sur une puce électronique.</i>	20
<i>Figure 8 : Représentation schématique d'une machine à injection réactive.</i>	21
<i>Figure 9 : Injection des polymères.</i>	23
<i>Figure 10 : Principe de l'électro-érosion.</i>	26
<i>Figure 11 : Impacts corrosifs sur la pièce.</i>	27
<i>Figure 12 : Electrodécoupage.</i>	27
<i>Figure 13 : Electroformage.</i>	28
<i>Figure 14 : Electrode fabriquée par Electrodécoupage (Va servir à l'électrofraisage).</i>	29
<i>Figure 15 : Tour à grande vitesse avec outil en diamant.</i>	30
<i>Figure 16 : Roue dentée par meulage à grande vitesse.</i>	31
<i>Figure 17 : Chaîne de montage du laser femtoseconde haute cadence.</i>	33
<i>Figure 18 : L'image de gauche est une rainure dans de l'inox via un laser femtoseconde et l'image de droite via un laser nanoseconde.</i>	34
<i>Figure 19 : Machine à ultrasons.</i>	36
<i>Figure 20 : Gauche : Trou de diamètre 0,64 usiné dans un substrat en aluminium. Droite : même diamètre de trous dans du Plexiglas.</i>	37
<i>Figure 21 : Les différentes étapes de la microgravure humide.</i>	40
<i>Figure 22 : Capteur piezorésistif fabriqué par BMM.</i>	41
<i>Figure 23 : Principe du micro-usinage de surface.</i>	43
<i>Figure 24 : Capteur de pression usiné par SMM.</i>	44
<i>Figure 25 : Rainure dans une plaquette de silicium.</i>	45
<i>Figure 26 : Gravure FIB.</i>	47
<i>Figure 27 : Fibre optique taillée.</i>	48
<i>Figure 28 : Trous percés sur une gaufre de silicium par FIB..</i>	48
<i>Figure 29 : Trous percés sur une gaufre de silicium par EBM.</i>	49

1 INTRODUCTION

1.1 OBJECTIFS

Ces dernières décennies ont vu naître petit à petit les termes de micromécanique, micropositionneur, micropince, micromanipulation, etc. Ces mots font référence à un domaine qui connaît actuellement un essor considérable et qui est celui des micro-objets. Ce domaine présente de nombreux intérêts tels que le gain de matière, d'encombrement, la manipulation de composants jusqu'ici trop petits pour les moyens classiques ou difficilement accessibles, la production de masse. Le gain de matière et la production de masse permettent une réduction des coûts. Cependant, comme la plupart des sciences confrontées au micromonde, les techniques de fabrication classiques ne peuvent plus toutes être appliquées telles quelles. C'est ainsi que certaines techniques dites « traditionnelles » se sont adaptées alors que de nouvelles techniques ont vu le jour, dérivées souvent des techniques de fabrication des composants électroniques.

L'objectif de ce travail est de répertorier les techniques de fabrication, conventionnelles ou non, qui puissent être généralement mises en œuvre lors de la fabrication de composants de microsystèmes. Il comprend une description du procédé, de ses éventuelles spécificités, de ses limites et de sa précision, ainsi qu'une liste des principaux avantages et désavantages. Une présentation illustrée vient compléter ce rapport avec des schémas de principe et des photos de quelques applications. Cet état de l'art ne prétend pas couvrir toutes les techniques qui se font de par le monde, mais présenter les plus répandues et les plus prometteuses dans ce domaine du petit.

1.2 QUELQUES PRÉCISIONS

Il n'existe aucune spécification bien précise concernant la taille des objets appartenant au champ de la microtechnologie. Dans ce travail, nous tiendrons compte des techniques qui peuvent fabriquer des composants dont les dimensions vont de quelques millimètres à quelques nanomètres.

Les techniques dérivées des procédés de fabrication de composants électroniques et du micro-usinage du silicium s'appliquent surtout aux microsystèmes électromécaniques (MEMS¹). Les MEMS sont des structures monolithiques dans lesquelles l'actionneur et la commande sont fabriqués simultanément sur un même substrat par les techniques de fabrication similaires à celles des circuits intégrés en électronique. Ces techniques de fabrication sont limitées à cause des faibles épaisseurs qu'elles permettent (structures planes 2D). Ces procédés seront étudiés parmi les nouvelles techniques propres aux micromonde.[11][18]

1.3 FABRICATION

[11][12]

1.3.1 CHOIX DU PROCÉDÉ DE FABRICATION

Par fabrication on entend le processus de conversion d'un matériau brut en un produit qui peut être fini ou servir à la fabrication d'autres produits. Elle apporte de toutes les manières une valeur ajoutée à ce dernier. [1 à 6][12]

La fabrication répond à des critères spécifiques :

- un produit doit correspondre au schéma de conception qui lui a été donné, aux notifications du concepteur,
- il doit être produit dans l'environnement le plus favorable et par la méthode la plus économique,
- les qualités de mise en œuvre à chaque étape de la fabrication, du dessin à l'assemblage, ainsi que le niveau de qualité doivent être appropriés au produit,
- il faut qu'il y ait une certaine flexibilité des méthodes de fabrication qui permettra de tenir compte des nouveaux moyens de production.

¹ MEMS : Micro ElectroMechanical Systems.

La fabrication peut s'envisager seule ou incluse dans un processus plus général allant de l'étude de marché au produit fini, en passant par l'évaluation, la conception, le dessin, la production, le contrôle, l'emballage et la mise sur le marché. Ici elle sera prise en compte isolément.

La sélection du matériau influence le type de mise en œuvre de façon décisive. En effet, chaque matériau possède, en plus de ses propriétés mécaniques, physiques, et chimiques, certaines propriétés de mise en œuvre qui détermineront si ce matériau peut être fondu, formé à chaud ou à froid, soudé, usiné, et avec quelle facilité et via quels moyens. En retour, il faut tenir aussi compte du fait que certaines des propriétés finales du produit, sa durée de vie et son coût final dépendront du procédé de fabrication choisi.

Pour ces raisons, le coût des opérations sera également un facteur déterminant dans le choix de la technique, ainsi que la taille, l'épaisseur, et la complexité de la forme. Parfois, certains facteurs, bien que souvent négligés, peuvent intervenir dans le choix du procédé. On pense notamment au facteur polluant, à la possibilité de recyclage ou à l'apparence de la pièce après fabrication.

De plus en plus, on observe une tendance à développer ce que l'on appelle en anglais le «design for manufacturing», qui est une approche dans laquelle le concepteur réadapte ses schémas pour tenir compte des contraintes de fabrication, qui sont le procédé choisi, la capacité et les limites des matériaux sélectionnés, les machines et équipements de fabrication. Le « design for manufacturing » reste cependant toute une approche en soi, exigeant une bonne maîtrise de tous les éléments entrant en compte dans le processus général de fabrication. Cette maîtrise est encore loin d'être totale dans le domaine du micromonde. Nous n'envisagerons donc pas cet aspect des choses.

1.3.2 PRÉCISION DIMENSIONNELLE ET FINITION DE SURFACE

L'observation du produit fini dans le cas de micro-objets nécessite l'utilisation systématique d'un microscope, qui peut être par exemple à balayage électronique. Mais celui-ci ne donne qu'une image bidimensionnelle des objets réalisés. On se rend dès lors compte que le contrôle de la qualité, ainsi que celui des dimensions et des formes devient problématique.

Les tolérances et la finition dans le macromonde ne sont pas toujours faciles à maîtriser. Par exemple, les tolérances obtenues à chaud ne sont pas aussi bonnes que celles obtenues à froid, à cause des changements dimensionnels, des oxydations de surface et d'éventuels gauchissements dus au refroidissement. Maîtriser les tolérances dans le micromonde peut être encore plus difficile, car si les problèmes cités ci-dessus existent encore, ils sont souvent plus difficiles à maîtriser du fait de la difficulté à positionner, à manipuler et à mesurer. Ainsi, l'usinage traditionnel avec des micro-outils sera propice à l'élaboration de composants tridimensionnels si les tolérances de fabrication ne sont pas extrêmes. Il est à noter que l'automatisation des procédés et des procédures de contrôle permet d'améliorer la qualité, dans le sens où l'erreur humaine est minimisée.

Dans le macromonde, il existe des protocoles de contrôle de qualité standardisés, qui ne sont pas seulement appliqués à la fin du processus de fabrication, mais à chaque étape de ce processus. Ainsi, du dessin à la production, la responsabilité de chacun est engagée. Un des aspects qui reste à envisager serait d'établir des procédures similaires pour le micromonde, afin d'établir un contrôle valable étant donné que les produits défectueux peuvent être très coûteux car souvent plus chers à réparer qu'à fabriquer.

1.3.3 PRIX

Comme énoncé plus haut, un des intérêts des microcomposants est la production de masse, qui fait baisser le prix de revient. Mais le prix est aussi fonction du temps de fabrication, du nombre d'étapes à effectuer, du taux de pollution ou de souillure que la fabrication entraîne, du gaspillage de matière brute (copeaux). La tendance dans les techniques de fabrication classiques est d'adopter des techniques aboutissant à un produit fini ou ne demandant qu'une opération supplémentaire de finition. Cette tendance est fortement observée dans la fabrication des MEMS, et autres structures dont l'ordre de grandeur se situe plus près du micron que du millimètre.

Cependant, à part les MEMS, et quelques microsystèmes réellement produits en masse (micro-injecteurs, microcapteurs), la plupart des composants fabriqués à l'heure actuelle sont des prototypes de laboratoire ou ne sont pas produits en assez grande quantité pour répondre à des règles de marché de faible coût. Mais les quelques microsystèmes cités ci-dessus laissent espérer qu'à l'avenir, la production des microcomposants répondra davantage aux critères de compétitivité.

1.4 MATÉRIAUX

[11][12]

Les matériaux mis en œuvre sont les suivants :

- les métaux ferreux comme les aciers, les aciers au carbone, les aciers alliés, les inox ;
- les métaux non ferreux comme l'aluminium, le magnésium, le cuivre, le nickel, le titane, les superalliages, les métaux réfractaires, le beryllium, le zirconium, les alliages à basse température d'ébullition, les métaux précieux ;
- les polymères constitués essentiellement des thermoplastiques, des thermodurcissables, et des élastomères ;
- les céramiques, les céramiques de verre, le graphite, le diamant, et matériaux similaires ;
- les matériaux composites tels que les plastiques renforcés de fibres, les métaux renforcés et les céramiques renforcées.

A côté de ces matériaux qui pourraient être qualifiés de classiques, il y a les nanomatériaux, les alliages à mémoire de forme, les alliages amorphes, les supraconducteurs et plusieurs autres matériaux nouveaux aux propriétés uniques.

La sélection des matériaux n'est pas une affaire aisée, et devient un problème à part entière avec le développement de nouveaux matériaux. En plus des propriétés de fabrication, il faut tenir compte des propriétés mécaniques, physiques, chimiques tant pour la fonction de l'objet à fabriquer que pour la fabrication en elle-même.

1.5 CLASSIFICATION

[11][12]

Une classification des catégories des techniques de fabrication pourrait être celle qui consiste à mettre d'un côté, les techniques dérivées du macromonde et celles propres au micromonde. Dans la littérature sur les techniques de microfabrication, on se contente en général de faire une énumération des techniques capables de fabriquer des pièces dont les dimensions se trouvent dans la plage allant du micron au millimètre. Dans la réalité, il existe une transition moins nette entre le macro et le micromonde. Dans l'état actuel de miniaturisation, ce sont souvent des pièces de dimension mésoscopiques avec certains détails microscopiques qui doivent être réalisées.

C'est pour cette raison que je propose de faire une classification par types de technique, pour avoir un aperçu des techniques traditionnelles qui restent viables dans le micromonde jusqu'à une certaine mesure et de voir quelles nouvelles techniques viennent s'ajouter. Ces différentes classes sont :

- les techniques de fonderie du métal, des poudres céramiques ou autres poudres,
- les techniques de mise en œuvre des polymère ;
- les techniques avec enlèvement de matière ;
- les techniques employant des masques ;
- les techniques de formage ;
- les techniques de traitement de surface et de finition ;
- les techniques de soudage et d'assemblage.

Les 3 dernières classes ne seront pas envisagées ici : le formage et les traitements de surface, faute de documentation exhaustive ; le soudage et l'assemblage parce qu'ils représentent un domaine précis en soi qui demande une étude supplémentaire pour voir jusqu'à quelle échelle l'assemblage peut encore être envisagé. Cependant, certaines techniques, comme l'électrodepositio, servent de techniques de finition de surface. Elles seront reprises dans certaines autres classes.

Dans la littérature actuelle, l'assemblage n'est pas toujours envisagé pour des dimensions submillimétriques. Certaines des techniques qui pourraient être des techniques d'assemblage comme le soudage laser, seront envisagées dans les techniques à enlèvement de matière.

Pour chacune des techniques, il y aura un descriptif du procédé, ses limites et la précision ainsi que les états de surface que l'on peut atteindre grâce à ce procédé, les matériaux qui lui sont adaptés, ses avantages et désavantages éventuels et ses coûts.

2 FONDERIE EN MICROMÉCANIQUE

[12]

2.1 FONDERIE MÉTALLIQUE

2.1.1 INTRODUCTION

Ce procédé permet de mettre en œuvre du métal ou un semi-conducteur à l'état liquide, qui est introduit dans un moule, refroidi à température ambiante et finalement retiré du moule.

C'est une technique de fabrication très employée dans le macromonde, qui ne semble pas être très utilisée comme procédé de microfabrication. Il faut faire une distinction entre les procédés de moulage où le métal est électroformé, car la maîtrise du travail du métal fondu n'est pas la même que celle du métal électroformé.

Il n'est pas possible d'ignorer la fonderie parce que c'est un procédé qui permet de fabriquer des pièces dont l'épaisseur est inférieure au millimètre notamment les gaufres de silicium à partir desquelles sont fabriqués les puces électroniques, et sur lesquelles repose toute l'industrie si florissante des circuits intégrés (IC²).

La fonderie métallique est un procédé qui demande une très bonne maîtrise de l'écoulement des fluides, en particulier des métaux fondus, de la solidification des métaux, des échanges thermiques, bref, une connaissance des sciences métallurgiques. Cette connaissance est indispensable car de celle-ci dépendent directement la forme, les dimensions, la composition chimique des grains de la pièce fabriquée, et donc sa fonctionnalité. Pour la fabrication des gaufres destinées aux puces électroniques par exemple, certaines aspects doivent être contrôlés, telles la monocristalinité, et la pureté de la pièce fabriquer. Ce qui entraîne la mise en place de salles blanches à la pureté de l'air contrôlée. Or, le devenir de ces paramètres lors de la réduction d'échelle est quelque chose qui doit encore être étudié. Cependant, la technique telle qu'elle existe actuellement permet de fabriquer quelques pièces dont les dimensions (l'une des dimensions au moins) sont de l'ordre du demi-millimètre.

² IC : Integrated Circuit

2.1.2 SOLIDIFICATION DES MÉTAUX

Les métaux purs ont un point d'ébullition fixe et solidifient à température constante. Il y a formation d'un front de solidification qui se déplace dans le métal fondu de l'interface moule-liquide vers le bord du métal fondu (voir figure 2). Une fois solidifiée, la pièce est démoulée suivant la technique de fonte employée, et est refroidie à l'air ambiant.

Le refroidissement rapide provoque la création de cristaux à fins grains équi-axes (dont les axes n'ont pas d'orientation précise). Ces grains croissent dans la direction opposée à celle du transfert de chaleur à travers le moule. Ces cristaux ont une configuration longitudinale colonnaire (ils s'empilent en colonne). Ces structures sont schématisées à la figure 1

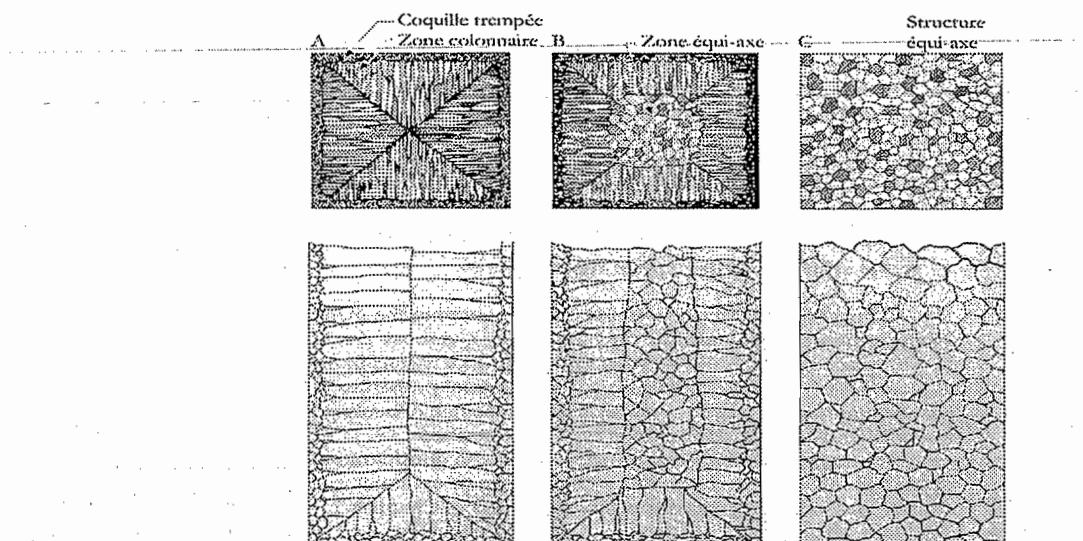


Figure 1 : A : dendrite colonnaire ; B : dendritique équi-axe ; C : Structure amorphe équi-axe.

Les alliages ont une plage de refroidissement qui s'étend de la température de fusion à la température de solidification, ce qui veut dire que leur refroidissement ne se fait pas à vitesse constante. Les grains ont aussi une configuration longitudinale colonnaire, mais ils croissent sous forme de dendrites (tentaculaires). Par exemple pour un acier au carbone, plus le pourcentage de carbone est élevé, plus la dendrite est accentuée.

2.1.3 RELATION ENTRE STRUCTURE ET PROPRIÉTÉS

Comme dit dans l'introduction, plusieurs facteurs influencent la pièce qui sortira du moule.

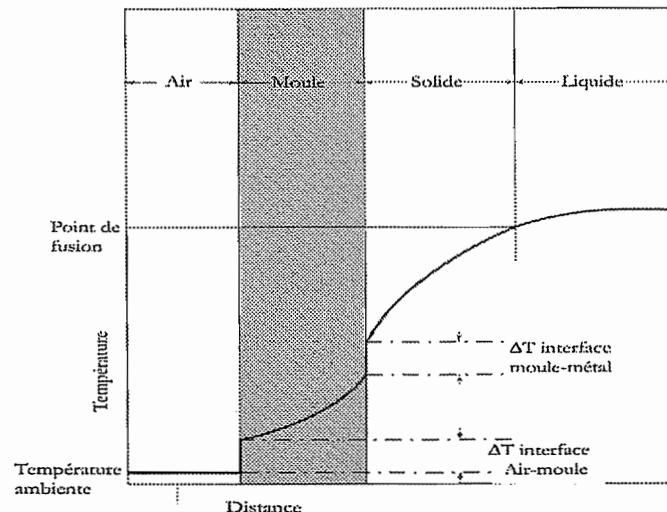


Figure 2 : Distribution de la température à l'interface moule-métal liquide lors de la solidification

Le temps de refroidissement est un des ces facteurs. Une vitesse de refroidissement faible ($\sim 10^2$ K/s) ou un temps de refroidissement local long provoquera une structure dendritique plus dure, avec de grands espaces entre les bras de dendrite. Si le temps de refroidissement est un peu plus court c'est à dire la vitesse plus grande ($\sim 10^4$ K/s), alors la structure sera plus fine, avec de plus petits espaces entre les bras de dendrite. Il est possible d'avoir une structure amorphe en diminuant très fort le temps de refroidissement local ($\sim 10^6$ à 10^8 K/s). La dendrite n'a pas le temps de se former. La figure 3 illustre ces différentes structures.

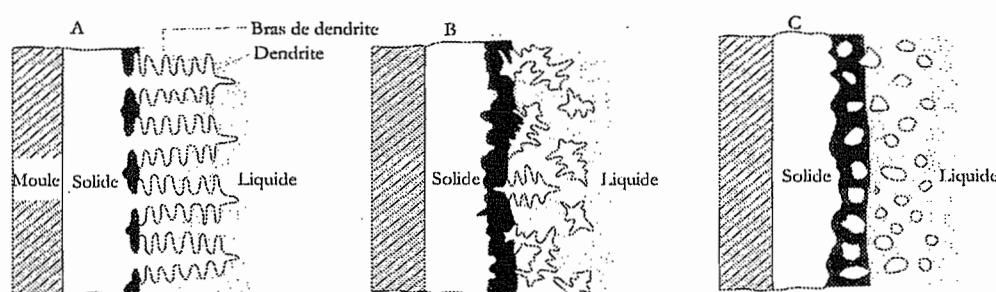


Figure 3 : Illustration schématique des trois types de structures lors de la fonte du métal. A : Dendrite colonnaire ; B : dendrite équi-axe ; C : grains amorphes équi-axes

Plus le grain est fin, plus la résistance et la ductilité de la pièce moulée sont grandes, la microporosité faible et la tendance aux craquements pendant la solidification diminue.

Certaines propriétés anisotropiques sont obtenues en régulant l'uniformité de la distribution des grains et de leur grosseur.

Les bras dendritiques sont cassant et se brisent si le métal liquide est soumis à une agitation ou à des vibrations mécaniques, lors de la phase de solidification. Cela contribue à avoir un grain plus fin, équi-axe, non dendritique et mieux réparti dans la pièce. Le même résultat peut être obtenu par convection au sein du liquide. Mais cette dernière technique est plus difficile à mettre en œuvre

Une non-uniformité des grains dans les macropièces provient parfois de la séparation des composants alliés, qui ont une densité différente de celle du métal. C'est ce que l'on appelle la ségrégation gravitationnelle. Des expériences sont menées actuellement sous microgravité pour étudier l'impact de l'absence de différence de densité lors de la solidification. Dans le cas de pièces très petites, cela a un impact moindre principalement pour une raison : comme le montre la formule [1], le temps de solidification local est proportionnel au carré du volume. Or si le volume diminue, le temps de solidification aussi. Ce qui ne laisse pas vraiment le temps aux composants plus lourd de se déposer. Mais encore une fois, on ne sait pas exactement à partir de quelle taille la différence de densité cesse de jouer. C'est une étude qui reste à faire.

La façon dont s'écoule le métal fondu a des conséquences sur les propriétés car elle influence le refroidissement. L'écoulement peut provoquer un refroidissement prématué, des turbulences qui à leur tour seront source d'irrégularités voir de défauts dans la structure de la pièce. C'est pour cette raison qu'il faut soigner le dessin du moule et des chemins d'acheminement du métal car ils déterminent le type d'écoulement (laminaire ou turbulent).

La fluidité (viscosité cinématique) du métal fondu a, quant à elle, un rôle important dans la façon dont le moule sera rempli. Les tensions de surface réduisent la fluidité. Or, il se forme souvent à la surface du métal qui s'écoule une couche d'oxyde qui augmente les tensions de surfaces. La fluidité est inversément proportionnelle à la durée de solidification. Elle dépend aussi du dessin du moule, du matériau de celui-ci, ainsi que des caractéristiques de sa surface, du gradient de température par rapport au point d'ébullition.

Plus la température est élevée au-dessus du point de fusion, plus la fluidité est grande. Il est évident dès lors que la vitesse de remplissage du moule est aussi déterminante dans les paramètres de fluidité puisqu'en refroidissant le métal fondu devient de moins en moins fluide. Donc si la solidification est retardée, un meilleur résultat dans le remplissage du moule sera garanti. Le temps de solidification est donné ci-après :

$$t_{solidification} = C \left(\frac{volume}{surface} \right)^2 \quad [1]$$

Où C est une constante [s/m^2], le volume et la surface étant ceux de la pièce coulée, et $t_{solidification}$ [s] est le temps de solidification de la pièce coulée.

2.1.4 RETRAIT

Un des problèmes majeurs de ce procédé est le retrait. Lors de la solidification, on constate un retrait du métal qui provoque des modifications dimensionnelles et parfois des craquellements dus :

- à la contraction du métal fondu pendant le refroidissement avant la solidification ;
- à la contraction durant le changement de phase ;
- à la contraction du métal après solidification.

Le retrait le plus important est le dernier cité. Mais malheureusement c'est celui qui est le moins maîtrisé car la pièce peut avoir des formes et des épaisseurs différentes qui subiront ce retrait avec ou sans dommage. Le tableau 1 ci-dessous reprend les retraits durant la solidification pour quelques métaux usuels.

Métal ou alliage	Contraction volumétrique de solidification (%)
Aluminium	6,6
Al-4,5% Cu	6,3
Al-12% Si	3,8
Acier au carbone	2,5-3
Acier au carbone à 1%	4
Cuivre	4,9
70 % Cu-30 % Zn	4,5
90 % Cu-10 % Al	4
Fer gris	Une expansion jusque 2,5
Magnésium	4,2
Fer blanc	4-5,5
Zinc	6,5

Tableau 1 : Contraction de quelques métaux lors de la solidification.

2.1.5 PROBLÈMES

Les défauts les plus souvent rencontrés sont des projections métalliques (bavures), des cavités dues au retrait et aux gaz qui peuvent se dégager, des craquements provenant le plus souvent d'un retrait contrarié. Des discontinuités sont aussi rencontrées, des défauts de surface, des pièces incomplètes si la température est trop basse, un gauchissement de la pièce, des inclusions qui peuvent être sources de tensions internes indésirables. Ces inclusions sont souvent le fruit de la réaction du métal fondu avec le matériau du moule ou avec le milieu ambiant (oxygène).

Un autre problème souvent présent est la porosité. Elle est causée aussi bien par le retrait que par des microbulles de gaz qui restent emprisonnées, ou par les deux. Si la dendrite développée est à gros grains, des pores restent coincés entre les bras. La porosité nuit à la ductilité de la pièce et à son état de surface.

La porosité des alliages se réduit ou s'élimine en appliquant un gradient de température élevé au dessus de la température de fusion. Cela réduit le grain et donc élimine les micropores. Une autre solution consiste à travailler sous gaz inerte ou sous vide. Et si c'est de l'oxygène qui est coincé on emploie un gaz désoxygénant.

2.2 MOULAGE À LIGNE PERDUE

2.2.1 PRINCIPE

C'est le moulage classique qui produit les plus petites pièces possibles. Le schéma ci-dessous (figure 4) décrit les différentes étapes de ce procédé. Comme le montre cette figure, le modèle est d'abord réalisé en cire ou en plastique (polystyrène). Il est souvent réalisé par injection de la cire ou du plastique fondu dans un moule métallique. Mais il peut être fait aussi par prototypage rapide. Une fois démoulé, le modèle est plongé dans une boue de matériau réfractaire comme par exemple celui constitué par des particules de silice mélangées à un liant, à de l'eau, à des acides et à du silicate d'éthyle, puis est mis à sécher. Après un premier séchage, on le replonge autant de fois que nécessaire pour avoir l'épaisseur souhaitée. Une fois sec, on le chauffe entre 90°C et 175°C pendant environ 12 heures, ce qui permet de fondre la cire ou le plastique et de l'évacuer. Une fois vidée du modèle, le moule est cuit à des températures allant de 650°C à 1050°C pendant 4 heures. Cette opération permet d'éliminer l'eau renfermée chimiquement dans le moule et de brûler les éventuels résidus du modèle en plastique ou en cire.

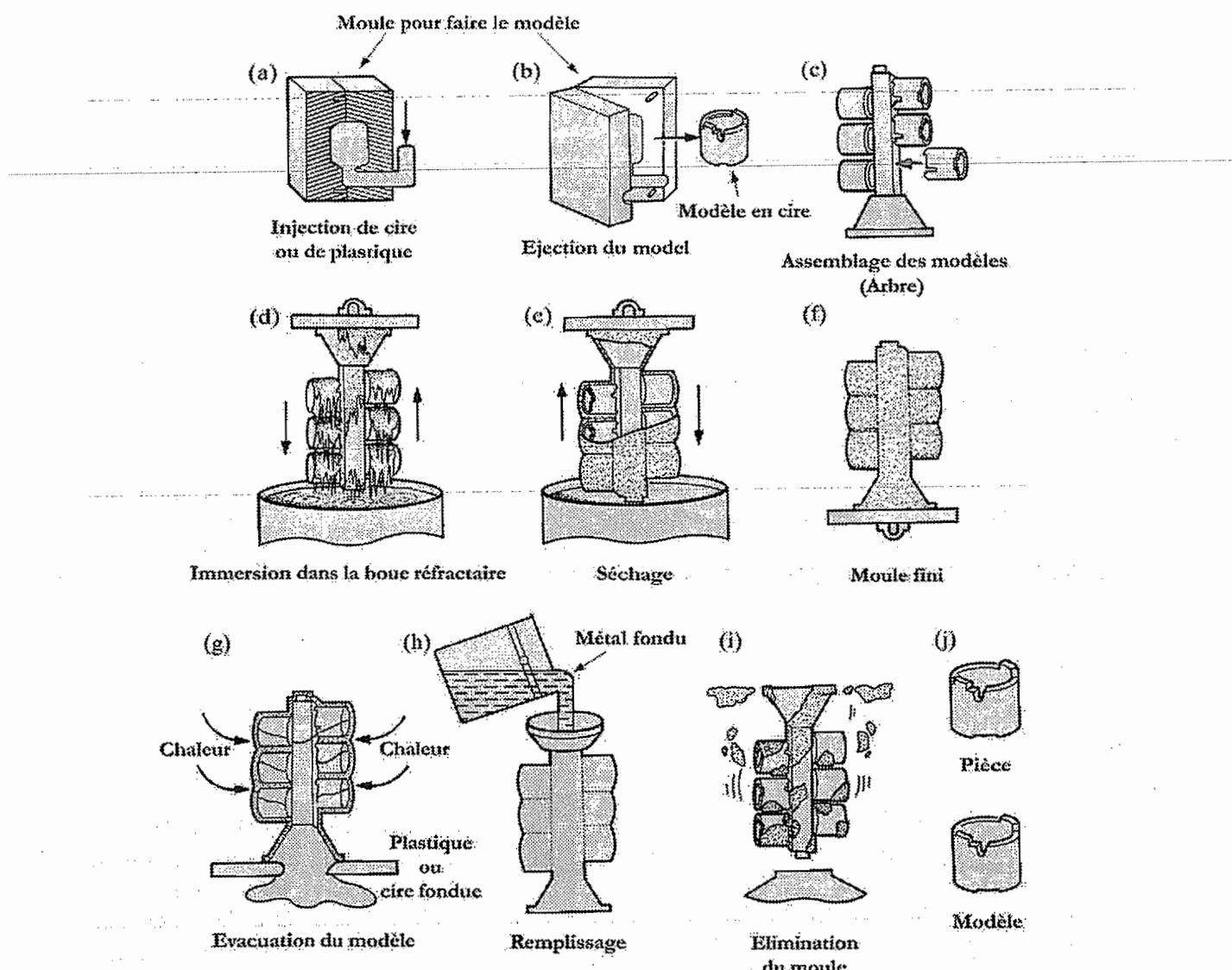


Figure 4 : Etapes de moulage à ligne perdue.

Finalement après le refroidissement du moule, on coule le métal ou l'alliage de métal qui constituera la pièce définitive. Quand cette dernière aura complètement refroidi, on casse le moule pour récupérer la pièce.

Comme l'indique le schéma de la figure 4, les modèles sont souvent montés en une structure pour permettre un plus grand débit de production. Ce procédé sert à fabriquer des pièces de type engrenages, valves, cames.

2.2.2 MATÉRIAUX

Ce procédé permet de travailler aussi bien les métaux ferreux que les non-ferreux. Quasiment tous les types d'alliage peuvent être mis en œuvre par le moulage à ligne perdue.

2.2.3 LIMITES ET PRÉCISIONS

Les plus petites pièces produites par ce procédé sont de l'ordre du millimètre sur une ou deux de leurs dimensions et pèsent environ 1 gramme. L'état de surface est de l'ordre de 0,5 à 3 μm Ra (voir annexe). Les tolérances sont en général de l'ordre de quelques centièmes de millimètres pour des applications dites de haute précision. Mais pour les applications commerciales, les tolérances sont de l'ordre de 0,8 mm.

2.2.4 AVANTAGES

Cette technique est la seule qui permette, parmi les techniques de moulage classique, d'obtenir de petites pièces et des formes complexes. Le fait que l'on ne doive pas se préoccuper du démolage le permet. En plus, de très bons états de surface sont obtenus, ainsi que de bonnes tolérances. En outre, il est possible de fabriquer des détails très précis. Le moulage à ligne perdue nécessite peu ou pas d'opération de finition.

2.2.5 DÉSAVANTAGES

Les pièces coulées ont une porosité relativement grande. De plus, le temps de mise en œuvre est relativement important. Il faut refaire le moule et le modèle pour chaque nouvelle pièce et la méthode de fabrication du modèle doit être précise. C'est un procédé qui s'avère onéreux si on ne fabrique pas les pièces avec un grand débit de production. La précision atteinte, bien qu'elle soit l'une des meilleures dans les procédés de fonte de métaux, n'est pas particulièrement élevée comparée aux autres techniques de microfabrication.

2.3 EN RÉSUMÉ

3 MISE EN OEUVRE DE COMPOSANTS EN POLYMÈRES OU DE POLYMÈRES COMPOSITES

3.1 LE MICROMOULAGE DES POLYMERES

[7][9][11][15][16]

L'une des seules méthodes pour produire des microcomposants en polymères est le moulage. Mais, dans le micromoulage, il existe différents types de fabrication des moules et différentes méthodes de remplissage des moules.

Les méthodes de fabrication des moules sont les suivantes : le LIGA³, l'électro-érosion, la gravure laser, l'usinage à grande vitesse et l'usinage au diamant.

Seule la technique LIGA sera abordée dans cette section, parce que bien qu'elle serve aussi à la fabrication de structures métalliques, c'est la plus adaptée pour le micromoulage de polymère quand il est nécessaire d'obtenir des tolérances très serrées sur des pièces de très petites dimensions. Et c'est la seule technique qui ne soit pas à enlèvement de matière. Les autres seront envisagées lors de la section concernant ces dernières.

Les méthodes de remplissage du moule dépendent du type de polymère que l'on veut mettre en œuvre. Les plus répandues sont l'injection réactive (reaction injection molding : RIM), l'injection des thermoplastiques et le moulage par impression. Ce dernier ne sera pas traité car il est employé pour des applications très particulières et il rejoint la fabrication des circuits intégrés sur gaufres de silicium.

Contrairement à la technique du moulage à ligne perdue vue ci-dessus pour les métaux, le moulage des polymères pourrait être plus rentable, grâce à la bonne tenue des moules après moulage et démoulage. Ils peuvent donc effectuer, selon le matériau, plusieurs dizaines, voire centaines de cycle.

Actuellement la plupart des pièces fabriquées via LIGA proviennent de l'institut des microtechnologies d'Allemagne à Mainz (IMM) et le CAMD⁴ aux U.S.A

³ LIGA : Lithographie galvanoformung abformung

⁴ CAMD : Center for advanced microstructures and devices

3.2 LIGA (LITHOGRAPHIE GALVANOFORMUNG ABFORMUNG)

[7][9][11][15][16]

3.2.1 PRINCIPE

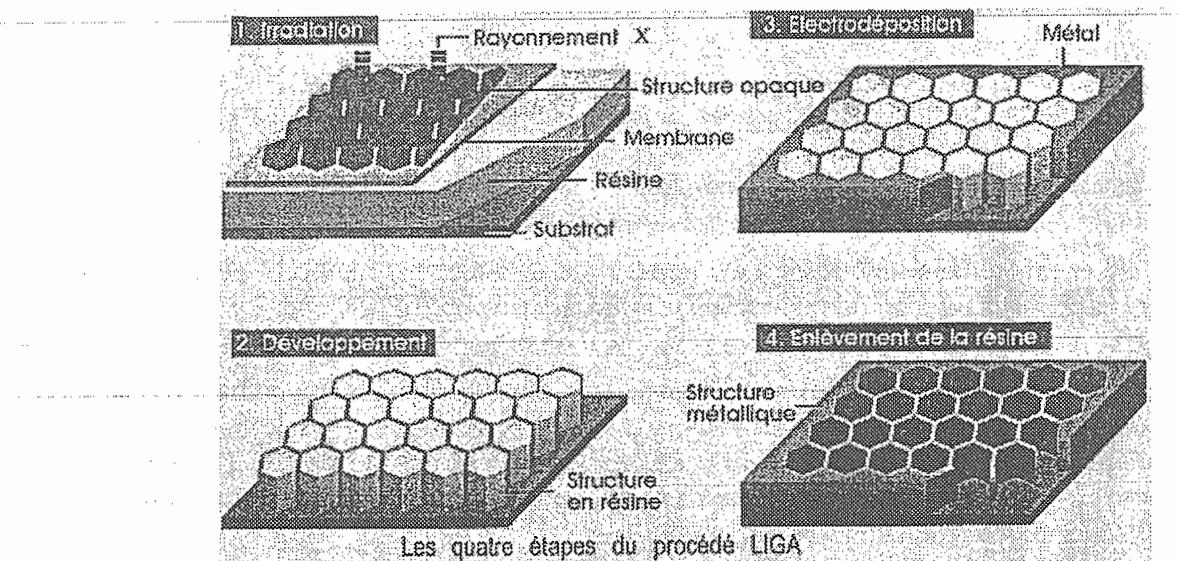


Figure 5 : Les étapes du LIGA.

Le LIGA est un procédé hybride entre les procédés basés sur la technologie du silicium, et les procédés de moulage classique. Comme le montre la figure 5, il consiste à superposer plusieurs couches dont un substrat, une résine épaisse, et un filtre se trouvant sur une membrane photosensible. On irradie la résine à travers le filtre pour pouvoir garder seulement certains blocs qui seront les formes à usiner plus tard. On reforme par électrodéposition les parties qui ont été éliminées par irradiation, et finalement on retire la résine. Il reste ainsi une structure qui est soit la structure finie ou qui peut servir de moule à former des structures en plastiques ou autres matériaux, par injection ou par électrodéposition. Des expositions successives permettent de réaliser des moules à empilement pour l'élaboration de composants complexes.

Il existe des variantes à ce système. Notamment le LIGA-like-process, qui remplace le rayonnement X par un rayonnement synchrotron pour avoir de plus belles finitions. C'est d'ailleurs le seul sur lequel les recherches continuent. Il y a aussi le LIGA-sacrificial qui conduit, comme le micro-usinage de surface (voir paragraphe 5.2), à des structures flottantes.

Ce procédé est surtout employé pour usiner des structures plus épaisses par rapport au BMM⁵ ou au SMM⁶ (voir paragraphes 5.2 et 5.3). On fabrique, grâce au LIGA, des microfiltres, des microconnecteurs multipins, des microcapteurs et des microstructures optiques.

⁵ BMM : Bulk MicroMachining

⁶ SMM : Surface MicroMachining

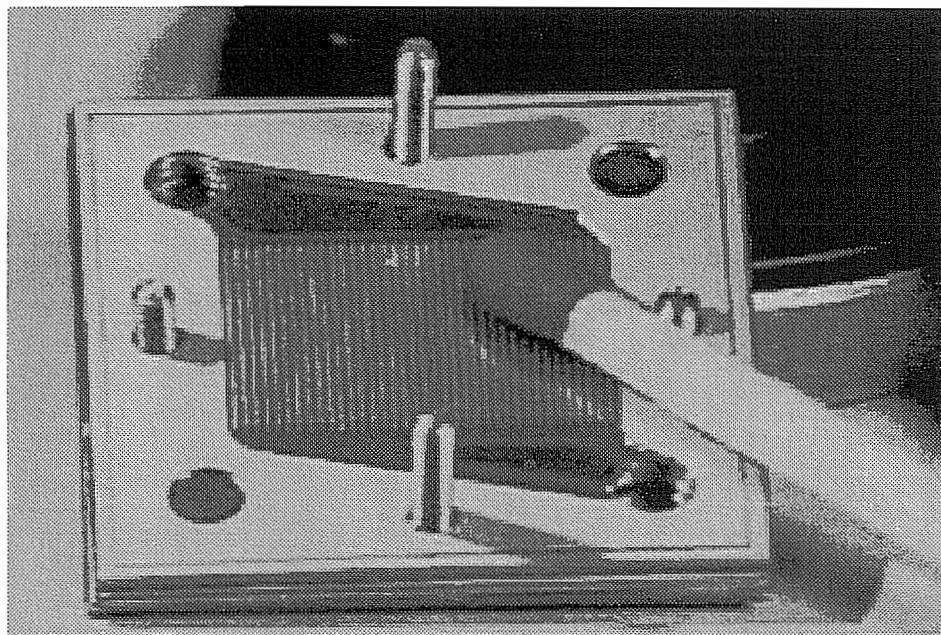


Figure 6 : Micro-échangeur de chaleur réalisé par LIGA.

3.2.2 MATÉRIAUX

La résine est le plus souvent en PMMA (polyméthyle méthacrylate). Les métaux électrodeposités sont du cuivre ou du nickel. Bien que cette technologie permette de mettre en œuvre les polymères et les composites, elle permet aussi de fabriquer des pièces métalliques comme le montre la figure 6. Les matériaux injectés sont donc du plastique, des composites, du verre, des céramiques ou des métaux. Cette méthode permet donc la mise en œuvre d'un très grand nombre de matériaux. Le LIGA permet aussi la mise en œuvre de matériaux actifs (magnétiques, piézo-électriques) dans les microstructures.

3.2.3 LIMITES ET PRÉCISIONS

L'ordre de grandeur des pièces varie en général entre 20 µm et 500 µm. De plus, il est possible d'usiner des pièces en 2,5D. Plusieurs composants de microstructures peuvent être construits par ce procédé, notamment des bobines en cuivre très plates. Il est possible pour des applications très particulières de descendre jusque 3 µm pour une des dimensions, avec des détails de surface atteignant 0,25 µm et une précision de quelques centaines de nanomètres. L'état de surface va de 0,02 à 0,03 µm Ra. Les dimensions maximales que l'on peut atteindre sont de 20x60 mm.

3.2.4 AVANTAGES

Le LIGA permet une grande diversité de combinaisons géométriques donc une certaine complexité de forme, bien que ce soit une méthode présentant certaines analogies avec les technologies du silicium pour l'électronique. Les microcomposants élaborés par cette technologie sont exploitables dans des structures sophistiquées, voire hybrides, puisque des combinaisons de matériaux et de formes peuvent être envisagées. Bien que ce soit un procédé de fabrication par couches, certaines structures peuvent être en 2,5D, grâce à l'approche hybride qu'elle permet. La figure 7 montre un microcapteur construit sur une puce électronique, qui illustre très bien ce caractère hybride.

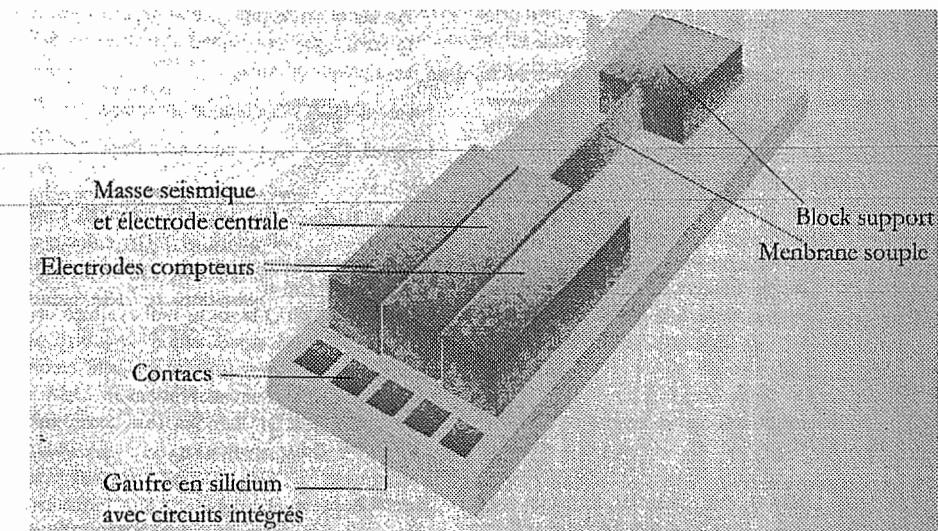


Figure 7 : Capteur d'accélération sur une puce électronique.

3.2.5 DÉSAVANTAGES

Cette technique reste pour l'instant fortement appliquée aux MEMS, car l'industrie du silicium possède des sources synchrotrons. Le montage d'une machine à rayonnement synchrotron coûte plus de 30 millions de dollars, ce qui rend le procédé assez inaccessible. Il n'est d'ailleurs pas encore exploité à l'échelle industrielle et reste donc très cher. Il n'est pas possible de faire du vrai 3D. La vitesse de production dépend du procédé qui remplit le moule si la structure est employée comme moule. Mais il est clair que c'est par électrodéposition que le temps de réalisation est le plus élevé.

3.3 MOULAGE PAR INJECTION RÉACTIVE

[7][9][11][15][16]

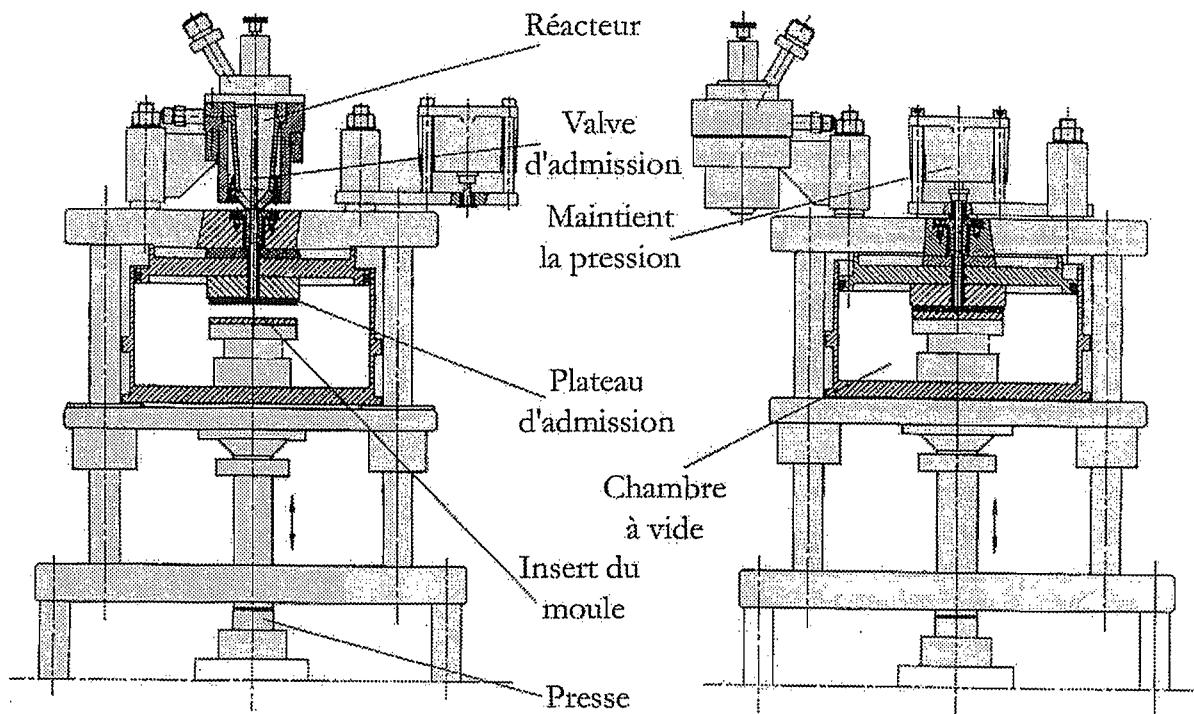


Figure 8 : Représentation schématique d'une machine à injection réactive.

3.3.1 PRINCIPE

Le réacteur est représenté à la figure 8. Il est composé d'un container dans lequel on mélange les réactifs, d'une pompe à vide pour l'évacuation de la cavité d'injection du moule et de la chambre à vide, du moule, et d'une presse hydraulique pour la fermeture et l'ouverture de la chambre à vide.

Les réactifs sont introduits dans la cavité du moule qui est fermée par la presse et mise sous vide. Un dégazage est effectué pendant toute la durée de la réaction pour éviter des bulles dans la pièce. La presse exerce une surpression pour prévenir le retrait du polymère pendant le refroidissement, vu qu'il est synthétisé à une température avoisinant les 150°C.

3.3.2 PROBLÈMES

Les problèmes le plus souvent rencontrés sont les bulles causées par un mauvais dégazage. Si la presse exerce une pression insuffisante, il en résulte un mauvais remplissage du moule, ce qui conduit à des pièces incomplètes. Le retrait peut avoir le même effet. Il est important de noter que le retrait des polymères est beaucoup plus important que celui des métaux. A titre d'exemple, le PMMA (polyméthyle métacrylate) a un retrait de 14%. Suivant l'usage auquel on prédestine la pièce fabriquée par injection réactive (électrodéposition de métal, par exemple), on doit prévoir de mettre un plateau métallique ou de plastique conducteur qui servira d'électrode. Ce plateau doit en outre être muni de moyens d'admission d'un autre polymère si la structure électrodéposée sert à son tour de moule. Les trous d'admissions sont généralement faits au laser ou par usinage diamant.

3.3.3 MATERIAUX

Il est évident que tous les polymères ne peuvent pas être synthétisés de cette manière. La phase qui a été expliquée sert surtout à fabriquer la résine sensible qui servira pour le LIGA (voir plus haut). Les meilleurs résultats ont été obtenus pour la synthèse du méthyle métacrylate. Le PMMA aussi est synthétisé par injection réactive. Le moule initial doit avoir été recouvert par un agent qui empêche la pièce de coller à ses parois.

3.3.4 LIMITES ET PRÉCISIONS

Plusieurs structures ne peuvent d'ores et déjà pas être fabriquées par cette méthode. Si la forme du moule est trop complexe, la résine peut ne pas polymériser à certains endroits de la cavité du moule. Les limites et les tolérances sont du même ordre que celles du LIGA. Ce procédé n'est pas encore industrialisé et reste dès lors très cher.

3.3.5 AVANTAGES

Le temps moyen d'un cycle est cependant plus court que celui de la micro-injection. Il dure entre 10 et 20 min, suivant la grandeur de la pièce. Les températures de réactions et les pressions appliquées sont plus faibles que celles de l'injection.

3.3.6 DÉSAVANTAGES

Les réactifs sont parfois explosifs. Il faut soigner le choix des réactifs ainsi que celui du matériau du moule pour ne pas avoir d'interactions entre ce dernier et les réactifs. Comme la surface du moule peut avoir une viscosité très basse, il faut prévoir plusieurs buses pour l'évacuation de la pièce. La viscosité du matériau de la surface du moule doit être très faible (0,1 à 1 Pa/sec), ce qui exige un très bon état de surface.

3.4 MICRO-INJECTION DES POLYMÈRES ET COMPOSITES

[9][13][14]

3.4.1 INTRODUCTION

La micro-injection est pratiquement l'une des seules techniques permettant de fabriquer des microcomposants en polymère. Elle consiste à faire de l'injection d'un polymère dans un micromoule. Le principe d'injection en lui-même reste le même que pour l'injection des pièces usuelles du macromonde. Toute la difficulté réside dans la conception et la fabrication du micromoule. Ce dernier peut être fabriqué par des techniques qui diffèrent très fortement les unes des autres, avec des coûts et des précisions très variables. C'est la technique qui sert à fabriquer les compacts Discs actuellement.

3.4.2 PRINCIPE

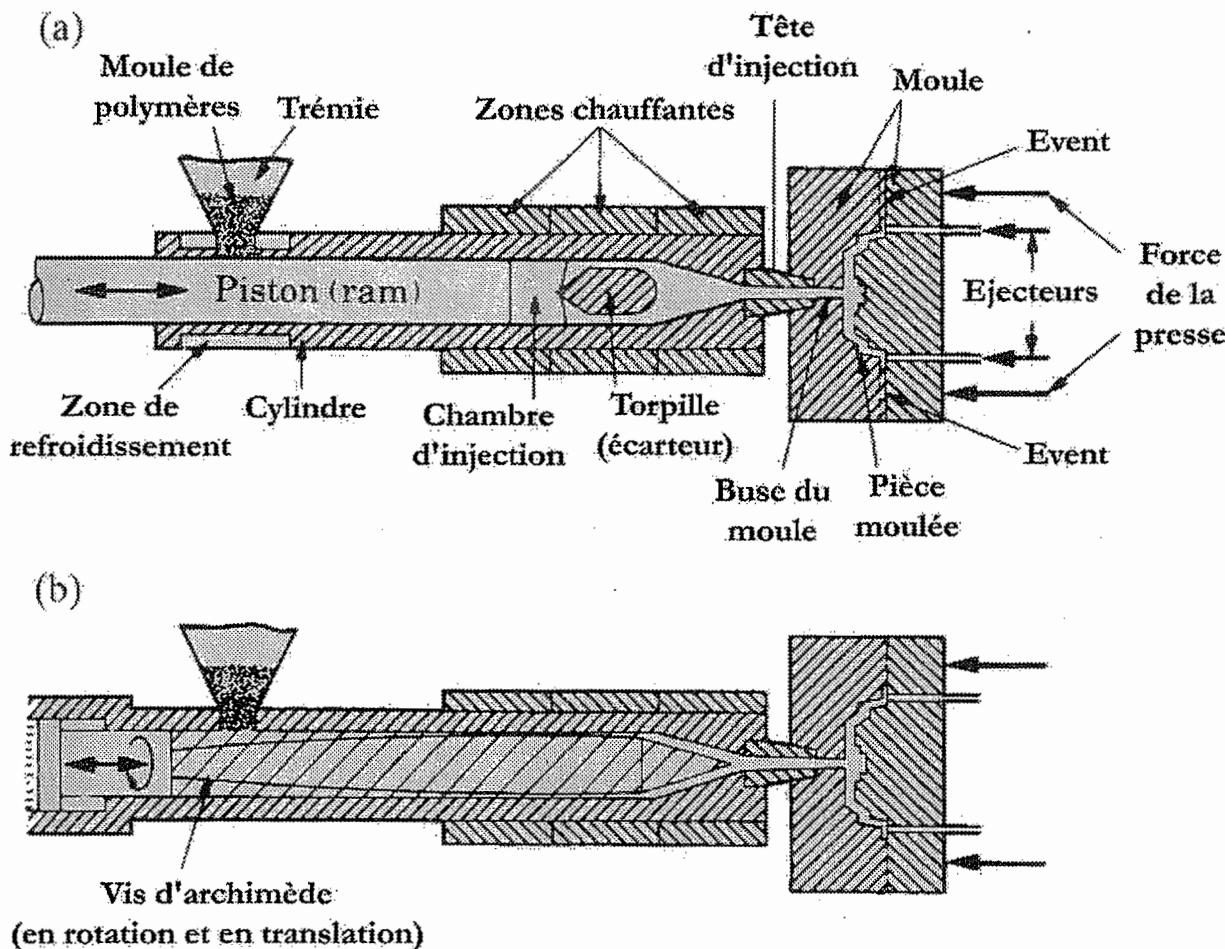


Figure 9 : Injection des polymères.

La figure 9 illustre l'injection des polymères. Les granulés de polymères sont introduits dans la trémie de l'injectrice. Cette dernière est, comme une extrudeuse, composée d'un cylindre chauffant, d'un piston ou d'une vis d'Archimède pouvant effectuer un mouvement de translation en plus du mouvement rotationnel, d'une chambre ainsi que d'une tête d'injection. Les granulés sont portés au-dessus de leur température de transition vitreuse aussi bien par leur passage dans le cylindre chauffant que par auto-échauffement (le frottement des couches contre couche dégage une quantité de chaleur non négligeable qui permet de fondre le polymère). Un volume défini de polymère fondu est amené entre les dents de la vis ou par le mouvement du piston jusqu'à la tête d'injection. Et en une fois le polymère est injecté dans le moule qui se trouve à la sortie de la tête d'injection. Une fois refroidie, la pièce est éjectée du moule.

3.4.3 MATÉRIAUX

Comme cela est spécifié plus haut, seuls les matériaux thermoplastiques peuvent être injectés car ce sont les seuls à avoir une température de transition vitreuse. Exemple le PVC (polychlorure de vinyle), le PMMA, l'ABS (polyacrylnitrylbutadienne styrol).

3.4.4 LIMITES ET PRÉCISIONS

Les limites et précisions de cette méthode sont semblables à celles du LIGA (voir paragraphe 3.2.3).

3.4.5 AVANTAGES

La micro-injection présente moins des défauts de bulles et nécessite une moins bonne qualité de surface que l'injection réactive. Par conséquent, la viscosité du matériau du moule peut être élevée (10^2 à 10^5 Pa/sec). Les granulés de plastique sont plus stables chimiquement que les réactifs pour la synthèse.

3.4.6 DÉSAVANTAGES

Il faut ici chauffer plus que dans le cas de l'injection réactive puisqu'il faut atteindre la température de transition vitreuse du polymère ; or pour l'injection réactive on chauffe simplement pour favoriser la synthèse. Il faut également exercer un meilleur contrôle de la température et de la pression d'injection. Le temps de refroidissement est considérablement plus long que l'injection réactive.

3.5 EN RÉSUMÉ

4 TECHNIQUES À ENLÈVEMENT DE MATIÈRE

4.1 ELECTRO-EROSION (ELECTRICAL DISCHARGE MACHINING : EDM)

[2][7][9]

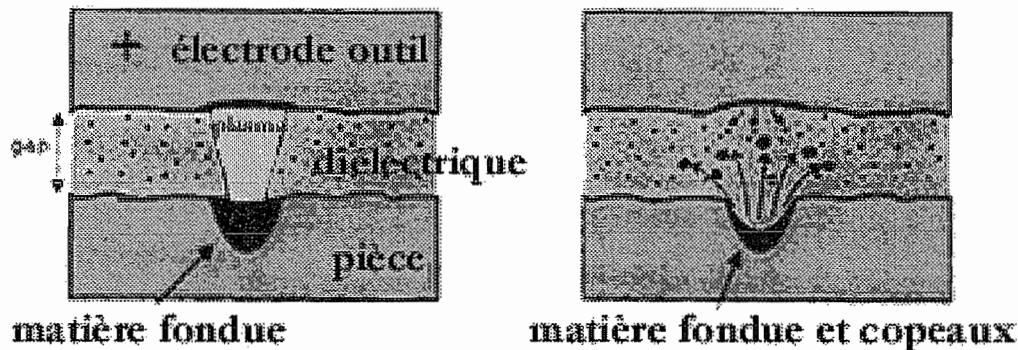


Figure 10 : Principe de l'électro-érosion.

4.1.1 PRINCIPE

Comme le montre la figure 10, l'outil et la pièce constituent respectivement l'anode et la cathode, et sont séparés par un liquide diélectrique ayant une certaine épaisseur (l'écart entre les deux électrodes) de l'ordre de quelques mm.

On élève la tension entre les deux électrodes ionisant ainsi un canal dans le diélectrique et permettant le passage du courant. Le canal se transforme alors en un canal de plasma. La température s'y élève très rapidement (entre 5000 et 10000 °C) ce qui provoque la fonte et l'évaporation de la pièce et de l'outil au droit du canal.

Une fois le courant arrêté, la température diminue entraînant l'explosion du gaz d'évaporation, et créant un petit cratère. Les résidus issus de l'explosion (copeaux) sont des petites sphères qui vont être évacuées par le diélectrique.

4.1.2 PROPRIÉTÉS

L'outil et la pièce doivent être des conducteurs électriques. La fréquence des impulsions électriques s'élève jusqu'à 20000 Hz. La profondeur et la forme du cratère dépendent de la durée, de l'intensité de la polarité, et de l'épaisseur du gap (écart entre les électrodes). La pièce est érodée à 95 % et l'outil à 5%. L'allure des impacts se trouve figure 11.

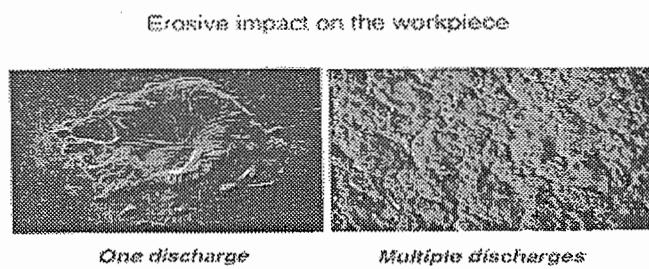


Figure 11 : Impacts corrosifs sur la pièce.

4.1.3 TYPES D'USINAGE

L'électroérosion se subdivise en deux types principaux d'usinage : l'électrodécoupage et l'électroformage.

L'électrodécoupage se fait à l'aide d'un fil de 0,25 à 0,02 mm de diamètre. Il est utilisé pour découper des couches très fines, des électrodes outils très petites, et d'autres pièces de découpage (voir figure 12)

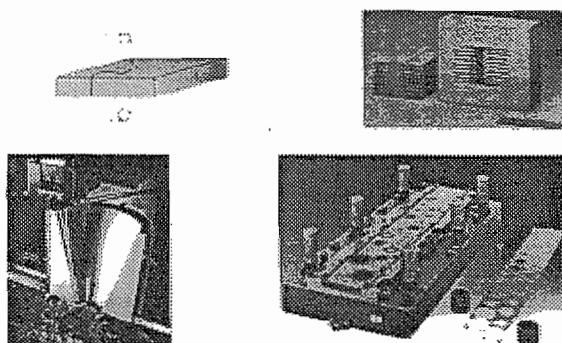


Figure 12 : Electrodécoupage.

L'électroformage est la création d'empreintes par enfoncement. Il sert à faire des moules, du contournage, de l'évidement de poche, du fraisage, du meulage, des géométries 2D et 3D, ainsi que des mouvements de virotin (vissage), et des dentures intérieures hélicoïdales. C'est une technique qui pourrait être reprise dans le fromage mais ici il y a enlèvement de matière. La figure 13 illustre cette variante.

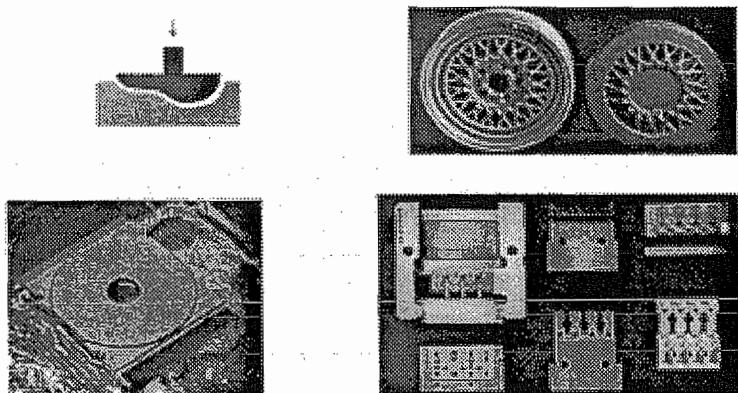


Figure 13 : Electroformage.

4.1.4 VARIANTE DU PROCÉDÉ

Il existe des variantes à ce procédé. L'EDM Drill, et le DDM (diffused discharge machining). Le premier est mis en œuvre pour faire des trous et des pré-trous afin d'insérer le fil de découpage. Le second est employé pour avoir un meilleur fini de surface. Pour cela des particules de graphite sont mélangées au diélectrique. Par cette méthode les charges diffusent ce qui permet des explosions plus contrôlées.

4.1.5 MATÉRIAUX

On peut employer pour ce procédé tout type de matériau à condition qu'il soit conducteur électrique. Les plus courants sont l'acier, le cuivre, l'aluminium, la fonte, les carbures métalliques qui permettent de fabriquer des outils, et même des silicium assez conducteurs.

4.1.6 LIMITES ET PRÉCISIONS

Les machines à électroérosion en Europe (Suisse) sont fabriquées par Agie et Charmilles [2]. La meilleure précision que l'on puisse atteindre avec ce procédé est de l'ordre de 5 à 125 µm. Les surfaces ont des rugosités allant de 0.1 à 10 µm Ra (voir annexes), avec des résolutions de l'ordre de 50 µm. Les parois électrodécoupées les plus finement ont une épaisseur d'environ 150 µm. Mais il est également possible d'usiner des grosses pièces de la taille de 200 mm x 200 mm.

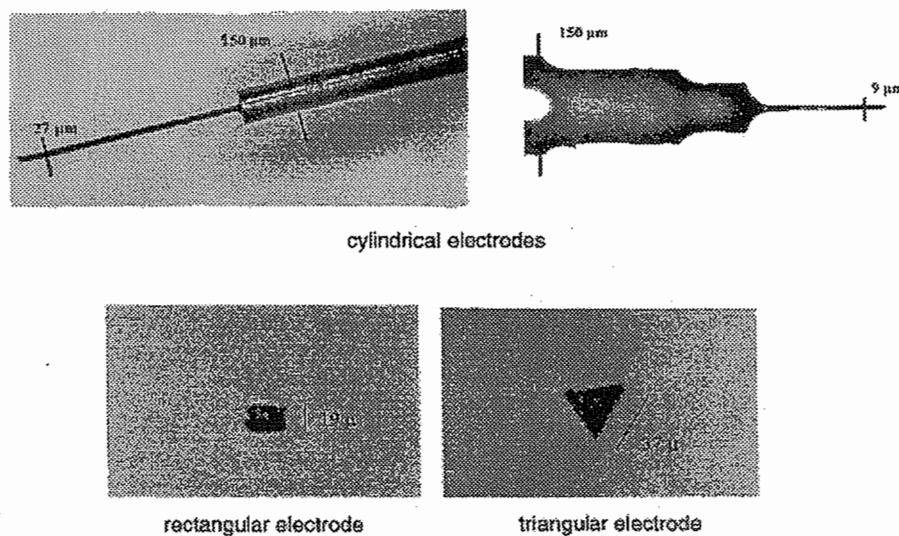


Figure 14 : Electrode fabriquée par Electrodécoupage (Va servir à l'électrofraiseage).

4.1.7 AVANTAGES

Ce procédé permet d'usiner un très grand choix de matériaux. De plus l'outil n'exerce aucune pression sur la pièce. On n'a donc pas besoin d'avoir des compensations d'outil. On obtient de très grandes précisions (voir § précédent).

4.1.8 DÉSAVANTAGES

On est strictement limité aux matériaux conducteurs. On a une usure très rapide des outils. En plus, lors du découpage, le fil, n'est employé qu'une fois. Il est ensuite jeté. Le coût de ce procédé reste très élevé.

Il y a une certaine difficulté à manipuler les objets, surtout de très petite taille, si la machine n'est pas couplée avec un système de détection et de positionnement de la pièce.

Les états de surface ne sont pas d'une qualité supérieure et demandent souvent un retraitement (traitement thermique où l'on refond la surface). En outre, il faut que la matière soit relativement homogène pour ne pas avoir une discontinuité dans l'usinage. C'est un procédé extrêmement lent (plus de 3 heures pour une pièce simple de quelques millimètres).

4.2 USINAGE À GRANDE VITESSE

[1][7][9][11][17]

4.2.1 PRINCIPE

L'usinage à grande vitesse est réalisé sur le même type de machine que l'usinage traditionnel. Il comprend les opérations de tournage, de fraisage, de meulage, de forage, etc. Il est caractérisé par de très grandes rotations de broches (de l'ordre de 10000 à 35000 tr/min) par rapport aux machines traditionnelles (entre 500 et 2000 tr/min), et de très grandes vitesses d'avance. Cette dernière est fonction du nombre de dents, de la fréquence de rotation, du diamètre de l'outil, et d'un coefficient réducteur ($<0,02$). Ce qui génère évidemment de très grandes vitesses de coupe. Comme ordre de grandeur nous avons entre 100 et 250 m/min pour les aciers alliés, et de 1000 à 3000 m/min pour les laitons et l'aluminium.

Les outils employés pour l'usinage de précision sont des outils en carbure de tungstène ou en diamant. Les outils en diamant sont faits à partir d'un monocristal de diamant qui est usiné par découpage électronique ou ionique.

4.2.2 PROPRIÉTÉS

Les machines ont des structures très rigides pour éviter les vibrations qui peuvent naître à cause des grandes vitesses mises en jeu. On est obligé de travailler dans des pièces climatisées et ce, pour garantir une certaine stabilité thermique. Les moteurs dans ces machines sont des moteurs puissants et la précision est assurée à l'aide de capteurs et d'outils de positionnement (microscopes). On utilise des tables pivotantes pour éviter les manipulations humaines lors du changement d'opération. Il arrive même que la pièce soit posée sur une enceinte à vide pour éviter que des inclusions ne viennent se mettre entre la pièce et l'outil.

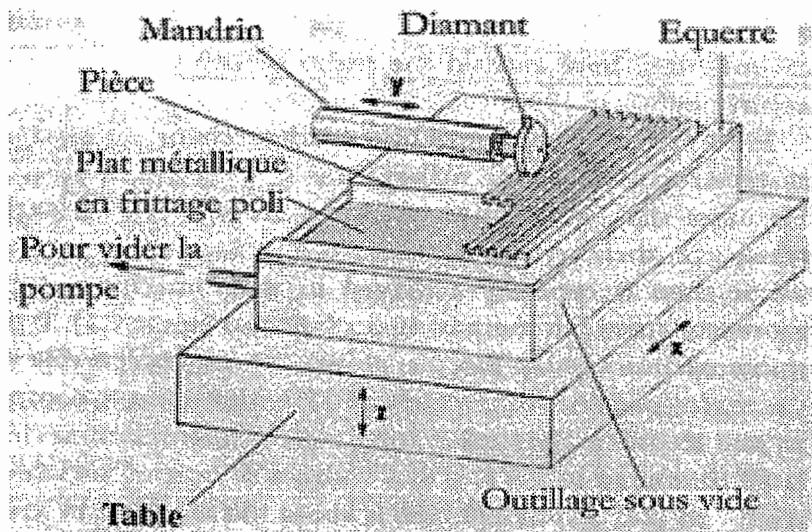


Figure 15 : Tour à grande vitesse avec outil en diamant.

Les pièces en cours d'usinage ne chauffent pour ainsi dire pas grâce à une évacuation thermique par les copeaux et à la lubrification avec de l'air sous pression mélangé à de l'huile. Les copeaux sont évacués par aspiration la plupart du temps, pour éviter d'endommager la pièce.

4.2.3 APPLICATIONS

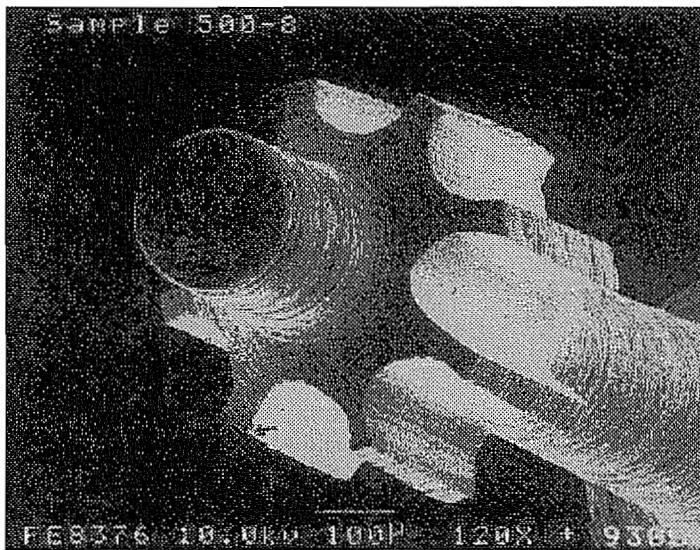


Figure 16 : Roue dentée par meulage à grande vitesse.

Plusieurs applications existent pour l'usinage à grande vitesse au diamant. C'est le cas des disques durs de certains ordinateurs, des lentilles polygonales pour les imprimantes lasers, des inserts des moules pour les têtes de lecture des compacts Discs. La figure 16 montre une roue dentée de quelques centaines de microns de diamètre, usinée par meulage.

4.2.4 MATÉRIAUX

Sont susceptibles d'être usinés par ce procédé tous types de métaux, de polymères durs, de cristaux, ainsi que certaines céramiques qui cependant sont plus difficiles à usiner car plus fragiles.

4.2.5 LIMITES ET PRÉCISIONS

La plus petite pièce usinable par ce procédé est de l'ordre de 100 µm. La résolution se situe aux environs de 5 µm pour les machines usuelles, et 0,01 µm pour certaines machines à outils en diamant. La précision du procédé va de 25 µm jusque 1 nm. Il faut tenir compte d'une déviation de rectitude d'environ 6 µm/m pour toute variation de 0,5 °C.

Pour les outils en diamant, on arrive à usiner des parois de 30 µm d'épaisseur et de 10 µm de profondeur.

4.2.6 AVANTAGES

Le temps d'usinage est considérablement réduit. Le nombre d'outils par phase d'usinage est également réduit. Les qualités de finitions sont très élevées, et on a de très bons états de surface. Comme le nombre de passes augmente lorsque l'effort de coupe diminue, il y a moins de compensation de flexion. Cette technique permet aussi l'usinage de parois très fines et de pièces dont la géométrie est assez complexe. Et comparée à des techniques comme le LIGA, elle reste très accessible et pas cher.

4.2.7 DÉSAVANTAGES

Les vibrations qui peuvent survenir si la machine n'est pas assez rigide peuvent fortement diminuer la précision. Le rapport profondeur/diamètre est limité à 10:1 pour les petits forêts, sinon l'outil se brise. Il y a gaspillage de matière. L'usinage à grande vitesse (tout comme l'usinage traditionnel d'ailleurs) produit environ 80 % de copeau qu'il faut pouvoir gérer dans le cas de très petites pièces pour ne pas endommager ces dernières.

Les machines ainsi que les outils coûtent très cher comparés aux outils habituels de l'usinage traditionnel. Les plaquettes en carbure de bore par exemple coûtent cent fois plus chères que les plaquettes en carbure ordinaires.

4.3 USINAGE LASER ET LE LASER FEMTOSECONDE

[3][7][9][21][22][23]

4.3.1 PRINCIPE

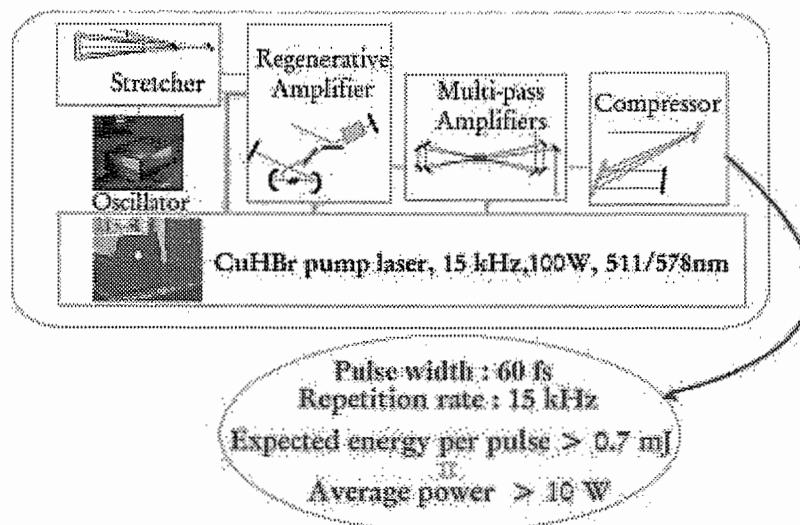


Figure 17 : Chaîne de montage du laser femtoseconde haute cadence.

Le faisceau laser provient d'une inversion de population d'électrons sur les niveaux énergétiques dans un gaz ou dans un cristal. Il en résulte la production d'un rayonnement. Ce dernier peut être continu ou à impulsions. Il existe plusieurs types de laser. Les plus courants sont le laser à gaz (CO_2) et le laser à solide (Néodymium).

Le laser à gaz développe une puissance comprise entre 1 et 20 kW de façon continue, et dans la zone de fréquence de l'infrarouge. Le laser à solide (YAG) fournit un faisceau dont la puissance est d'environ 100 W, de façon continue ou par impulsions, dans la zone des ultraviolets (longueur d'onde d'environ 1,06 μm).

Plus la durée de l'impulsion est courte, plus la puissance est élevée. D'où l'intérêt de développer des lasers dont la durée de l'impulsion est de l'ordre de la femtoseconde (10^{-15} s).

Le laser femtoseconde est un laser tout solide. Il envoie des impulsions de 100 fs d'une énergie de 100 μJ , avec une puissance d'environ 1020W/cm². Il débite 1000 impulsions /s, à travers une cible qui fait entre 15 et 240 nm de diamètre. La figure 16 représente un exemple de montage du laser sur une chaîne haute cadence.

4.3.2 PROPRIÉTÉS

Avec ce laser il est possible de faire de l'usinage par ablation. Il y a un phénomène nouveau qui apparaît par rapport au laser classique : l'interaction laser-matière est de type athermal. En effet, l'énergie est déposée très vite dans le matériau, et ensuite emportée par les ions formés, dans des temps qui ne laisse pas aux processus habituels le temps pour que le transfert thermique puisse avoir lieu.

Cela présente néanmoins le désavantage de ne pas pouvoir faire de la soudure. On peut par contre très bien faire du marquage ou du perçage. La profondeur et la largeur de coupe sont fonction de l'intensité et de la grosseur du faisceau, ainsi que de sa vitesse de déplacement et de la durée de l'impulsion.

4.3.3 MATÉRIAUX

Le laser permet d'usiner à peu près tout type de matériaux, à condition qu'il ne soit pas trop réfléchissant. Sont usinés ainsi des matériaux fragiles tels le bois, les céramiques, le verre, le quartz, dont la figure 18 montre un exemple.

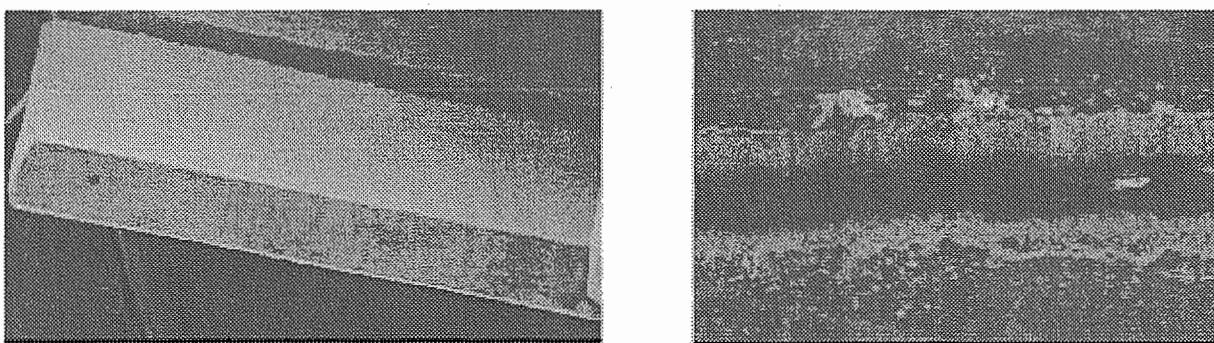


Figure 18 : L'image de gauche est une rainure dans de l'inox via un laser femtoseconde et l'image de droite via un laser nanoseconde.

4.3.4 LIMITES ET PRÉCISIONS

La profondeur typique ablatée est de 3 µm à 3 mm. Les plus petites pièces découpées sont de l'ordre de 100x100x100 µm, mais peuvent descendre jusqu'à 10 µm. Le rapport profondeur/diamètre peut monter jusqu'à 50:1. La précision des trous est de 10% du diamètre. La qualité de surface est d'environ 10 µm Ra. Pour les trous il y a un angle de dépouille de 1% du diamètre. Ce laser peut être monté sur des machines de 2 à 5 axes. Les diamètres des trous les plus gros qui ont été réalisés sont de l'ordre du millimètre.

4.3.5 AVANTAGES

Comme il n'y a pas d'usure d'outil, il n'y a pas de compensation d'outil à envisager. Grâce au caractère athermal du laser femtoseconde, il n'y a pas de bavures. Bon nombre de matériaux sont usinables.

4.3.6 DÉSAVANTAGES

L'imprécision qu'introduit l'angle de dépouille constitue un des grands désavantages du laser. La perte de puissance lors de l'usinage de matériaux trop réfléchissant aussi. Il y a un mauvais contrôle de la profondeur de coupe et de la forme du fond du trou. Et de plus il n'est pas possible de faire de la soudure avec le laser femtoseconde, c'est qui est un des grands domaines d'application des lasers.

4.4 USINAGE PAR ULTRASONS

[5][7][9][20]

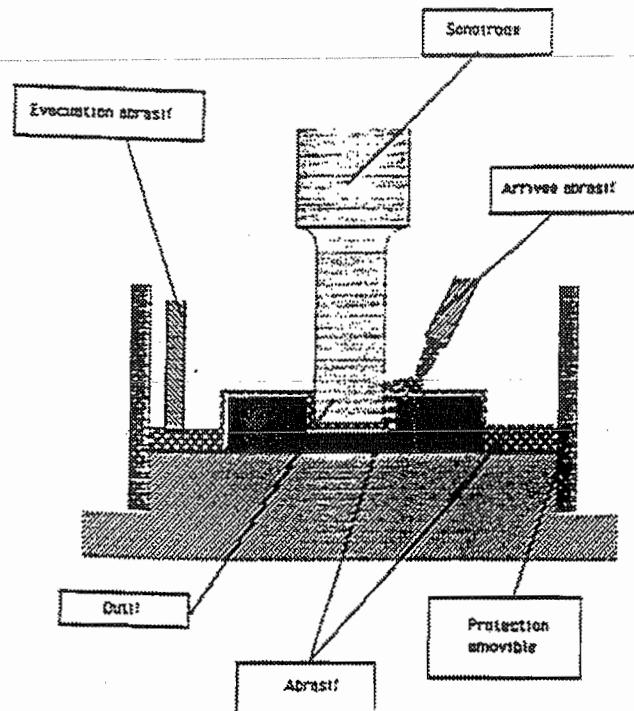


Figure 19 : Machine à ultrasons.

4.4.1 PRINCIPE

L'outil se trouve sur une sonotrode qui le fait vibrer. La sonotrode fonctionne par magnétostriction : elle permet une vibration contrôlée de l'outil (qui a la forme que l'on veut usiner) sur la pièce qui est plongée dans un bain (ou arrosée) de fluide contenant des particules abrasives. La fréquence de vibration peut être de l'ordre de 20 kHz dans l'axe longitudinal de l'outil, et l'amplitude du mouvement vibratoire varie entre 0,013 mm et 0,1 mm. La figure 19 montre schématiquement le principe.

Il existe deux variantes à ce procédé. Le RUM (Rotary Ultrasonic Machining) où l'outil, en diamant, en plus de vibrer, tourne à une vitesse de rotation qui avoisine les 5000 tr/min. Le liquide abrasif n'est plus employé dans ce cas; et le UAM (Ultrasonically Assisted Machining), permet de rajouter, en plus de la vibration communiquée par la sonotrode, une source vibratoire directement sur l'outil. Ce dernier n'est pas un outil spécifique, et l'usinage reste traditionnel. Cela permet d'usiner plus rapidement.

4.4.2 MATÉRIAUX

Les matériaux classiques usinés par ultrasons sont des matériaux très durs tels les carbures, le verre, la ferrite, le rubis, le quartz, les céramiques. Cette méthode convient donc très bien pour des matériaux durs et fragiles.

4.4.3 LIMITES ET PRÉCISIONS

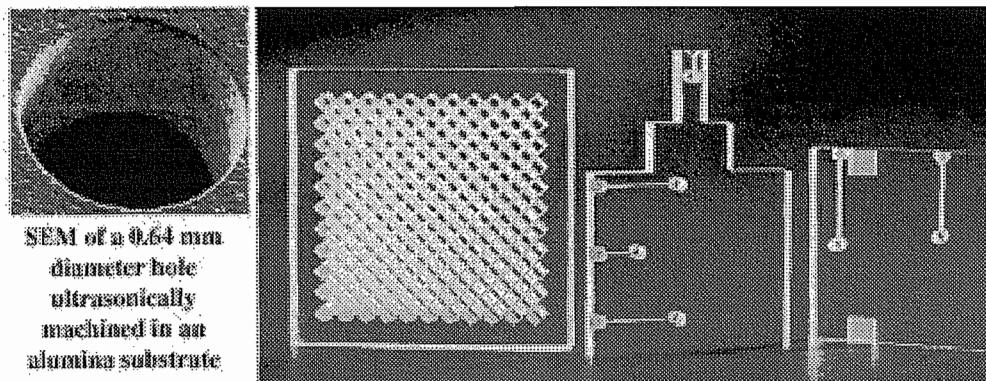


Figure 20 : Gauche : Trou de diamètre 0,64 usiné dans un substrat en aluminium. Droite : même diamètre de trous dans du Plexiglas.

Ce procédé de fabrication offre une précision d'environ 0,03 mm. Le plus petit trou que l'on puisse faire par ultrasons est de 0,08 mm. Le rapport profondeur/diamètre atteint est de 3:1. Le fini de la surface varie entre 0,2 µm et 1,6 µm Ra.

4.4.4 AVANTAGES

Les avantages de cette méthode sont une assez bonne qualité de finition, l'absence de zone affectée thermiquement, l'absence de bavures et la possibilité de travailler des matériaux fragiles (verre, céramique).

4.4.5 DÉSAVANTAGES

Le rapport profondeur/diamètre est très faible. La conception d'outil devient assez complexe du fait que c'est lui qui détermine directement la forme finale. Par conséquent on ne peut pas obtenir de formes très complexes. L'usinage de matériaux ductiles n'est pas possible.

4.5 USINAGE PAR JET D'EAU (HYDRODYNAMIQUE MACHINING : HDM)

4.5.1 PRINCIPE

L'usinage de la pièce se fait par l'action d'un jet d'eau ou d'eau mélangée à des particules abrasives, qui sort d'une buse à très grande pression (environ 700 MPa), et vient enlever la matière par microrupture ou abrasion-érosion. Les paramètres contrôlant la qualité de la coupe sont le débit et la pression du jet, le type d'abrasif et la distance entre la pièce et la buse.

Les particules ont des tailles allant de quelques micromètres à 50 µm. Une variante consiste à injecter uniquement des particules abrasives sans liquide porteur. Cette méthode est surtout employée pour usiner de matériaux non-métalliques, bien qu'elle soit aussi employée pour finir ou ébavurer des métaux après usinage traditionnel.

4.5.2 MATÉRIAUX

Les matériaux usinés par jet sont pour la plupart des matériaux fragiles tels que le bois, le papier, l'amiante, le gypse, les plastiques, le cuir, la fibre de verre, etc. Certaines céramiques aussi peuvent être usinées, ainsi que le verre et le cristal.

4.5.3 LIMITES ET PRÉCISIONS

La largeur d'un trou est de 0,03 mm en plus du diamètre de la buse. La précision va de 0,03 mm à 0,13 mm. La tolérance des axes de rotations est d'environ 1°. L'usinage de parois de 70 µm est possible. Les plus petits trous font 0,05 mm à 0,2 mm. L'état de surface varie entre 3 µm et 6 µm Ra. Le rapport profondeur/diamètre est de 10:1. On a un angle de dépouille qui est fonction de la profondeur et vaut environ 2°/30 mm.

4.5.4 AVANTAGES

Les avantages sont une très bonne répétabilité avec une tolérance de 20 µm, l'usinage des matériaux fragiles, la non-nécessité d'effectuer de changement d'outil, l'absence d'usure d'outil, l'absence de zones affectées thermiquement et la possibilité de faire des découpes assez profondes.

4.5.5 DÉSAVANTAGES

Il n'est pas vraiment possible de contrôler la profondeur de la découpe. Il ne doit pas y avoir des accélérations soudaines du mécanisme ou du jet sous peine d'endommager la pièce. L'usure des buses diminue la précision. Il y a un angle de dépouille. La précision est moyenne. Les techniques à masque ou à couches successives.

4.6 EN RÉSUMÉ

5 TECHNIQUES À MASQUES OU À COUCHES SUCCESSIVES

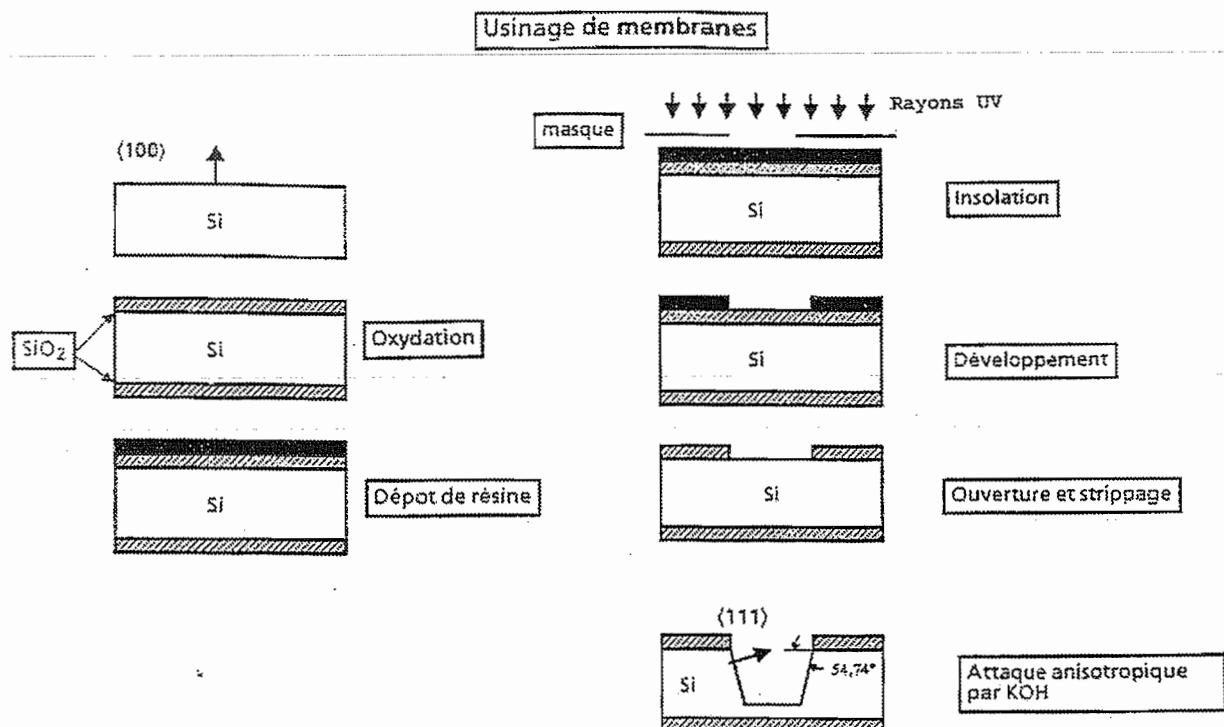


Figure 21 : Les différentes étapes de la microgravure humide.

5.1 MICROGRAVURE HUMIDE (BULK MICROMACHINING OU BMM)

[4][7][9][16]

5.1.1 PRINCIPES

La figure 21 présente les différentes étapes de la microgravure humide. Sur une tranche de silicium, sur laquelle une couche d'oxydation a été préalablement formée, on dépose une couche de résine sensible aux rayons UV. La résine est irradiée à travers un masque et découvre les zones d'oxyde à graver. Les zones sont nettoyées de leur oxyde et on procède à l'attaque, par un agent gravant, du silicium.

La microgravure humide est surtout mise en œuvre dans les applications ayant trait à l'électronique (circuits intégrés) et à la fabrication de MEMS (Micro ElectroMechanical Systems). L'attaque est de deux types : isotropique (suivant toutes les directions) ou anisotropique selon des plans préférentiels du silicium ($<100>$, $<110>$, $<111>$). Dans ces plans la gravure humide est plus rapide puisque la densité atomique y est plus élevée. La solution gravante est pour la plupart du temps du KOH.

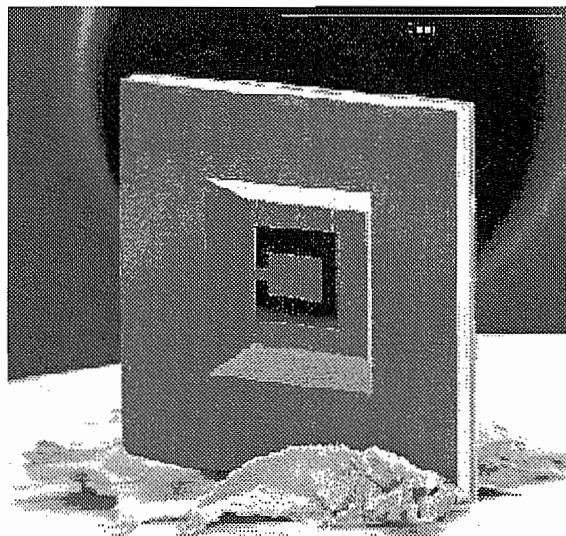


Figure 22 : Capteur piezorésistif fabriqué par BMM.

La gravure isotropique est surtout employée pour adoucir les angles prédéterminés qui apparaissent lors de la gravure anisotropique ou pour libérer certains éléments gravés antérieurement.

C'est un des procédés qui typiquement provient des procédés de gravure des puces en électronique (voir figure 22).

5.1.2 MATÉRIAUX

Le principal matériau envisagé dans la microgravure humide est, comme spécifié plus haut, le silicium. Mais il existe des variantes où le verre, le quartz et l'arsénic de gallium sont usinés.

Outre la microgravure humide, il existe aussi une gravure humide à plus grande échelle sur de l'acier ou de l'aluminium. Les masques ont alors des épaisseurs de 0,2 à 0,4 mm, et sont collés sur la pièce. Il y a un angle de dépouille qui se crée et la qualité de la surface est de 3 µm Ra pour une épaisseur usinée de 0,013 mm. Mais cela reste très lent et bidimensionnel.

5.1.3 LIMITES ET PRÉCISIONS

L'épaisseur du substrat sur lequel s'applique le procédé va de quelques μm à 500 μm . Le rapport profondeur/diamètre va jusqu'à 100:1. Ce procédé permet l'usinage de membranes de 5 à 10 μm d'épaisseur. Les parois verticales sont parfaitement à 90 °C pour le cas de la gravure anisotropique.

5.1.4 AVANTAGES

Il n'y a pas d'usure d'outil, bien qu'il faille remplacer la solution de temps en temps.

Les états de surface obtenus sont assez bons. La précision est très bonne, surtout pour la gravure anisotropique. Il est possible d'usiner des formes assez complexes. On peut respecter des tolérances très petites pour des pièces un peu plus grandes. Ce procédé permet l'usinage de parois très minces ou de membranes.

5.1.5 DÉSAVANTAGES

Il n'est possible de faire que de l'usinage 2D uniquement. Les tolérances latérales sont moins bonnes. C'est très lent (à l'échelle macroscopique). Et c'est surtout développé pour l'électronique et les MEMS.

5.2 MICRO-USINAGE DE SURFACE (SURFACE MICROMACHINING : SMM)

[4][7][9][16]

5.2.1 PRINCIPE

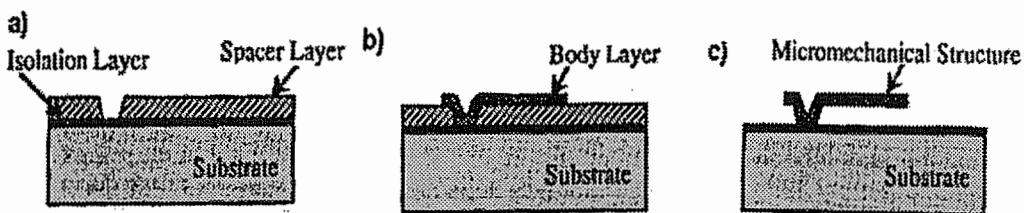


Figure 23 : Principe du micro-usinage de surface.

Pour le micro-usinage de surface, le principe est le même que pour la gravure humide mais uniquement de façon isotropique. C'est une technique à plusieurs couches : le substrat (couramment du silicium), les couches isolantes (oxyde de silicium), les couches sacrificielles (qui seront gravées), et une ou plusieurs couches structurales.

Les couches structurales sont formées soit par déposition (low pressure chemical vapor deposition), par plasma ou par faisceau de molécules. L'agent gravant n'attaque que les couches sacrificielles.

C'est de cette manière que sont obtenues des structures flottantes ou des cavités scellées. Ces structures sont de tailles beaucoup plus petites que les structures réalisées en BMM. Leur taille varie de 0,25 à 10 μm . L'état de surface est de l'ordre de 0,003 $\mu\text{m Ra}$.

5.2.2 MATÉRIAUX

COUCHE STRUCTURALE (Épaisseur µm)	COUCHE SACRIFIÉE (Épaisseur µm)
Polysilicium (1 – 4)	PSG (1) SiO ₂ (7)
Si ₃ N ₄ (0.2 – 2)	PSG (2) SiO ₂ (2)
SiO ₂ (1 – 3)	Polysilicium (1 – 3)
Polyimide (10)	Aluminium (1.5 – 3)
W (2.5 – 4)	SiO ₂ (8)
Molybdène (0.5)	Aluminium (0.7)
SiC (1.5)	SiO ₂ (1.5)
TiNi (8)	Polyimide (3) Al (2)
NiFe (2.5)	Al ou Cu (7)
PolySi-ZnO (2 – 0.95)	PSG (0.6)
PolySi – Si ₃ N ₄ – PolySi (1 - 0.2 - 1)	PSG (2)

Tableau 5 : Tableau des couples couche structurale - couche sacrifiée.

Comme on peut le constater dans le tableau 2, pour les matériaux il existe plusieurs possibilités. Les diverses applications pour ce type d'usinage sont les comb-drives, les micromoteurs. Les désavantages et les avantages sont les mêmes que le BMM.

5.2.3 LIMITES ET PRÉCISIONS, AVANTAGES, DÉSAVANTAGES

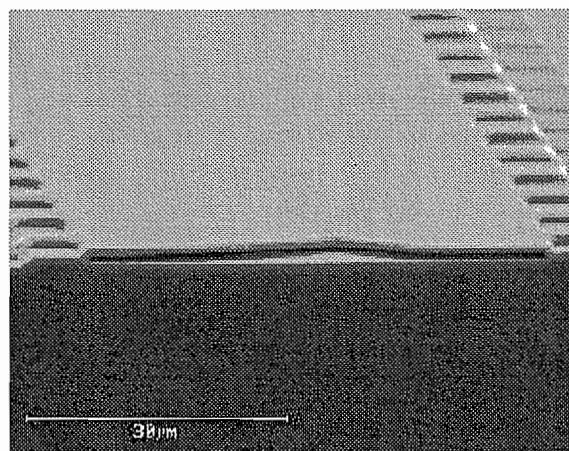


Figure 24 : Capteur de pression usiné par SMM.

Les limites, précisions, avantages et désavantages du micro-usinage de surface sont semblables à ceux de la microgravure humide (paragraphes 4.6.3, 4.6.4 et 4.6.5). La figure 24 illustre une des structures flottantes.

5.3 GRAVURE PLASMA (REACTION ION ETCHING : RIE)

[4][6][7]

5.3.1 PRINCIPE

Un plasma continu est créé entre deux électrodes à partir d'un gaz se trouvant dans une enceinte. Une pompe éjecte le plasma à très grande vitesse et à très haute température sur la pièce à graver qui, pour la plupart du temps, est en polysilicium. On arrive à faire des trous de l'ordre de 0.4 µm de diamètre, profond de 8 µm maximum.

Cette technique existe aussi à plus grande échelle et porte le nom de PAM (Plasma Arc Machining). Avec le PAM, c'est plutôt l'usinage des métaux tels l'aluminium, le cuivre, l'acier, le tungstène, le nickel. Ici, l'épaisseur maximale des pièces obtenue est de 150 mm, et la largeur de 5 mm. Mais il y a formation d'un angle de dépouille de 2° à 10.

5.3.2 MATÉRIAUX

Tout matériau conducteur (aluminium, aciers, et aciers inoxydables, cuivre, titane...) convient.

5.3.3 LIMITES ET PRÉCISIONS

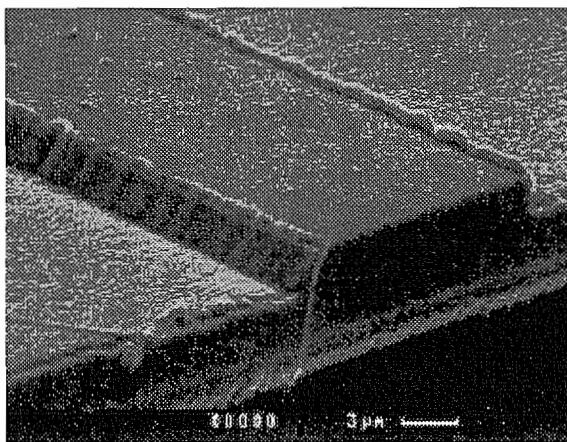


Figure 25 : Rainure dans une plaquette de silicium.

La finition de la surface dépend du gaz employé, de la puissance du jet et de la vitesse de coupe. Il est possible d'atteindre des finitions de 0,75 µm Ra. Les meilleures tolérances que l'on puisse atteindre sont d'environ 20 à 25 µm. On usine des rainures et des parois de 3 µm comme illustré à la figure 25.

5.3.4 AVANTAGES

Ce procédé possède pratiquement les mêmes avantages que l'EDM ou l'usinage laser. La découpe des nombreuses formes est possible. De plus, ce procédé est moins cher que l'EDM ou l'usinage laser.

5.3.5 DÉSAVANTAGES

Il y a altération des surfaces due souvent aux grands changements de températures subit par les pièces. Cela altère la précision. On est limité aux matériaux conducteurs seulement ayant des très hauts points de fusion. Il y a l'existence d'un angle de dépouille.

5.4 GRAVURES IONIQUES ET ÉLECTRONIQUES (FOCUSED ION BEAM OU FIB ET ELECTRON BEAM MACHINING OU EBM)

[4][6][9]

5.4.1 PRINCIPE

Le principe de ce procédé est de transformer l'énergie cinétique des électrons ou des ions en énergie thermique. Le faisceau électronique ou ionique vient bombarder une surface très dure. Cette méthode sert à faire des trous, des dépôts, de la lithographie, des lamelles de l'ordre de 100 nm, des soudures.

5.4.2 MATÉRIAUX

Les matériaux employés avec cette méthode sont les aciers, l'or, les céramiques PZT, le platine, le cuir, des textiles...

5.4.3 LIMITES ET PRÉCISIONS

Les tolérances sont de l'ordre de 5 μm pour le EBM et 50 nm pour le FIB. La résolution atteint 70nm. L'état de surface peut arriver jusqu'à 0,01 μm Ra ce qui est très bien. Il existe un angle de dépouille pour les deux techniques.

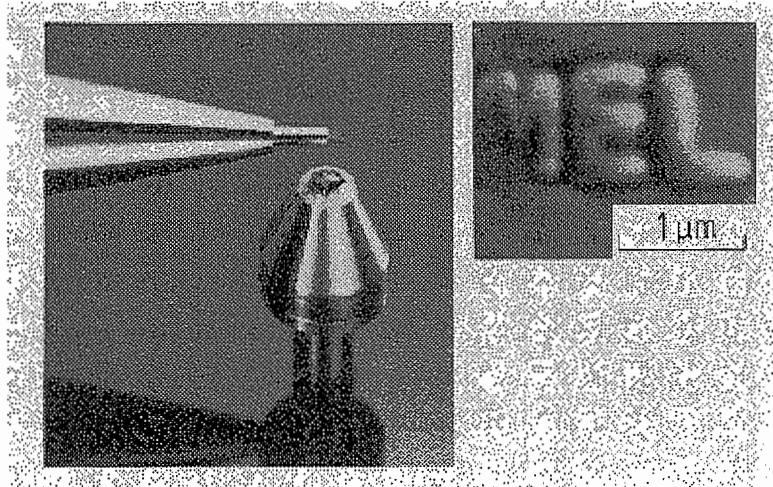


Figure 26 : Gravure FIB.

5.4.4 AVANTAGES

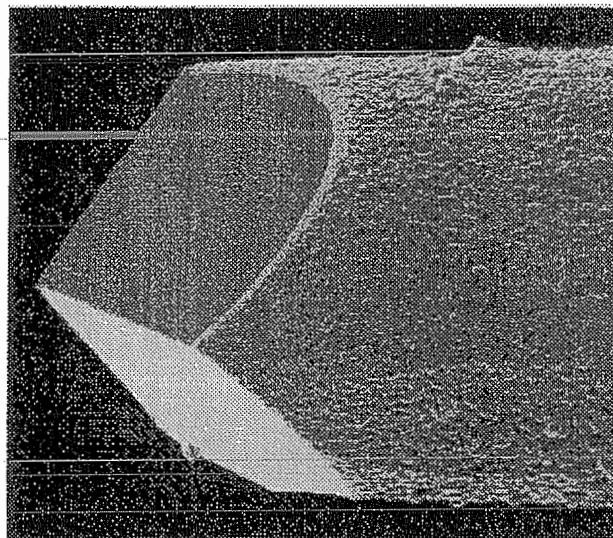


Figure 27 : Fibre optique taillée.

Comme le laser et la découpe plasma, il n'y a pas d'usure d'outil, et donc pas de compensation d'outil à faire. Le fini est beau comme l'illustre la figure 27. Il est possible de faire des trous à angle.

5.4.5 DÉSAVANTAGES

Ce sont des méthodes qui restent quand même très chère. Elles ne sont pas très précises comme on peut le voir sur les figures 27 et 28. De plus, il y a un angle de dépouille et il n'est encore pas possible d'obtenir des trous à fond plat. Il est nécessaire de travailler sous vide, ce qui consomme aussi de l'énergie.

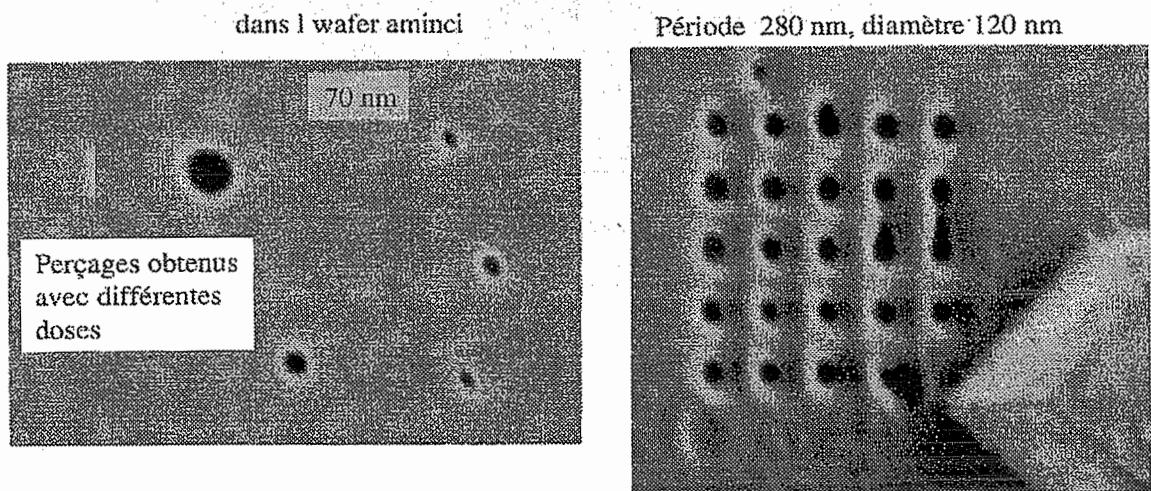


Figure 28 : Trous percés sur une gaufre de silicium par FIB..

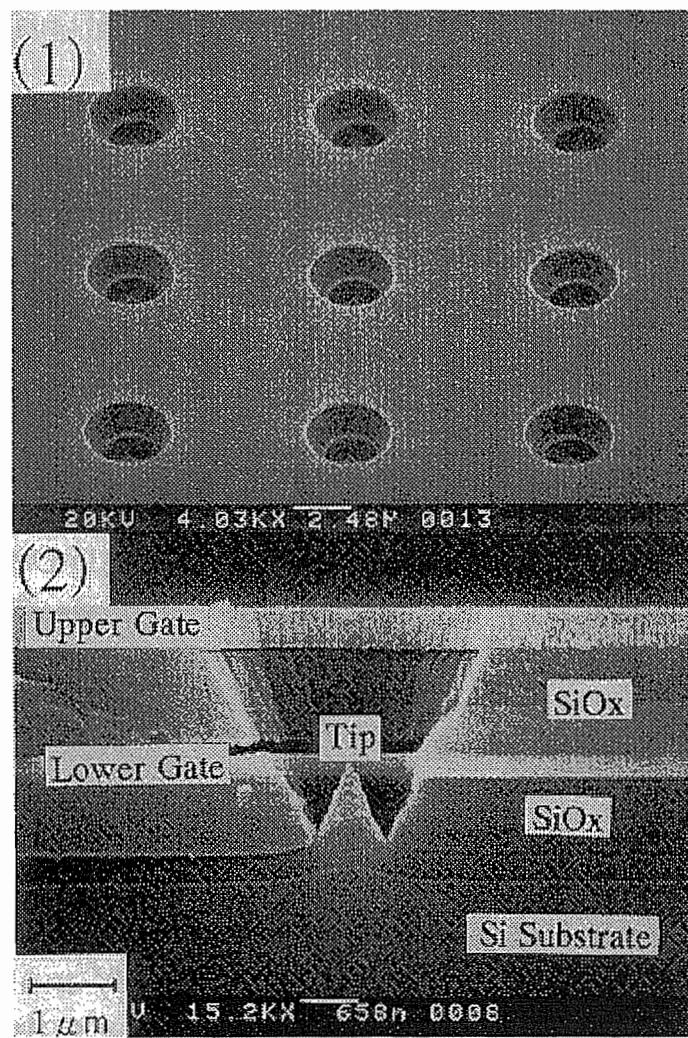


Figure 29 : Trous percés sur une gaufre de silicium par EBM.

5.5 USINAGE ELECTROCHIMIQUE (ELECTROCHEMICAL MACHINING : ECM)

[7][19]

5.5.1 PRINCIPE

Le principe est quasiment le même que l'électroérosion, sauf qu'ici, la pièce et l'outil trempent dans un bain électrolyte, qui permet le passage du courant entre la cathode (outil) et l'anode (pièce). La matière s'en va ainsi de la pièce à l'outil et après un certain temps la pièce est «déplaquée» selon la forme de l'outil.

L'enlèvement de la matière est d'autant plus importante que la distance entre la pièce et l'outil est petite. Ce dernier doit donc bouger vers la pièce à la même vitesse que la matière change d'électrode. Et le fluide doit circuler à une vitesse assez grande pour chasser les particules d'hydroxydes solides et les bulles de gaz qui se forment durant l'électrolyse. On emploie ce procédé principalement pour l'affûtage, l'ébavurage, la rectification et le perçage. Il pourrait néanmoins servir à des traitements de surface pour plaquer des pièces. Il est très utilisé dans le monde de l'électronique.

5.5.2 MATÉRIAUX

Comme l'électroérosion, ce procédé ne peut être appliqué qu'à des matériaux conducteurs.

5.5.3 LIMITES ET PRÉCISIONS

Le plus petit diamètre usinable est de 0.1 mm. On ne peut pas usiner des formes très complexes puisqu'elles dépendent de la forme de l'outil. Les tolérances sont de l'ordre de 0.01 mm à 0.25 mm. Le fini de surface va de 0.2 µm à 6.3 µm Ra. Il y a un angle de dépouille d'environ 0.1°.

5.5.4 AVANTAGES

Cette technique permet l'usinage de forme démolables. Contrairement à l'électroérosion, il n'y a pas usure d'outil. Le rendement est assez bon. Elle peut également servir de technique de finition comme le plaquage.

5.5.5 DÉSAVANTAGES

Seuls les matériaux conducteurs sont usinés. La conception de l'outil réduit la complexité de la pièce. La corrosion due aux électrolytes peut poser des problèmes de stockage et de dégradation de milieux. L'équipement coûte cher. Il y a une bonne pratique à connaître car l'intensité du courant appliquée à chaque matériau n'est pas la même et peut endommager la pièce. De plus il arrive que la pièce soit poreuse. C'est un procédé très lent.

5.6 EN RÉSUMÉ

6 CONCLUSIONS

La liste des procédés de microfabrication n'est pas exhaustive. Mais il se dégage plusieurs choses de ce travail.

Les critères de sélection d'un procédé sont multiples. Il faut une bonne connaissance des matériaux et des spécifications demandées pour pouvoir faire un premier choix.

On peut constater que la plupart de ces techniques ne sont pas industrialisées et leurs équipements coûtent très cher. Les seules techniques de vulgarisation industrielles sont celles qui ont trouvé un débouché étroitement lié au monde de la fabrication des puces électroniques. Pour cette raison, tant que le micromonde reste un marché à venir, les réalisations de type non-électroniques doivent se tourner vers des technologies issues des techniques du macromonde.

Certaines technologies semblent cependant fort prometteuses. C'est le cas du LIGA qui reste une expérience de laboratoire excessivement inaccessible et chère. Mais il y a à espérer qu'avec la croissance de la demande industrielle, elle ne le soit plus. D'autres procédés sont encore à l'état d'étude. On ne peut vraiment cerner les problèmes qu'ils posent car souvent le cas d'étude ne s'est pas encore présenté, vu la jeunesse des microtechnologies.

Il serait intéressant de découvrir quelles sont, parmi les technologies existantes celles qui seraient capables de repousser leurs limites pour permettre la réalisation de composants trop grands ou trop complexes pour la technologie électronique, mais trop petits pour les technologies usuelles.

De la même manière il faudrait envisager de rendre les techniques issues de la technologie du silicium plus complète et plus compétitives dans la fabrication des pièces 3D.

La suite de ce travail serait de rendre cet état de l'art le plus complet possible des techniques de microfabrication et de leur domaine (voir matériaux, limites, précision). Cela dans le but d'élaborer un outil de recherche et sélection adapté non seulement aux spécifications mais aussi à l'accessibilité du procédé.

Un tel outil pour la sélection des techniques de fabrication ne serait cependant qu'une première aide. Un facteur qui influe énormément le choix de la technique c'est la complexité de la pièce à usiner. C'est pour cette raison que pour avoir une certaine efficacité, il faudrait coupler les règles de bonne pratique du «design for manufacturing» et adapter le dessin de la pièce à fabriquer de façon à ce qu'elle soit le plus facilement mise en œuvre avec la méthode choisie.

Il existe plusieurs aspects qui viennent compliquer l'étude des techniques de fabrication, et que l'on néglige souvent lorsqu'on envisage ces techniques. Un premier de ces aspects c'est la manipulation et la vision d'objets fabriqués. Un objet qui, à priori pourrait être fabriquer par une méthode très simple, pourrait voir l'application de cette méthode devenir très difficile voire impossible si on ne trouve pas un moyen de placer correctement la pièce ou de la récupérer une fois fabriquée. Un second de ces aspects, a été décrit dans l'introduction c'est le contrôle des dimensions et des formes. Pour faire une étude complète des techniques de microfabrication, il faudrait tenir compte de cet aspect-là aussi.

Les perspectives à venir sont nombreuses dans le domaine des microtechnologies, mais il est essentiel de pouvoir fixer de limites de réalisation à cette miniaturisation.

7 ANNEXES

8 BIBLIOGRAPHIE –RÉFÉRENCES

CONFÉRENCE

- [1] JEAN GUENOT (du centre de transfert des microtechniques : CMT) - *Usinage à grande vitesse appliquée aux pièces de petites dimensions* – Conférence « DU COPEAU À L'ATOME... » (Séminaire Agoria – novembre 2000)
- [2] PHILIP BLEYS – *Électroérosion appliquée aux pièces de petites dimensions* – Conférence « DU COPEAU À L'ATOME... » (Séminaire Agoria – novembre 2000)
- [3] ERIC AUDOUARD – *Usinage laser: du YAG au femtoseconde* – Conférence « DU COPEAU À L'ATOME... » (Séminaire Agoria – novembre 2000)
- [4] PASCAL BLIND – *Les micro-usinages par voie chimique (KOH) et par voie sèche (RIE)* – Conférence « DU COPEAU À L'ATOME... » (Séminaire Agoria – novembre 2000)
- [5] PASCAL BLIND - *Usinage par ultrasons* - Conférence « DU COPEAU À L'ATOME... » (Séminaire Agoria – novembre 2000)
- [6] MICHEL FROELICHER – *Le nano-usinage* – Conférence « DU COPEAU À L'ATOME... » (Séminaire Agoria – novembre 2000)

OUVRAGES

- [7] VÉRONIQUE BEAUDOIN – *Revue des procédés de fabrication* – (rapport pour Patrice Masson du GAUSS – août 2000)
- [8] THOMAS DROZDA, J. CHARLES WICK – *Tool and manufacturing engineers handbook, Vol. 1 – Machining, chap. 14* – fourth edition by SME (1983).
- [9] MARC MADOU – *Fundamentals of microfabrication* – edition by CRC Press (1997).
- [10] MICHAEL F. ASHBY – *Materials selection in mechanical design* – second edition by BUTTERWORTH HEINEMANN (1999).
- [11] PATRICE MINOTTI ET ANTOINE FERREIRA – *Les micromachines* – edition HERMES (1998).
- [12] SEROPE KALPAKJAN AND STEVEN R. SCHMID – *Manufacturing engineering and technology* – fourth edition by PRENTICE HALL.(2001).

- [13] DOMINICK V. ROSATO, DONALD V. ROSATO AND MARLENE G. ROSATO. – *Injection molding handbook* – 3rd edition by KAP (2000).

COURS

-
- [14] LEO VITO - Cours de rhéologie des polymères de l'Université Libre de Bruxelles.

SITES INTERNETS

- [15] Laboratoire pour l'utilisation du rayonnement thermique
<http://www.microfab.lure.u-psud.fr/webfr/web/principe.htm>

- [16] IMM Institut of micrtechnology Mainz - http://www.imm-mainz.de/english/sk_a_tec/basic_te/liga.html

- [17] Institut for micromanufacturing - <http://www.latech.edu/tech/engr/ifm/>

- [18] Sandia - <http://mems.sandia.gov/scripts/index.asp>

- [19] Electrochemical machining - <http://www.unl.edu/nmrc/ecm00.htm>

- [20] Bullen ultrasonics - <http://www.bullen-ultrasonics.com/>

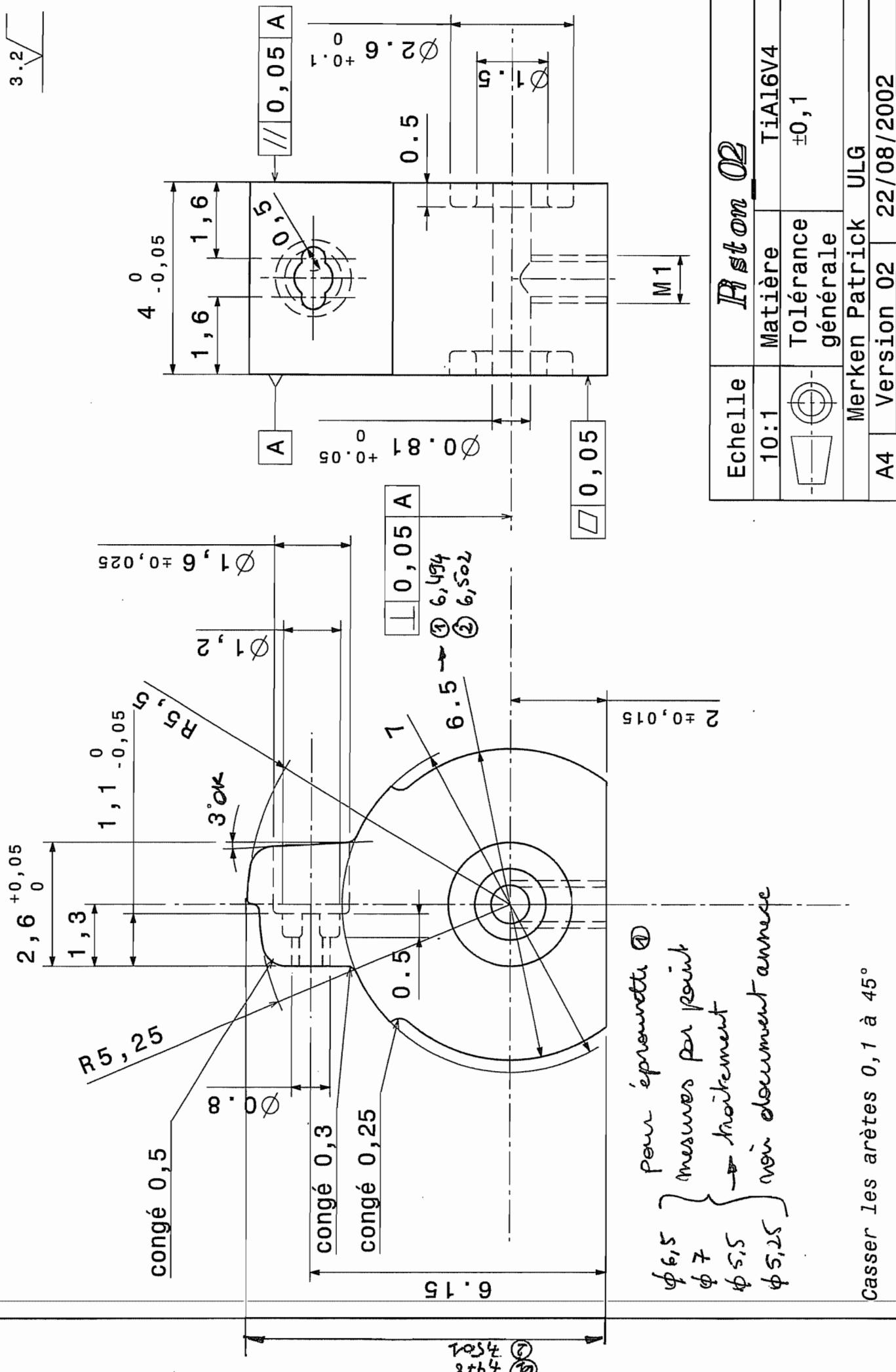
- [21] Institut national de la recherche scientifique - Énergie et matériaux -
<http://www.inrs-ener.uquebec.ca/lasmat.html>

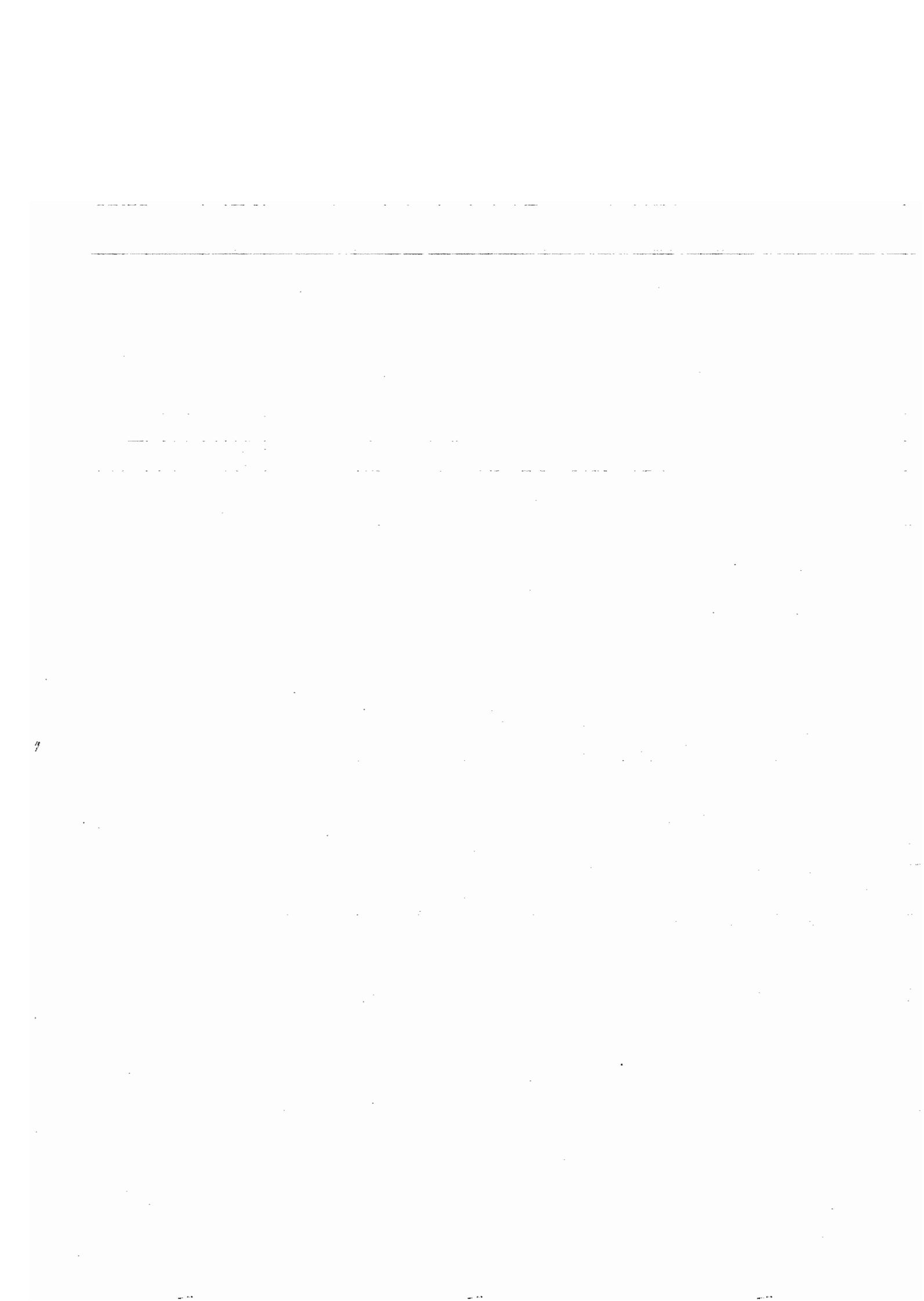
- [22] Université Jean Monet/CNRS/TSI – <http://www.nanodata.com/>

- [23] Un laser femtoseconde ultra-intense – <http://www.cnrs.fr/cw/fr/band/cnrs/>
-

6.7. Métrologie







Piston_02 02-03-02 01/08/02**Mesures**

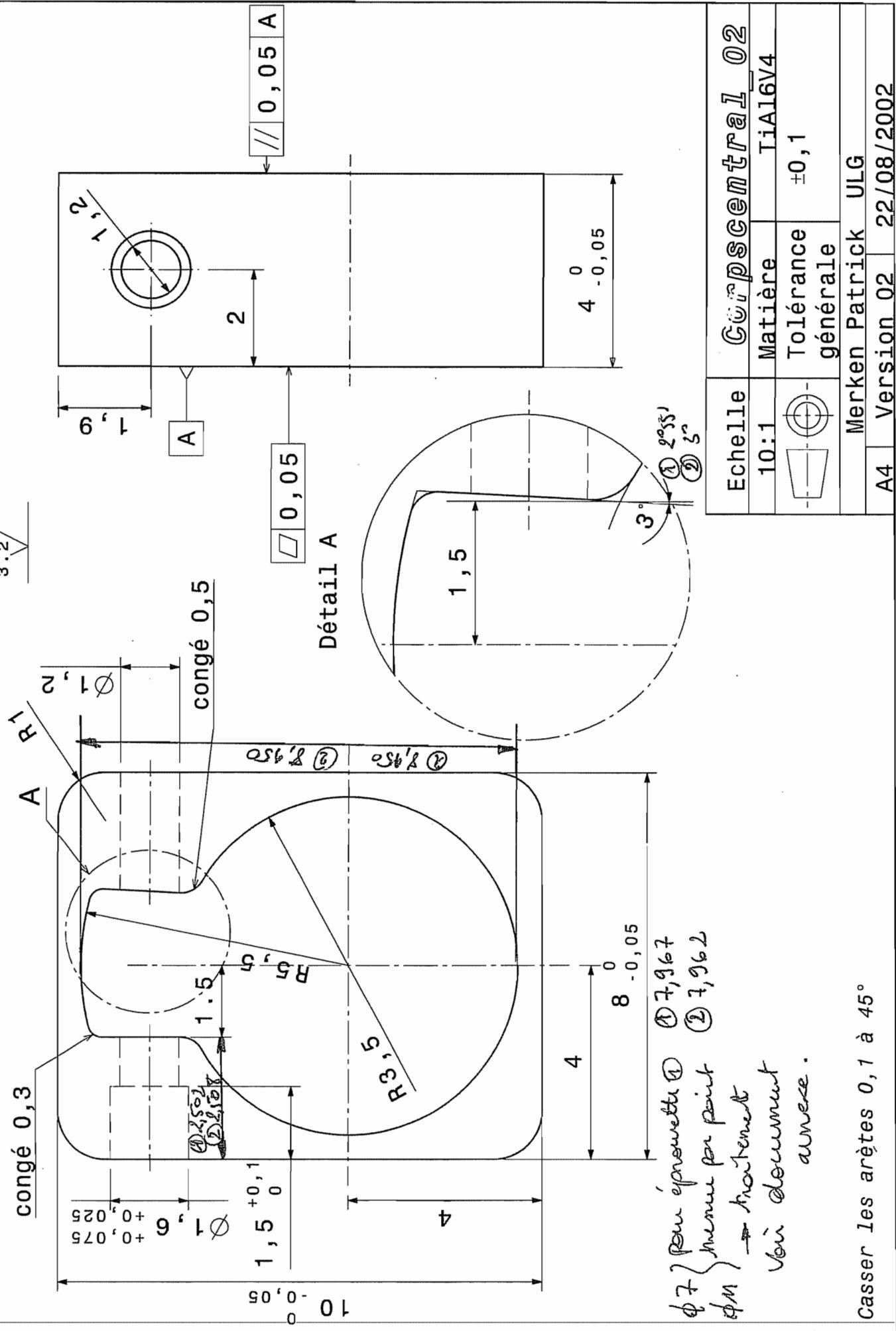
$\emptyset 6,5$		$\emptyset 7$		$\emptyset 5,5$		$\emptyset 5,25$	
X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
-5.837	0.640	-0.970	1.440	-4.236	4.152	-3.086	4.001
-6.041	0.325	-1.253	1.665	-4.074	4.196	-2.879	3.997
-6.168	0.081	-1.517	1.825	-3.921	4.210	-2.710	3.982
-6.336	-0.420	-1.742	1.930	-3.644	4.235	-2.492	3.961
-6.441	-1.162	-4.834	1.854	-3.487	4.254	-2.432	3.948
-6.412	-1.684	-5.011	1.747				
-6.258	-2.299	-5.227	1.604				
-6.088	-2.706	-5.386	1.487				
-5.942	-3.011	-5.539	1.352				
-0.495	-2.999	-5.673	1.237				
-0.220	-2.475						
-0.031	-1.882						
-0.035	-1.321						
-0.032	-0.539						
-0.275	0.159						
-0.519	0.586						
-0.769	0.908						

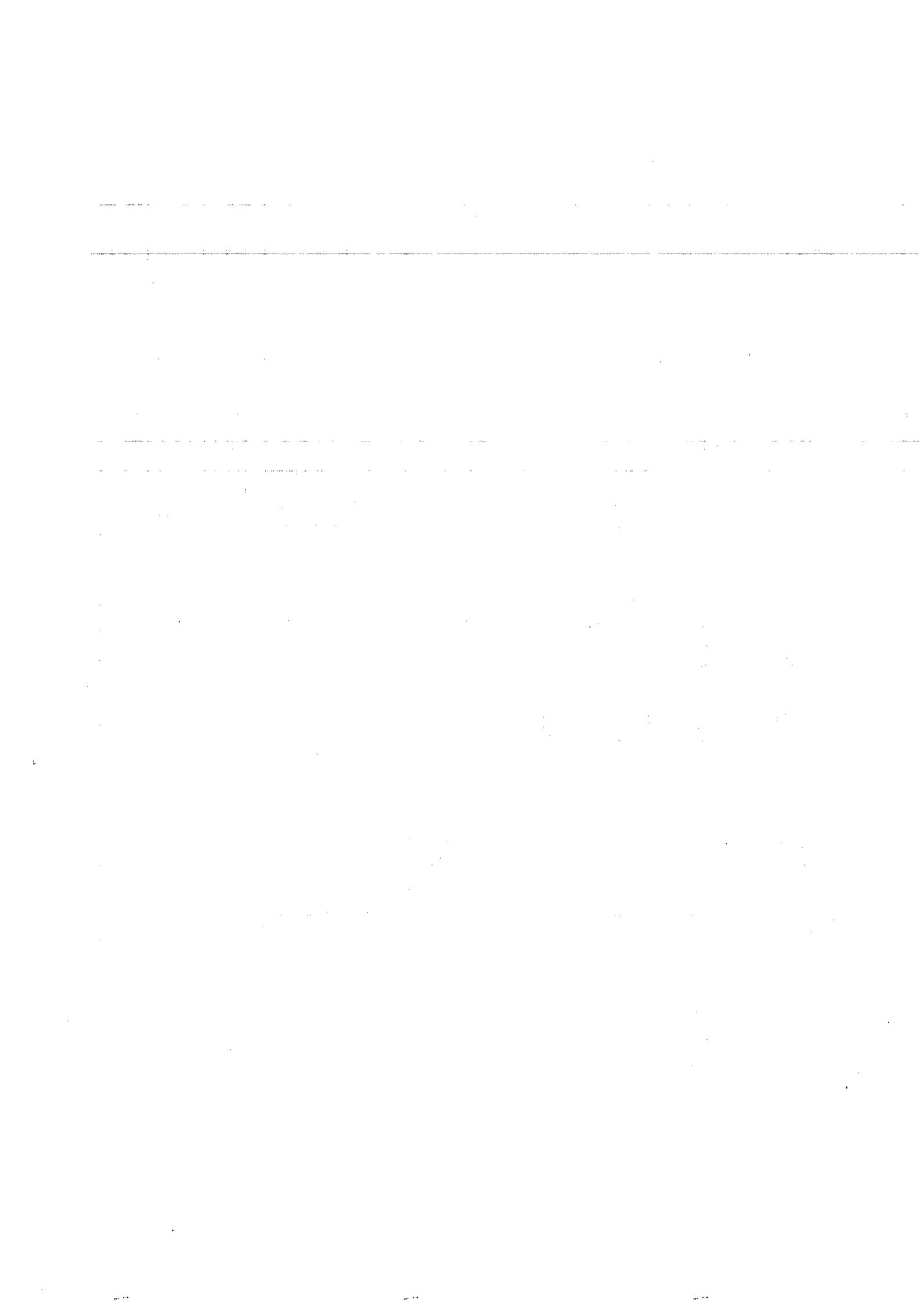
Résultats

Least Squares Method circularity = 85.303709 µm center (a,b) = (-3.209232 -1.232044)	Least Squares Method circularity = 10.255020 µm center (a,b) = (-3.202984 -1.231082)	Least Squares Method circularity = 14.412200 µm center (a,b) = (-3.311369 -.182679)	Least Squares Method circularity = 4.350226 µm center (a,b) = (-3.094215 .264765)
P-Norm Method circularity = 71.382417 µm center (a,b) = (-3.230854 -1.212882)	P-Norm Method circularity = 9.500511 µm center (a,b) = (-3.203763 -1.226169)	P-Norm Method circularity = 12.031755 µm center (a,b) = (-3.389243 .265209)	P-Norm Method circularity = 3.953037 µm center (a,b) = (-3.058493 .020975)
R mean = 3.233373 mm log(p) = 6.00 iterations = 38 2.p-mean = .713823E-01 2.p-norm = .713825E-01 %error = .133482E-03 contact points with outer circle = 2 contact points with inner circle = 2	R mean = 3.482990 mm log(p) = 6.00 iterations = 38 2.p-mean = .950050E-02 2.p-norm = .950052E-02 %error = .135087E-03 contact points with outer circle = 2 contact points with inner circle = 2	R mean = 3.983973 mm log(p) = 6.00 iterations = 38 2.p-mean = .120318E-01 2.p-norm = .120318E-01 %error = .154766E-03 contact points with outer circle = 2 contact points with inner circle = 2	R mean = 4.020092 mm log(p) = 6.00 iterations = 38 2.p-mean = .395304E-02 2.p-norm = .395304E-02 %error = .124826E-03 contact points with outer circle = 2 contact points with inner circle = 2



Projektion der Projektl. LLN. 06/08/2002
13/08/2002





Corpscentral_02 02-03-02 05/08/02**Mesures**

$\emptyset 7$		$\emptyset 11$	
X	Y	X	Y
-1.776	-2.686	-3.370	-8.851
-1.510	-2.926	-4.049	-8.900
-1.303	-3.140	-4.623	-8.830
-0.806	-3.888	-5.519	-8.517
-0.557	-4.544	-6.302	-7.945
-0.467	-5.135	-6.675	-7.418
-0.460	-5.643	-7.112	-6.789
-0.580	-6.367	-7.359	-5.827
-0.800	-6.948	-7.361	-5.033
-1.071	-7.396	-7.074	-4.006
-1.571	-7.985	-6.702	-3.348
-2.245	-8.464	-6.153	-2.765
-2.753	-8.699		

Résultats**Least Squares Method**

circularity = 78.835556 μm
 center (a,b) = -3.913784 -5.423898

P-Norm Method

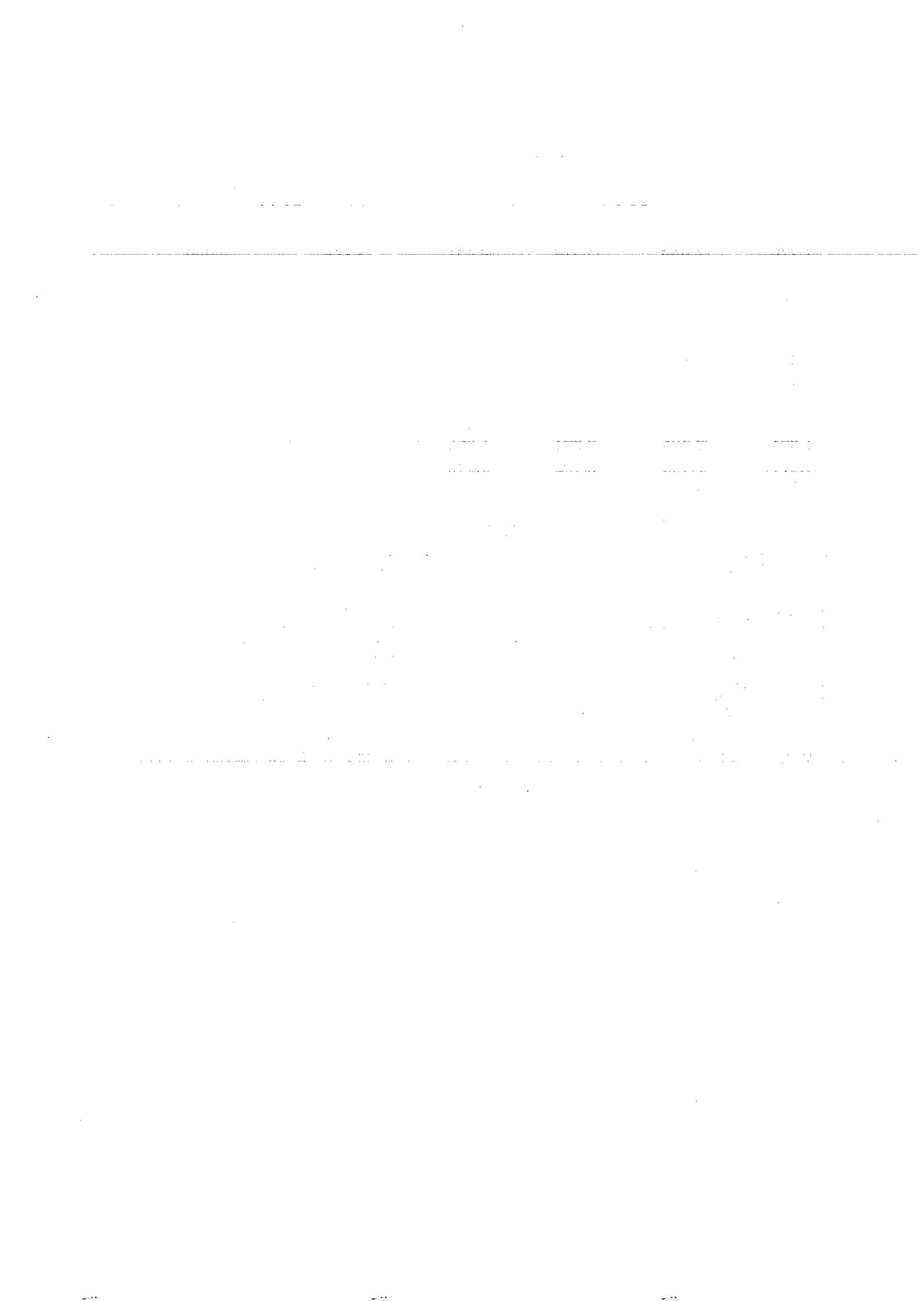
circularity = 72.482317 micrometers
 center (a,b) = -3.887823 -5.414985
 R mean = 3.468503 millimeters
 log(p) = 6.00
 iterations = 38
 2.p-mean = .724822E-01
 2.p-norm = .724824E-01
 %error = .127864E-03
 contact points with outer circle = 2
 contact points with inner circle = 2

Least Squares Method

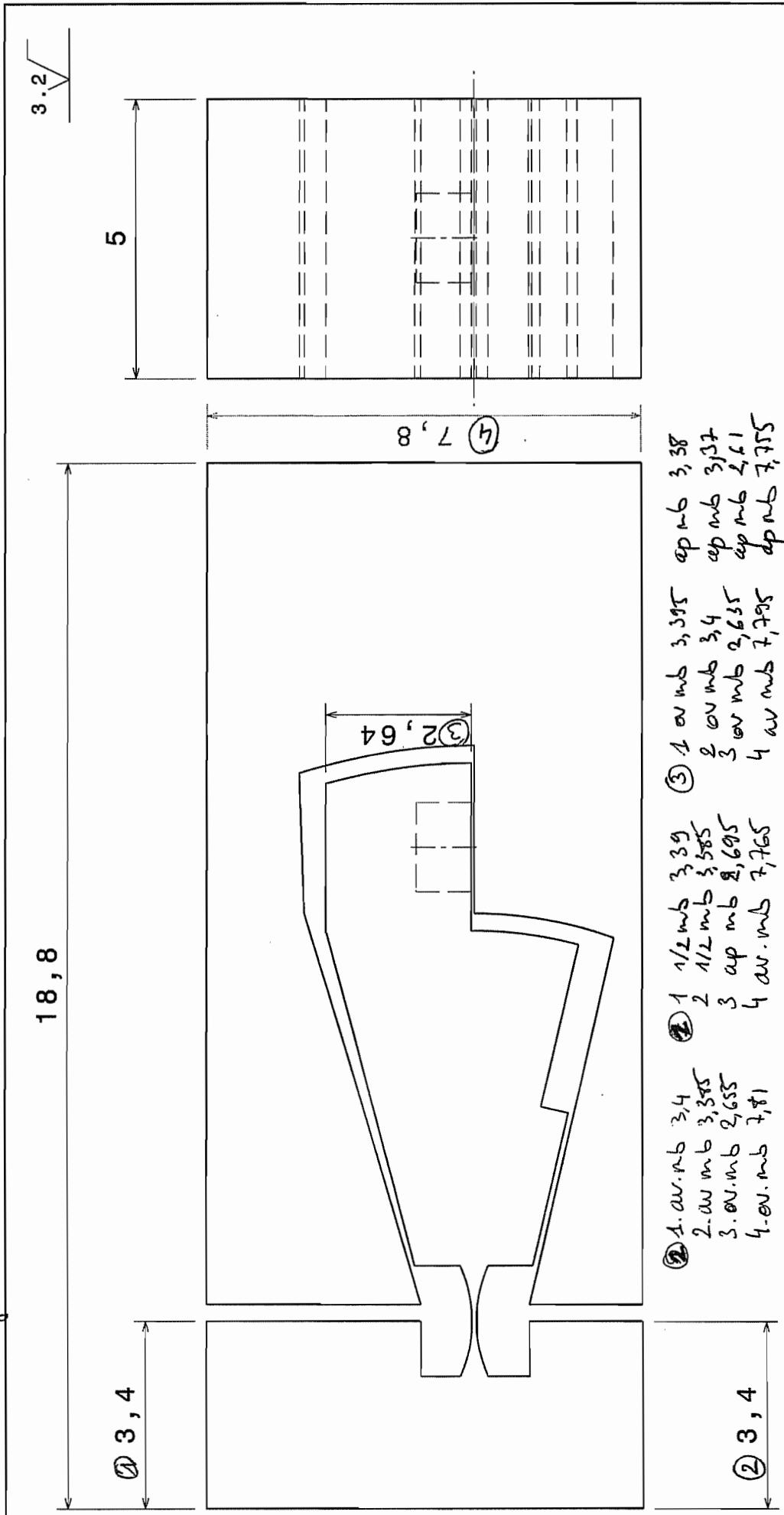
circularity = 15.523004 micrometers
 center (a,b) = -3.922319 -5.621061

P-Norm Method

circularity = 14.464379 micrometers
 center (a,b) = -3.940632 -5.226813
 R mean = 5.281522 millimeters
 log(p) = 6.00
 iterations = 38
 2.p-mean = .144644E-01
 2.p-norm = .144644E-01
 %error = .134299E-03
 contact points with outer circle = 2
 contact points with inner circle = 2



Pyrometry

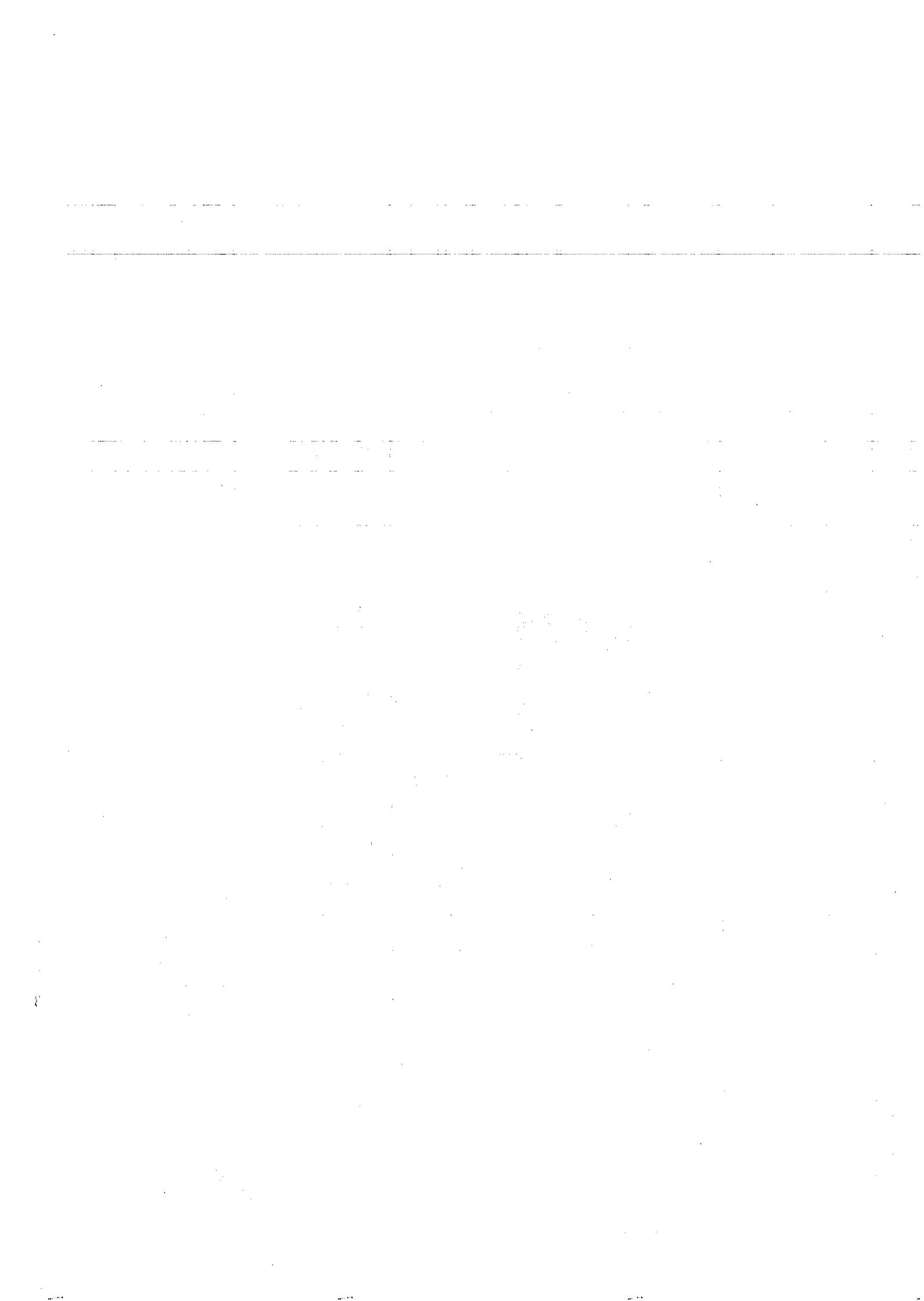


Lépendre

av-nb: closed minotillage
1/2 nb: minotill et no tillage
op-nb: open minotillage

Casser les arêtes 0,1 à 45°

Echelle	Corps d'épreuve 5		
10 : 1	Matière	TiAl6V4 X20Cr13	
	Tolérance générale		
	Merken Patrick	ULG	
A4	Version 01	29/10/2002	



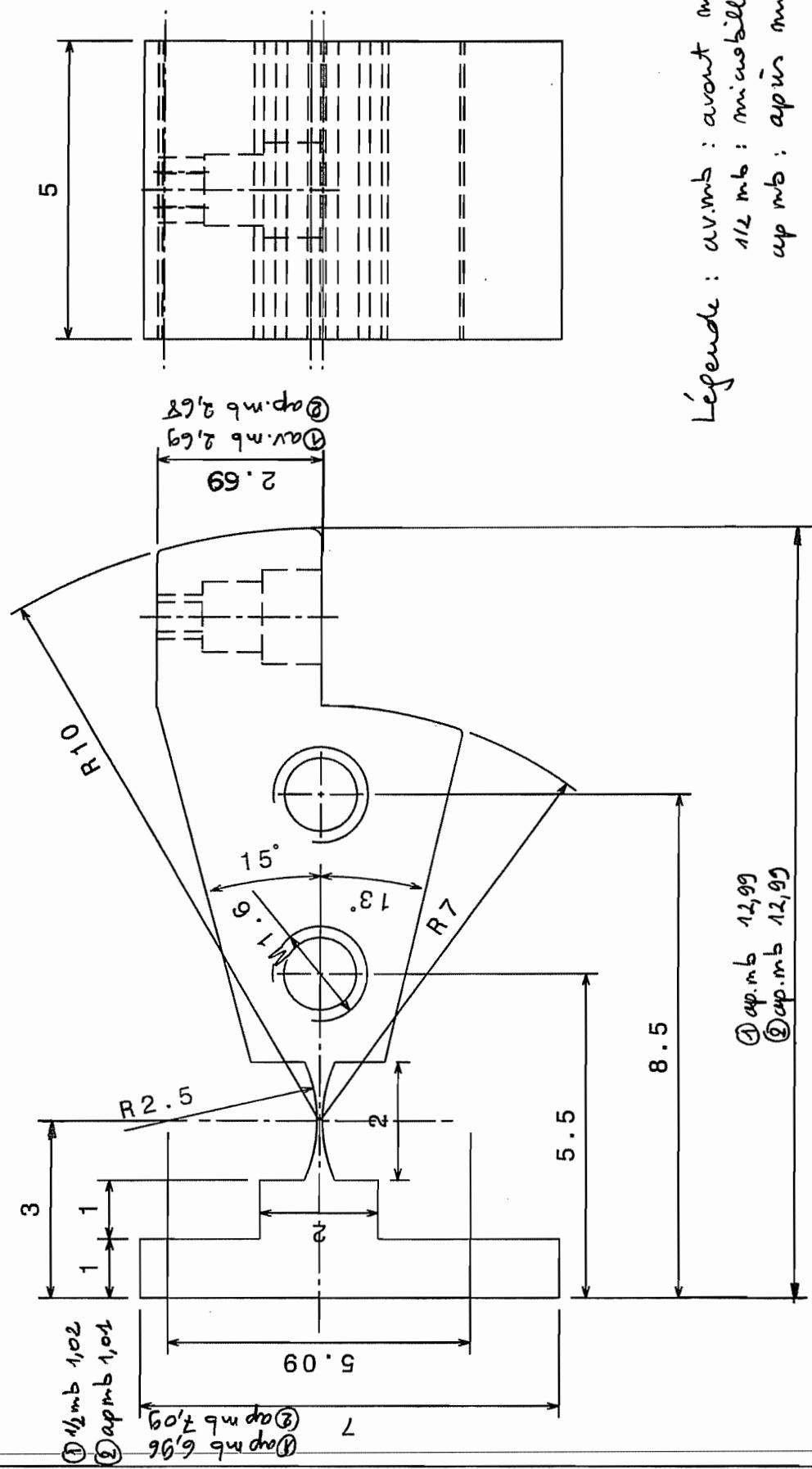
PLAN METRO 05

Légende : avvmb : avant minibillefe
1/2 mbs : minibille ol' 1 coté
cup mbs : après minibillefe

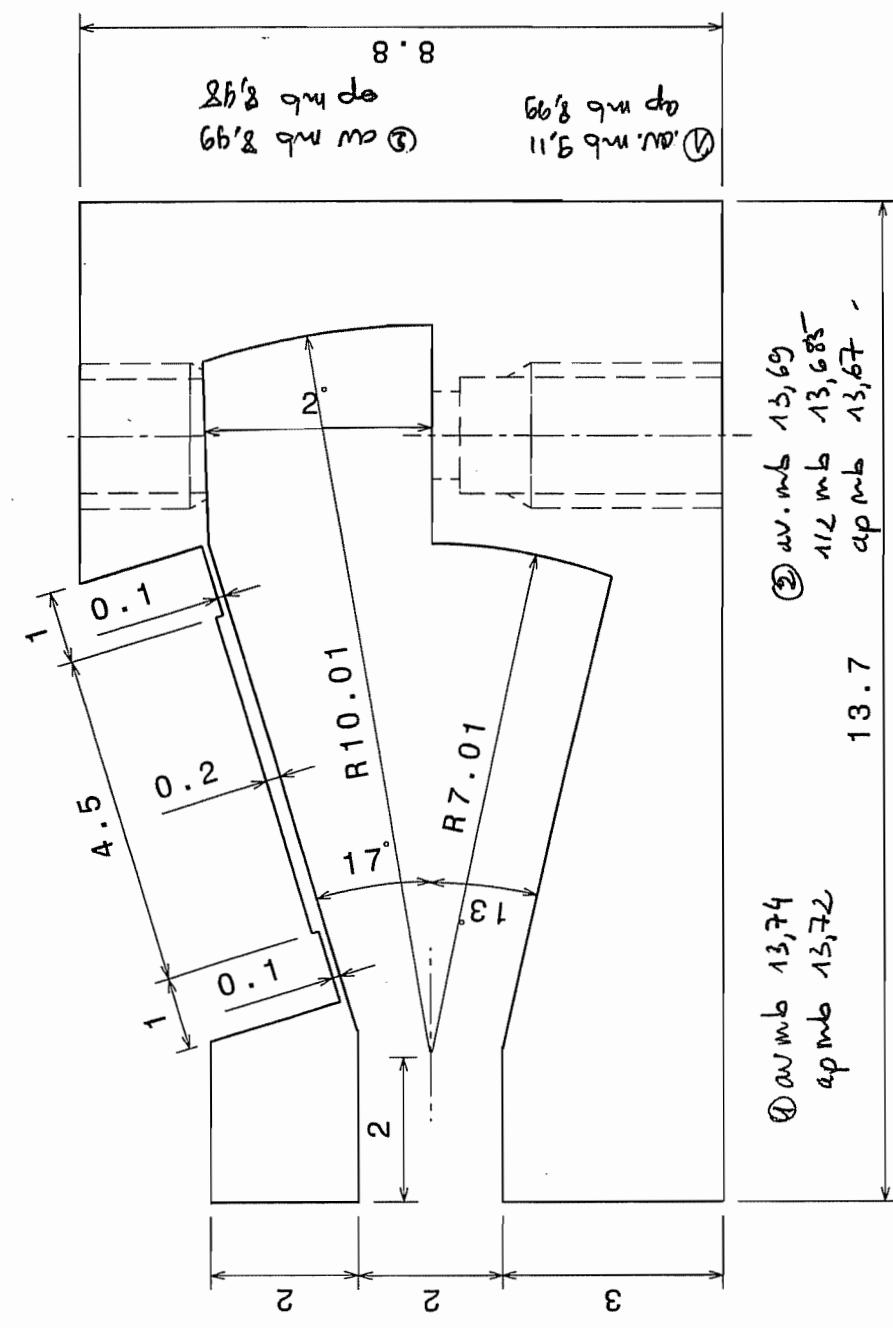
Echelle		Palette	
10 : 1	Matière	X20Cr13	
	Tolérance générale		
A4	Merken Patrick	ULG	Version 03 29/10/2003

Epaisseur de col : 0,08

Casser les arêtes 0,1 à 45°



3.2 ✓

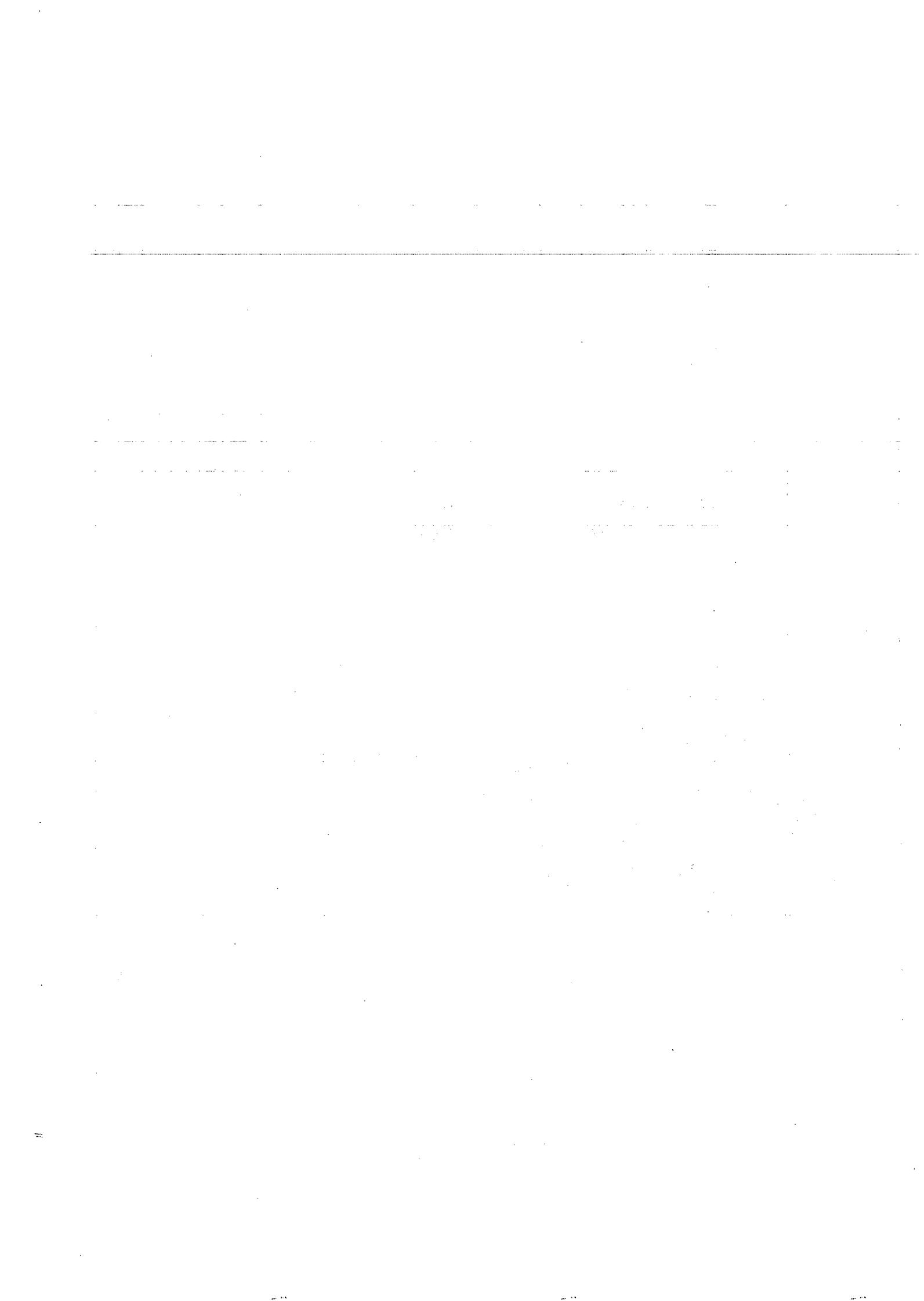


① av.mbs 13,74
ap.mbs 13,72
② av.mbs 13,69
112 mbs 13,685
ap.mbs 13,67

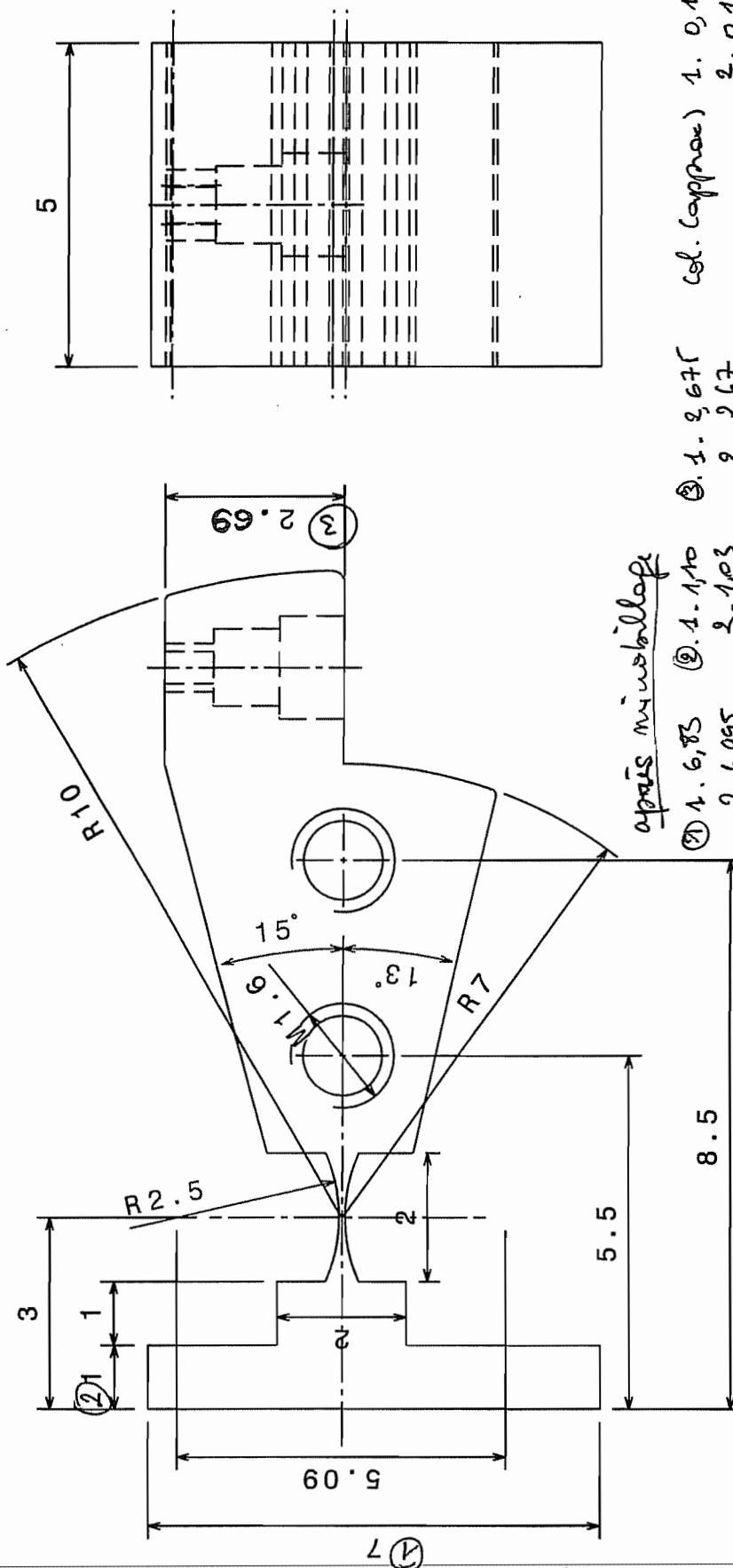
Légende:

av.mbs : avant minéralage
1/2 mbs : minéralage sur 1 face
ap.mbs : après minéralage -
Casser les arêtes 0,1 à 45°

Corps de pompe		
Echelle	Matière	Tolérance
10:1	TiAl6V4	
	Tolérance générale	
	Merken Patrick ULG	
A4	Version 03	08/01/2003

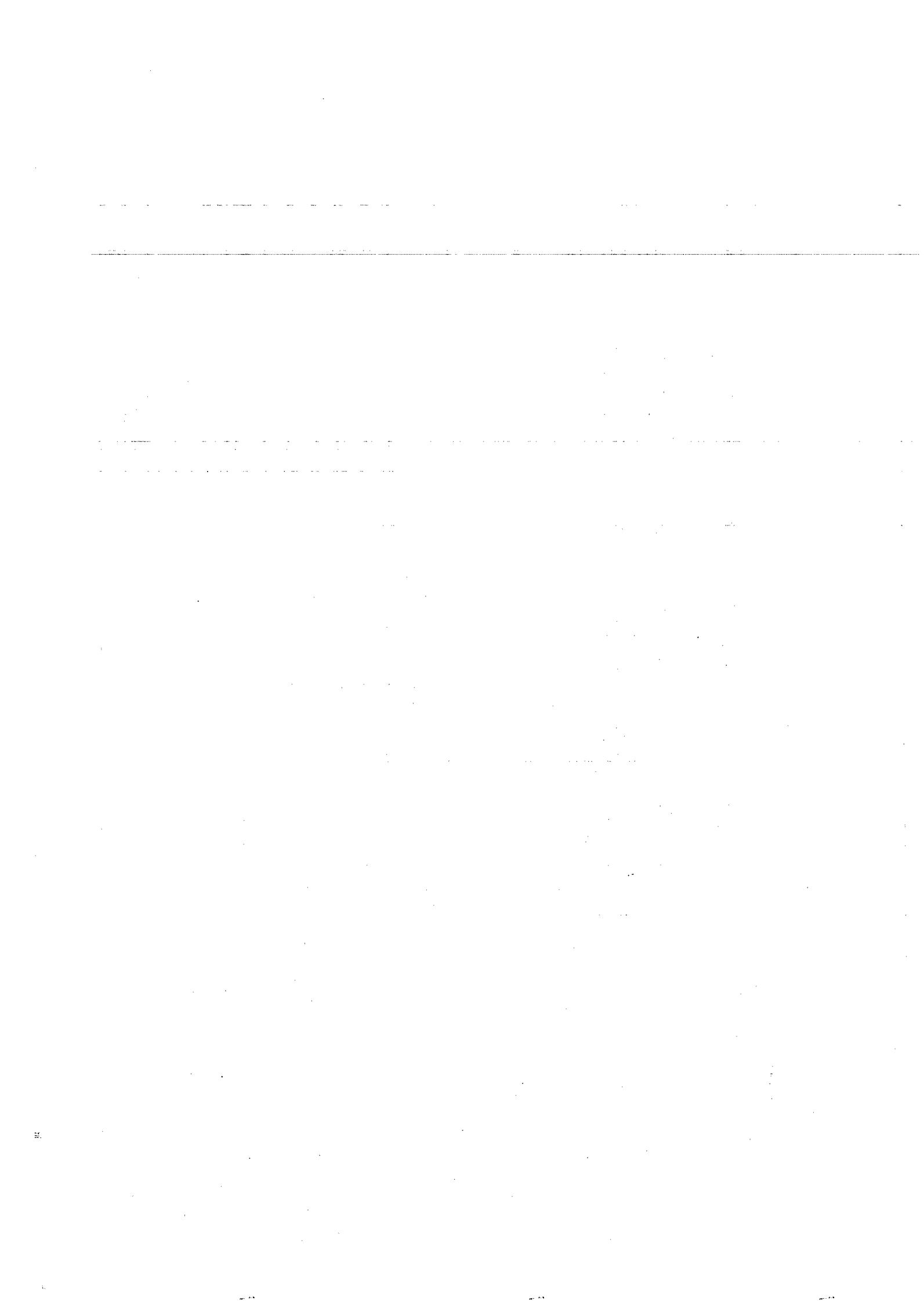


3.2



Palette			
Echelle		Matière	X20Cr13
10:1		Tolérance générale	
A4	Version 03	Merken Patrick	ULG 29/10/2003

Casser les arêtes 0,1 à 45°

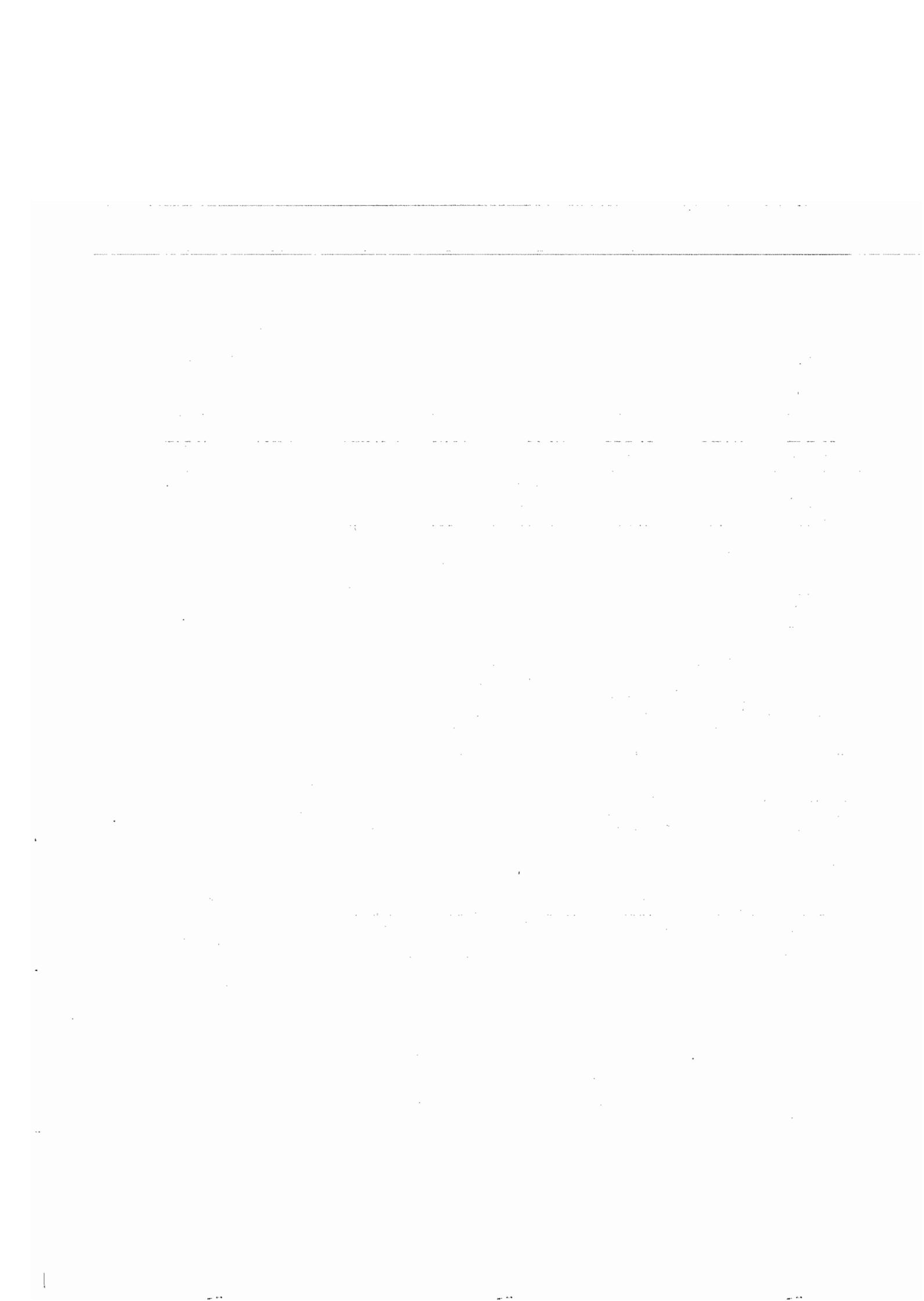


Roulement RMB SM1148K-0**Mesures**

1 Øext		1 Øint		2 Øext		2 Øint	
X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
-0.014	0.160	-0.886	-0.220	-0.227	0.449	-0.815	-0.280
-0.124	0.486	-0.845	-0.017	-0.524	0.722	-0.919	-0.043
-0.253	0.702	-0.907	0.165	-0.924	0.897	-1.094	0.065
-0.610	1.020	-1.035	0.294	-1.373	0.920	-1.330	0.065
-0.998	1.170	-1.323	0.349	-1.706	0.829	-1.538	-0.081
-1.713	1.104	-1.573	0.184	-2.039	0.612	-1.612	-0.276
-2.024	0.928	-1.644	0.000	-2.284	0.314	-1.507	-0.587
-2.358	0.523	-1.612	-0.215	-2.454	-0.219	-1.291	-0.711
-2.494	0.043	-1.498	-0.357	-2.408	-0.662	-1.031	-0.678
-2.478	-0.253	-1.312	-0.451	-2.152	-1.136	-0.875	-0.533
-2.305	-0.713	-1.147	-0.440	-1.830	-1.398	-0.818	-0.384
-1.486	-1.139	-0.992	-0.359	-1.452	-1.542	-0.825	-0.209
-1.552	-1.257	-0.887	-0.221	-0.968	-1.540		
-1.011	-1.263			-0.543	-1.372		
-0.505	-1.041			-0.276	-1.149		
-0.227	-0.757			-0.075	-0.840		
-0.073	-0.466			0.018	-0.561		
-0.067	-0.441			0.041	-0.301		
-0.012	-0.231			-0.032	0.101		

Résultats

Least Squares Method circularity = 130.006007 micrometers center (a,b) = -1.243351 - .032374	Least Squares Method circularity = 9.837538 micrometers center (a,b) = -1.246633 - .048473	Least Squares Method circularity = 5.500199 micrometers center (a,b) = -1.208333 - .317730	Least Squares Method circularity = 4.476149 micrometers center (a,b) = -1.212576 - .317621
P-Norm Method circularity = 128.922001 micrometers center (a,b) = -1.267347 -.016115	P-Norm Method circularity = 9.067259 micrometers center (a,b) = -1.245695 - .050013	P-Norm Method circularity = 5.128690 micrometers center (a,b) = -1.208592 - .318199	P-Norm Method circularity = 3.921935 micrometers center (a,b) = -1.212197 - .318097
R mean = 1.240089 millimeters log(p) = 6.00 iterations = 46 2.p-mean = .128922E+00 2.p-norm = .128922E+00 %error = .103957E-03 contact points with outer circle = 2 contact points with inner circle = 2	R mean = .401899 millimeters log(p) = 6.00 iterations = 38 2.p-mean = .906725E-02 2.p-norm = .906727E-02 %error = .131362E-03 contact points with outer circle = 2 contact points with inner circle = 2	R mean = 1.247828 millimeters log(p) = 6.00 iterations = 38 2.p-mean = .512868E-02 2.p-norm = .512870E-02 %error = .154299E-03 contact points with outer circle = 2 contact points with inner circle = 2	R mean = .400981 millimeters log(p) = 6.00 iterations = 38 2.p-mean = .392193E-02 2.p-norm = .392194E-02 %error = .161089E-03 contact points with outer circle = 2 contact points with inner circle = 2

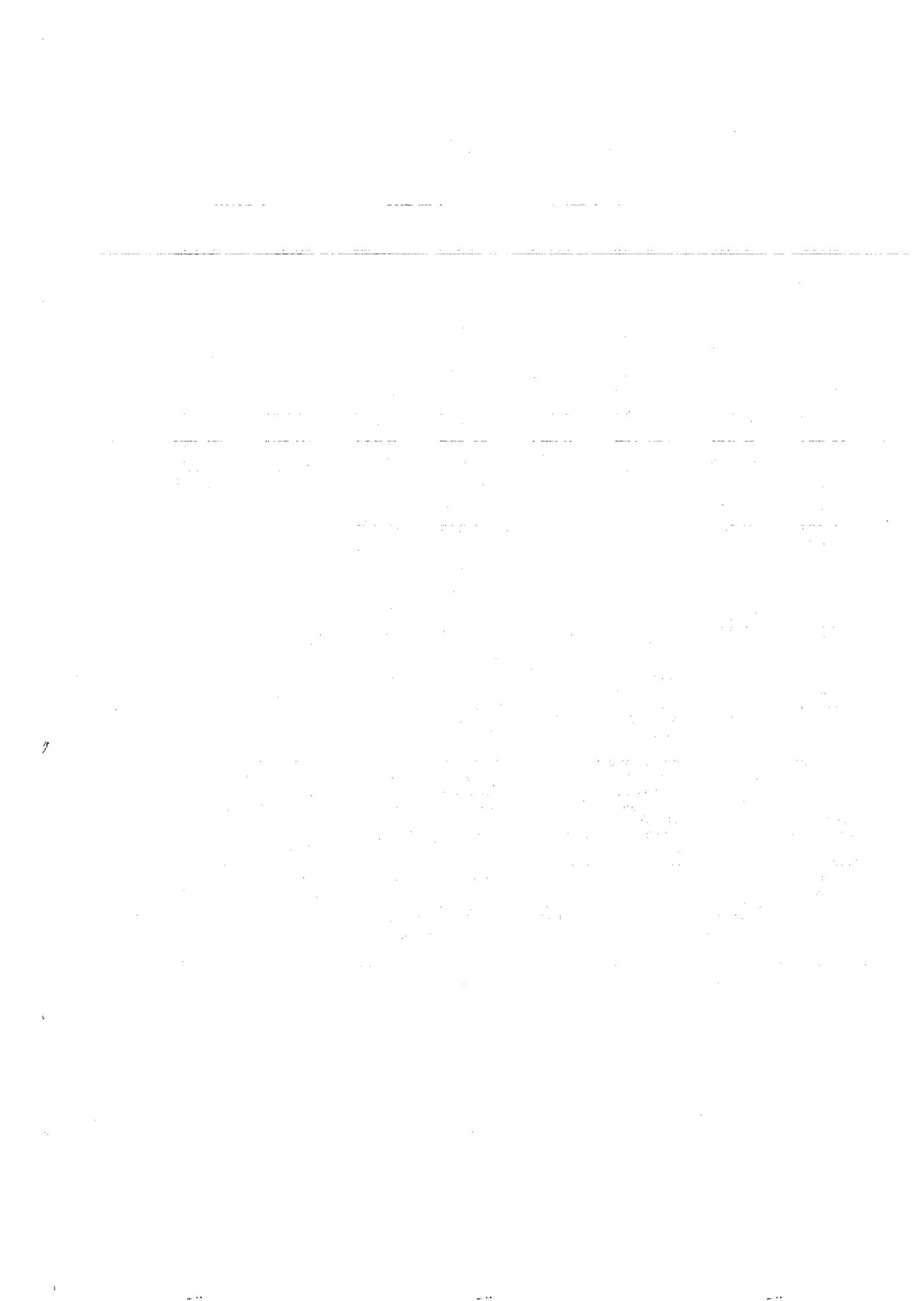


Roulement RMB SM1148K-0**Mesures**

3 Øext		3 Øint		4 Øext		4 Øint	
X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
0.055	0.329	-0.830	0.199	-0.050	0.284	-0.857	-0.152
0.024	0.667	-0.802	0.483	-0.223	0.643	-0.885	0.102
-0.112	1.006	-0.980	0.726	-0.475	0.908	-1.074	0.297
-0.454	1.384	-1.208	0.785	-0.765	1.080	-1.364	0.318
-0.815	1.566	-1.481	0.661	-1.059	1.163	-1.662	0.124
-1.334	1.617	-1.584	0.455	-1.424	1.162	-1.648	-0.078
-1.740	1.497	-1.568	0.237	-1.710	1.087	-1.499	-0.384
-2.147	1.178	-1.435	0.058	-1.989	0.931	-1.211	-0.472
-2.383	0.756	-1.134	-0.017	-2.224	0.706	-1.002	-0.386
-2.441	0.306	-0.914	0.087	-2.389	0.437	-0.898	-0.260
-2.345	-0.099	-0.817	0.233	-2.488	0.067	-0.852	-0.101
-2.035	-0.536	-0.892	0.109	-2.422	-0.491	-0.850	-0.035
-1.672	-0.773			-2.166	-0.908		
-1.387	-0.851			-1.815	-1.179		
-0.827	-0.815			-1.375	-1.308		
-0.496	-0.656			-0.816	-1.240		
-0.263	-0.452			-0.499	-1.065		
-0.111	-0.247			-0.275	-0.843		
-0.036	-0.097			-0.061	-0.454		

Résultats

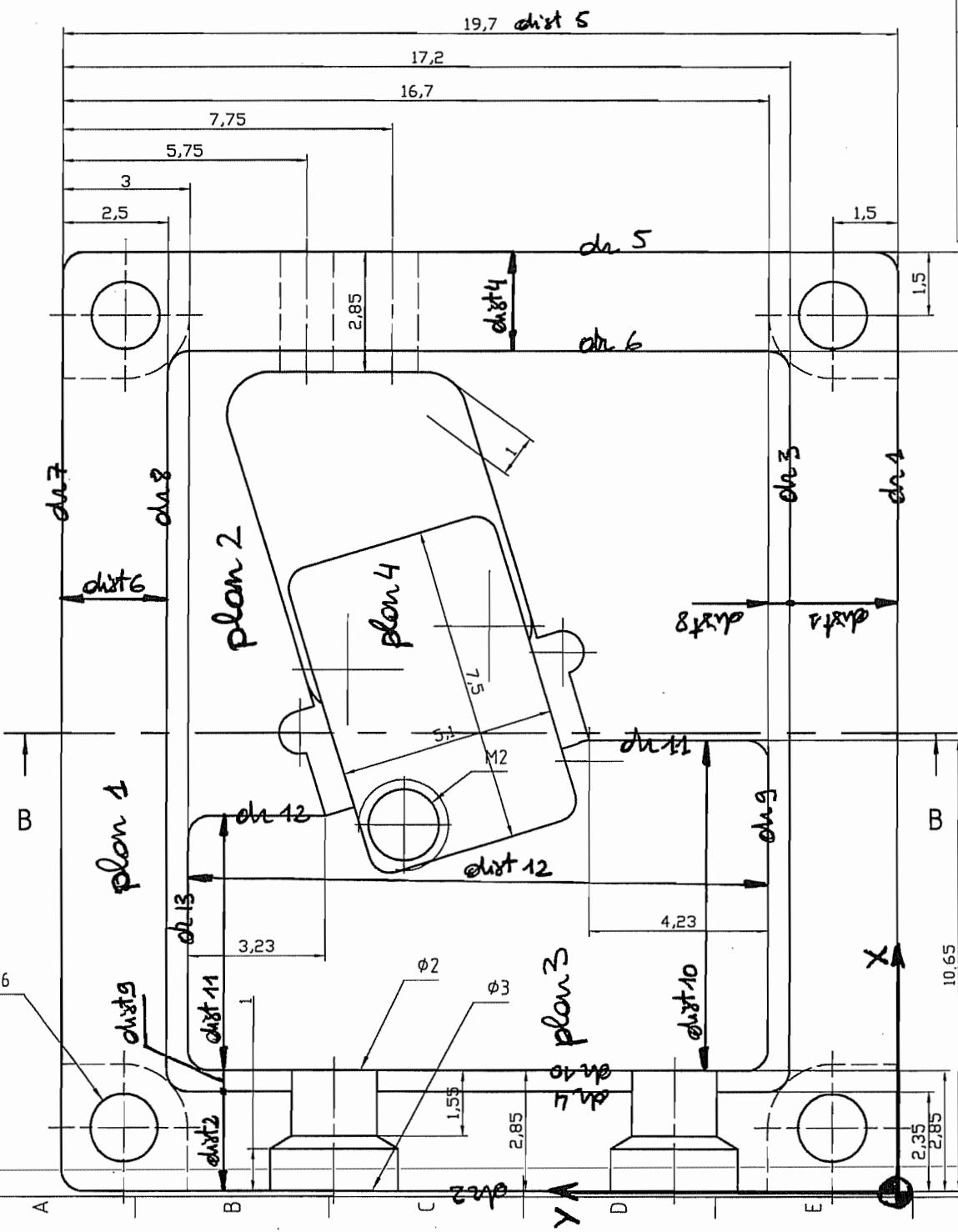
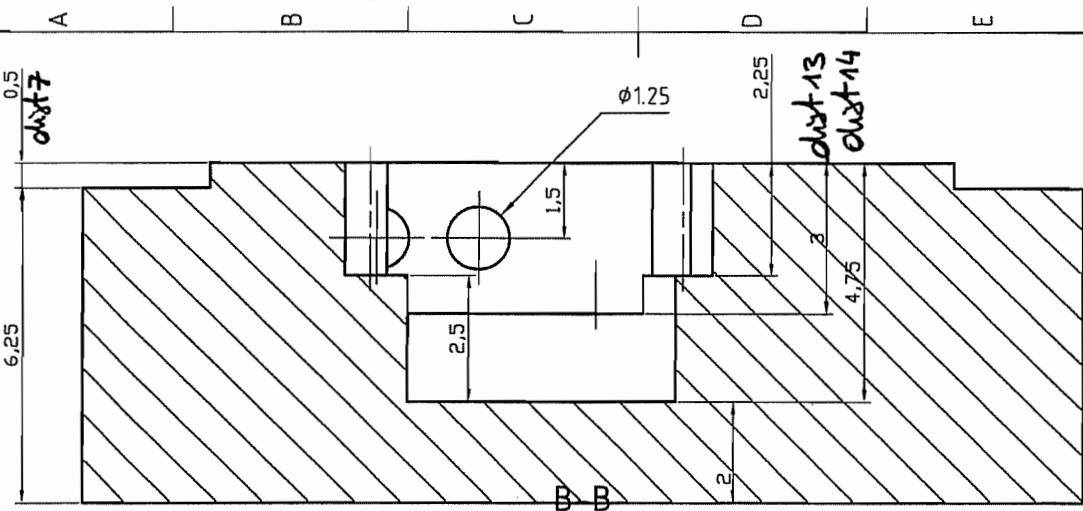
Least Squares Method circularity = 7.568827 micrometers center (a,b) = -1.191239 .378514	Least Squares Method circularity = 4.754590 micrometers center (a,b) = -1.190590 .381015	Least Squares Method circularity = 6.516170 micrometers center (a,b) = -1.247300 .069096	Least Squares Method circularity = 55.175471 micrometers center (a,b) = -1.258750 .063469
P-Norm Method circularity = 6.564019 micrometers center (a,b) = -1.192095 .379593 R mean = 1.247790 millimeters log(p) = 6.00 iterations = 38 2.p-mean = .656401E-02 2.p-norm = .656403E-02 %error = .142941E-03 contact points with outer circle = 2 contact points with inner circle = 2	P-Norm Method circularity = 3.937715 micrometers center (a,b) = -1.189957 .380427 R mean = .403007 millimeters log(p) = 6.00 iterations = 38 2.p-mean = .393771E-02 2.p-norm = .393772E-02 %error = .160352E-03 contact points with outer circle = 2 contact points with inner circle = 2	P-Norm Method circularity = 5.880932 micrometers center (a,b) = -1.246956 .068269 R mean = 1.245883 millimeters log(p) = 6.00 iterations = 38 2.p-mean = .588092E-02 2.p-norm = .588094E-02 %error = .169334E-03 contact points with outer circle = 2 contact points with inner circle = 2	P-Norm Method circularity = 49.684435 micrometers center (a,b) = -1.269248 .049792 R mean = .404643 millimeters log(p) = 6.00 iterations = 38 2.p-mean = .496844E-01 2.p-norm = .496845E-01 %error = .130490E-03 contact points with outer circle = 2 contact points with inner circle = 2



23/03/04 LLN. (Grossissement $\times 1$)

RESULTATS SUR FEUILLE ANNEXE

PLAN METRO 08



COUVERCLE INF					
Projection	Quant. : 1	Mat. : Titane	Reference : -	Designed by : SMAL OLIVIER	Checked by : -
	Scale : 10:1	Tolerance : ± 0.2	Surf. fin. : Ra 3.2	Date : 13/05/2003	
	N° 1	Edition 1	Sheet 1/1		

UCL-CEREM(PRM-LEI)

8

7

6

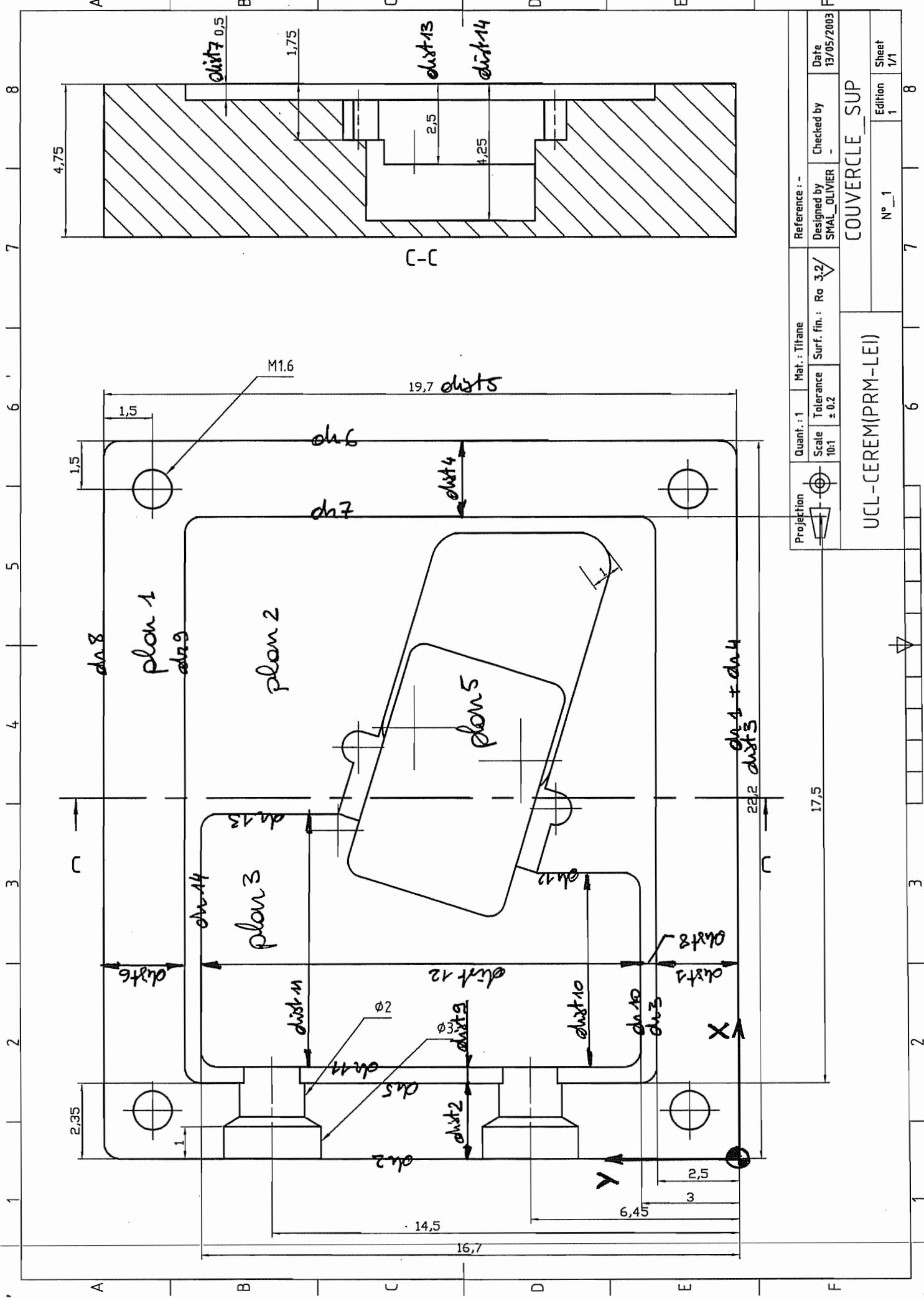
5

4

3

2

1



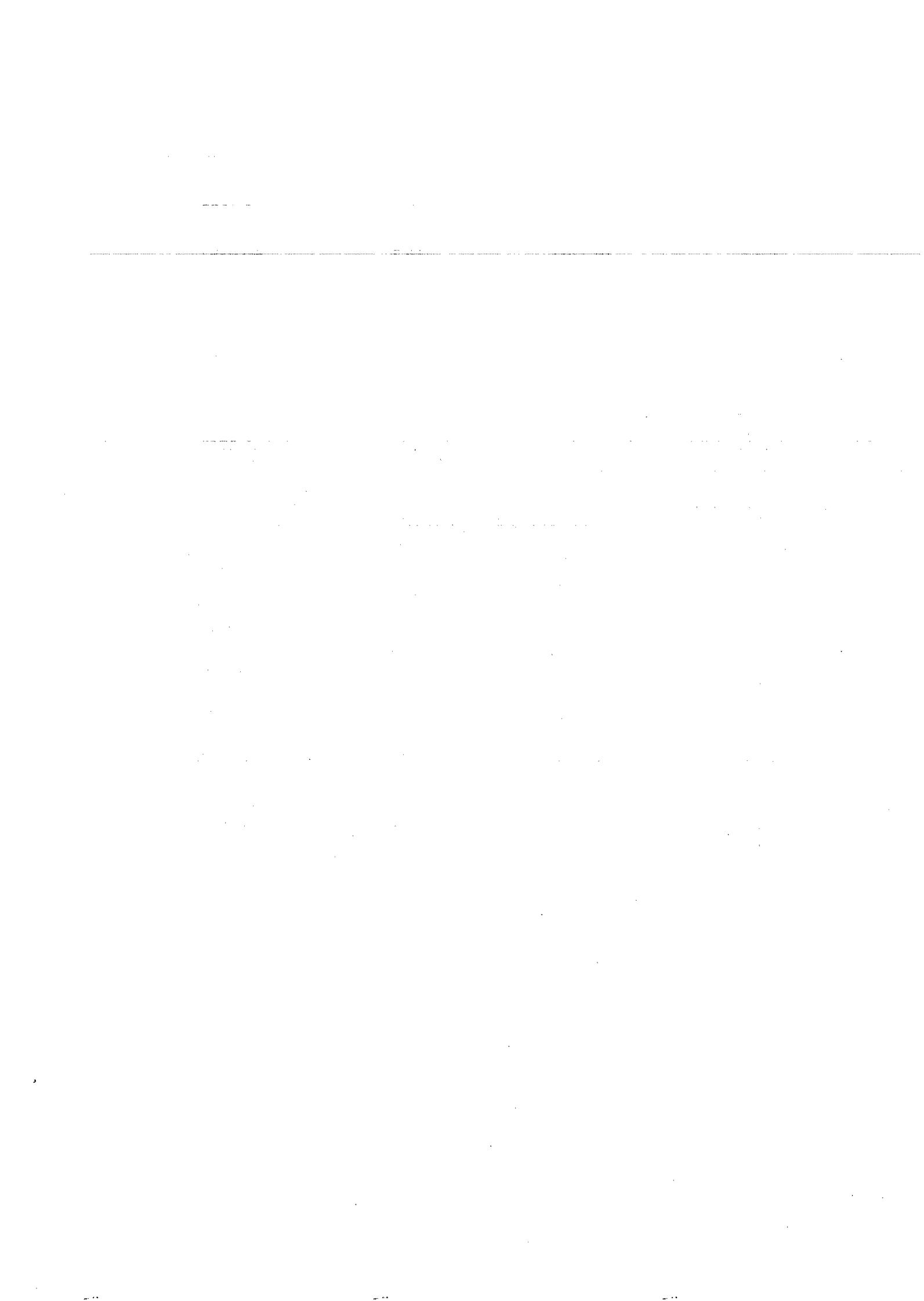


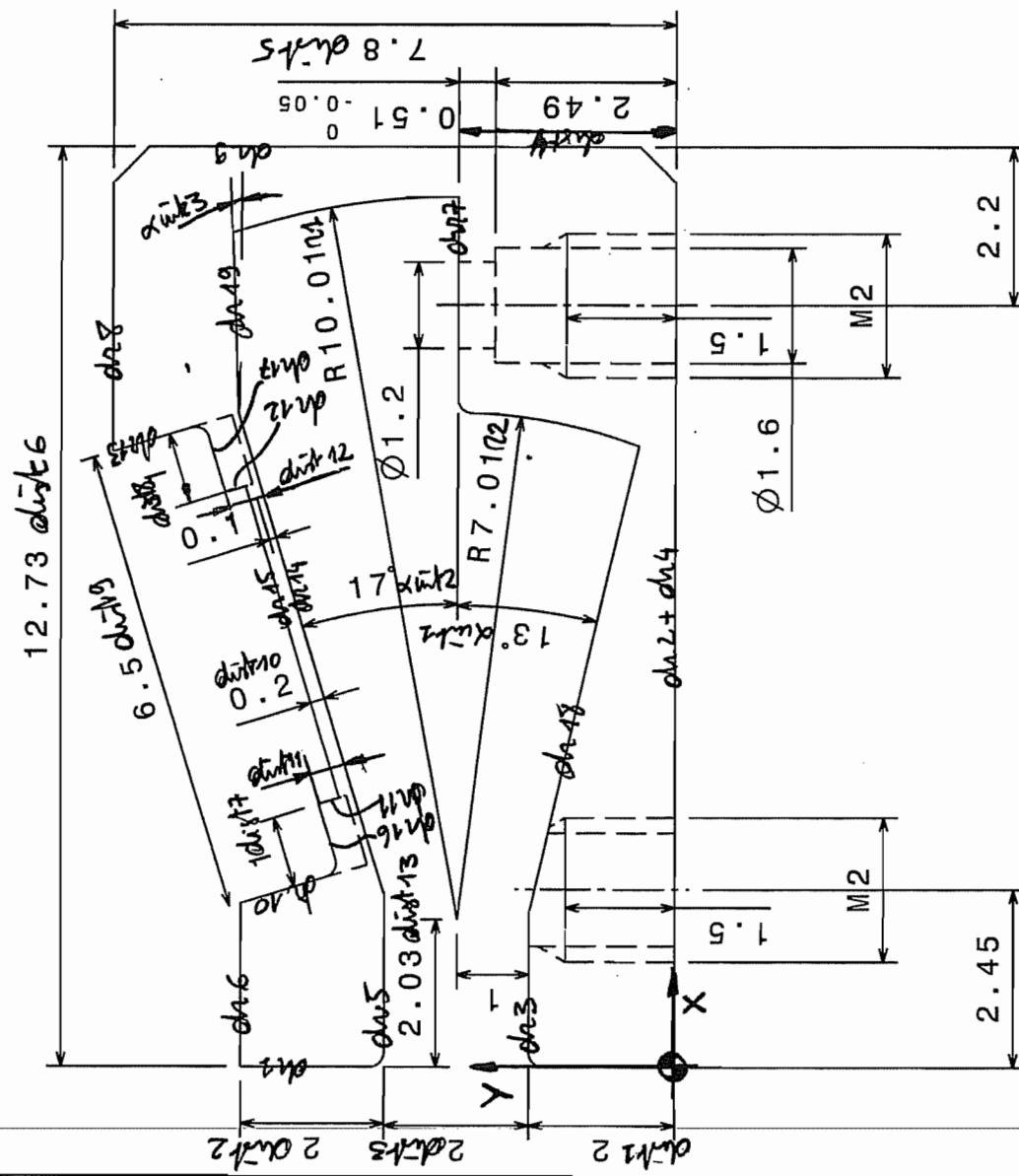
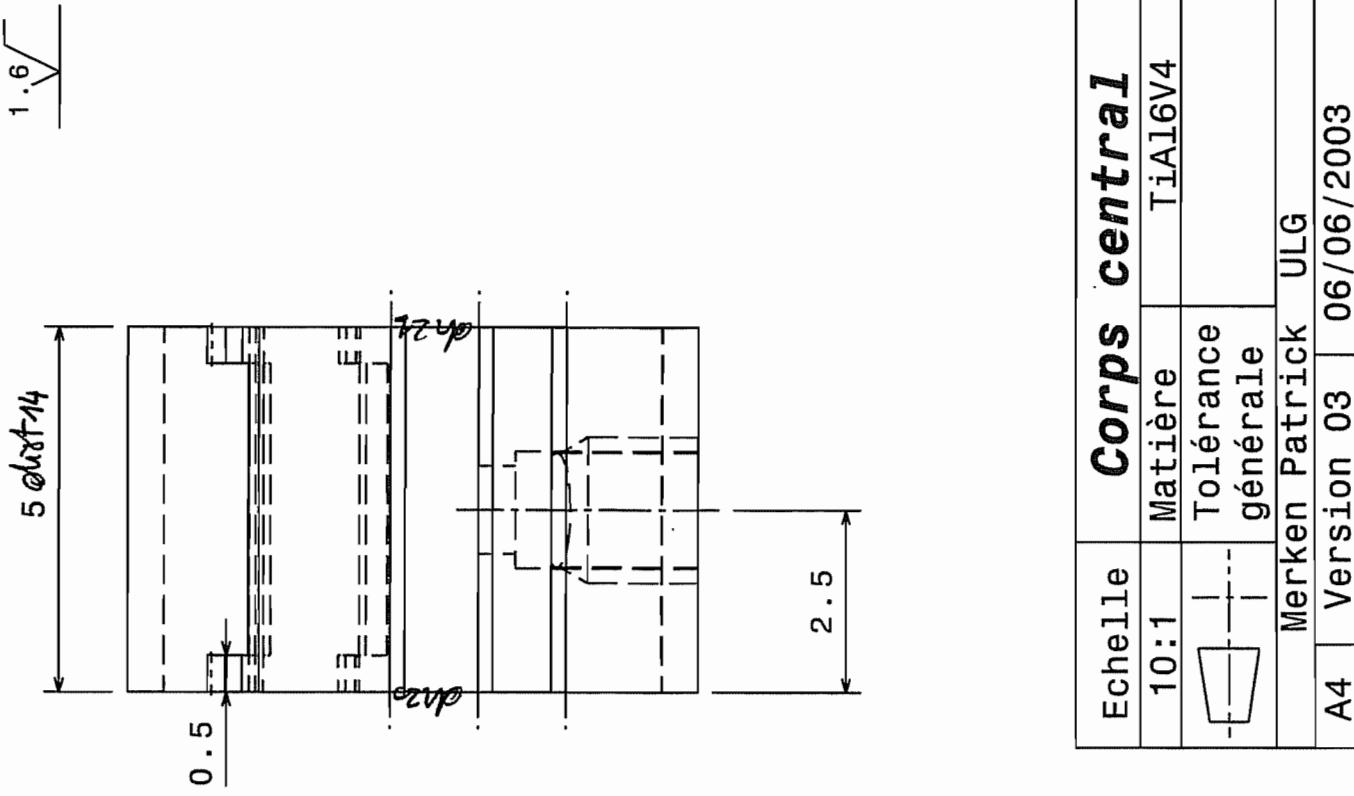
COUVERCLE INF

Elément	Mesure	Valeur théorique	Différence
dist 1	2.5290	2.5	+0.0290
dist 2	2.3941	2.35	+0.0441
dist 3	22.2373	22.2	+0.0373
dist 4	2.4392	2.35	+0.0892
dist 5	19.7392	19.7	+0.0392
dist 6	2.5957	2.5	+0.0957
dist 7	0.4015	0.5	-0.0985
dist 8	0.4781	0.5	-0.0219
dist 9	0.4814	0.5	-0.0186
dist 10	7.8589	7.8	+0.0589
dist 11	6.0184	6	+0.0184
dist 12	13.7368	13.7	+0.0368
dist 13	2.9345	3	-0.0655
dist 14	4.6740	4.75	-0.0760

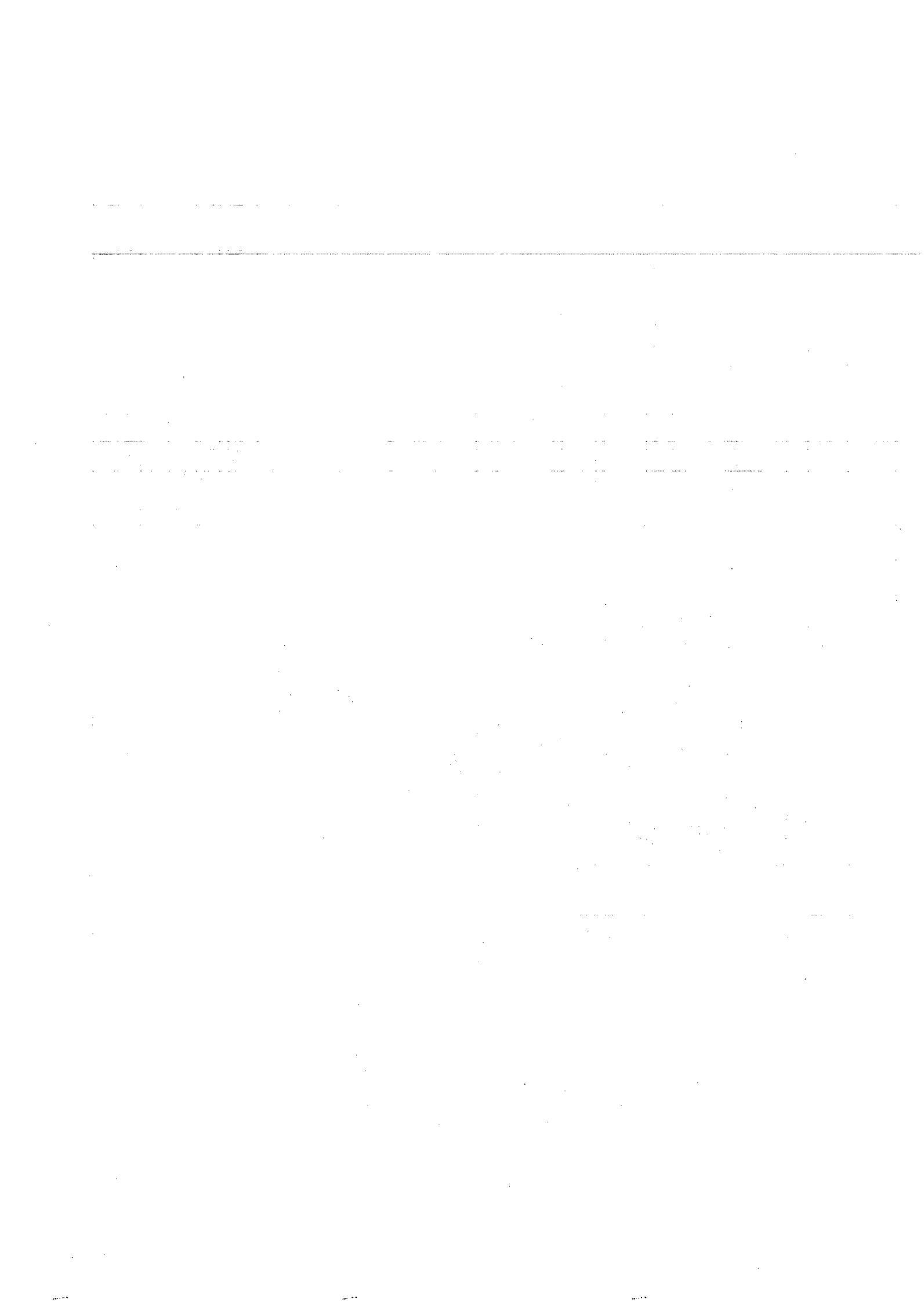
COUVERCLE SUP

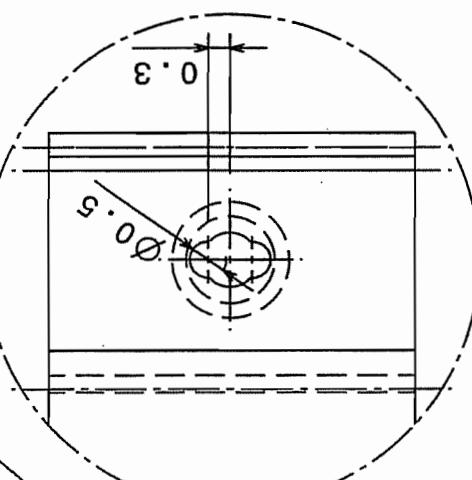
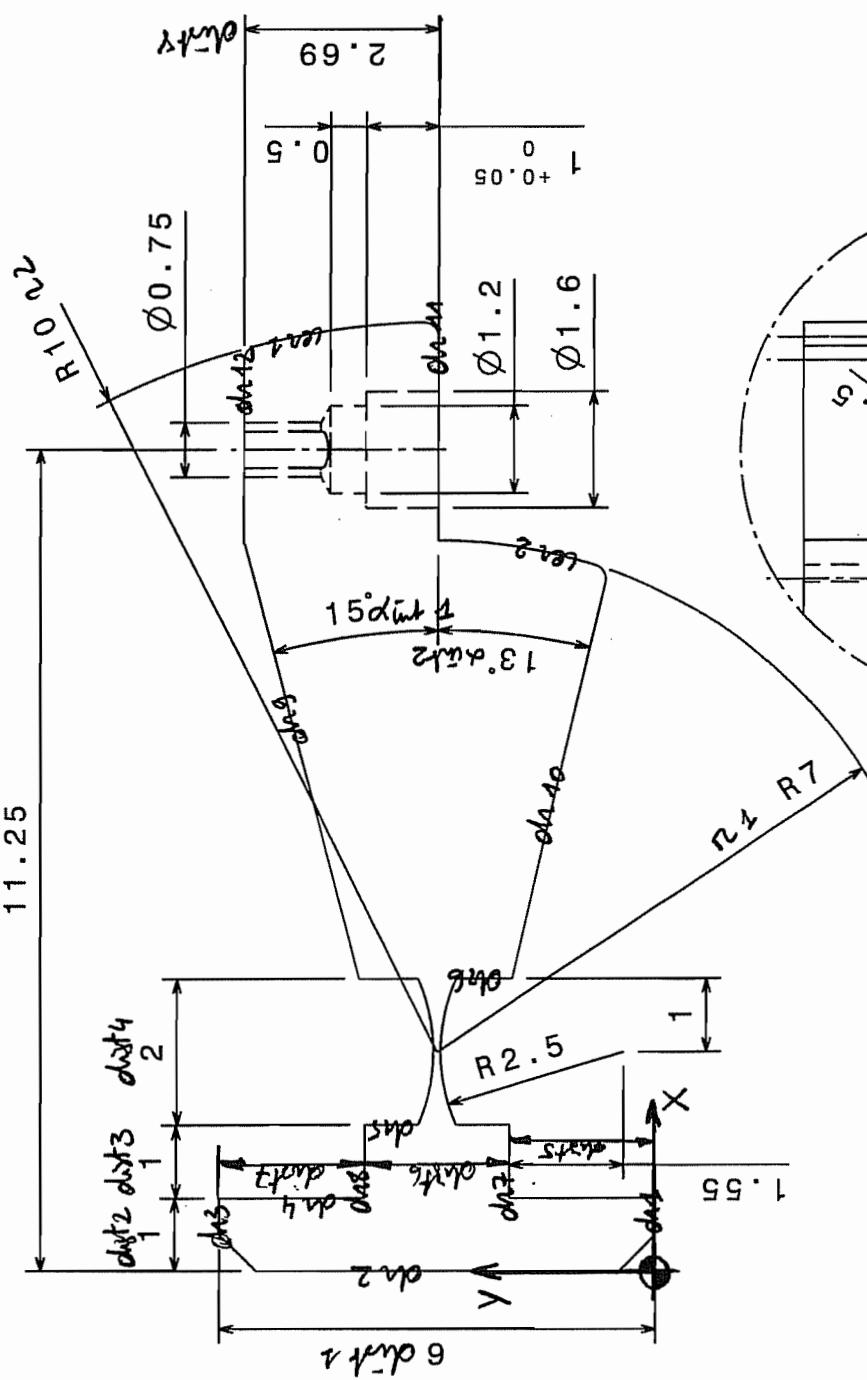
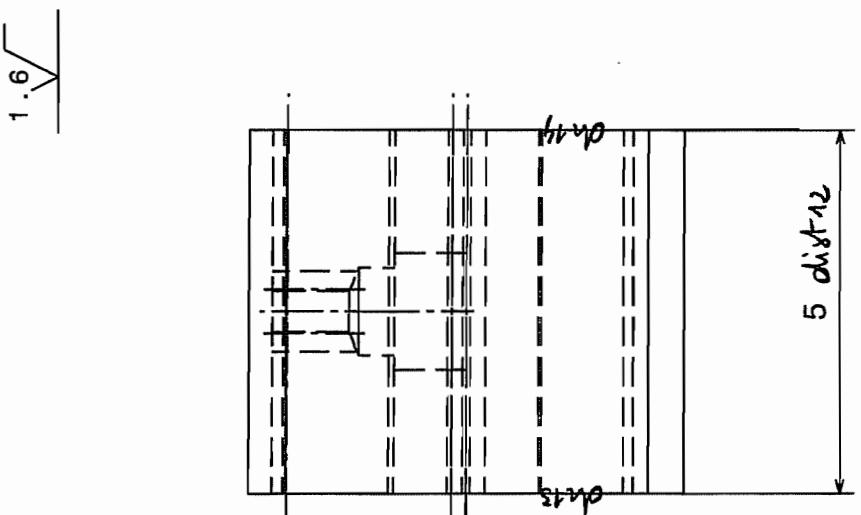
Elément	Mesure	Valeur théorique	Différence
dist 1	2.4553	2.5	-0.0447
dist 2	2.3265	2.35	-0.0735
dist 3	22.2297	22.2	+0.0297
dist 4	2.3309	2.35	-0.0191
dist 5	19.7350	19.7	+0.0350
dist 6	2.5030	2.5	+0.0030
dist 7	0.4740	0.5	-0.0260
dist 8	0.4966	0.5	-0.0034
dist 9	0.5206	0.5	+0.0206
dist 10	6.1197	6	+0.1197
dist 11	7.8658	7.8	+0.0658
dist 12	13.7990	13.7	+0.0990
dist 13	2.5141	2.5	+0.0141
dist 14	4.2212	4.25	-0.0288





Casser les arêtes 0, 1 à 45°

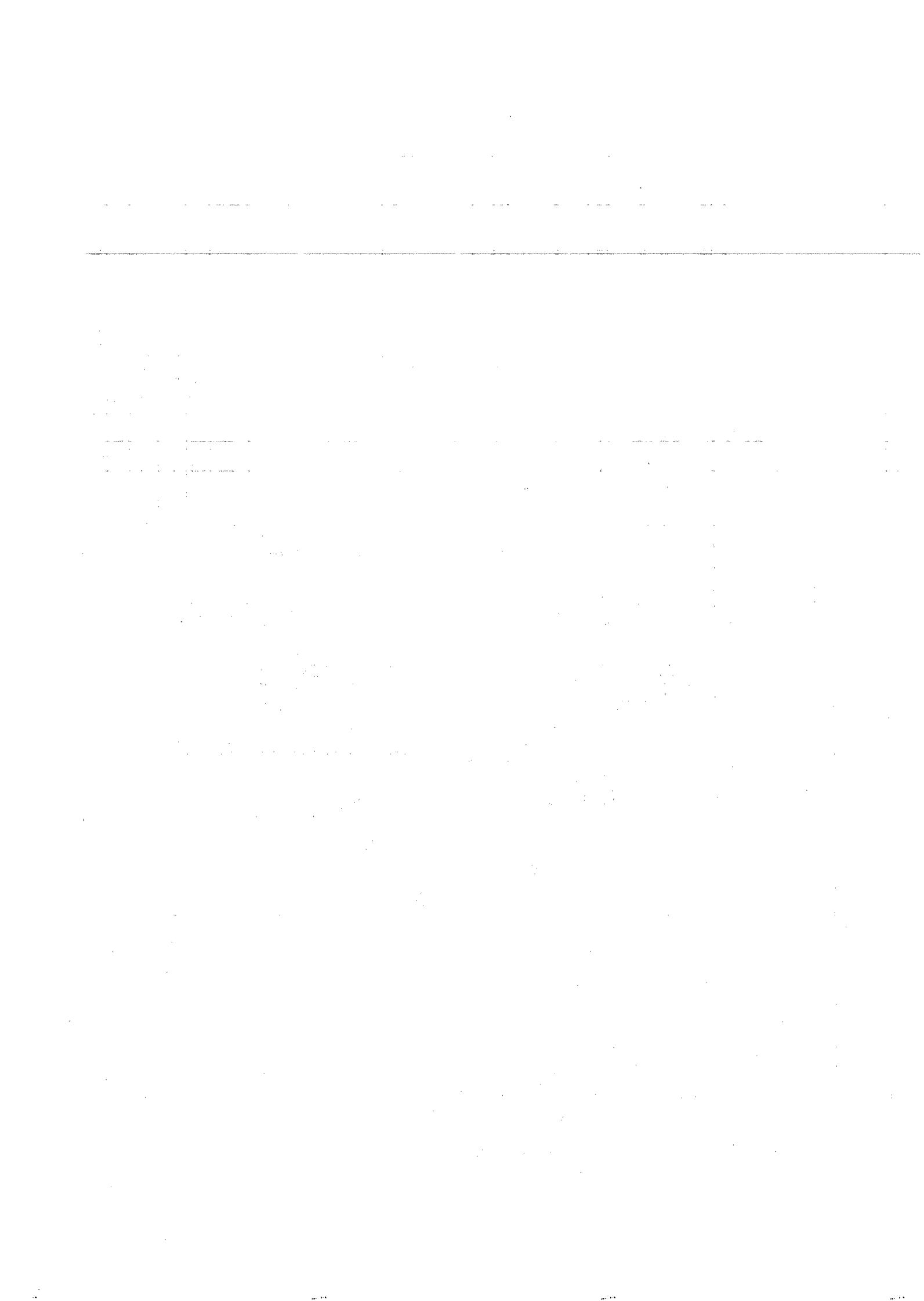




Echelle		Palette	
10 : 1	Matière	X20Cr13	
	Tolérance générale		
	Merken Patrick	ULG	
A4	Version 03	06/06/2003	

Le clapet doit coulisser parfaitement

Casser les arêtes 0,1 à 45°



ENVELOPPE

Elément	Mesure	Valeur théorique	Différence
dist 1	1.9862	2	-0.0138
dist 2	1.9673	2	-0.0327
dist 3	1.8851	2	-0.1149
dist 4	2.9464	3	-0.0536
dist 5	7.7422	7.8	-0.0578
dist 6	12.7070	12.73	-0.0270
dist 7	1.0205	1	+0.0205
dist 8	0.8052	1	-0.1948
dist 9	6.5389	6.5	+0.0389
dist 10	0.2021	0.2	+0.0021
dist 11	0.4103	0.4	+0.0103
dist 12	0.4758	0.4	+0.0758
dist 13	2.5926	2.03	+0.5626
dist 14	4.9477	5	-0.0523
αint 1	17.7503°	17°	+0.7503°
αint 2	13.2761°	13°	+0.2761°
αint 3	1.8910°	2°	-0.1090°
r 1	9.4421	10.01	-0.5679
r 2	6.5378	7.01	-0.4722

PALETTE

Elément	Mesure	Valeur théorique	Différence
dist 1	5.9617	6	-0.0383
dist 2	0.9525	1	-0.0475
dist 3	1.0048	1	+0.0048
dist 4	2.0488	2	+0.0488
dist 5	1.9844	2	-0.0156
dist 6	1.9722	2	-0.0278
dist 7	1.9938	2	-0.0062
dist 8	2.6587	2.69	-0.0313
dist 12	4.9847	5	-0.0153
αint 1	15.0395°	15°	+0.0395°
αint 2	12.8434°	13°	-0.1566°
r 1	10.1289	10	+0.1289
r 2	7.7761	7	+0.7761



7. Problématique médicale



7.1. Synthèse et vulgarisation des connaissances actuelles sur le diabète



Synthèse et vulgarisation des connaissances actuelles sur le diabète

V. Croquet

Qu'est ce que le diabète

Le terme diabète est employé lorsque l'organisme ne produit plus ou pas assez d'insuline ou bien lorsque les cellules de l'organisme ne réagissent plus suffisamment à l'insuline.

L'insuline est une hormone produite par le pancréas qui aide l'organisme à faire parvenir le glucose dans les cellules du corps et à maintenir le taux de glucose du sang à une valeur déterminée.

Une glycémie normale se situe aux alentours de 70 à 110 mg/dl avant un repas et est juste inférieure à 160 mg/dl après le repas.

Une quantité insuffisante d'insuline dans le corps provoque une augmentation du taux de glucose dans le sang et donc une hyperglycémie.

A l'inverse, une quantité trop élevée de d'insuline dans le corps entraîne une hypoglycémie.

Le schéma de régulation de l'organisme est le suivant :

L'organisme transforme le sucre en glucose, le glucose est amené aux différentes cellules de l'organisme par le sang ; l'insuline qui est produite par le pancréas (glande située juste derrière l'estomac) régit alors la pénétration du glucose dans les cellules.

Le diabète est donc une maladie qui perturbe le métabolisme au niveau de la transformation des sucres.

Le déglutissement de sucres sous forme facilement absorbable (sucre, confiture,...) permet une élévation rapide de la glycémie alors que celle de sucres sous forme complexe à résorption lente (pâtes, pain, riz, fruits,...) provoque une élévation moins rapide de la glycémie.

Deux types de diabètes

Le diabète est une maladie qui peut se manifester de deux manières différentes chez les individus.

D'une part les diabétiques de type 1 chez qui nous constatons une destruction des cellules produisant l'insuline.

Ce type de maladie concerne 10% des diabétiques et se caractérise par une manifestation soudaine.

D'autre part les diabétiques de type 2 chez qui la production d'insuline est simplement insuffisante.

Ce type de maladie concerne 20 % des diabétiques et se caractérise par une manifestation progressive.

Les symptômes de la maladie sont les suivants :

-pour le type 1 : besoin fréquent d'usiner, faim et soif intense, perte de poids, fatigue

Le diabète de type 1 se manifeste soudainement au cours de la vie d'une personne, généralement durant l'enfance.

-pour le type 2 : besoin fréquent d'usiner, faim et soif intense, fatigue, vision floue, bouche sèche et peaux sèche, picotement des mains et des pieds, infections guérissant difficilement, démangeaison au niveau des organes génitaux

Le diabète de type 2 apparaît essentiellement chez les sujets présentant une surcharge pondérale.

Ces derniers fournissent en effet une quantité d'insuline ne correspondant pas à leur poids, il faut alors tenter d'adapter la quantité et la composition des aliments (régime pauvre en hydrate de C) à la quantité d'insuline produite par le pancréas ou diminuer l'obésité.

Dans le cas où le sujet ne maigri (élimination des cellules adipeuses) pas assez, il sera alors nécessaire de donner des comprimés hypoglycémiants afin de stimuler le pancréas pour augmenter la quantité d'insuline produite.

Les biguamides permettent en particulier la régularisation de la glycémie en agissant au niveau intestinal et hépatique.

L'administration d'insuline sera employée en dernier recours si le résultat produit par les comprimés n'est pas suffisant.

Dans les deux cas, une hyperglycémie ($>250\text{mg/dl}$ à jeun) est généralement associée à un besoin fréquent d'uriner, une déshydratation et une soif intense, une perte de poids, une faim anormale une grande fatigue ainsi que des jambes douloureuses.

L'aggravement de cette hyperglycémie se traduit par des nausées, des maux de tête des douleurs abdominales, voire des vomissements.

Une Hypoglycémie est quand à elle associée à des signes annonciateurs tels que des tremblements, des maux de tête, des étourdissements pouvant aller jusqu'à une perte de conscience voire le coma.

La partie la plus affectée par un déficit en sucre est en effet le cerveau.

L'injection de glucagon (hormone pancréatique hypoglycémiant) par voie intramusculaire ou sous cutanée permet de libérer toute la réserve de sucre stockée dans le foie.

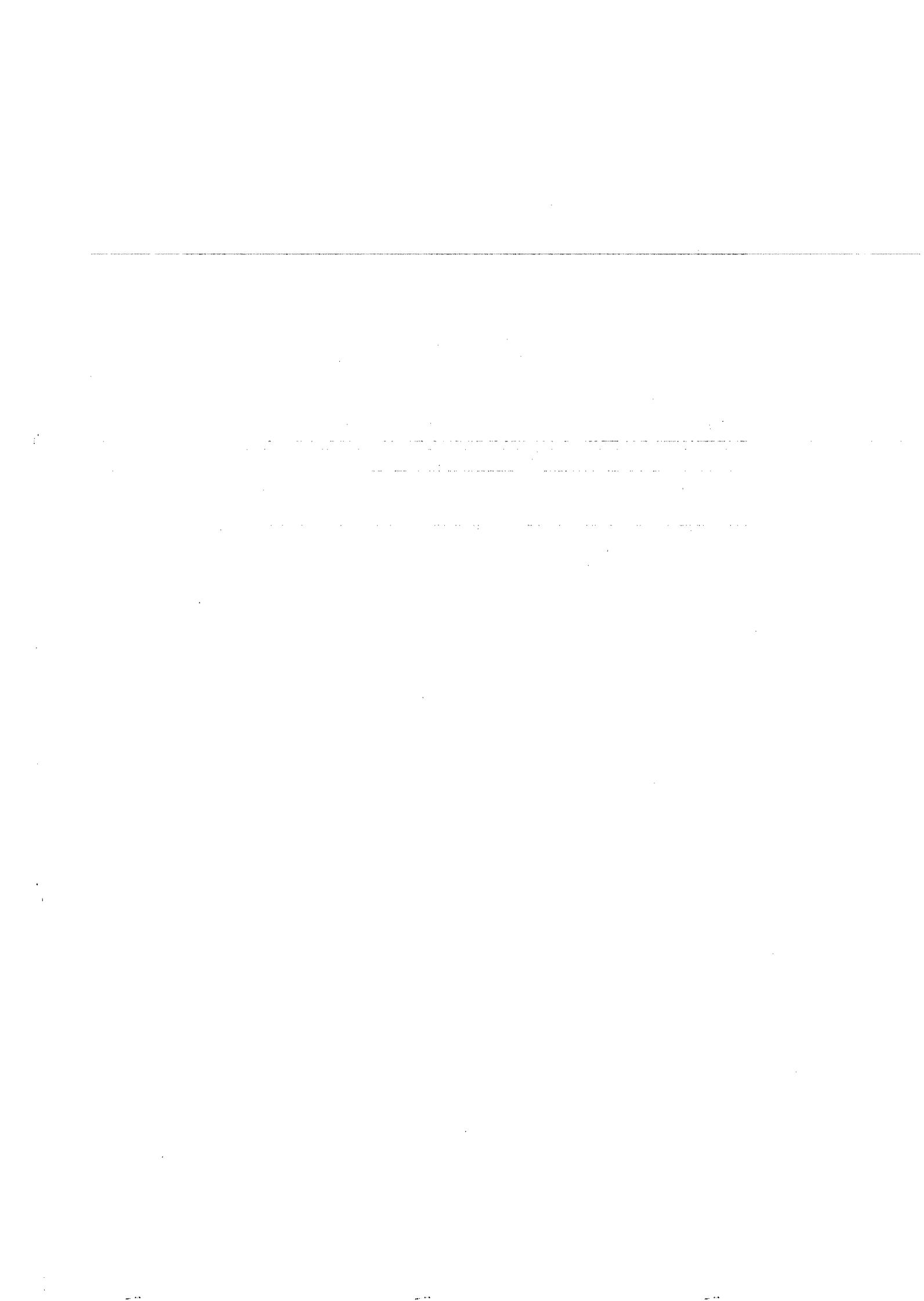
Les causes de l'hypoglycémie sont les suivantes: excès d'insuline, site d'injection mal approprié (injection dans une lipodystrophie par exemple), erreur dans le type d'insuline administrée...

7.2. Liste des contacts avec le corps médical

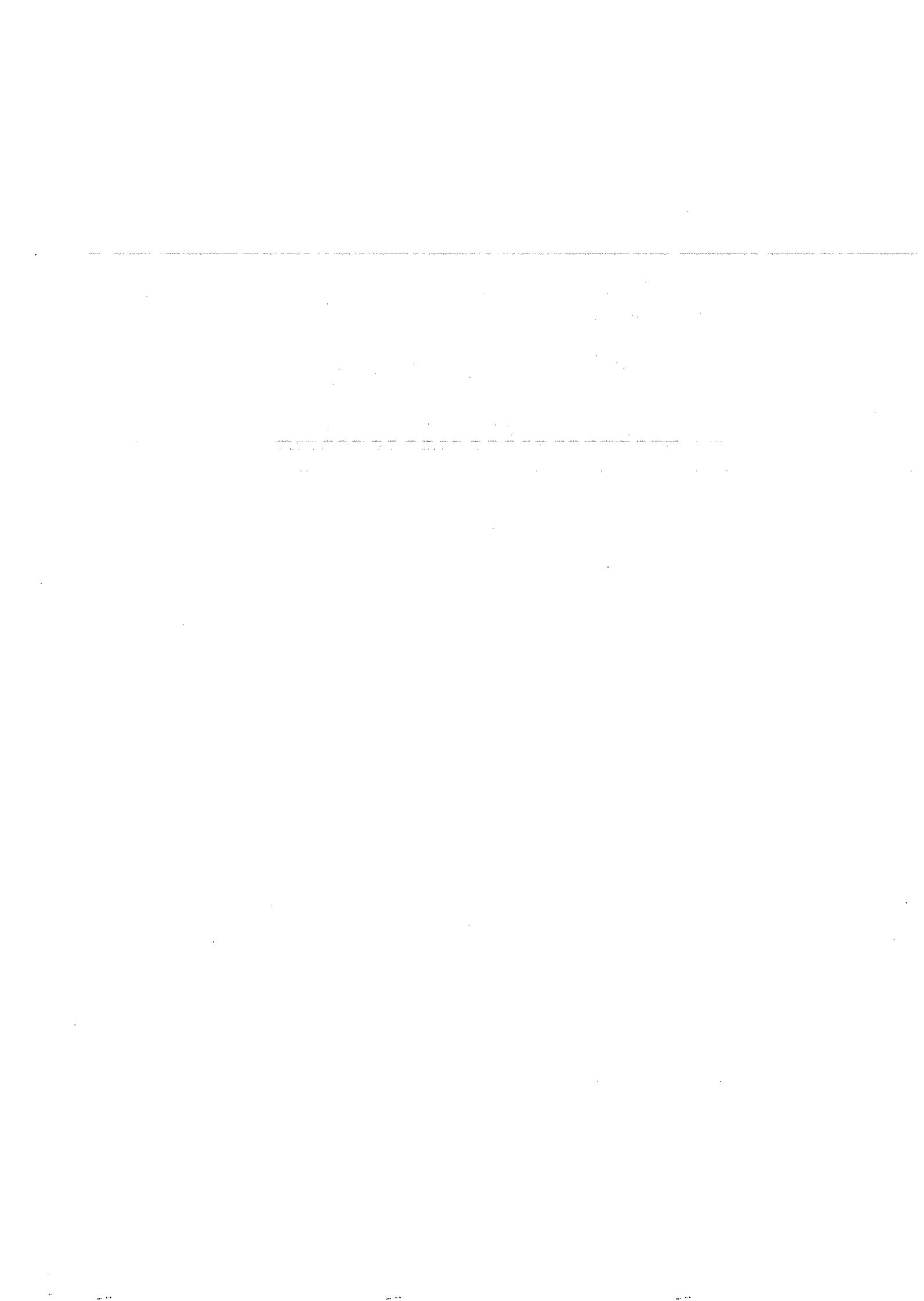


Liste des contact avec le corps médical

- Véronique Lassmann-Vague (draccah@ap-hm.fr), unité de recherche clinique et biologique en diabétologie UFR de médecine à Marseille
- Michel Hermans (02/7645475-02/7641040), service de diabétologie de l'UCL
- Dr. Peter Vanorolleghem (Peter.Vanorolleghem@rug.ac.be), diabétologue à Gent
- Eddy Hens (Eddy.hens@aventis.com - 02/6458226), Aventis Pharma Pleinlaan 9
- Francis Vanden Broecke (francis.vandenbroecke@aventis.com - 02/6458213), Product Manager Aventis Pharma 9 Bld de la plaine 1040 Bruxelles
- Professeur A.Scheen (043/667238 – 043/418511), Implantation de pompes à insuline à Liège
- Dr. Deckers (02/7378430), diabétologue à la clinique ST Michel
- Dr.Chantal Mathieu (chantal.mathieu@med.kuleuven.ac.be - 016/346023), diabétologue à la KUL pratiquant l'implantation de pompe à insuline
- Dr.Lauvaux (), diabétologue à l'hôpital Edith Cavel
- Dr. Gianello (02/7645586 - gianello@chex.ucl.ac.be) professeur de chirurgie expérimentale à l'UCL
- Dr. Lavand'homme (02/7641821 – lavandhomme@anes.ucl.ac.be) , professeur anesthésiologue à l'UCL



7.3. Synthèse actuelle sur les matériaux biocompatibles



Université Libre de Bruxelles

**Synthèse actuelle sur les
matériaux biocompatibles**

**Croquet Vincent
Sercice de mécanique analytique et CFAO
ALAIN DELCHAMBRE**

Table des matières

0. Table des matières

1. Qu'entend-on par matériaux biocompatibles ?

1.1 Définition

1.2 Les matériaux biocompatibles et leur environnement

1.3 Diverses applications

2. Les différentes classes de matériaux dits biocompatibles

2.1 Les métaux et alliages métalliques

2.1.1 Caractéristiques générales

2.1.2 Différents types

2.1.2.1 Les aciers

2.1.2.1.1 Caractéristiques générales

2.1.2.1.2 Différents types

1/ Les aciers inoxydables austénétiques

2/ Les aciers inoxydables martensitiques

2.1.2.1.3 Remarques

2.1.2.1.4 Applications

2.1.2.2 Les alliages à base de Titane

2.1.2.2.1 Caractéristiques générales

2.1.2.2.2 Différents types

1/ Le Titane pur

2/ Les alliages de type $TiAl_6V_4$

3/ Les autres alliages

2.1.2.2.3 Remarques

2.1.2.2.4 Applications

2.1.2.3 Les alliages à base de Cobalt

2.1.2.3.1 Caractéristiques générales

2.1.2.3.2 Différents types

1/ Les alliages de type $CoCrMo$

2/ Les alliages de type $CoCrWNi$

3/ Les alliages de type $CoNiCrMo$

2.1.2.3.3 Remarques

2.1.2.3.4 Applications

2.1.2.4 Les revêtements métalliques poreux pour matériaux à base de Cobalt et de Titane

2.1.2.4.1 Caractéristiques générales

2.1.2.4.2 Différents types

2.1.2.4.3 Remarques

2.1.2.4.4 Applications

2.1.2.5 Les alliages à base de Nickel

2.1.2.5.1 Caractéristiques générales

2.1.2.5.2 Différents types

2.1.2.5.3 Remarques

2.1.2.5.4 Applications

2.1.2.6 Les alliages dentaires à base de matériaux nobles

2.1.2.6.1 Caractéristiques générales

2.1.2.6.2 Différents types

1/ Les alliages à teneur élevée en or ($Au > 75\%$)

2/ Les alliages à faible teneur en or ($Au < 75\%$)

3/ Les alliages à base de Pd

2.1.2.6.3 Remarques

2.1.2.6.4 Applications

2.1.2.7 Les autres métaux purs

- 2.1.2.7.1 Caractéristiques générales
 - 2.1.2.7.2 Différents types
 - 1/ Le tantale
 - 2/ Le platine et l'iridium
 - 2.1.2.7.3 Remarques
 - 2.1.2.7.4 Applications
 - 2.1.3 Remarques
 - 2.1.4 Applications
- 2.1.3 Remarques
- 2.1.4 Applications

2.2 Les céramiques

- 2.2.1 Caractéristiques générales
- 2.2.2 Différents types
 - 2.2.2.1 *Les céramiques d'oxydes bioinertes*
 - 2.2.2.1.1 Caractéristiques générales
 - 2.2.2.1.2 Différents types
 - 1/ Les céramiques à base d'oxyde d'aluminium
 - 2/ Les céramiques de zirconium
 - 2.2.2.1.3 Remarques
 - 2.2.2.1.4 Applications
 - 2.2.2.2 *Les céramiques en phosphate de calcium bioactif*
 - 2.2.2.2.1 Caractéristiques générales
 - 2.2.2.2.2 Différents types
 - 1/ Le tricalciumphosphate (TCP)
 - 2/ L'hydroxyapatite (HAP)
 - 2.2.2.2.3 Remarques
 - 2.2.2.2.4 Applications
 - 2.2.2.3 *Les verres et vitrocéramiques*
 - 2.2.2.3.1 Caractéristiques générales
 - 2.2.2.3.2 Différents types
 - 1/ Les verres
 - 2/ Les vitrocéramiques
 - 2.2.2.3.3 Remarques
 - 2.2.2.3.4 Applications
- 2.2.3 Remarques
- 2.2.4 Applications

2.3 Les polymères

- 2.3.1 Caractéristiques générales
- 2.3.2 Différents types
 - 2.3.2.1 *Le polyéthylène (PE)*
 - 2.3.2.1.1 Caractéristiques générales
 - 2.3.2.1.2 Différents types
 - 1/ Le HDPE (high density PE)
 - 2/ Le LDPE (low density PE)
 - 3/ Le UHMWPE (ultra high molecularweight PE)
 - 2.3.2.1.3 Remarques
 - 2.3.2.1.4 Applications
 - 2.3.2.2 *Le polypropylène (PP)*
 - 2.3.2.2.1 Caractéristiques générales
 - 2.3.2.2.2 Différents types
 - 2.3.2.2.3 Remarques
 - 2.3.2.2.4 Applications

- 2.3.2.3 *Le polytétrafluoroéthylène (PTFE)***
 - 2.3.2.3.1 Caractéristiques générales
 - 2.3.2.3.2 Différents types
 - 2.3.2.3.3 Remarques
 - 2.3.2.3.4 Applications
- 2.3.2.4 *Le polyméthacrylate de méthyle (PMMA)***
 - 2.3.2.4.1 Caractéristiques générales
 - 2.3.2.4.2 Différents types
 - 2.3.2.4.3 Remarques
 - 2.3.2.4.4 Applications
- 2.3.2.5 *Les polyamides (PA)***
 - 2.3.2.5.1 Caractéristiques générales
 - 2.3.2.5.2 Différents types
 - 2.3.2.5.3 Remarques
 - 2.3.2.5.4 Applications
- 2.3.2.6 *Les polychlorures de vinyle (PVC)***
 - 2.3.2.6.1 Caractéristiques générales
 - 2.3.2.6.2 Différents types
 - 2.3.2.6.3 Remarques
 - 2.3.2.6.4 Applications
- 2.3.2.7 *Le polyéthylènetéréphthalate (PETP)***
 - 2.3.2.7.1 Caractéristiques générales
 - 2.3.2.7.2 Différents types
 - 2.3.2.7.3 Remarques
 - 2.3.2.7.4 Applications
- 2.3.2.8 *Les polysulfones (PSU)***
 - 2.3.2.8.1 Caractéristiques générales
 - 2.3.2.8.2 Différents types
 - 2.3.2.8.3 Remarques
 - 2.3.2.8.4 Applications
- 2.3.2.9 *Les polysiloxanes (Silicones)***
 - 2.3.2.9.1 Caractéristiques générales
 - 2.3.2.9.2 Différents types
 - 2.3.2.9.3 Remarques
 - 2.3.2.9.4 Applications
- 2.3.2.10 *Les polyuréthanes (PUR)***
 - 2.3.2.10.1 Caractéristiques générales
 - 2.3.2.10.2 Différents types
 - 2.3.2.10.3 Remarques
 - 2.3.2.10.4 Applications
- 2.3.2.11 *Les hydrogels***
 - 2.3.2.11.1 Caractéristiques générales
 - 2.3.2.11.2 Différents types
 - 2.3.2.11.3 Remarques
 - 2.3.2.11.4 Applications
- 2.3.2.12 *Les polymères biodégradables***
 - 2.3.2.12.1 Caractéristiques générales
 - 2.3.2.12.2 Différents types
 - 2.3.2.12.3 Remarques
- 2.3.3 Remarques**
- 2.3.4 Applications**

3. Bibliographie

1. Qu'entend on par matériaux biocompatibles ?

1.1 Définition

La conférence de la Société Européenne des biomatériaux qui s'est déroulée à Chester en 1986 définissait un matériau biocompatible par l'appellation 'matériau non vivant utilisé dans un dispositif médical destiné à interagir avec les systèmes biologiques'.

Cette définition prend en compte la notion de tolérance (des tissus vis-à-vis du contact avec le corps étranger) et la notion de biostabilité (stabilité chimique et physique des matériaux présents dans l'organisme).

La notion de biocompatibilité a cependant fortement évolué au cours de la dernière décennie passant respectivement par les termes biocompatibilité négative, biocompatibilité élargie et finalement par le terme très actuel de bioactivité.

La biocompatibilité négative se caractérise essentiellement par le caractère non toxique et inertiel du matériau et est décrite par la liste de tous les aspects que le matériau ne doit pas posséder (non dégradable, non irritant, non cancérogène, non toxique, non allergénique,...).

La biocompatibilité élargie se caractérise quant à elle par la capacité que possède le matériau à réaliser une certaine application avec une réponse étrangère appropriée.

Cette nouvelle notion met en évidence le fait qu'une reconnaissance active du matériau par le corps est plus appropriée qu'une non reconnaissance.

Enfin, la bioactivité caractérise la capacité que possède le matériau à faire réagir le tissu vivant, mettant ainsi totalement de côté la notion d'inertie préalablement citée.

Il faut cependant noter qu'il y a lieu de rester extrêmement prudent lors de l'utilisation de ces différents termes : la biocompatibilité n'est pas une propriété intrinsèque du matériau comme nous avons souvent tendance à le croire.

Un matériau sera plutôt dit biocompatible en fonction des conditions dans lesquelles il sera employé : la forme, la qualité de la surface, sa présentation (pièces moulées, extrudées, tissus, films, mousses, fils tressés, cables,...), l'adjonction éventuelle d'additifs, le procédé de stérilisation,...

Aucun matériau n'est donc univoquement qualifiable de biocompatible.

1.2 Les matériaux biocompatibles et leur environnement

Les matériaux dits biocompatibles ont pour rôle essentiel la réalisation de diverses fonctions dans un environnement qualifié d'hostile et agressif.

La principale cause des problèmes les plus souvent rencontrés résulte de la combinaison des facteurs environnement hostile - propriétés mécaniques : corrosion liée à la fatigue, fissuration liée aux contraintes,...

Une énorme importance sera accordée à la corrosion et à la dégradation des produits car la présence de la moindre petite particule rejetée sera synonyme, outre de la perte des propriétés mécaniques, d'irritation et de destruction des tissus présents dans l'organisme.

On peut dégager trois processus généraux résultant de l'interaction entre les matériaux implantés et les tissus de l'organisme:

1/la réaction interfaciale initiale : les protéines ou glycoprotéines contenues dans le liquide physiologique dans lequel le corps est plongé ont tendance à se placer sur les faces du matériau implanté et ce par adsorption.

2/la stabilité des matériaux et tissus : l'environnement physiologique étant extrêmement hostile et agressif, les métaux et alliages métalliques auront tendance à se corroder et à s'oxyder, les céramiques à se dissoudre, les polymères à se dépolymériser,...

Il y aura donc un rejet de particules étrangères au corps humain entraînant d'une part la perte de fonctionnalité de la pièce implantée et d'autre part une réaction du milieu environnant entraînant l'irritation voire même la destruction des tissus.

3/réaction locale proprement dite : le processus d'inflammation est généralement relativement semblable à celui d'un traumatisme classique dans lequel l'implant est considéré comme une source d'origine chimique et mécanique stimulant l'activité cellulaire et humorale.

Ce processus d'inflammation consiste en la contention et à l'élimination de l'agent pathogène ainsi qu'en l'élimination des tissus endommagés ou morts.

Les deux principaux acteurs de cette défense immunitaire sont les leucocytes (neutrophiles et monocytes) et les anticorps.

Les leucocytes qualifiés de phagociteurs migrent, englobent et détruisent les tissus endommagés.

Ce processus de phagocytose est initié par l'attachement de la particule rejetée sur la surface d'une cellule; ceci est possible grâce à l'immunoglobuline des anticorps du sérum pour laquelle la surface de la cellule possède des récepteurs.

La cellule englobe alors l'objet d'une membrane et des puissants enzymes sont libérés par les granules cytoplasmiques de cette cellule afin de désintégrer la particule.

Selon l'amplitude de l'inflammation, différents scénarios sont susceptibles de se produire :

1/une inflammation restreinte pourra être résorbée rapidement sans complications.

2/une inflammation plus prononcée présentera un état chronique caractérisé par la présence de fibroblastes et une accumulation de cellules blanches (macrophages, plasma et lymphocytes).

3/une inflammation permanente ne pouvant être éradiquée que par le retrait de l'implant lui-même sera qualifiée de granulation du tissu.

L'implant devient alors une barrière physique à la formation et au grandissement du collagène et des vaisseaux sanguins.

Le collagène finit alors par encapsuler l'implant, ce processus est appelé communément 'encapsulation fibreuse des implants'.

1.3 Diverses applications

Les matériaux dits biocompatibles sont utilisés dans des applications nombreuses et variées.

Citons comme exemple : l'ophtalmologie, l'odontologie, la chirurgie orthopédique, la chirurgie cardiovasculaire, l'urologie, l'endocrinologie, la chirurgie esthétique,...

2.Les différentes classes de matériaux dits biocompatibles

2.1 Les métaux et alliages métalliques

2.1.1 Caractéristiques générales

2.1.2 Différents types de métaux et d'alliages métalliques

2.1.2.1 Les aciers

2.1.2.1.1 Caractéristiques générales

2.1.2.1.2 Différents types

1/ Les aciers inoxydables austénétiques

1.1 Caractéristiques générales

Les aciers inoxydables austénétiques profitent d'une bonne tenue à la corrosion. Ils sont de plus amagnétiques (absence totale de ferrite).

1.2 Différents types

1.2.1 Les aciers de type 316L

-*Formules* : XCrNiMo

-*Caractéristiques* : -les aciers du type 316L bénéficient d'une bonne tenue à la corrosion et à la fatigue.
-ils profitent également d'une tenacité élevée et d'une grande dureté.

-*Remarques* : ce type d'acier se trouve sous différentes formes (pièces matricées, barres laminées,...) et sous différents états métallurgiques (hypertrempé, écroui à froid,...).

-*Applications particulières* : -ces matériaux sont essentiellement destinés aux tiges et têtes d'articulation.
-leur combinaison dureté-résistance à la corrosion n'est pas adaptée à la réalisation d'instruments chirurgicaux.

1.2.2 Les aciers à l'azote

-*Formules* : $X_2CrNiMnMoVN$

-*Caractéristiques* : -les aciers à l'azote bénéficient d'une meilleure tenue à la corrosion que le 316L.
-ils profitent de plus de meilleures caractéristiques mécaniques : statiques (Rm, Rp) et dynamiques (tenue à la fatigue) que le 316L.

-*Remarques*

-*Applications particulières* : ce matériau a spécialement été mis au point aux USA pour des applications d'ostéosynthèse

1.3 Remarques

Les nuances implantables sont définies par des normes nationales (NF, BS, DIN, ASTM,...) ou internationales (ISO, EN,...)

Le principal procédé d'usinage est le forgeage/matricage.

Ces matériaux sont souvent utilisés à l'état écroui à froid, ce qui permet d'améliorer la tenue à la fatigue, la résistance à la rupture ainsi que la limite élastique.

1.4 Applications

Ces aciers sont destinés principalement à la réalisation d'implants permanents à géométrie complexe (prothèse de hanche, de genoux, d'épaules) et d'implants temporaires souvent destinés à l'ostéosynthèse (clous, vis, plaque, tige intramédullaire).

2/ Les aciers inoxydables martensitiques

2.1 Caractéristiques générales

Les aciers inoxydables martensitiques profitent d'une résistance mécanique élevée.
Ils montrent de plus une bonne tenue à l'abrasion ainsi qu'une bonne qualité de coupe.

2.2 Différents types

2.2.1 Les aciers chromés

-*Formules* : $X_{30}Cr_{13}$, $X_{20}Cr_{13}$, X_7Cr_{14}

-*Caractéristiques* : les aciers chromés montrent une dureté et une résistance élevées.

-*Remarques* : - ces matériaux sont intéressants en raison de leur faible coût et de leur facilité d'emploi.

- il existe actuellement un nombre croissant de cas où la tenue à la corrosion devient insuffisante lors d'opérations de nettoyage, il convient alors de recourir à des aciers plus riches en chrome et en molybdène.

-*Applications particulières* : les aciers chromés sont destinés principalement à la réalisation d'instruments chirurgicaux.

2.2.2 Les aciers renforcés

-*Formules* : $X_5CrNiCuNb$, $X_{17}CrNi$

-*Caractéristiques* : -ce sont des aciers plus riches en chrome bénéficiant d'un renforcement à la corrosion.

-le premier est un acier à durcissement structural; un simple traitement thermique entre 160 et 620° suffira donc à atteindre le durcissement souhaité sans grand risque de déformation de la pièce.

-le second est un martensitique classique que l'on durci par trempe et revenu ; il n'y aura dès lors pas de risque de déformation de la pièce.

-*Remarques*

-*Applications particulières*

2.2.3 Les aciers à nuance plus dure

-*Formules* : $X_5CrNiCuNb$, $X_{40}CrMoVN$, $X_{105}CrMo$

-*Caractéristiques* : -le premier acier possède une très bonne tenacité qui s'améliore dès que l'on diminue un petit peu la résistance visée; au vu de ses bonnes performances, ce matériau est surtout utilisé dans des pièces de formes complexes sollicitées en traction et en flexion.

-le second présente une très bonne dureté et une remarquable tenue à la corrosion.

-le dernier enfin présente une structure fine et homogène qui procure, à la dureté maximale (58HRC), une certaine plasticité totalement absente des nuances traditionnelles.

-*Remarques*

-*Applications particulières*

2.2.4 Les aciers d'automates

-*Formules* : $X_{12}CrMoS_{17}$

-*Caractéristiques*

-*Remarques*

-*Applications particulières* : la combinaison dureté élevée - résistance à la corrosion adéquate le rend très intéressant pour la fabrication d'instruments chirurgicaux.

2.3 Remarques

Les normes définies pour les aciers inoxydables martensitiques sont beaucoup plus floues que celles définies pour les aciers inoxydables austénétiques.

Il en résulte un nombre fort élevé de nuances différentes pour un même type de matériau.

2.4 Applications

Ces matériaux sont essentiellement destinés à la fabrication d'instruments chirurgicaux.

2.1.2.1.3 Remarques

2.1.2.1.4 Applications

2.1.2.2 Les alliages à base de Titane

2.1.2.2.1 Caractéristiques générales

Le titane est un métal de grande dureté.

Il possède un module d'élasticité inférieur à celui de l'acier.

Ce faible module d'élasticité lié à une limite à la fatigue élevée diminue le risque d'apparition de surtensions à l'interface implant/os.

Il profite d'une bonne résistance à la corrosion.

La biocompatibilité peut être caractérisée de très bonne (l'os adhère spontanément au Titane).

2.1.2.2.2 Différents types

1/ le Titane pur

1.1 Formule : Ti

1.2 Caractéristiques : -le titane possède une structure hexagonale (?) à température ambiante et une structure cubique (?) au-delà de 882°C.

L'adjonction d'aluminium, de zinc, d'oxygène favorise la phase ? alors que l'adjonction de vanadium, de chrome et de fer favorise la phase ? .

-les pièces sont relativement difficiles à travailler et à déformer à froid en raison de leur dureté importante, il est donc préférable de les travailler à chaud.

1.3 Remarques

1.4 Applications

2/ les alliages de type $TiAl_6V_4$

2.1 Formule : $TiAl_6V_4$

2.2 Caractéristiques : cet alliage possède les deux phases ? et ? à température ambiante.

2.3 Remarques : la couche d'oxydation de l'alliage est beaucoup plus épaisse que celle du Ti pur ; cet alliage est cependant plus sensible à l'endommagement de la couche de passivation.

2.4 Applications

3/les autres alliages

3.1 Formule : $TiAl_6Nb_7$, $TiAl_5Fe_{2.5}$

3.2 Caractéristiques

3.3 Remarques

3.4 Applications

2.1.2.2.3 Remarques

La tendance actuelle pousse au remplacement progressif du $TiAl_6V_4$ par le $TiAl_6Nb_7$, et ce, en raison des éventuels effets toxiques du Vanadium.

Les pièces sont relativement difficiles à travailler et à déformer à froid en raison de leur dureté importante, il sera donc préférable de les travailler à chaud.

Il faudra de plus faire attention à la réactivité avec l'oxygène, le carbone et l'azote lors de l'usinage.

2.1.2.2.4 Applications

Les alliages à base de Titane sont surtout utilisés pour la réalisation de tiges d'endoprothèses, la chirurgie de la colonne vertébrale ainsi que pour l'élaboration de prothèses dentaires.

2.1.2.3 Les alliages à base de Cobalt

2.1.2.3.1 Caractéristiques générales

Ces matériaux bénéficient généralement d'une bonne résistance à la corrosion lorsqu'ils bénéficient d'une teneur en carbone de l'ordre de 25 à 30% (il se forme alors une couche de passivation Cr_2O stable capable de repassivation spontanée).

2.1.2.3.2 Différents types

1/ Les alliages de type CoCrMo

1.1 Formules : CoCr28Mo6, CoCr31Mo6

1.2 Caractéristiques :-les alliages de type *CoCrMo* bénéficient d'une dureté élevée.

-la texture de grains est fine et les carbures bien répartis.

1.3 Remarques : la résistance mécanique est relativement élevée et peut être ajustée en fonction des conditions de transformation thermomécaniques.

1.4 Applications : ce type d'alliage est essentiellement utilisé pour les têtes d'articulation des prothèses de hanches.

2/ Les alliages de type CoCrWNi

2.1 Formules : CoCr₂₅W₁₅Ni₁₀

2.2 Caractéristiques :-la texture de grains est très fine.

-la présence d'un réseau de type cfc procure une excellente dureté.

2.3 Remarques

2.4 Applications

3/ les alliages de type CoNiCrMo

3.1 Formules : CoNi₃₅Cr₂₀Mo₁₀, CoCr₂₀Ni₁₇Mo₇

3.2 Caractéristiques : les alliages de type *CoNiCrMo* bénéficient d'une dureté et d'une tenacité élevées.

3.3 Remarques

3.4 Applications : ces alliages sont principalement utilisés pour la réalisation des tiges d'endoprothèses.

2.1.2.3.3 Remarques

La dureté peut être améliorée par un procédé d'écrouissage à la grenade.

La biocompatibilité est moindre que dans le cas de l'utilisation du Titane et la formation d'une capsule de tissus conjonctif autour de ces alliages n'est pas à exclure.

2.1.2.3.4 Applications

Différents matériaux en céramiques à base de Co sont utilisés lors de la réalisation de prothèses de hanche.

2.1.2.4 Les revêtements métalliques poreux pour matériaux à base de Cobalt et de Titane

2.1.2.4.1 Caractéristiques générales

Les structures poreuses permettent :

- 1/ l'augmentation de la superficie, ce qui favorise le développement et l'adhérence des cellules
- 2/ la diminution du module d'élasticité à l'interface implant/tissus .

2.1.2.4.2 Différents types

2.1.2.4.3 Remarques

Ce traitement de revêtement peut être comparé à celui du frittage pour lequel la température de frittage pour le *CoCrMo* se situe entre 1200 et 1310°C (la fixation se fait alors par fonte localisée) et entre 1200 et 1400°C pour le *TiAl₆V₄* (la fixation se fait alors par diffusion à l'intérieur de la couche).

Le choix d'une forme optimale permettra de diminuer les mauvaises propriétés adhésives provenant de la phase ? apparaissant généralement sur le bord des pièces.

2.1.2.4.4 Applications

2.1.2.5 Les alliages à base de Nickel

2.1.2.5.1 Caractéristiques générales

Ces alliages sont relativement ductiles et faciles à travailler.

Ils bénéficient d'une bonne résistance à la corrosion.

2.1.2.5.2 Différents types

1. Formule : $Ni_{70}Cr_{16}Mo_6$, $Ni_{64}Cr_{24}Mo_{10}$, $Ni_{59}Cr_{26}Mo_{11}$

2. Caractéristiques

3. Remarques

4 . Applications

2.1.2.5.3 Remarques

Ces alliages sont souvent utilisés en association avec divers matériaux composites.

2.1.2.5.4 Applications

Ces alliages sont surtout utilisés pour la fabrication de prothèses et d'implants non permanents.

2.1.2.6 Les alliages dentaires à base de matériaux nobles

2.1.2.6.1 Caractéristiques générales

Ces alliages bénéficient de bonnes propriétés mécaniques.

Ils montrent une bonne résistance à la corrosion.

L'usinage est relativement aisé.

2.1.2.6.2 Différents types

1/ les alliages à teneur élevée en or (Au>75%)

1.1 Formules : AuPt, AuPtPd, AuAgPt

1.2 Caractéristiques

1.3 Remarques

1.4 Applications

2/ les alliages à faible teneur en or (Au<75%)

2.1 Formules : AuPd, AuAgCu

2.2 Caractéristiques

2.3 Remarques

2.4 Applications

3/ les alliages à base de Pd

3.1 Formules : PdAu, PdAgAu, PdAG, PdCuGa

3.2 Caractéristiques

3.3 Remarques : Les alliages de type PdAu sont moins bons que ceux à base d'or bien qu'ils aient des propriétés électrochimiques semblables.

Les alliages de type PdAg et PdCuGa sont sensibles à la corrosion et ne sont pas frittables.

3.4 Applications

2.1.2.6.3 Remarques :

L'adjonction d'or supplémentaire n'augmente en rien les diverses propriétés de ces alliages.

L'adjonction d'argent ou de cuivre diminue la résistance à la corrosion et rend l'alliage toxique.

2.1.2.6.4 Applications :

Les alliages à base d'or sont principalement utilisés pour les plombages, les couronnes et les prothèses.

2.1.2.7 Les autres métaux purs

2.1.2.7.1 Caractéristiques générales

2.1.2.7.2 Différents types

1/ le tantale

1.1 Formules

1.2 Caractéristiques : le tantale bénéficie d'une bonne biocompatibilité mais n'est que très peu commercialisé en raison de ses mauvaises propriétés mécaniques.

1.3 Remarques

1.4 Applications : on retrouve le tantale dans la réalisation de certains stimulateurs cardiaques.

2/ le platine et l'iridium

2.1 Formules

2.2 Caractéristiques : ce sont deux matériaux nobles utilisés généralement pour la fabrication de fils destinés à des stimulateurs cardiaques et ce en raison de leur haute résistance à la corrosion malgré leur faible densité et leur fragilité élevée.

2.3 Remarques

2.4 Applications

3/ le niobium

3.1 Formules

3.2 Caractéristiques : ce matériau possède des propriétés mécaniques proches de celles du tantale

3.3 Remarques

3.4 Applications : sa faible densité le rend particulièrement intéressant pour son emploi en chirurgie du crâne

2.1.2.7.3 Remarques

2.1.2.7.4 Applications

2.1.3 Remarques

Les principaux problèmes non encore résolus lors de l'emploi des métaux et alliages métalliques concernent les points suivants :

- 1/ la corrosion électrochimique et la durabilité
 - 2/ les mécanismes de dégradation non électrochimique incluant les interactions protéines/métal.
 - 3/ les réactions immunitaires proprement dites et les notions d'hypersensibilité
 - 4/ les propriétés caractérisant les frottements et les particules rejetées.
- On sait cependant que certains facteurs favorisant la corrosion doivent être évités, ce sont
- l'association de divers matériaux (soudure, articulation,...)
 - la formation de piles locales superficielles
 - la variation locale ou temporelle du p_h
 - l'endommagement de la couche de passivation (ions Cl^- , défauts structurels,...).

2.1.4 Applications

2.2 Les céramiques

2.2.1 Caractéristiques générales

La catégorie céramique biocompatible regroupe en réalité les céramiques proprement dites, les verres, les vitrocéramiques et les matériaux carbonés.

Les céramiques sont composées d'éléments métalliques et non métalliques offrant une large variété de choix et d'application en raison du grand nombre possible de combinaison d'éléments

Elle regroupe aussi bien les matériaux inertes que les biorésorbables que les bioactifs.

Les céramiques sont composées d'éléments métalliques et non métalliques présentant une structure cristallographique des plus complexes.

Les liens entre atomes sont plus élevés que les liens métalliques procurant ainsi à ce matériau des propriétés plus élevées que celle des métaux (dureté, résistance électrique et thermique).

Ces matériaux se caractérisent donc généralement par une température de fusion élevée et un comportement relativement fragile, ce qui limite sensiblement leur domaine d'application.

La taille des grains a une très grande importance sur les propriétés des céramiques.

La durée de vie d'un céramique est estimée à partir des mécanismes de rupture élastique linéaire.

2.2.2 Différents types de céramiques

2.2.2.1 Les céramiques d'oxydes bioinertes

2.2.2.1.1 Caractéristiques générales

2.2.2.1.2 Différents types

1/ Les céramiques à base d'oxyde d'aluminium

1.1 Formules : Al_2O_3

1.2 Caractéristiques :-les céramiques à base d'oxyde d'aluminium profitent d'une grande dureté.

-la bonne finesse des grains permet de descendre jusqu'à une rugosité inférieure à $0.2\mu m$.

-la bonne mouillabilité permet au film de lubrifiant de se répartir équitablement sur toute la surface.

1.3 Remarques : -malgré la texture à grains fin le risque de rupture n'est pas à exclure et il est donc souhaitable d'avoir recours à des matériaux composites.

-les divers procédés d'usinage les plus fréquents sont : le façonnage, le frittage et les travaux de finition.

-l'utilisation d'une combinaison céramique /céramique est en général à proscrire malgré la diminution des pertes d'abrasion et ce en raison du mauvais comportement des céramiques frittées.

1.4 Applications : une prothèse est souvent une articulation ayant une tête en céramique, une tige métallique et une cavité synthétique.

2/ Les céramiques de zirconium

2.1 Formules : ZrO_2

2.2 Caractéristiques : -ce type de céramique possède une structure monoclinique jusqu'à 1170°C, une structure tétragonale de 1170 à 2370°C et une structure cubique de 2370 à 2689°C.

-l'apparition de tensions au fond des fissures peut entraîner la transformation de phase d'une structure tétragonale vers une structure monoclinique.

-les contraintes de compressions résultant de cette transformation de phase ont alors pour effet la fermeture des fissures.

2.3 Remarques

2.4 Applications : ces matériaux sont surtout utilisés pour la fabrication de prothèses d'articulation et de valves cardiaques.

2.2.2.1.3 Remarques

2.2.2.1.4 Applications

2.2.2.2 Les céramiques en phosphate de calcium bioactif

2.2.2.2.1 Caractéristiques générales

L'objectif de l'utilisation de ce type de matériau est de se rapprocher au mieux de la composition naturelle de l'os, à savoir : 26.7% de Ca, 12.5% de P, 3.48% de CO_2 , 0.436% de Mg, 0.73% de Mo, 0.055% de K, 0.08% de Cl et 0.07% de Fe.

Ces céramiques possèdent la particularité d'être ostéoconductrices et biorésorbables.

Elles favorisent ainsi la repousse osseuse tout en disparaissant d'elles-mêmes après un certain laps de temps.

2.2.2.2.2 Différents types

1/ Le tricalciumphosphate (TCP)

1.1 Formules : $Ca_3(PO_4)_2$

1.2 Caractéristiques : -la résistance à la fatigue est nettement inférieure à celle des céramiques oxydes.

-ces matériaux sont dès lors essentiellement utilisés sous forme de poudres ou de matériaux de revêtement.

-ce sont des matériaux résorbables utilisés uniquement pour des implants à court terme.

1.3 Remarques : la vitesse de résorption est réglée par le rapport Ca/P, par la température, le p_h et la concentration de la solution environnante.

1.4 Applications : ces matériaux sont avant tout utilisés pour le remplissage et le colmatage des os endommagés sur une longueur de plus de 1mm.

2/ L'hydroxyapatite (HAP)

2.1 Formules : $Ca_5(PO_4)_3(OH)$

2.2 Caractéristiques : -l'hydroxyapatite possède la même structure, la même composition chimique et le même réseau cristallin que celui de l'os.

- sa résistance à la fatigue est faible.
- c'est un matériau résorbable.
- sa porosité varie entre 100 et 200 µm ce qui favorise l'inclusion des tissus.
- la rugosité se situe aux alentours de 75µm afin de favoriser le bon encrage de l'implant dans les tissus osseux.
- la cristallinité oscille quand à elle entre 70 et 95%.

2.3 Remarques : le principal problème consiste à synthétiser une HAP ayant une taille de pores adéquate pour que la colonisation se fasse dans des conditions optimales.

2.4 Applications : L'HAP est souvent utilisé comme matériau de revêtement dont l'épaisseur moyenne se situe aux alentours des 200µm.

- Cette valeur résulte d'un compromis favorisant d'une part une meilleure incorporation du tissu (couche épaisse) et d'autre part l'adhésion (couche mince).
- Cette couche peut être appliquée par projection au plasma, par précipitation électrophorétique ou par frittage.
- On le retrouve principalement pour l'élaboration d'implants et matériaux de comblement dentaire, en chirurgie orthopédique ainsi que pour certaines applications visant la réalisation de vaisseaux artificiels.

2.2.2.3 Remarques

2.2.2.4 Applications

2.2.2.3 Les verres et vitrocéramiques

2.2.2.3.1 Caractéristiques générales

2.2.2.3.2 Différents types

1/ les verres

1.1 Formules :

SiO_2 ? P_2O_5 ? CaO

1.2 Caractéristiques

Les verres se caractérisent par une mauvaise résistance statique et à la fatigue.

La corrosion est principalement réglée par la teneur en SiO_2 .

1.3 Remarques

1.4 Applications

Le verre est généralement considéré comme un revêtement favorisant l'inclusion d'implants dans les tissus osseux.

2/ les vitrocéramiques

2.1 Formules SiO_2 ? Al_2O_3 ? MgO

2.2 Caractéristiques

Les vitrocéramiques sont des verres (instables) transformés par germination en un état cristallin thermodynamiquement stable

2.3 Remarques

2.4 Applications

2.2.3.3 Remarques

Les principaux problèmes rencontrés avec l'emploi des matériaux en céramiques et non encore résolus à l'heure actuelle se situent essentiellement au niveau :

- des mécanismes de dégradation (et de l'influence exacte du rôle des enzymes)
- de l'activité de surface (adhérence des protéines et cellules)
- de la résistance à la fracture
- de la durabilité
- de la mesure et du contrôle de la biorésorption
- de l'effet de la stérilisation sur cette biorésorption

2.2.3.4 Applications

2.2.3 Remarques

2.2.4 Applications

2.3 Les polymères

2.3.1 Caractéristiques générales

2.3.2 Différents types de polymères

2.3.2.1 Le polyéthylène (PE)

2.3.2.1.1 Caractéristiques générales

Le PE est un des thermoplastiques les plus courants.

Il est obtenu par polymérisation de l'éthylène (C_2H_4).

Pour rappel, les thermoplastiques sont formables à chaud, de façon réversible sans aucune modification de leur structure chimique.

Les macromolécules linéaires ou ramifiées se ramollissent sous l'action de la chaleur et prennent les formes qui leur sont imposées.

2.3.2.1.2 Différents types

1/ le HDPE (high density PE)

1.1 Formules

1.2 Caractéristiques

1.3 Remarques

1.4 Applications

Le HDPE est un matériau destiné principalement aux prothèses soumises à de fortes contraintes tribologiques (prothèse de hanche, de doigt, de genou, plaques d'ostéosynthèse destinées à la diminution des fractures,...).

2/ le LDPE (low density PE)

2.1 Formules

2.2 Caractéristiques

2.3 Remarques

Ce matériau tend à la formation d'une capsule de fibrine épaisse (fibrose) lorsqu'il est implanté dans le corps humain.

2.4 Applications :

Le LDPE convient surtout à la fabrication de cathéters, de poches de transfert, de tuyaux,...

3/ le UHMWPE (ultra high molecularweight PE)

3.1 Formules

3.2 Caractéristiques

Le UHMWPE bénéficie de bonnes caractéristiques tribologiques lorsqu'il est employé avec les métaux ou les céramiques.

3.3 Remarques

3.4 Applications

Le UHMWPE se retrouve entre autre dans les cavités articulaires des prothèses de hanches.

2.3.2.1.3 Remarques

2.3.2.1.4 Applications

2.3.2.2 Le polypropylène (PP)

2.3.2.2.1 Caractéristiques générales

Le PP résulte de la polymérisation du propylène (C_3H_8) qui provient des gaz de raffinage du pétrole.

Ce matériau se caractérise par une rigidité et une dureté élevées.

Il est non hémocompatible et bénéficie d'une biocompatibilité limitée en raison de sa faible résistance à la stérilisation

2.3.2.2.2 Différents types

2.3.2.2.3 Remarques

2.3.2.2.4 Applications

Le PP est employé essentiellement pour des applications spécifiques (par exemple l'implant de vaisseaux artificiels).

2.3.2.3 Le polytétrafluoroéthylène (PTFE)

2.3.2.3.1 Caractéristiques générales

Le polytétrafluoroéthylène bénéficie d'une forte tenacité et d'une faible dureté.

Il est extrêmement hydrophobe et fait preuve d'une bonne hémocompatibilité.

Il montre une légère tendance au flUAGE et possède un haut degré de cristallisation (proche de 90%).

2.3.2.3.2 Différents types

2.3.2.3.3 Remarques

Le PTFE est limité en emploi à cause des ces mauvaises caractéristiques mécaniques.

Les différentes combinaisons avec l'acier libère des particules entraînant des réactions tissulaires néfastes à l'organisme.

2.3.2.3.4 Applications

On retrouve le polytétrafluoroéthylène dans diverses applications telles

-les substituts de vaisseaux (pour un diamètre intérieur compris entre 5 et 30mm)

-les prothèses du canal urinaire, les prothèses des osselets de l'ouïe,...

2.3.2.4 Le polyméthacrylate de méthyle (PMMA)

2.3.2.4.1 Caractéristiques générales

Le polyméthacrylate de méthyle se caractérise par une bonne rigidité et une bonne dureté.

Il résiste bien à la traction et ne se fragmente pas lors d'une cassure.

Les caractéristiques optiques et mécaniques sont très bonnes.

Les différentes propriétés sont variables selon le type de ciment, les méthodes de production, la taille et la répartition des particules.

L'absorption d'eau est faible et il est non résistant à l'alcool.

2.3.2.4.2 Différents types

2.3.2.4.3 Remarques

Il est nécessaire de rester attentif à une bonne homogénéisation des particules de PMMA dans la matrice non polymérisée car une mauvaise répartition de celles-ci entraînera des maxima locaux engendrant souvent la formation de fissures.

La polymérisation s'accompagne d'une diminution de volume entraînant un effet négatif sur l'enrage ; le ciment risque alors de s'effriter à l'endroit des plus fortes contraintes.

2.3.2.4.4 Applications

Le polyméthacrylate de méthyle est surtout employé pour

- le remplissage de vides entre l'implant et l'os
- la fabrication de prothèses orthopédiques
- l'élaboration de lentilles de contact ou de prothèses de la cornée
- la réalisation de prothèses dentaires, plombages,...
- le stockage et libération de solutions médicamenteuses

2.3.2.5 Les polyamides (PA)

2.3.2.5.1 Caractéristiques générales

Les polyamides sont des thermoplastiques semi-cristallins.

Ces matériaux bénéficient d'une excellente résistance à l'usure et d'une très bonne stabilité chimique.

Leur capacité d'amortissement et de résistance aux contraintes dynamiques est elle aussi excellente.

Les PA sont de plus hémocompatibles.

2.3.2.5.2 Différents types

2.3.2.5.3 Remarques

Le taux d'humidité influence énormément les caractéristiques mécaniques.

2.3.2.5.4 Applications

Les polyamides sont essentiellement utilisés pour les implants de courte durée.

2.3.2.6 Les polychlorures de vinyle (PVC)

2.3.2.6.1 Caractéristiques générales

Le PVC fait partie de la famille des thermoplastiques et est donc formable à chaud.

Il est obtenu par polymérisation du chlorure de vinyle, lui-même dérivé du dichloréthane qui provient à son tour de la chloration de l'éthylène.

Ce sont des matériaux de synthèse amorphes ayant une composante cristalline de l'ordre de 5%.

Ils bénéficient d'une bonne stabilité chimique et sont ainsi peu sensible à la fissuration.

2.3.2.6.2 Différents types

2.3.2.6.3 Remarques

Le spectre des produits disponibles est très large en raison des diverses combinaisons PVC/additif possibles.

Un des grands problèmes liés à l'emploi de ce matériau dans le corps humain réside dans la diffusion du plastifiant extrait par des solutions contenant du liquide ou des graisses du sang.

Il existe actuellement peu d'informations sur les dommages causés par ce problème.

2.3.2.6.4 Applications

Le PVC constitue à lui seul 25% du marché des produits à usage médical.

On le retrouve principalement au niveau des emballages stériles, des respirateurs artificiels, des cathéters, des poches pour le stockage de liquide physiologique,...

2.3.2.7 Le polyéthylènetréphthalate (PETP)

2.3.2.7.1 Caractéristiques générales

Le polyéthylènetréphthalate est une matière synthétique thermoplastique qui bénéficie d'une rigidité et d'une résistance mécanique élevée.

Ce matériau présente une faible tendance à l'absorption d'eau et est donc relativement résistant à la fissuration.

Il résiste aux irradiations et est donc facilement stérilisé.

2.3.2.7.2 Différents types

2.3.2.7.3 Remarques

La dégradation est généralement proportionnelle à la durée de l'implantation.

2.3.2.7.4 Applications

Le PETP est un des polyesters les plus employés en médecine.

On le retrouve dans l'élaboration de vaisseaux artificiels, des tendons, des ligaments, de valves cardiaques,...

2.3.2.8 Les polysulfones (PSU)

2.3.2.8.1 Caractéristiques générales

Les PSU sont des thermoplastiques amorphes linéaires et durs.

Ces matériaux bénéficient d'une bonne stabilité mécanique et thermique.

Ils résistent en outre relativement bien aux chocs thermiques (jusqu'aux alentours de 120°C) et peuvent donc être stérilisés dans des autoclaves.

2.3.2.8.2 Différents types

2.3.2.8.3 Remarques

Les PSU ne s'hydrolysent pas facilement.

2.3.2.8.4 Applications

Les PSU sont utilisés comme matériaux de matrice pour membrane de dialyse en matériaux composites.

2.3.2.9 Les polysiloxanes (Silicones)

2.3.2.9.1 Caractéristiques générales

Les polysiloxanes font partie de la classe des élastomères.

Ils sont par conséquent formables par des techniques proches de celles employées dans l'industrie du caoutchouc.

Les macromolécules forment des réseaux à larges mailles tridimensionnelles où des groupes réactifs jouent le rôle d'agrafes entre les chaînes.

Ces élastomères ont comme caractéristique principale le retour à leur forme initiale lors de la suppression des contraintes appliquées.
Les silicones sont des matériaux hydrophobes et hémocompatibles.
Ils résistent bien aux hautes températures (jusqu'aux alentours de 255°C - pointes à 400°C) et peuvent donc être stérilisés dans des autoclaves.
Ils résistent longtemps à des dégradations enzymatiques et électrolytiques.
La résistance mécanique peut être augmentée par l'adjonction de silicates.

2.3.2.9.2 Différents types

2.3.2.9.3 Remarques

L'avantage essentiel réside par la non nécessité de plastifiant.
L'utilisation sous forme de gel ne peut se faire qu'en présence d'un revêtement garantissant l'étanchéité, le cas contraire conduirait à la libération de monomères entraînant la phagocytose.

2.3.2.9.4 Applications

Les silicones sont employées dans diverses applications, citons comme exemple les prothèses mammaires,....

2.3.2.10 Les polyuréthanes (PUR)

2.3.2.10.1 Caractéristiques générales

Le polyuréthane est un thermodurcissable dont la structure peut être subdivisée en segments rigides et en segments souples.
Les thermodurcissables sont des matériaux formables à chaud de façon irréversible avec modification de leur structure chimique.
Les macromolécules forment un réseau à mailles serrées qui caractérise les propriétés de rigidité, d'insolubilité et de non fusibilité de ces matériaux.
Les PUR bénéficient d'une bonne résistance mécanique.
Ces matériaux ont cependant tendance à former des complexes avec les ions métalliques altérant ainsi les propriétés mécaniques et chimiques.
Ils sont sensibles à l'eau chaude et à la vapeur, l'autoclave ne convient donc pas pour leur stérilisation.
L'hémocompatibilité dépend du rapport entre les segments de polymères rigides et souples
Les liaisons H des segments rigides se reforment spontanément après leur destruction ce qui leur confère une excellente résistance à la rupture et au déchirement.

2.3.2.10.2 Différents types

2.3.2.10.3 Remarques

Ces matériaux sont en passe de devenir les plus importants dans le domaine médical.
Le spectre des produits disponibles est très large en raison des diverses combinaisons possibles.
La résistance mécanique peut encore être améliorée par un renforcement de fibres de carbone.

2.3.2.10.4 Applications

Les applications essentielles de ces types de matériaux consistent en la réalisation de membrane de pompe, le remplacement de cœur entier, la fabrication de cathéters, valves, prothèses de l'intestin,...
En outre, leur très bonne résistance mécanique permet d'obtenir des vaisseaux sanguins ayant un diamètre intérieur inférieur à 4mm.

2.3.2.11 Les hydrogels

2.3.2.11.1 Caractéristiques générales

Les hydrogels consistent en un réseau de polymères insolubles gorgés d'eau. La disposition de l'eau (quantité de l'ordre de 30 à 70%) est déterminante au niveau du comportement mécanique, des propriétés de surface et de la perméabilité.

2.3.2.11.2 Différents types

2.3.2.11.3 Remarques

2.3.2.11.4 Applications

Les hydrogels sont essentiellement utilisés en tant que peau artificielle, lentille de contact, matériel de suture,...

2.3.2.12 Les polymères biodégradables

2.3.2.12.1 Caractéristiques générales

2.3.2.12.2 Différents types

2.3.2.12.3 Remarques

La surface doit être hydrophobe pour qu'une réaction d'hydrolytique puisse se dérouler. Le processus débute par un revêtement de protéines sur lequel les cellules adhèrent.

2.3.2.12.4 Applications

Les polymères biodégradables sont essentiellement utilisés en tant qu'implants temporaires : plaques d'ostéosynthèses, membranes, fils,...

2.3.3 Remarques

2.3.4 Applications

3.Bibliographie

- [1] BERCOT P. -*Les biomatériaux* (cours de matériaux) –Laboratoire d’automatique de Besançon (UMR CNRS6596-ENSMM/UFC).
- [2] DELCHAMBRE ALAIN -*cours de technologies (2nd édition 1995-1996)* –Service de mécanique appliquée (Université Libre de Bruxelles).
- [3] DELPLANCKE JEAN-LUC -*cours des matériaux (?)* –Service de métallurgie (Université Libre de Bruxelles).
- [4] REGA PIERRE –special steels and alloys for medical implants and surgical instruments-catalogue Aubert et Duval Belgium.
- [5] WILLIAMS DAVID –*Medical and dental materials* – Pergamon Press (first edition 1990).

8. Divers

8.1. Rapport de visite à Neuchatel



Compte rendu du voyage à Neuchâtel (Suisse).

Mercredi 13 février.

- 8h30 : visite de SMLAB (The Sensors, Actuators and Microsystems Laboratory)

Partie intégrante de l'Institut de Microtechnologie (IMT) de l'Université de Neuchâtel

rue Jaquet-Droz 1
CH- 2007 Neuchâtel
Switzerland

Tél : +41 32 720 51 21
Fax : +41 32 720 57 11
E-mail : info.samlab@unine.ch
Web : <http://www-samlab.unine.ch/>

Contact : Prof. Nico F. de Rooij

Applications développées au sein de SMLAB

1. commutateurs pour fibres optiques
2. modulateurs réflectifs (= miroirs dont la réflexivité dépend de sa déformation)
3. micro-électrodes pour la biotechnologie
4. AFM (= Atomic Forces Microscope)
Samlab fabrique des leviers et des pointes en Si et en diamant
5. Systèmes d 'analyse miniaturisés (= Lab on Chip)
6. Micromoteurs piézo-électriques
Essentiellement développés pour l'industrie horlogère, ces micromoteurs d'un diamètre d'environ 5 mm développent des couples très faibles (de l'ordre du μNm)
7. Nez électroniques
8. Capteurs de vitesse angulaire
9. Nanotitratoirs coulométriques
10. Activités microfluidiques (en rapport avec Spacelab)
 - μ pompes
 - vannes
 - capillaires
 - débitmètres

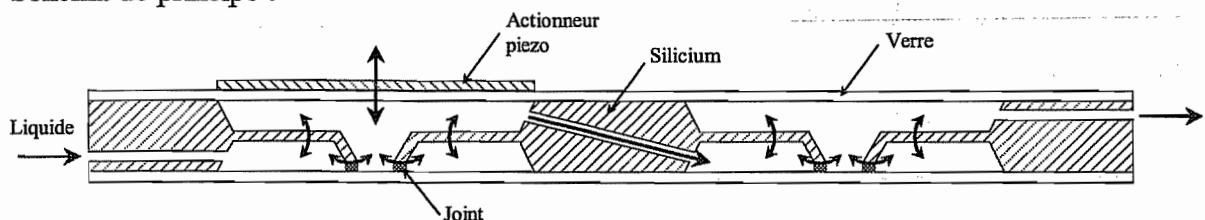
Cas particulier de la micropompe en silicium

Le principe de fonctionnement de cette micropompe est vieux d'une quinzaine d'année. En raison de la variation du débit en fonction de la pression de refoulement, la pompe est suivie d'un débitmètre. On peut avantageusement remplacer celui-ci par une pipette placée horizontalement à des hauteurs différentes de manière à simuler des pressions de sortie différentes.

Dimensions	22 X 22 mm ² , épaisseur de quelques mm
Débit	1-10 mlh ⁻¹

Fréquence	5-10 Hz
Différence de pression entre admission et refoulement	200-500 mbar (limitée à 300 mbar à cause du débitmètre qui ne supporte pas plus)
Actionnement	Pastille piézoélectrique sur membrane
Membrane	En verre ou en silicium, 10X10mm Epaisseur de quelques dizaines de μm Débattements de quelques μm pour le verre Débattements de quelques dizaines de μm pour le silicium
Valves	Passives, en silicium, 25 μm d'épaisseur, ouverture par différence de pression
Priming	Design adapté au remplissage Remplissage initial sous une pression de 500mbar Liquide dégazé Pas de cavitation

Schéma de principe :



Cas particuliers des micromoteurs – actionneurs

3 principes :

- piézoélectrique (pour l'horlogerie, quelques μNm)
Il s'agit en fait d'un mécanisme transformant le mouvement de translation en mouvement de rotation : une membrane actionnée en translation verticale par des piézoélectriques comprime des leviers dont la flexion provoque un déplacement tangentiel à la membrane, provoquant ainsi sa mise en rotation (voir schéma dessous)
- électrostatique
- électrodynamique (notamment en remplacement des actionneurs piézoélectriques habituellement utilisés dans les AFM, actionneurs piézo nécessitant des différences de potentiel (100V) incompatibles avec l'environnement martien favorisant les décharges électrostatiques.)

Microscopie à forces atomiques

1. Principe de fonctionnement

Le fonctionnement du microscope à forces atomiques repose sur la mesure optique de la défexion d'une micropoutre en silicium ou en niture de silicium dont la pointe, en silicium ou en diamant, est attirée par la surface du substrat ou en contact franc avec elle.

Le calcul de la raideur de cette poutre peut être effectué grâce à la connaissance que nous avons des propriétés du silicium monocristallin. Parfois, ce calcul est remplacé par une calibration basée sur la mesure de la fréquence de résonance de la poutre.

Dès lors, la mesure du déplacement de l'extrémité de la poutre permet de connaître la force exercée.

Il s'agit essentiellement d'une sorte de microscope permettant l'analyse d'une surface de quelques dizaines de μm^2 . La mesure des forces, théoriquement possible, n'a toutefois pas fait l'objet d'une application quantitative.

2. Matériaux

Traditionnellement, la poutre est réalisée en silicium ou en nitride de silicium.

La pointe, dont le rayon de courbure atteint quelques dizaines de nm, est réalisée en silicium (idéal), en diamant (trop rugueux pour permettre une mesure exacte du déplacement de manière optique).

On voit apparaître des leviers en plastique, qui rendent l'appareil beaucoup moins précis.

Le coating du levier, s'il présente l'avantage de pouvoir mesurer l'interaction entre deux matériaux différents du silicium, donne malheureusement lieu à la formation de structure bimorphe extrêmement sensibles aux variations de température.

De tels bimorphes sont d'ailleurs utilisés comme calorimètres de précision (sensibilité de l'ordre du picojoule)

3. Applications chez Samlab

Samlab fabrique des leviers pour AMF et tente d'y ajouter différentes fonctionnalités supplémentaires telles que la mesure locale de la température, de la lumière (photodiodes) ou ledépôt de quantités infimes de liquides au travers d'un microcanal de 20 à 50 nm percé au travers de la pointe.

L'application la plus prestigieuse de Samlab dans le domaine des AMF est la réalisation d'un AMF à 8 pointes destiné à l'analyse des poussières de l'atmosphère martienne.

Suite aux échecs successifs de la NASA (voir missionspathfinder), l'aboutissement de ce travail est reporté à la prochaine mission, qui n'aura pas lieu d'ici 2006 ou 2007.

Cette expérience consiste en l'analyse de poussières martiennes en utilisant l'AMF en modes slipping (déplacement tangentiel de la pointe le long de la surface analysée, au risque de déplacer les poussières sans les analyser) et tapping (oscillations contrôlées de la pointe. La hauteur de la pointe par rapport à la surface scannée est contrôlée en mesurant les variations de déphasage, d'amplitude et de fréquence de résonance de la poutre à l'approche de la surface).

La mesure de la forme de la poussière peut se faire de manière directe, lorsqu'on mesure l'interaction entre la pointe du levier et la poussière.

Lorsqu'une poussière reste attachée à la pointe, le microscope devient aveugle. On recourt alors à la mesure indirecte, en mesurant l'interaction entre la poussière fixée au levier et des pointes acérées semblables à celle de la poutre, mais disposés régulièrement sur la surface scannée. On obtient alors autant de fois la même image de la poussière qu'il y a de pointe sur la surface.

Contacts

Samlab :

- Prof Nico de Rooij
- PhD Urs Staufer
- Notre ami le Biennois ? ? ?

ETH Zurich :

- Monsieur Dual(e)

Debiotech :

Société à Lausanne, contact : Monsieur Mayfair (orthographe à vérifier)

Conférence MEMS, à Interlaken

Société Seiko, productrice de moteurs piézo dans une gamme intéressante pour notre micropompe.

- 13h00 : visite du Centre Suisse d'Electronique et de Microtechnique (CSEM)

CSEM SA
 Rue Jaquet-Droz 1
 P.O. Box
 CH-2007 Neuchâtel

Tel. +41 32 720 5111
 Fax +41 32 720 5700

Web : <http://www.csem.ch/>

La division Instruments du CSEM est spécialisée dans l'étude nanométrique et micrométrique des surfaces (et couches) des matériaux.

Notre visite s'est scindée en deux parties : la première concernant le Variocouple et les capteurs de couple tandis que la seconde partie consistait en la présentation des différents instruments d'analyse de surface qu'ils commercialisent.

Variocouple et capteur de couple

Le Variocouple (voir annexe) est un banc d'essai destiné à la mesure de forces et de couples de faible amplitude analogue à celui que l'on désire réaliser dans le cadre du projet 4M pour évaluer les performances du microactionneur.

Sur ce banc était monté un capteur de couple du type TSF (voir annexe) auquel était suspendu, via un bras de levier, un poids de 2g de façon à exercer le couple à mesurer. Un logiciel d'acquisition permet de mesurer le couple en fonction de la position angulaire. Ce logiciel affiche notamment le couple maximum, minimum, moyen et la variance.

Plusieurs éléments de ce banc d'essai nous ont plus particulièrement intéressés :

- Le centrage de l'axe du capteur avec l'axe moteur s'effectue à l'aide d'une lunette de centrage escamotable.
- La pièce à mesurer est fixée sur la broche du variocouple par l'intermédiaire d'un mandrin de précision.

Les capteurs de couple du type TSF sont calibrés sur toute leur gamme de mesure. Il est possible d'obtenir, pour chaque capteur, un certificat reprenant différentes données utiles dont l'erreur de linéarité et l'hystérèse en chaque point de calibration. Cela permettrait éventuellement de corriger ces erreurs.

Instruments d'analyse de surface

Ces appareils sont destiné à évaluer différentes propriétés des surfaces et des couches des matériaux telles que l'usure, la dureté...

1. Tribomètre

Le principe de fonctionnement d'un tribomètre est illustré à la Figure 1. Il s'agit généralement d'une bille que l'on applique, avec une force connue, sur l'échantillon à tester. L'échantillon étant en rotation, il en résulte des force de friction entre la bille et la surface de

l'échantillon. Ces forces sont mesurées et permettent notamment de déterminer la tenue à l'usure de la surface de l'échantillon.

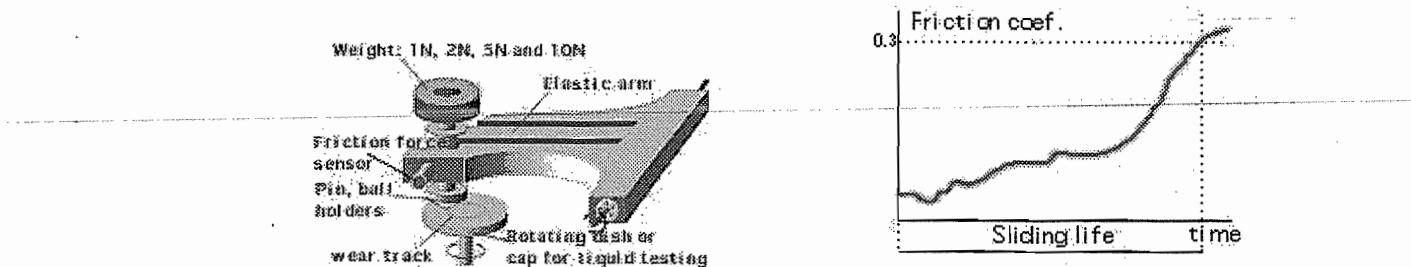


Figure 1.

Les caractéristiques principales des tribomètres commercialisés par CSEM Instruments sont les suivantes :

Tribomètre	Micro	Nano
Rotation Speed	0.03 to 500 rpm	0.01 to 80 rpm
Friction force	up to 10 N	10 μ N to 1 N
Standards loads	1, 2, 5, 10 N	50 μ N to 1 N
Depth range		20 nm to 100 μ m
Disk dimensions (\varnothing_{\max})	60 mm	up to 20 mm

Un tribomètre haute température permettant de travailler jusqu'à une température de 800 °C a également été présenté.

2. Scratch Tester

Le principe de fonctionnement d'un Scratch Tester est illustré à la Figure 2.

Ce dispositif permet d'introduire des contraintes à l'interface entre couches de matériaux. Ceci est réalisé en appliquant, avec une force normal F_N , une pointe en diamant sur la surface de l'échantillon. L'échantillon est déplacé à vitesse constante tandis que la force F_N peut évoluer linéairement, quadratiquement... La force maximale à partir de laquelle on observe un phénomène de rupture à l'interface des couches de matériaux est appelée charge critique et notée L_c . Cette dernière grandeur donne des informations importantes sur les propriétés des couches des matériaux.

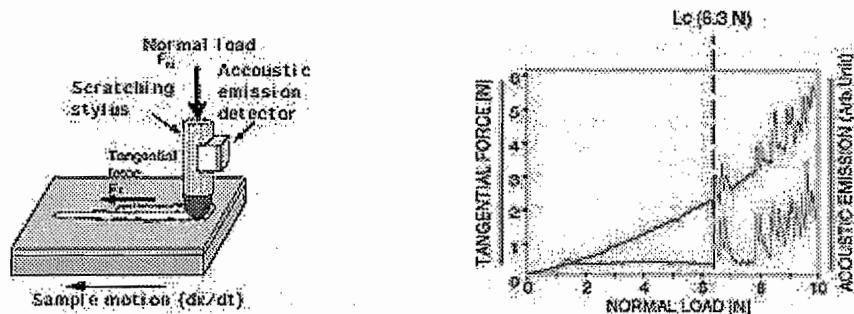


Figure 2.

Les caractéristiques principales des Scratch Tester commercialisés par CSEM Instruments sont les suivantes :

Scratch Tester	Micro	Nano
Normal Load	0.05 to 30 N	10 μ N to 1 N
Friction force	0.05 to 30 N	6 μ N to 1 N
Loading rate	up to 100 N/min	up to 5 N/min
Scratching speed	0.4 to 20 mm/min	0.4 to 20 mm/min
Scratch length	up to 20 mm	up to 20 mm
Depth range	up to 1 mm	up to 1 mm

3. Hardness Tester

Le principe de fonctionnement d'un duromètre est illustré à la Figure 3.

La mesure de dureté se fait par indentation. Un poinçon de forme déterminée est appliqué sur l'échantillon avec une force normale croissante. La courbe force-pénétration permet de déterminer la dureté de l'échantillon.

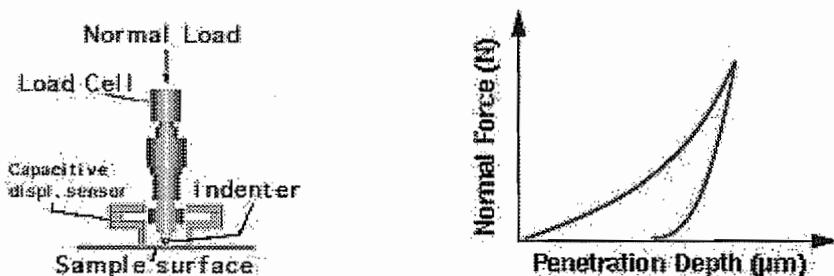


Figure 3.

Les caractéristiques principales des Scratch Tester commercialisés par CSEM Instruments sont les suivantes :

Hardness Tester	Micro	Nano
Max. displacement	200 μ m	20 μ m
Displacement resolution	0.3 nm	0.04 nm
Max. force	30 N	300 mN
Force resolution	0.3 mN	1 μ N

Ce dispositif peut-être combiné à un microscope AFM pour visualiser l'empreinte et déduire certaines propriétés du matériau.

Contacts

Didier Jobe (Customer Services) : didier.jobe@csem.ch

Site internet : <http://www.csem-instruments.com/>

Jeudi 14 Février.

- 13h00 : visite de COLIBRYS

COLIBRYS SA

Maladière 83

CH-2007 Neuchâtel

SWITZERLAND

Tél : 41 (0)32 720 58 11

Fax : 41 (0)32 720 57 84

Mail : info@colibrys.ch

Web : <http://www.colibrys.ch>

Présentation générale

4 secteurs d'activités actuels :

- 1) mécanique : accéléromètres, gyromètres, capteurs de position XY électromagnétiques
- 2) magnétique : imprimante à haute cadence 600 dpi
- 3) Capteurs de radiations (en dentisterie, et bientôt en mesure de la fluorescence, compétence donnant accès à la protéonique et au séquencement de l'ADN)
- 4) Lentilles
 - dans le domaine des ondes UV, avec application aux masques de lithographie utilisés dans la fabrication des puces)
 - dans le domaine des éléments diffractifs fournis à la société Zeiss, elle-même alimentant SML

2 secteurs à venir :

- 5) RF – Mems dans le but de fabriquer des résonateurs de haute précision et des switches
- 6) Moems (Micro Opto Electromechanical systems) pour les applications de télécom à fibre optique (réseaux d'atténuateurs variables et miroirs)

Colibrys a débuté en août 1998, avec du matériel fourni par le CSEM.

Actuellement, Colibrys emploie 132 personnes, dont 6 personnes en R&D. Les liens sont très étroits avec le CSEM qui fournit beaucoup d'inventions qui sont ensuite mises en production. Les chercheurs ont la possibilité d'osciller entre les univers académique et industriel, supervisant la mise au point de la production de leur invention avant de retourner à la R&D. La production annuelle s'élève à 20000 wafers. Ce chiffre devrait d'elever à 50000 unités par an d'ici 2004. Cette augmentation de la production sera financée par les investissements consentis notamment par Intel, investissements totaux s'élèvant à $12 \cdot 10^6$ USD en juillet 2001. Ces chiffres modestes relatifs à la production sont compensés par une très haute valeur ajoutée des composants.

Production et organisation de la fonderie

Les salles blanches sont isolées et il y règne un flux laminaire évacuant les poussières inévitablement introduites par les opérateurs. Elles sont alimentées en produits chimiques par des tuyauteries les reliant au sous-sol.

Par le biais d'un couloir de visite, nous avons eu un aperçu du procédé de fabrication :

- gravure sèche : bombardement de silice fondu (quartz) par plasma
- gravure humide : attaque su silicium avec du KOH
- cuisson dans un four à haute température
- découpe (dicing)
- packaging et wire bonding (conditionnement et soudure des connections)
- assemblage et intégration dans un boîtier (assemblage manuel et robotisé [robot développé par Sysmec, permettant le positionnement, l'alignement nanométrique, le collage, le soudage])

L'équipement de Colibrys lui permet de combien 3 types de technologies :

- gravure
- croissance galvanique
- technologie C-MOS, notamment dans les capteurs de radiation)

Produits

Accéléromètres, constitués de deux plaques fixes et d'une plaque mobile, dont on mesure le déplacement par variation de capacité. Le déplacement dépend de la force appliquée à une masse de référence, c'est à dire, une accélération. La plaque mobile est placée dans un environnement gazeux favorisant son amortissement.

Colibrys fabrique des accéléromètres 1 axe ou 3 axes, consommant 170 µA sous une tension de 3V. Ils sont sensibles au milli-G.

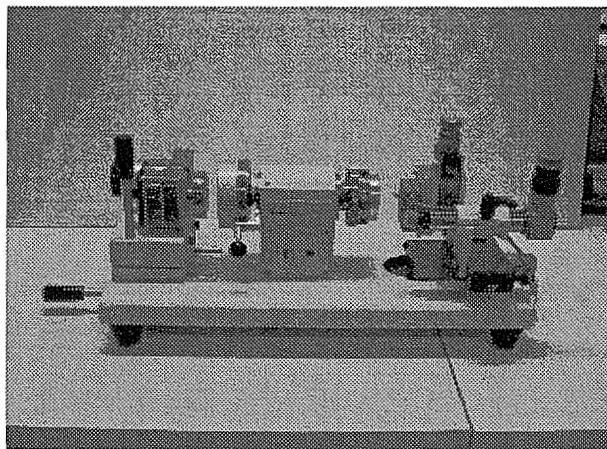
Ces accéléromètres sont utilisés dans le contrôle inertiel des avions, l'inclinaison des plate-formes de forage, la détection de chutes chez les personnes âgées ou à mobilité réduite.

8.2. Variocouple CSM



CSM VARIOCOUPLE®

APPAREIL UNIVERSEL DE MESURE DE COUPLES ET DE FORCES



DOMAINES D'APPLICATION

Le VARIOCOUPLE® trouve son application au niveau de la recherche, du développement, de l'analyse, de la mise au point, du contrôle et de l'enseignement dans les principaux domaines suivants :

- ? microtechnique
- ? horlogerie mécanique et électronique
- ? électromécanique
- ? appareillage
- ? instrumentations
- ? composants et mécanismes divers
- ? etc.

PRINCIPE DE MESURE

La pièce à mesurer est fixée sur la broche du VARIOCOUPLE® par l'intermédiaire des moyens de serrage à disposition (pinces, mandrins, plateau). Une lunette de centrage escamotable permet le contrôle du centrage du mobile.

Un moteur équipé d'un réducteur à 10 vitesses assure l'entraînement de la broche de l'appareil, ceci par l'intermédiaire d'un accouplement magnétique qui a pour effet de supprimer la transmission des vibrations lors de mesures de faibles forces ou couples.

La mesure s'effectue avec un capteur de force ou de couple, soit coaxialement au mobile intéressé ou par l'intermédiaire d'un bras, aiguille ou poulie rapportée sur l'axe du mobile.

Le capteur, monté sur un chariot à trois axes de déplacement XYZ, peut aisément être positionné par rapport à l'axe du mobile.

Divers accessoires mécaniques, d'enregistrement, de synchronisation, ainsi qu'un large choix de capteurs de couple et de force permettent une large utilisation de l'appareil VARIOCOUPLE®.

EXEMPLES DE MESURES

? train de rouage	? paliers et roulements
? ressorts et spiraux	? accouplements
? ressorts de barillet	? frictions
? brides glissantes	? moteur pas à pas
? quantièmes	? compteurs
? mécanismes de remontage	? mécanismes divers
? dispositifs de verrouillage	? etc.

CARACTERISTIQUES PRINCIPALES

L'appareil de base se compose de :

- ? plaque de base en fonte vernie montée sur éléments antivibratoires
- ? poupée avec :

- broche pour pince SV type B8
- nez fileté, M15x1,5 mm
- hauteur utile 93mm, longueur utile 125mm (nez-broche - capteur)
- blocage de la broche
- friction de la broche
- division angulaire avec index

- | accouplement magnétique
- | commande pour moteur incorporé
- | support moteur amovible monté sur amortisseurs de vibrations
- | moteur avec réducteur multiple à 10 vitesses, gamme standard 0.01 à 10 tours/min (autres vitesses sur demande)
- | chariot porte-capteur avec coulisse XYZ équipée de vis micrométriques avec vernier
- | lunette de centrage escamotable, grossissement 50x
- | poids : 40 kg
- | encombrement : 50 x 25 x 25 cm
- | alimentation : 220V/50Hz

ACCESSOIRES

- | pinces SV type B8
- | mandrins à 3 ou 6 mors
- | plateau à 3 chiens
- | support inclinable permettant l'inclinaison de $\pm 90^\circ$ du VARIOCOUPLE®, positionnement tous les 15° (sur demande)
- | capteurs de force divers, étendue de mesure de $\pm 20\text{mN}$ à $\pm 10\text{ N}$
- | capteurs de couples TSF, étendue de mesure de $50\ \mu\text{N.m}$ à $\pm 20\ \text{mN.m}$
- | système de SYNCHRO-SELEC avec présélection angulaire, présélection et affichage du nombre d'inversion de sens de marche. Ce système assure la parfaite synchronisation de l'avance du papier de l'enregistreur par rapport à la rotation de la broche du VARIOCOUPLE®.
- | ponts de mesure à fréquence porteuse
- | enregistreurs SERVOGOR



8.3. Rapport de visite au SIAMS

Compte rendu de la visite au SIAMS, salon des microtechniques de Moutier

Jeudi 23 mai et vendredi 24 mai 2002

Merken Patrick

En tant que chercheur en micromécanique, il m'est apparu important de me tenir au courant de activités en microtechnique. Cette visite fait partie d'un ensemble de procédures visant à établir des contacts avec le monde de la micromécanique. Le but était donc précisément de m'informer sur les moyens de fabrication, les possibles sous-traitants travaillant dans le secteur des microtechniques ainsi que sur les rubriques connexes (composants, boulonnerie, etc).

Durant ce salon, différents contacts ont été établis. Voici, classés par secteurs, les différents contacts qui ont eu lieu.

Roulements / Paliers / joints d'étanchéité

- Société Wälzlager Vertriebs WVAG
Contact : M. Marcel Füglister
Ringstrasse 20
8600 Dübendorf
Tél : 01/802 86 00
Fax : 01/802 86 01
www.wvag.ch

Cette société représente des constructeur de roulements miniature et d'instrumentation (GRW et GMN) et de joints d'étanchéité sans contact (GMN).

En ce qui concerne les joints sans contact, il est rapidement apparu que la dimension minimale disponible est trop élevée (10 mm de diamètre d'alésage) par rapport aux dimensions réelle de notre micropompe (10 mm hors tout).

En ce qui concerne notre besoin spécifique en roulement, il n'a pas été possible de me donner directement une réponse quant à la possibilité d'obtenir le roulement désiré (contact oblique, travaillant sous eau, en matière biocompatible, de faible dimension et travaillant à faible vitesse alternative sous faible charge). Mais il n'est pas exclu de trouver un tel roulement chez leur fournisseur. Il a été décidé de maintenir le contact.

- Société KIF Parechoc SA
Ch-1347 Le Sentier
Tél : +41 (0)21 845 61 41
Fax : +41 (0)21 845 46 53
www.kif-parechoc.ch

Cette société est active dans la réalisation de, notamment, dispositifs amortisseurs de choc, plus connus chez nous sous le nom de palier à rubis. Ce type de palier est toujours à étudier et il semble que cette société puisse éventuellement nous donner des informations supplémentaires sur les possibilités d'utiliser ces paliers à rubis.

Sous-traitance mécanique

Parmi les nombreux sous-traitants en mécanique de précision présents sur le site, j'ai visité ceux qui me paraissaient les plus aptes à fabriquer nos pièces. Parmi ceux-ci, nous trouvons :

- Société ETAMECA SA

Sous-traitance en mécanique de précision
Contact : M. Jacques Jungen, vice-directeur
Kaltenstrasse 1
CH-2563 Ipsach
Tél. : 032 333 17 27
Fax. : 032 333 17 28

- Société Mimotec SA

Blancherie 61
CH - 1950 Sion
Tél. : +41 (0) 27 329 09 09
Fax. : +41 27 329 09 00
www.mimotec.ch

Réalisation de micromoules et de microcomposants ; technologie unique Mimetal™.

- Société VALDAR SA

Composants pour l'horlogerie et la micromécanique
Contact : M. Fritz Niggeler ; vente – fondé de pouvoir
Rue Centrale, 35
Case postale 72
Ch-1341 L'Orient
Tél. : 021/845 15 45
Fax : 021/845 15 40

- Société Métafil –laGirolle SA

Contact : M. Pierre Rom, directeur adjoint
Route de Fornet 105
Ch-2718 Lajoux JU
Tél : +41 32 484 70 70
Fax : +41 32 484 70 71
www.metafil-lagirolle.ch

Société idéale pour réaliser des pièces de profil, mais à une échelle 10 fois supérieure à la notre !

- Société Meylan Frères SA

Route du Planoz 31
Ch-1348 Le Brassus
Tél : +41 21 845 25 00
Fax : +41 21 845 25 01

Usinage par électro-érosion de micro-pièces.

Décolletage

- Société Monnin Frères SARL
Contact : M. Pierre-André Pfammatter, responsable technique
Ch-2605 Sanceboz
Tél : 032 489 10 77
032 489 27 30
Fax : 032 489 26 09

Décolletage à faon, fournitures d'horlogerie, appareillage et pièces à façon. Capacité de 0,40 à 20 mm dans toutes les matières décolletables. Cette société est prête à nous fabriquer des sièges de soupapes en titane, en petite série.

- Société Décovi SA
Contact : M. Jean-Paul Chèvre, responsable technique
ZI La Romaine 2
Ch-2824 Vicques
Tél : 032 436 10 60
Fax : 032 436 10 69
www.decovi.ch
Décolletage de précision.
- Société Burri SA
Contact : Jean-Paul Müller, directeur commercial
Rue de la paix 90
Ch-2740 Moutier
Tél : 032/494 58 00
Fax : 032/494 58 71
www.burri-sa.ch

Société spécialisée dans le domaine médical et dentaire. Fabricant de vannes miniatures. Recommandée comme étant spécialiste des micropièces à usage médical. Malheureusement, la production doit être de grande série (2500 et plus).

Toute une série de société spécialisée dans le décolletage, parmi celles-ci, nous trouverons, notamment, les sociétés Imhof sa, Rougemont sa, Ischy Stephane sa, Codec swiss, G. & Y. Leuenberger sa, Ch. Bergonzo sa et Microtornitura sa.

Outillage

- DIXI4
Av. du Technicum 37
Ch-2400 Le Locle
Tél : 032 933 54 44
Fax : 032 931 89 16
www.dixi.com

Fournisseur de micro-taraud , une gamme complète d'outils en carbure de tungstène monobloc pour le micro-usinage (micro-forets, diamètre à partir de 0,10 mm).

- Société Daniel Charpilloz SA
CH-2735 Malleray
Tél : +41 32 491 63 63
Fax : +41 32 491 64 64
www.dcswiss.ch

Techniques de taraudage.

Représentant en Belgique :
N.V. VULHOPP Industrie S.A.
Rue Prins Boudewijnlaan 17
2550 Kontich
Tél : 03 457 78 79
Fax : 03 457 79 51
vulhopp@glo.be

- Société Sphinx Werkzeuge AG
Industriestrasse 6
Ch-4562 Biberist
Tél : +41 32 671 21 00
Fax : +41 32 671 21 11
www.sphinx-tools.ch

Fabricant de micro-forêts en HSS-E et métal dur, diamètres à partir de 0,05 mm.

- Société Alphatool Werkzeugsysteme AG
Postfach
Müllerstrasse 3
9604 Volketswil
www.alphatool.ch

Contact : M. Fabrice lange, société GLS (antenne Haute-Savoie).

Outilage pour le filetage, le décolletage et le roulage.

Revêtement de surface / Dépôt en couche / Traitement d'état de surface

- Société SURCOTEC SA
109 chemin du Pont-du-Centenaire
1228 Plan-les-Ouates Genève
Tél : +41 22 794 73 83
Fax : +41 22 794 73 60
www.surcotec.ch

Cette société est activé dans le traitement de surface, le nettoyage de surface ainsi que dans le dépôt de couches mince. Elle est également active dans le domaine médical, pour la décontamination, la pré-stérilisation ainsi que le revêtement biocompatible.

- Société estoppey addor sa
Traitement de surface
Wasen 32 / cp 4227
2500 Bienne 4
Tél : +41 32 344 99 55
Fax : +41 32 344 99 66
www.estoppey-addor.ch

Les activités de cette société concernent essentiellement les traitements de surface : microbillage, ébavurage, sablage, nickel chimique et électrolytique, hardalloy W, chrome dur, noir et mat, dorage, placage, argentage, rhodiage, palladium-nickel, hardinox.

- Société Hort Coating Center SA
Contact : M. Joachim Stein, assurance qualité.
Ch-3900 Sierre (Valais)
Tél : +41 27 455 91 25
Fax : +41 27 456 30 06
www.hortcoating.ch

Cette société est spécialisée dans le revêtement de surface. Parmi les différents revêtements, on trouve des anti-corrosion, des anti-adhérent, des anti-grippage, des anti-chaleur, des anti-statique et des anti-usure. Toute une gamme de revêtement est disponible, allant des polymère (teflon, PTFE, polyester, epoxy, etc) aux céramiques, en passant par les composites, les carbures et les métaux.

- Société François Studer SA
Chemin de la croix
Zone industrielle
Ch-2822 Courroux
Tél : 032/424 43 30
Fax : 032/422 31 72

Traitements thermiques à façon. Four à cloche, four à pot, trempe sous vide, four de passage, trempe par induction, noircissement, brunissage, sablage, bain de sel, redressement.

Rubriques connexes

- Société Laser Automation gekatronic SA
Contact : M. Jean-Christophe Kullmann, director, marketing & sales
Rue L.-J.-Chevrolet 12
Ch-2300 La Chaux-de-Fonds
Tél : +41 (0)32 925 99 00
Fax : +41 (0)32 925 99 09
www.laser-automation.ch

En ce qui concerne l'usinage des pièces grâce au laser, au vu des pièces à réaliser, la personne rencontrée a affirmé qu'il s'agissait d'usinage par fraisage, typiquement. Cependant, cette société est active également dans le domaine du soudage au laser et a déjà soudé le titane et l'inox. Il s'agit donc d'une société de choix au cas où nous opterions pour un assemblage par soudure des flasques. Notons que cette société possède

également des ateliers mécaniques et qu'il est donc envisageable de sous-traiter plusieurs choses chez eux.

- Société Maret sa
Rue des Croix, 43
Ch-2014 Bôle/Neuchatel
Tél : +41 (0) 32 843 83 83
Fax : +41 (0) 32 842 25 02

Cette société est spécialisée dans la fabrication et l'usinage de composants en matériaux tels que les céramiques ou le rubis / saphir. L'activité s'étend du choix des poudres composants les céramiques jusqu'au produit final utilisable par le client. Elle est active notamment dans le domaine médical, où la céramique prend de plus en plus d'importance. Cependant, les céramiques fournies par cette société ne sont pas encore destinées à être implantées et ne le seront probablement pas d'ici peu.

8.4. Rapport de visite à Besançon et à Paris



Compte rendu du voyage à Besançon et à Paris.

Mardi 13 Novembre.

- 14h30 : visite du pôle micromachines au laboratoire de mécanique appliquées (LMA)

LMARC : Laboratoire de mécanique appliquée (ENSMM)
24, Chemin de l'Epitaphe.

Contact : *Patrice Minotti, responsable du pôle micromachines*

Tel personnel : +33 (0)3 81 66 60 15

Tel général : +33 (0)3 81 66 67 00

Mail : patrice.minotti@univ-fcomte.fr

Web : <http://lma.univ-fcomte.fr/>

http://lma.univ-fcomte.fr/micro_us/welcome.htm

Le Laboratoire de Mécanique Appliquée R. Chaléat -LMARC- est une unité mixte de recherche Université de France-Comté/CNRS (UMR 6604). Les recherches développées concernent les domaines suivants :

- propriétés mécaniques des matériaux,
- dynamique des structures,
- modélisation et la mise en forme des matériaux,
- Robotique
- Micromachines et microsystèmes.

La visite s'est uniquement portée sur le pôle « micromachines » dirigé par Patrice Minolti. Cette personne est le directeur de recherche de ce centre.

La visite s'est déroulée dans un seul bureau dans lequel il a pu nous montrer une série de vidéos illustrant les différentes réalisations du laboratoire. (j'essaierai d'avoir les fichiers de ces vidéos ?)

- il y a bientôt 10 ans, ils ont réalisé un actionneur sphérique à actionnement piézoélectrique (rollmobs ?) fonctionnant par friction. J'ai pu voir une vidéo de cet actionneur mais Monsieur Minolti est passé rapidement sur le sujet car cette recherche n'est plus d'actualité dans ce labo.
- L'activité principale du laboratoire est de montrer les possibilités et les performances des micro-actionneurs électrostatique. La technologie utilisée pour miniaturiser ces actionneurs est celle du dépôt par couches. L'avantage de cette technologie est de pouvoir réaliser les éléments « moteurs » et les contacts électriques en une seule opération.

Aucun débouchés industriels n'est d'application pour l'instant mais il existe plusieurs pistes : têtes de lecture des disques durs, cellule de micro convoyage, microactionneurs, ...

La philosophie du centre est la suivante : puisqu'on ne nous demande rien pour l'instant, montrons ce dont nous sommes capables afin de pouvoir convaincre des possibilités de cette technique.

- Trois types de micro-actionneurs :
 - Micro moteur rotatif : diamètre 500 µm
 - Micro actionneur tubulaire
 - Micro convoyage 20x20 mm²
- Aller sur le site <http://www.micromachines.univ-fcomte.fr/> pour trouver des vidéos de ces différentes réalisations.

Dernière remarque : les moyens mis en œuvre en terme de financement sont considérablement élevés....

- +/- 17h00 : visite du laboratoire de microanalyse des surfaces (LMS)

LMS : laboratoire de microanalyse des surfaces

26, chemin de l'épitaphe

25030 besançon cedex

Tél : 33 (0) 3 81 40 28 51

Fax : 33 (0) 3 81 40 28 52

Contact : *Jamal takadoum, Docteur d'Etat, professeur à l'ENSAM*

Mail : jamal.takadoum@ens2m.fr

Web : <http://www.ens2m.fr/lms/>

Monsieur Takadoum a brièvement présenté le laboratoire :

Le « lms » a été créé en 1980 lors de la fusion de l'institut de chimie de Besançon (ICB) avec l'école nationale supérieure de mécanique et des microtechniques (ENSMM). Ce laboratoire compte actuellement 25 personnes travaillant sur un thème fédérateur : Microcaractérisation et élaboration des états de surface des matériaux avec approches prédictives des transferts d'énergie et de matière aux interfaces rugueuses.

Cette thématique, qui s'est affinée au fil des années, a permis de porter une attention particulière aux domaines suivants : traitements de surface, tribologie, métrologie des surfaces, étude des forces de contact, modélisation,...

Lors de la visite « éclair » de ce laboratoire, nous avons pu voir un microscope à force atomique, plusieurs rugosimètres, une machine de déposition vapeur,...

Pour plus d'infos sur ce labo, voir : <http://www.ens2m.fr/lms/>

Mercredi 14 Novembre.

• 09h30 : visite du centre de transferts des microtechniques

Centre de transfert des microtechniques (CTM)

39, Av de l'Observatoire – BP 1445

25007 Besançon cedex 3 – France

Tel : +33 (0)3 81 47 70 20

Fax : +33 (0)3 81 47 70 21

Contact : Pascal Blind, ingénieur de recherche

Web : <http://www.ctm-france.com/>

Le CTM est un Groupement d'Intérêt Public fondé en 1999 pour :

Concevoir et réaliser des prototypes de Microsystèmes, Favoriser les transferts de technologies, Orienter les industriels dans le domaine des Microtechniques, Représenter en région le Réseau Micro/Nanotechnologies (RMNT).

Le CTM développe spécifiquement la MICRO-MECANIQUE HYBRIDE :

Miniaturisation des actionneurs, Packaging des Microsystèmes, Instrumentation pour Microsystèmes

Bien que disposant de peu de personnel, ce centre de recherche dispose de moyen considérables dans les domaines suivants :

- Micro usinage des métaux
- Micro mécanismes
- Micro usinage chimique : Silicium, quartz, métaux
- Photolithographie
- Electroformage LIGA UV
- Dépôt de couches minces
- ...

Lors de notre tour du laboratoire (voir plaquette photo), nous avons pu observer :

- micro bobines
- capteurs quartz
- micro moteur piézo à ondes progressives
- navette intestinale
- micro couplemètre
- salle blanche

En s'entretenant de la micropompe avec le concepteur de la navette intestinale,, nous avons appris l'existence d'une micropompe doseuse piézoélectrique fabriquée en Allemagne :

Technische Universität Ilmenau

Fakultät Maschinenbau

FG Mikrosystemtechnik

PF 327

98684 Ilmenau

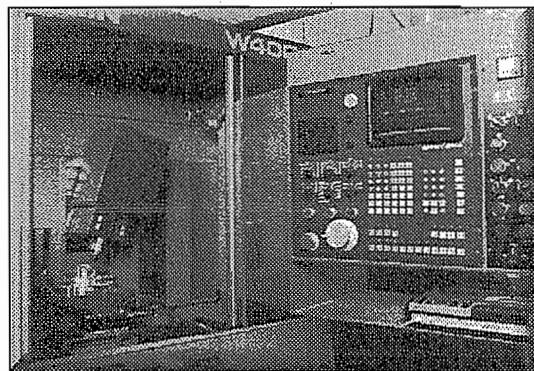
Dr Ing N. Schwesinger

Tel : +49/3677/69 2978

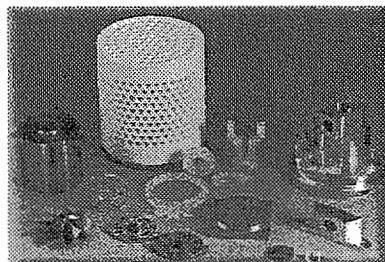
De la documentation sur ces pompes se trouve en annexe.

Remarque : Le CTM de Besançon tenait à souligner qu'il existe des possibilités de financement au niveau européen. Eventuellement les recontacter à ce sujet...

- Le CTM dispose d'un centre de micro usinage à commande numérique. Quelques exemples de pièces réalisées avec cette machine se trouvent ci dessous.



Centre de micro usinage.

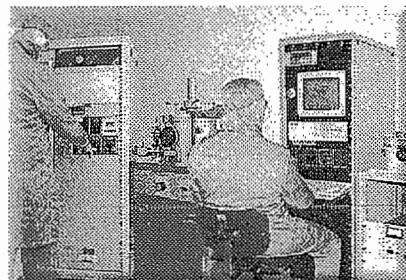


Pièces micro usinées

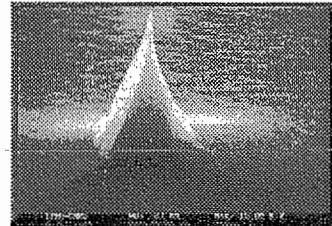


Pièces pour une navette intestinale

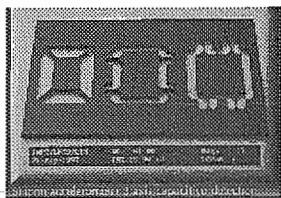
- Une technologie fort employée est celle de l'usinage par couche du Silicium ainsi que du dépôt par couche. Quelques exemples de pièces réalisées se trouvent ci-dessous.



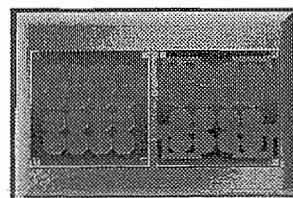
Salle blanche pour dépôt par couche.



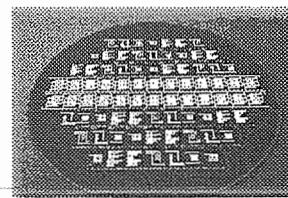
Micro pointe de Silicium



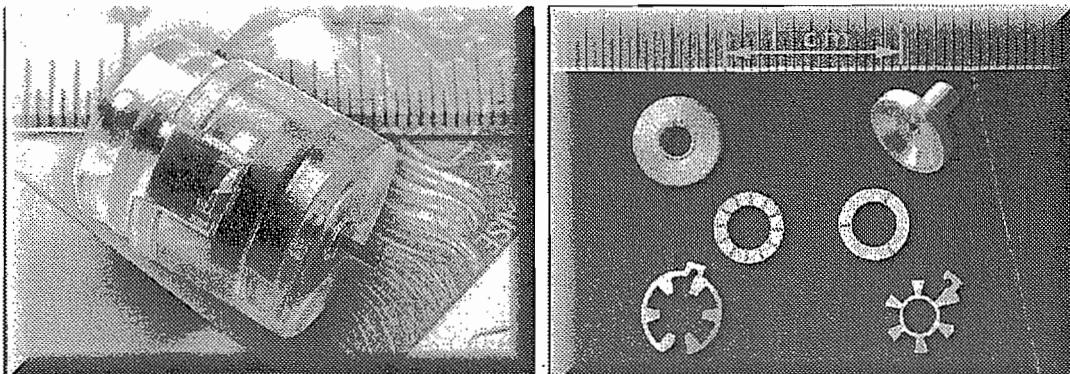
Accéléromètres 3 axes en Silicone



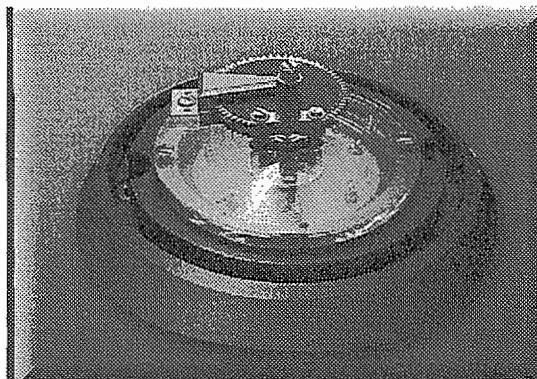
membrane en silicone
(actuation électrostatique)



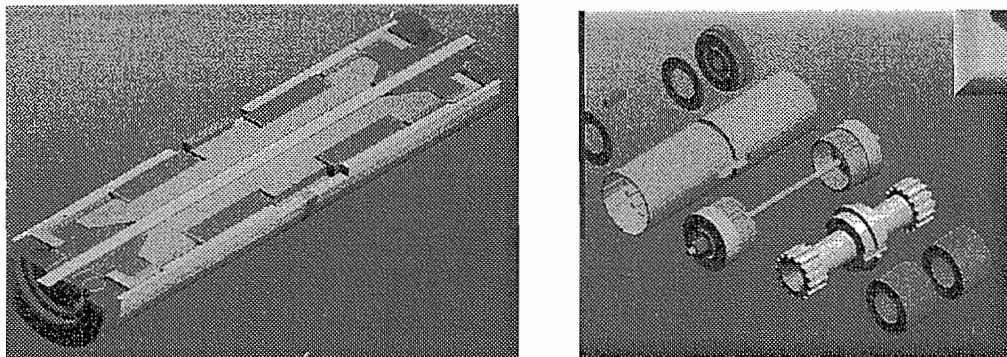
- Le CTM a réalisé plusieurs types de micro moteur piézoélectriques mais également électromagnétiques.



Moteur piézoélectrique : diamètre 5mm

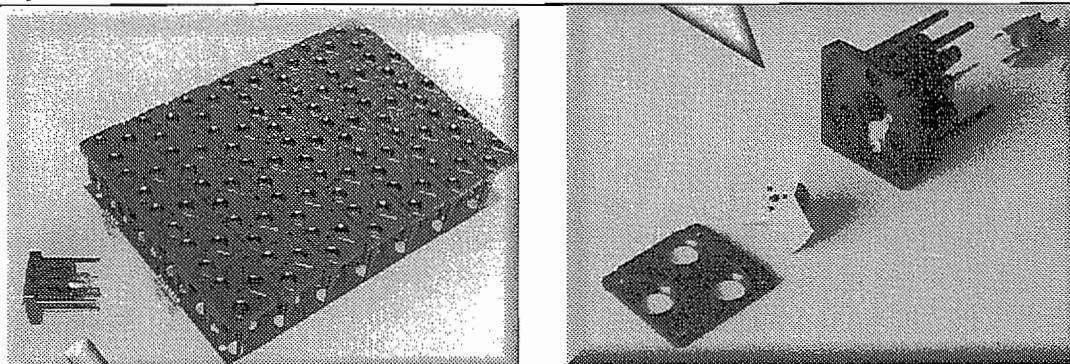


Mécanisme entraîné par moteur piézoélectrique (diamètre 5mm)



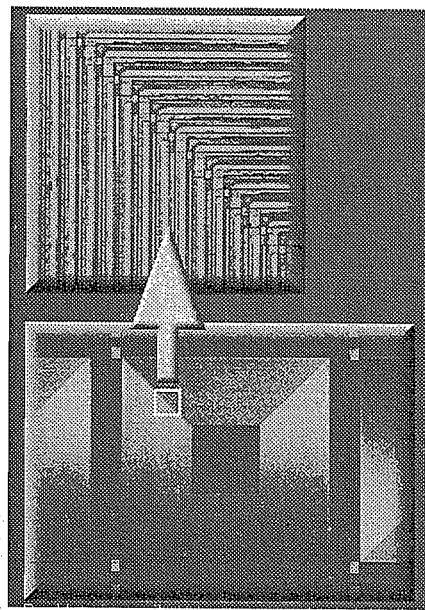
Micro moteur électromagnétique (60 pas par tour)

- Autre type de réalisation : occulteur mécanique utilisé comme panneaux de signalisation sur les autoroutes françaises.



Un panneau est utilisé pour représenter un caractère.
Avantage de ce dispositif : très peu d'entretien car très simple.

- Réalisation de micro bobines grâce à la technologie optique, et de l'usinage chimique.



Micro bobine

- 14h00 : rencontre de Mr Boy au LCEP

LCEP : Laboratoire de chronométrie électronique et piézo-électricité

26, chemin de l'épitaphe

25030 besançon cedex

tél. : (33) (0)3 81 40 28 20

fax : (33) (0)3 81 88 57 14

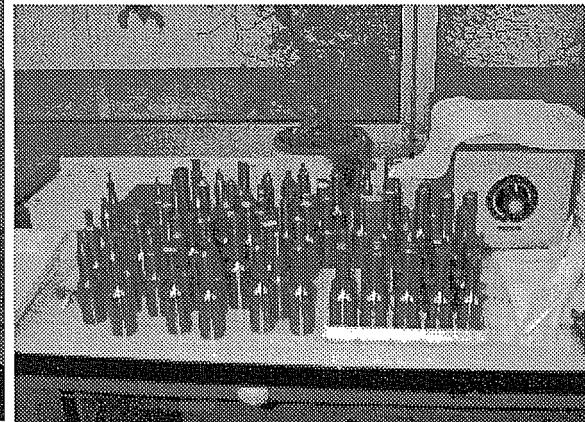
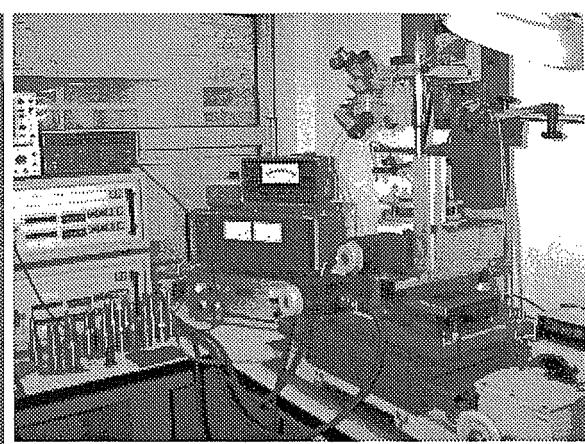
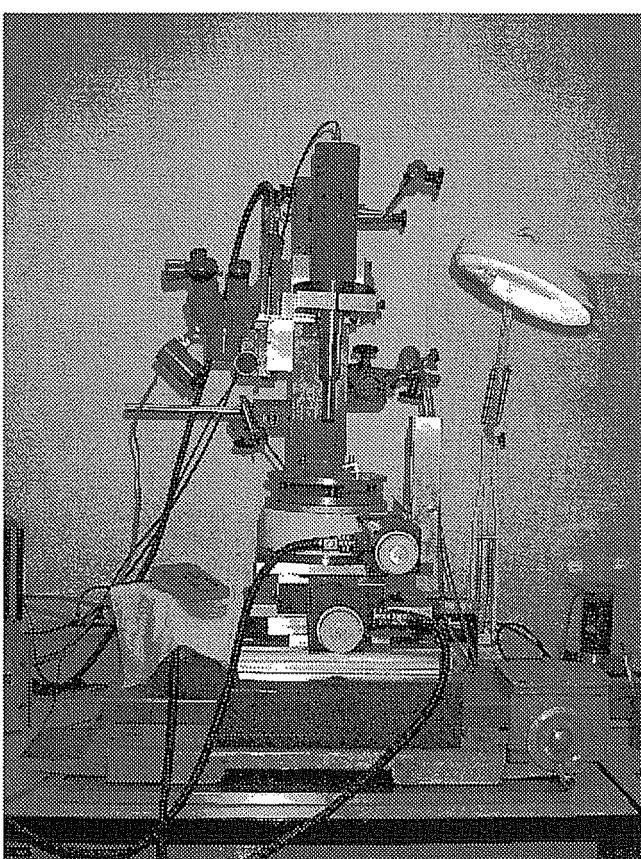
Contact : *Jean-jacques Boy, Ingénieur de recherches*

Mail : jjboy@ens2m.fr

Tel : 03 81 40 28 23

Web : <http://www.ens2m.fr/lcep>

Les activités du laboratoire du LCEP les amènent à réaliser des résonateurs à quartz. Pour l'usinage de ces résonateurs, ils utilisent l'usinage ultrasonore. Une photo de cette machine se trouve ci dessous.



Récemment, le LCEP a travaillé pour un horloger qui veut fabriquer des montres en saphir : presque toutes les pièces sont réalisées en saphir. Le technicien du LCEP a donc formé une personne sur cette machine et réalisé un jeu de pièce en saphir. La machine est maintenant repartie chez le fabricant de montres qui continue la production de cette montre (pour information, le prix annoncé de vente de cette montre est de 1.000.000 de Franc Français !).

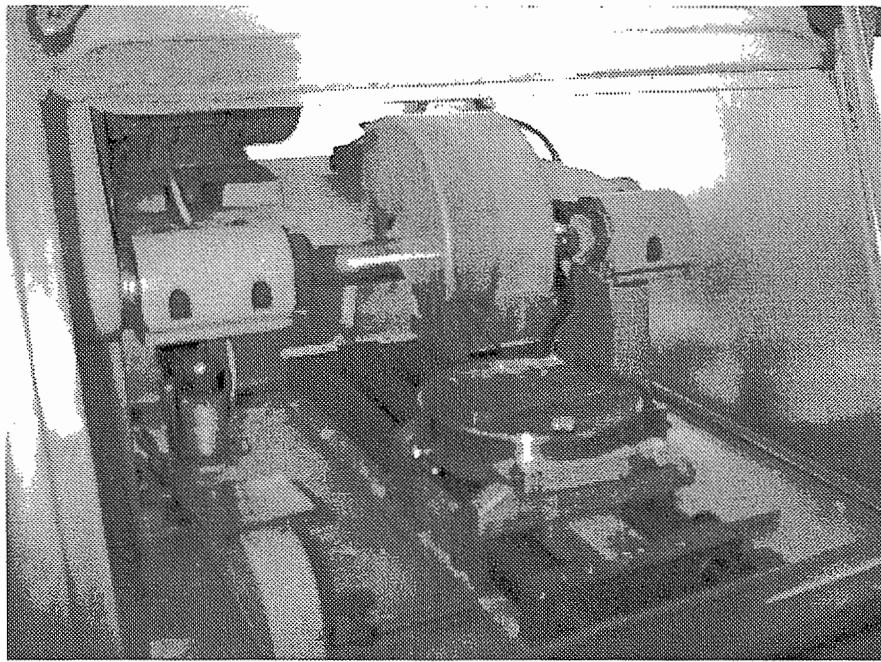
Aucune mesure de la charge statique n'est prévue, l'avance est réglée à l'aide d'une butée mobile.

Le déplacement motorisé de la table est possible dans les deux directions horizontales. La rotation motorisée de la table (à faible vitesse) est possible pour des perçages cylindriques à tolérance importantes. Le positionnement de l'outil est pratiqué à l'aide d'une lunette de visée. Afin de savoir si la pièce est tangente ou non, la fréquence de vibration est analysée et lorsque celle-ci baisse, cela signifie que l'outil touche la pièce.

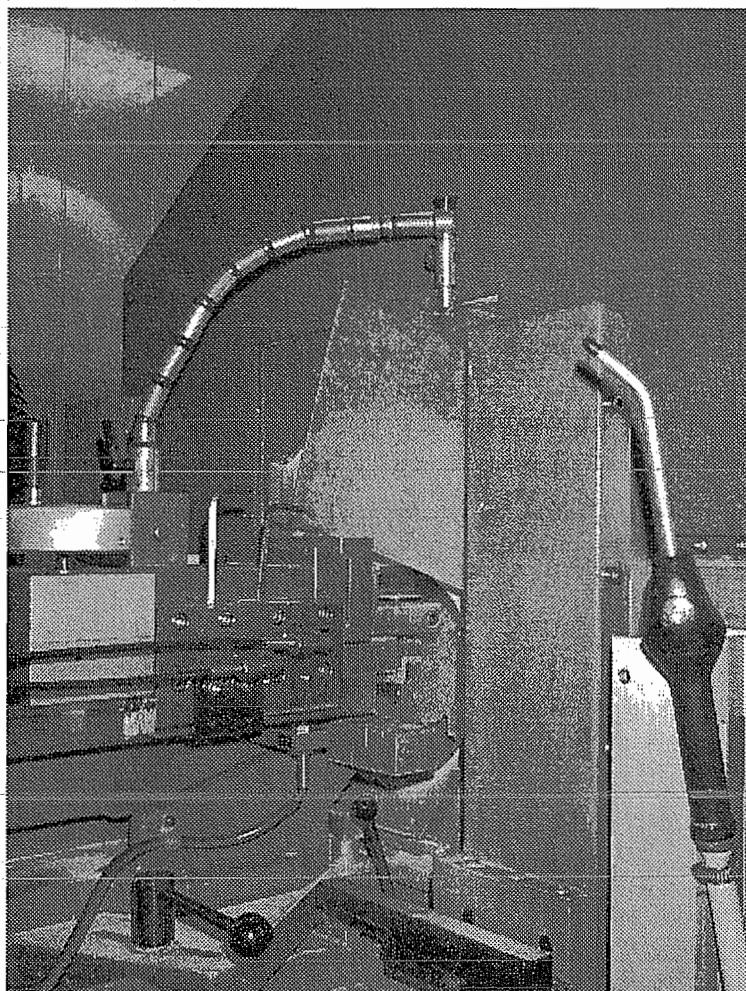
Les sonotrodes secondaires ou concentrateurs sont réalisés à l'atelier dans de l'acier doux.

Les outils sont brasés à l'extrémité de la sonotrode.

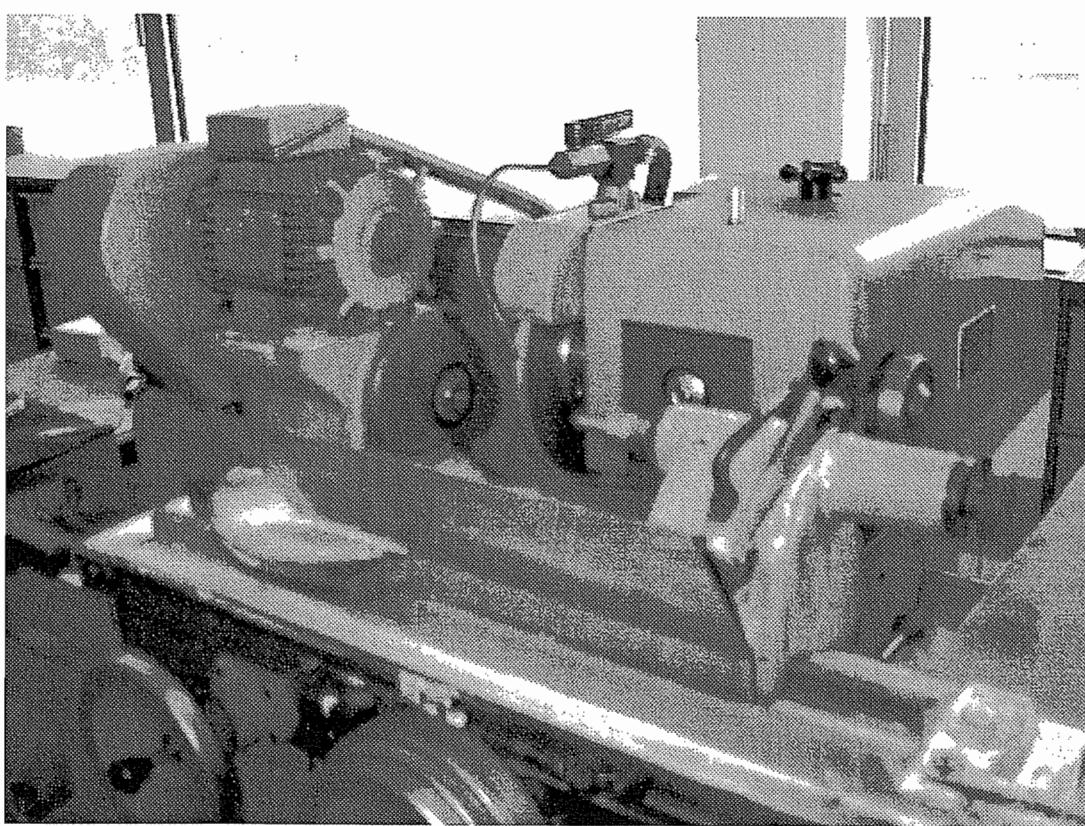
Les autres équipement du laboratoire sont illustrés ci dessous : il s'agit de scies annulaires, de rectifieuses planes et cylindriques,... nécessaire à la découpe des cristaux.



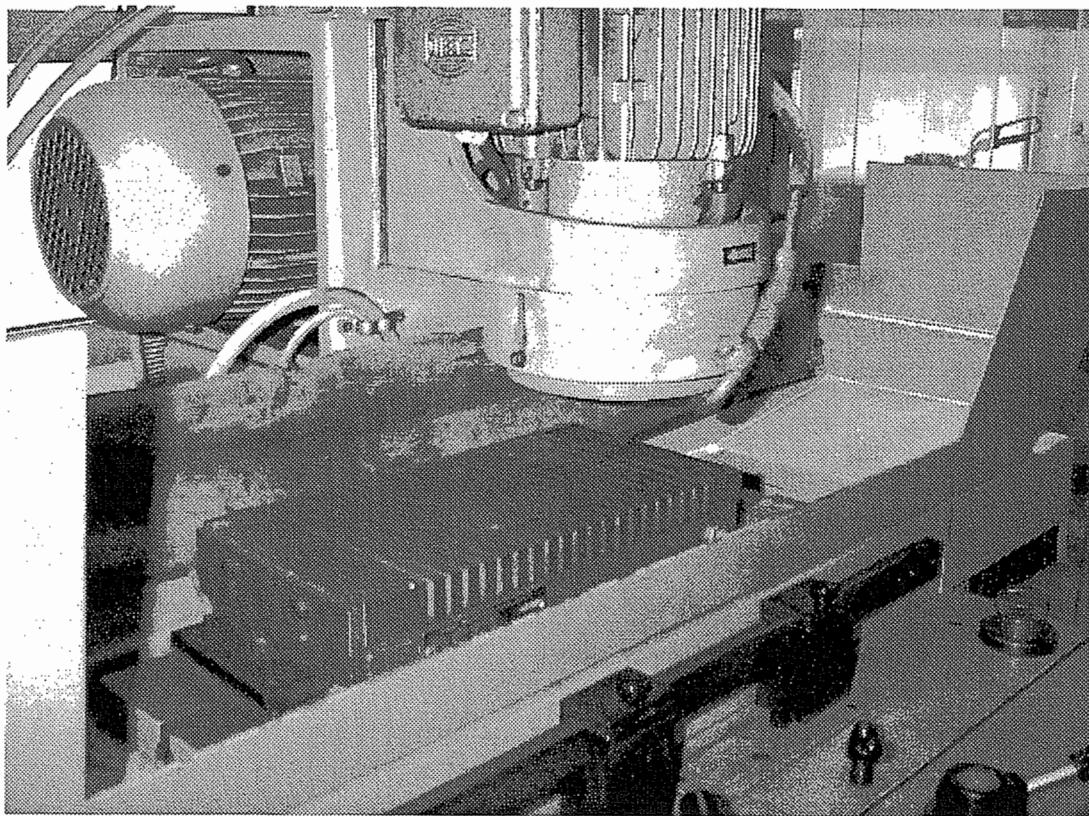
Scie annulaire extérieure



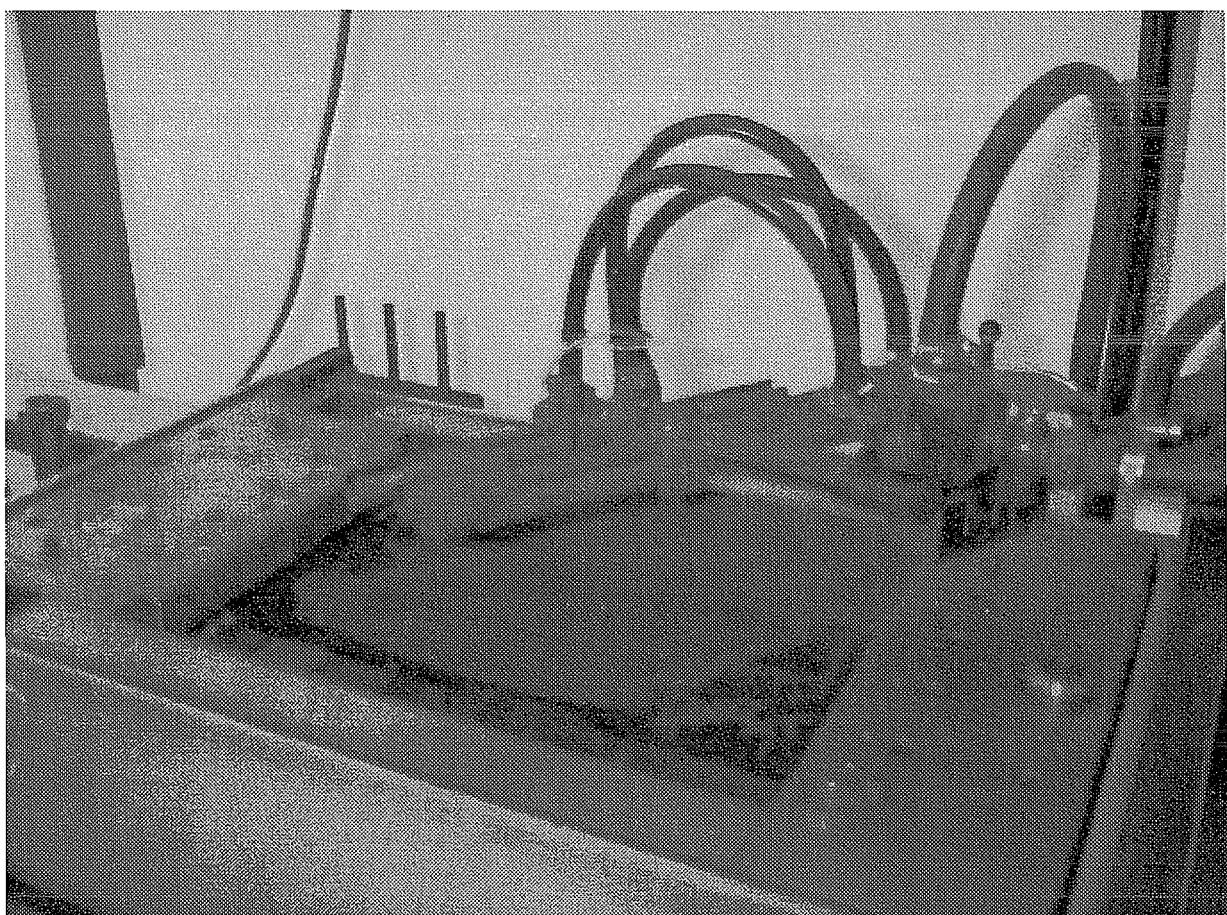
scie annulaire intérieure



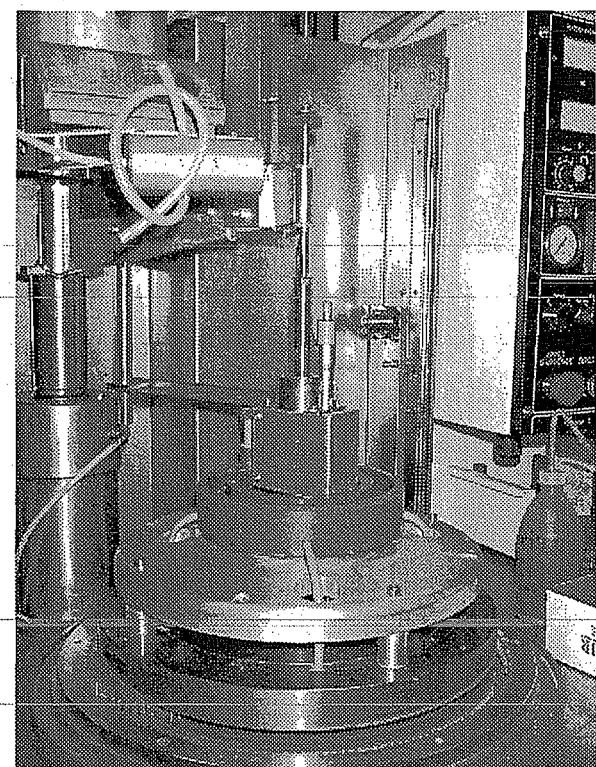
Rectification cylindrique



Rectification plane



Sciage à lame



Polissage abrasif

Jeudi 15 Novembre.

• Matinée : Rencontre d'un constructeur de machine ultrasonore : « Extrude Hone »

17. rue du Bel Air
ZAI Eglantier CE no 1524
Lisses 91015 Evry Cedex

France

Tel: (33) 1 60 86 08 65
Fax: (33) 1 60 86 35 18
E-mail: extrude@extrude-france.fr

Contacts: Arnaud Scellier, Technical Manager- Daniel Kremer, Consultant - Nicole Kremer, Administrator
Web : <http://www.extrudehone.com/sonex.html>

Voici l'historique de la société « Extrude Hone » et « Sonex » comme Monsieur Scellier nous l'a raconté :

Extrude Hone est une entreprise située aux états unis en Pennsylvanie. Elle a été créée il y a 40 ans et emploie aujourd'hui 400 personnes dans le monde. Cette entreprise a débuté dans le traitement des pièces par pâte abrasive, ce qui constitue aujourd'hui encore la majeure partie de son chiffre d'affaire.

Des recherches pratiquées à l'ENSA a débouché la commercialisation (à petite échelle) d'une machine d'usinage ultrasonore : la Sonex 300. Cette machine est celle que l'on a vue à l'ENSA.

Durant plusieurs années, cette machine a permis d'usiner principalement des électrodes en graphite pour l'électroérosion. Cependant, le marché en France est très petit et aujourd'hui, on préfère en général réaliser les électrodes en cuivre, ce qui est moins coûteux.

Cette machine a été vendue à 4 exemplaires en Europe.

Une tête rotative à broche aérostatique a également été développée dans le but de remplacer l'usinage classique sur une fraiseuse et avec huile de coupe par de l'usinage rotatif ultrasonore sans usinage de lubrifiant. Une application qui a abouti est par exemple l'usinage à sec des blocs moteurs en Aluminium.

Autre application : perçage de petits trous dans les aubes de turbines. Un brevet a été déposé pour la réalisation d'une sonotrode « multi-pines » qui permet d'usiner 600 trous sur une surface incluse dans un cercle de diamètre de 90 mm.

Pour conclure, Mr Scellier rappelle que l'activité *usinage* ultrasonore représente 0.1 % des activités et ce pour des petits perçages.

Au niveau de la R&D, Mr Scellier envisage l'usinage des matériaux composites mais également l'assistance ultrasonore à la rectification. Sur ce sujet, Mr Scellier n'a cependant pas semblé vouloir dévoiler ses véritables activités...

Les 99.9 % restant des activités de la société sont le polissage par pâte abrasive : un exemple est celui des moteurs Hdi qui sont polis par ce procédé.

Conclusions :

➤ Au niveau de mes activités de recherche

Comme il existe très peu de fabricants de machines d'usinage par abrasion ultrasonore, il m'a semblé intéressant de rencontrer les quelques personnes qui travaillent dans ce domaine : A savoir : Mr Boy, ingénieur de recherche à Besançon et Mr Scellier, ingénieur chez Extrude Hone France et administrateur de la division Sonex.

La machine présente à Besançon est assez simple mais est équipée de manière à pouvoir réaliser des usinages de précision. (table à microdéplacement, support rotatif, lunette de visée, butée motorisée, transducteur efficace,...) Elle se différencie du dispositif actuel par les points suivants :

- usinage à avance constante contrôlée par une butée motorisée.
- Microdéplacements x-y à l'aide d'une table motorisée
- Rotation motorisée de la table (à faible vitesse)
- pas de recyclage de l'abrasif
- Différents types de sonotrodes disponibles avec outils brasés à l'extrémité
- Dispositif de positionnement de la pièce par rapport à l'outil.

La machine d'essai présente à Evry chez Extrude Hone est fort similaire au dispositif présent à Louvain. Tout les déplacements sont manuels et dans ce cas, c'est l'expérience du technicien qui fait la différence. La charge statique est réglée à l'aide d'un contre-poids.

Pour des essais plus reproductibles, la machine à commandes numériques est à leur disposition.

Maintenant que le dispositif présent à LLn est terminé, il reste à faire une série d'essais les plus reproductibles possibles. Suite à la difficulté de régler des efforts faibles, il sera probablement nécessaire de se limiter à des usinage de plus grand diamètres.

Une application du prototype à envisager est celle de la destruction des forêts cassés.

P.S : Ne serait-il pas intéressant dans un moyen terme d'envisager de réparer le transducteur ?

➤ Au niveau des connaissances générales dans les microtechniques.

Pas de mal de connaissances générales au niveau des techniques de microfabrication. Cela resta tout de même fort difficile de tout digérer en une seule fois...

Des contacts intéressants pour le projet 4M.



